

**Intelligent Construction of Power Systems and the
Application of Artificial Intelligence Technology**

电力系统智能化建设与人工智能技术的应用

谢士雷 著



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

CIP INFORMATION

Title: Intelligent Construction of Power Systems and the Application of Artificial Intelligence Technology

题目：电力系统智能化建设与人工智能技术的应用

Author: Shilei Xie

作者：谢士雷

ISBN: 979-8-90040-369-4

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

**Intelligent Construction of Power Systems and the Application of Artificial
Intelligence Technology**
电力系统智能化建设与人工智能技术的应用

Address: 100 N Howard St Ste R, Spokane, Wa, 99201. United States

Tel: +888-754-5177

Email: contact@cypedia.net

Format: 170mmx240mm 1/16 Sheets: 19.75

Word Counts: 210.000

Edition: First edition in August 2026

Printing: First printing in August 2026

**CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL
SCHOLARS**

非开放获取·电子版请联络出版社购买·版权归出版社所有·侵权必究

Not Open Access. For the electronic version, please contact the publisher for purchase. The copyright belongs to the publisher.
Infringement will be prosecuted.

前言 PREFACE

我国的经济的快速发展，市场化建设不断成熟，城市化建设不断完善，这些进展都离不开电力网络的支持。我国的电力系统，也随着社会经济的进展同步发展和提高。在科学技术不断进步，互联网技术广泛使用的今天，智能电网这一概念也被提出，并成为了电网系统建设的一个方向。电力系统本身是一个复杂庞大的系统，他本身涉及多个组成部分，同时分布地域辽阔。而电力系统自动化是我们电力系统一直以来追求的发展方向。在智能电网建设的过程中，电力系统自动化主要设涉及电网的配电环节。通过将自动化技术与现在科技中的智能化技术做出有效的结合，通过电力系统自身，对电力系统运行状况做出实时监测，并报告相关数据和问题，根据系统自身的智能判断，最终做出有效的配电决策。

现代社会对电能供应的“安全，可靠，经济、优质”等各项指标的要求越来越高，相应地，电力系统也不断地向智能化提出更高的要求。本书是电力系统方向的著作，主要研究电力系统的智能化建设与人工智能技术的应用，本书从同步发电机的自动并列入手，接着对同步发电机的励磁自动控制系统和电力系统频率及有功功率的自动调节进行了分析研究；另外对设备监测诊断数据平台、设备监测诊断智能应用做了一定的介绍；还对神经网络在谐波检测和负载分配中的应用及智能电力网络系统进行了探讨；最后阐述了电力系统通信技术以及网络技术的原理和应用。对电力系统的智能化建设及人工智能技术的应用有一定的借鉴意义。

在本书的策划和编写过程中，曾参阅了国内外有关的大量文献和资料，从其中得到启示；同时也得到了有关领导、同事、朋友及学生的大力支持与帮助。在此致以衷心的感谢。由于电力系统的技术发展非常快，本书的选材和编写还有一些不尽如人意的地方，加上编者学识水平和时间所限，书中难免存在缺点，敬请同行专家及读者指正，以便进一步完善提高。

目录 CONTENTS

第一章 同步发电机的自动并列	1
第一节 准同期并列条件分析及整定	1
第二节 准同期并列的基本原理	5
第三节 自动并列装置的工作原理	10
第四节 数字式并列装置	16
第二章 同步发电机的励磁自动控制系统	21
第一节 励磁控制系统的任务和要求	21
第二节 励磁系统的分类与原理	27
第三节 励磁系统中转子磁场的建立和灭磁	32
第四节 励磁控制系统调节特性和并联机组间的无功分配	36
第五节 励磁系统稳定器	45
第六节 励磁自动控制系统对电力系统稳定的影响	49
第三章 电力系统频率及有功功率的自动调节	51
第一节 电力系统的频率特性	51
第二节 调频与调频方程式	52
第三节 电力系统的经济负荷分配	56
第四节 电力系统低频减负荷	60
第五节 电力系统频率控制技术体系	64
第六节 频率控制系统虚拟实验与仿真	75
第七节 光伏发电功率控制及参与电网的频率调节	77
第八节 电网辅助服务的储能系统运行控制技术	88

第九节 电化学储能电站参与电力系统二次调频功率分配的策略·····	96
第四章 电力系统数据平台·····	101
第一节 IEC61850/61968/61970 一体化建模·····	101
第二节 基于模型源端维护的信息交互·····	105
第三节 基于 SOA 的统一 CIS 服务·····	108
第四节 基于智慧城市的电力数据平台建设·····	110
第五节 基于电力数据中心数据流转的可视化途径·····	113
第六节 电网调度中心图形信息跨平台共享·····	114
第五章 设备在线监测及智能诊断·····	125
第一节 状态参量数据优化·····	125
第二节 设备监测动态预警·····	127
第三节 基于信息融合的设备故障智能诊断·····	130
第四节 基于全景信息的多维度状态评价·····	135
第五节 基于故障模式诊断的风险评估·····	139
第六节 基于风险控制检修策略·····	143
第七节 人工智能技术在电力设备状态分析中的应用·····	144
第八节 配电智能运维系统设计及其应用实例·····	153
第六章 神经网络在谐波检测和负载分配中的应用·····	161
第一节 神经网络基础·····	161
第二节 前向神经网络在有源电力滤波器中的应用·····	174
第三节 Hopfield 神经网络在谐波检测系统的应用·····	190
第四节 Hopfield 网络在经济负荷分配中的应用·····	195
第五节 基于 RBF 神经网络的电网安全态势预测建模·····	197
第六节 进化神经网络的电力信息网安全态势量化方法·····	200
第七章 智能电力网络系统·····	203
第一节 智能电网概述·····	203

第二节 统一坚强智能电网	207
第三节 智能电网工程探索	220
第四节 智能配电网	224
第五节 分布式发电与智能电网	227
第八章 电力系统通信技术	231
第一节 电力线载波通信技术	231
第二节 电力微波通信技术和卫星通信技术	240
第三节 NB-IoT 通信技术与应用	252
第四节 LoRa 物联网通信技术	258
第九章 电力通信网络技术	267
第一节 电力通信网络技术概述	267
第二节 电力通信同步网	270
第三节 电力通信接入网	276
第四节 电力通信骨干网	291
参考文献	307

第一章 同步发电机的自动并列

第一节 准同期并列条件分析及整定

一、准同期并列的条件

电力系统运行中，任一母线电压瞬时值可表示为

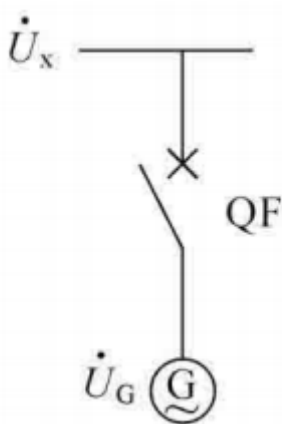
$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

式中： U_m 为电压幅值， ω 为电压角频率， φ 为电压初相角。

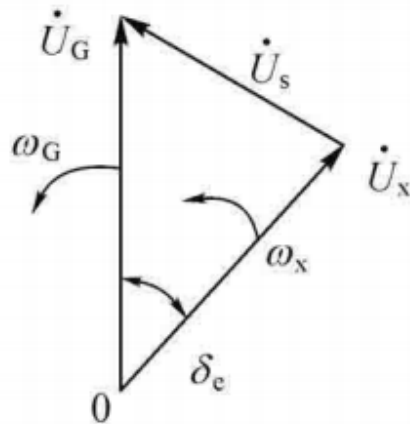
式子反映了电网运行中该母线电压的幅值、频率和相角。这三个重要参数常被指定为运行母线电压的状态量。电网电压也常用相量 $\dot{U}$ 来表示。

设待并发电机组 G 已经加上了励磁电流，其端电压为 $\dot{U}_G$ ，QF 为并列断路器，QF 的另一侧为电网电压 $\dot{U}_x$ 。并列断路器合闸前，QF 两侧电压状态量 u_G 与 u_x 一般不相等，需要对待并发电机组进行适当的调整，使它符合并列条件，然后才能发出 QF 的合闸信号。

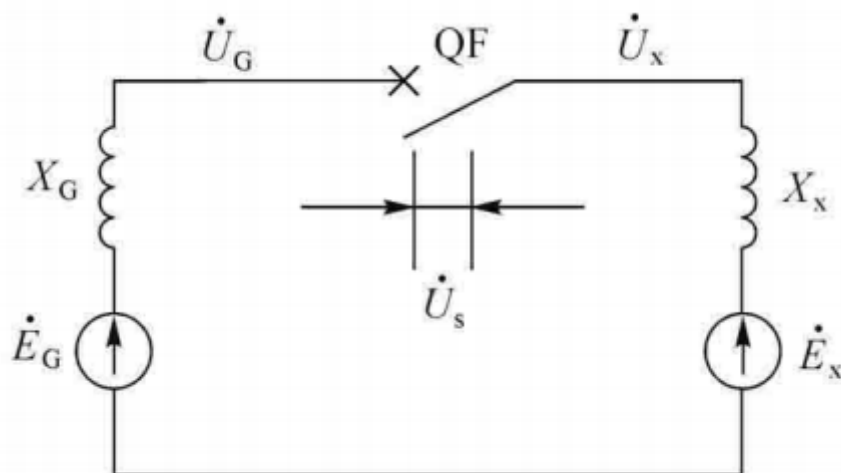
由于 QF 两侧电压的状态量不等，QF 主触头间具有电压差 $\dot{U}_s$ ，其值可由图 1-1 (b) 所示的电压相量求得。



(a) 电路示意图



(b) 相量图



(c) 等值电路图

图 1-1 准同期并列

设发电机电压的角频率为 ω_G ，电网电压 $\dot{U}_x$ 的角频率为 ω_x ，它们间的相量差 $(\dot{U}_G - \dot{U}_x)$ 为 $\dot{U}_s$ 。计算并列时冲击电流的等值电路如图 1-1 (c) 所示。当电网参数一定时，冲击电流决定于合闸瞬间的 $\dot{U}_s$ 值。要求 QF 合闸瞬间 $\dot{U}_s$ 的值尽可能小，应使其冲击电流最大值不超过允许值。最理想情况 $\dot{U}_s$ 的值为零，这时 QF 合闸的冲击电流也就等于零；并且希望并列后能顺利地进入同步运行状态，对电网无任何扰动。

综上所述，发电机并列的理想条件为并列断路器两侧电源电压的三个状态量全部相等，即图 1-1 (b) 中两个相量 $\dot{U}_G, \dot{U}_x$ 完全重合并且保持同步旋转。所以并列的理想条件可表达为：

$$\omega_G = \omega_x \text{ 或 } f_G = f_x \text{ (即频率相等)}$$

$$U_G = U_x \text{ (即电压幅值相等)}$$

$$\delta_e = 0 \text{ (即相角差为零)}$$

这时，并列合闸的冲击电流等于零，并且并列后发电机 G 与电网立即进入同步运行，不发生任何扰动现象。可以设想，如果待并发电机的调速器和调压器按式子进行调节，实现理想的并列操作，则可极大地简化并列过程。

但是，实际运行中待并发电机组的调节系统很难实现式子的理想条件调节，因此三个条件很难同时满足。其实在实际操作中也没有这样苛求的必要。因为并

列合闸时只要求冲击电流较小、不危及电气设备，合闸后发电机组能迅速拉入同步运行，对待并发电机和电网运行的影响较小，不致引起任何不良后果。

因此，在实际并列操作中，并列的实际条件允许偏离式子，其偏离的允许范围则需经过分析确定。

二、准同期各个条件对准同期并列的影响

（一）电压幅值差

设发电机并列时的电压相量即并列时发电机频率 f_G 等于电网频率 f_x ，相角差 δ_e 等于零，电压幅值不等 ($U_G \neq U_x$)。则冲击电流的有效值 I_h'' 为：

$$I_h'' = \frac{U_G - U_x}{X_d'' + X_x}$$

式中： U_G, U_x 分别为发电机电压、电网电压有效值， X_d'' 为发电机直轴次暂态电抗， X_x 为电力系统等值电抗。

当 δ_e 很小时，可认为 $\dot{I}_h$ 与 $\dot{U}_G$ 夹角为 90° ，所以由电压幅值差产生的冲击电流主要为无功电流分量。冲击电流最大瞬时值 $i_{h \cdot \max}''$ 的计算式为：

$$i_{h \cdot \max}'' = 1.8\sqrt{2}I_h'' \approx 2.55I_h''$$

冲击电流的电动力对发电机绕组产生影响，由于定子绕组端部的机械强度最弱，所以须特别注意对它所造成的危害。由于并列操作为正常运行操作，冲击电流最大瞬时值限制在 1 ~ 2 倍额定电流以下为宜。为了保证机组的安全，我国曾规定压差并列冲击电流不允许超过机端短路电流的 1/20 ~ 1/10。据此，得到准同期并列的一个条件为：电压差 U ，不能超过额定电压的 5% ~ 10%。现在一些巨型发电机组更规定在 0.1% 以下，即要求尽量避免无功冲击电流。

（二）合闸相角差

设并列合闸时，断路器两侧电压相量，即

$U_G = U_x$ ，电压幅值相等。

$f_G = f_x$ ，频率相等。

$\delta_e \neq 0$ ，合闸瞬间存在相角差。

这时发电机为空载情况，电动势即为端电压并与电网电压相等，冲击电流的有效值为：

$$I_h'' = \frac{U_x}{X_q'' + X_x} \left(2 \sin \frac{\delta_c}{2} \right)$$

式中：\$U_x\$ 为电网电压有效值，\$X_{q''}\$ 为发电机交轴次暂态电抗，\$X_x\$ 为电力系统等值电抗。

当 \$\delta_c\$ 很小时，可认为 \$2 \sin \frac{\delta_c}{2} \approx \sin \delta_c\$，可认为 \$I_h\$ 与 \$\dot{U}_G\$ 夹角为 \$0^\circ\$，所以由合闸相角差产生的冲击电流主要为有功冲击电流。冲击电流最大瞬时值的计算式为

$$i_{h,\max}'' = 1.8\sqrt{2}I_{b_h}'' \approx 2.55 \frac{U_x}{X_q'' + X_x} \sin \delta_c$$

当相角差较小时，这种冲击电流主要为有功电流分量，说明合闸后发电机与电网间立刻交换有功功率，使机组联轴受到突然冲击，这对机组和电网运行都是不利的。为了保证机组安全运行，一般将有功冲击电流限制在较小数值以内。

对于小机组而言，允许合闸相角差 \$\delta_c\$ 为 \$10^\circ\$；

对于大机组而言，允许合闸相角差 \$\delta_c\$ 为 \$2 \sim 4^\circ\$；

对于现代巨型机组而言，其安全裕度较小，旗只允许为 \$2^\circ\$。

三、自同期并列

自同期并列方式不能用于两个系统间的并列操作。同时应该看到，当发电机以自同期方式投入电网时，在投入瞬间，未经励磁的发电机接入电网，相当于电网经发电机次暂态电抗 \$X\$。短路，因而不可避免地要引起冲击电流。

自同期并列的冲击电流的周期分量可由下式求得，即

$$I_h^* = \frac{U_x}{X_d^* + X_x}$$

式中：\$U_x\$ 为归算到发电机端的电网电压，\$X_x\$ 为归算后的电网等值电抗。

这时，发电机母线电压 \$U_G\$ 为

$$U_G = \frac{U_x}{X_d'' + X_x} X_d''$$

两式子表明，当机组一定时，自同期并列的冲击电流主要决定于系统的情况，即决定于 \$U_x\$ 和 \$X_x\$ 自同期时发电机的端电压值 \$U_G\$ 与冲击电流成正比。

另外，必须指出：发电机母线电压瞬时下降对其他用电设备的正常工作将产生影响，为此也需受到限制，所以自同期并列操作方法在非正常情况下采用时，

也常受到限制。

第二节 准同期并列的基本原理

采用准同期并列方法将待并发电机组投入电网运行，在满足并列条件的情况下，只要控制得当就可使冲击电流很小且对电网扰动甚微。因此，准同期并列是电力系统运行中的主要并列方式。

设并列断路器 QF 两侧电压分别为 $\dot{U}_G$ 和 $\dot{U}_x$ ，并列断路器 QF 主触头闭合瞬间所出现的冲击电流值以及进入同步运行的暂态过程，决定于合闸时的脉动电压的 $\dot{U}_s$ 值和滑差角频率 ω_s 。因此，准同期并列主要是对脉动电压 $\dot{U}_s$ 和滑差角频率 ω_s 进行检测和控制，并选择合适的时间发出合闸信号，使合闸瞬间的 $\dot{U}_s$ 值在允许值以内。检测的信息取自 QF 两侧的电压，而且主要是对 $\dot{U}_s$ 进行检测并提取信息。现对脉动电压的变化规律进行分析。

一、脉动电压

为便于分析问题，设待并发电机电压 $\dot{U}_G$ 与电网电压 $\dot{U}_x$ 的幅值相等，而 ω_G 与 ω_x 始点，这时 $\dot{U}_s$ 的表达式

$$u_s = U_s \cos\left(\frac{\omega_G + \omega_x}{2}t\right)$$

$$U_s = 2U_{mx} \sin\frac{\omega_s}{2}t = 2U_{mG} \sin\frac{\omega_s}{2}t$$

$\dot{U}_s$ 脉动电压波形如图 1-2 所示，为正弦脉动波形，它的最大幅值为 $2U_{mx}$ （或 $2U_{mG}$ ）。

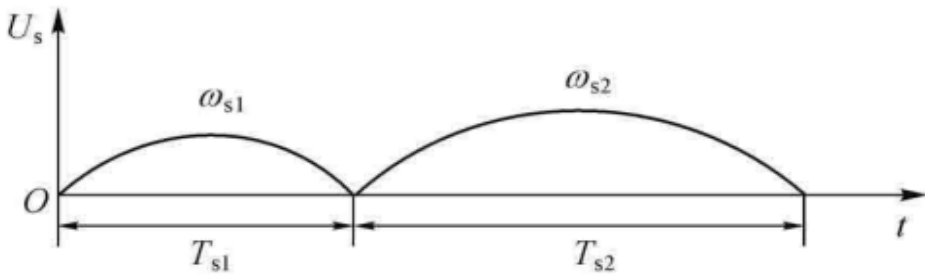


图 1-2 $U_G = U_x$ 时 U_s 脉动电压波形

如果并列断路器 QF 两侧的电压幅值不相等，应用三角公式可求得 U_s ，的值为

$$U_s = \sqrt{U_{mx}^2 + U_{mG}^2 - 2U_{mx}U_{mG}\cos\omega_s t}$$

当 $\omega_s t = 0$ 时， $U_s = |U_{mG} - U_{mx}|$ ，为两电压幅值差；

当 $\omega_s t = \pi$ 时， $U_s = |U_{mG} + U_{mx}|$ ，为两电压幅值和。

两电压幅值不等时，由于脉动周期 T_s 只与 ω_s 有关，所以脉动电压周期 T_s 表达得与图 1-2 相同。

在 U_s 的脉动电压波形中载有准同期并列所需检测的信息—电压幅值差、频率差以及相角差随时间的变化规律。因此，并列断路器 QF 两侧的电压为自动并列装置提供了并列条件信息和合适的合闸信号控制发出时机。

(一) 电压幅值差

电压幅值差 $|U_{mG} - U_{mx}|$ 对应于脉动电压波形的最小幅值 $U_{s\min}$ ，得

$$U_{s\min} = |U_{mG} - U_{mx}|$$

表明并列操作的合闸时机即使掌握得非常理想，相角差为零，并列点两侧存在电压幅值差时仍会导致冲击电流，其值与电压幅值差成正比。为了限制并网合闸时的冲击电流，须设定电压幅值差限制，作为并列条件之一。

(二) 频率差

$\dot{U}_G$ 与 $\dot{U}_x$ 间的频率差就是脉动电压 U_s 幅值的频率 f_s ，它与滑差角频率 ω_s 的关系如式 $\omega_s = 2\pi f_s$ 所示，即

$$\omega_s = 2\pi f_s$$

可见 ω_s 反映了频率差 f_s 的大小。要求 ω_s 小于某一允许值，就相当于要求脉动电压周期 T_s 大于某一给定值。

例如，设滑差角频率的允许值 ω_{sy} 规定为 $0.2\% \omega_N, f_N = 50\text{Hz}$ ，即

$$\omega_{sy} = 0.2\% \times \frac{2\pi f_N}{100} = 0.2\pi (\text{rad/s})$$

对应的脉动电压周期 T_s 的值为

$$T_s \dots \frac{2\pi}{\omega_{sy}} = 10(\text{s})$$

所以 U_s 的脉动周期 T_s 大于 10s 才能满足 ω_{sy} 小于 $0.2\% \omega_N$ 的要求。这就是说，测量 T_s 的值可以检测待并发电机组与电网间的滑差角频率 ω_s 的大小，即频率差的

大小。

（三）合闸相角差 δ_e 的控制

前面已经提及，最理想的合闸瞬间是在 $\dot{U}_G$ 与 $\dot{U}_x$ 两相量重合的瞬间。考虑到断路器操动机构和合闸回路控制电器的固有动作时间，必须在两电压相量重合之前发出合闸信号，即取提前量。

U_s 随相角差 δ_e 的变化规律为发出合闸信号的提前量提供了计算和判别依据。目前，准同期并列装置采用的提前量有恒定越前相角和恒定越前时间两种。在与两相量重合之前恒定角度发出合闸信号的，称为恒定越前相角并列装置。在自 $\dot{U}_G$ 与 $\dot{U}_x$ 两相量重合之前恒定时间 δ_{yt} 发出合闸信号的，称为恒定越前时间并列装置。一般并列合闸回路都具有固定动作时间，因此恒定越前时间并列装置得到了广泛使用。

二、自动准同期并列装置

（一）控制单元

为了使待并发电机组满足并列条件，准同期并列装置主要由下列三个单元组成：

1. 频率差控制单元

它的任务是检测 $\dot{U}_G$ 与 $\dot{U}_x$ 间的滑差角频率 ω_s ，且调节待并发电机组的转速，使发电机电压的频率接近于电网频率。

2. 电压差控制单元

它的功能是检测 $\dot{U}_G$ 与 $\dot{U}_x$ 间的电压差，且调节发电机电压 U_G ，使它与 U_x 间的电压差值小于规定允许值，促使并列条件的形成。

3. 合闸信号控制单元

检查并列条件，当待并机组的频率和电压都满足并列条件时，合闸控制单元就选择合适的时间发出合闸信号，使并列断路器的主触头接通时，相角差是接近于零或控制在允许范围以内。

（二）自动化程度

同步发电机的准同期并列装置按自动化程度可分为以下两种。

1. 半自动并列装置

这种并列装置没有频率差控制和电压差控制功能，只有合闸信号控制单元。

并列时，待发电机的频率和电压由运行人员监视和调整，当频率和电压都满足并列条件时，并列装置就在合适的时间发出合闸信号。它与手动并列的区别仅仅是合闸信号由该装置经判断后自动发出，而不是由运行人员手动发出。

2. 自动并列装置

这种并列装置中设置了频率差控制单元、电压差控制单元和合闸信号控制单元。由于发电机一般都配有自动电压调节装置，因此在有人值班的发电厂中，发电机的电压往往由运行人员直接操作控制，不需配置电压差控制单元，从而简化了并列装置的结构；在无人值班的发电厂中，自动准同期并列装置需设置具有电压自动调节功能的电压差调整单元。同步发电机并列时，发电机的频率或频率和电压都由并列装置自动调节，使它与电网的频率、电压间的差值减小。当满足并列条件时，自动选择合适时机发出合闸信号，整个并列过程不需要运行人员参与。

三、准同期并列合闸信号的控制逻辑

在准同期并列操作中，合闸信号控制单元是准同期并列装置的核心部件，所以以准同期并列装置原理也往往是指该控制单元的原理。其控制原则是当频率和电压都满足并列条件的情况下，在 $\dot{U}_G$ 与 $\dot{U}_x$ 两相量重合之前发出合闸信号。

（一）恒定越前相角准同期并列

装置所取的提前量信号是某一恒定相角 δ_{yl} ，即在脉动电压 U_s 到达 $\delta_e = 0$ 之前的 δ_{yl} 相角差时发出合闸信号。为了简单起见，设 U_G 与 U_x 相等且都为额定值，相角差 δ_e 与脉动电压间 U_s 存在着一定的对应关系。设越前相角为 δ_{yl} ，它所对应的 U_s 电压值为 U_A 。现设断路器的合闸时间为 t_{QF} ，显然，当 ω_s 很小时，QF 主触头闭合瞬间的相角差可近似认为接近于合 δ_{yl} 值。当 $\omega_s = \omega_{syl} = \frac{\delta_{yl}}{t_{QF}}$ 时，并列时的合闸相角差等于零。 ω_{sy0} 称为最佳滑差角频率。当 $\omega_s > \omega_{sy0}$ 时，合闸相角差又将增大。与越前相角 δ_{yl} 相对应的越前时间随滑差角频率 ω_s 而变。由于断路器 QF 的合闸时间 t_{QF} 近乎恒定，因而合闸时的相角差与 ω_s 有关。为了使合闸时冲击电流值不超过允许值，滑差角频率的允许值就必须限制在某一范围以内，其值可根据发电机的参数计算求得。

（二）恒定越前时间准同期并列

装置所采用的提前量为恒定时间信号，即在脉动电压 U_s ，到达两电压相量

$\dot{U}_G$ 、 $\dot{U}_x$ 重合($\delta_e=0$)前 t_{YJ} 发出合闸信号,一般取 t_{YJ} 等于并列装置合闸出口继电器动作时间 t_c 和断路器的合闸时间 t_{QF} 之和,因此采用恒定越前时间的并列装置在理论上可以使合闸相角差 $\delta_e=0$ 。

在 $\delta_e=0$ 之前的恒定时间 t_{YJ} 发出合闸信号,它对应的越前相角 δ_{YJ} 的值是随 ω_s 而变化的。

由于 $\delta_{YJ}=\omega_s t_{YJ}$,当 t_{YJ} 为定值时,发出合闸脉冲时的越前相角与 ω_s 成正比。

虽然从理论上讲,按恒定越前时间原理工作的自动并列装置可以使合闸相角差 $\delta_e=0$,但实际上由于装置的越前信号时间、出口继电器的动作时间以及断路器的合闸时间 t_{QF} 存在着分散性,因而并列时仍难免具有合闸相角误差,这就使并列时的允许滑差角频率 ω_{sy} 受到限制。

四、恒定越前时间并列装置的整定计算

恒定越前时间并列装置需要整定的参数如下。

(一) 越前时间 t_{YJ}

通常令

$$t_{YJ}=t_c+t_{QF}$$

式中: t_c 为自动装置合闸信号输出回路的动作时间, t_{QF} 为并列断路器的合闸时间。

t_{YJ} 主要决定于 t_{QF} ,其值随断路器的类型不同而不同。所以装置中的知应便于整定,以适应不同断路器的需要。

(二) 允许电压差

U_G 与 U_x 间允许电压差值一般定为 $(0.1 \sim 0.15) U_N$ (U_N 为额定电压)。

(三) 允许滑差角频率

由于装置输出回路和断路器合闸动作时间都存在着误差,因此就造成合闸相角误差 δ_e ,在时间误差一定的条件下, δ_e 与 ω_s 成正比。设 δ_{ey} 为发电机组的允许合闸相角,可求得最大允许滑差 ω_{sy} 为

$$\omega_{sy} = \frac{\delta_{ey}}{|\Delta t_c| + |\Delta t_{QF}|}$$

式中: $|\Delta t_c|$ 、 $|\Delta t_{QF}|$ 分别为自动并列装置、断路器的动作误差时间。

第三节 自动并列装置的工作原理

一、装置的控制逻辑

恒定越前时间准同期并列装置中的合闸信号控制单元由滑差角频率检测、电压差检测和越前时间信号等环节组成。它的控制逻辑如图 1-3 (a) 所示。由图 1-3 (a) 可见, 恒定越前时间信号能否通过与门 Y1 成为合闸输出信号, 决定于滑差角频率检测和电压差检测的结果。如果其中任何一个不符合并列条件, 那么由或非门 H1 输出的非逻辑使与门 Y1 闭锁, 因而所产生的越前时间信号不能通过与门 Y1, 也就不能发出合闸信号, 只有在滑差角频率和电压差都符合并列条件的情况下, 越前时间信号才能通过与门 Y1 成为合闸信号输出。由此可见, 它们间的时间配合如图 1-3 (b) 所示, 在一个脉动电压周期内, 必须在越前时间信号到达之前完成频率差和电压差的检测任务, 做出是否让越前时间信号通过与门 Y1 的判断, 也就是做出是否允许并列合闸的判断。

因此在 U_s 每一个脉动周期内, 确定出电压差和频率差的检测区间。图 1-3 (b) 表达了它们间的配合关系, 在越前时间 t_w 信号之前电压差和频率差检测环节就已分别做出符合或不符合并列条件的判断。如果不符合并列条件, 则或非门 H1 的输入逻辑值为“1”, 或非门 H1 的两个输入端只要有一个输入端出现“1”, H1 的输出逻辑即为“0”, 与门 Y1 就被闭锁, 所形成的越前时间信号就不起作用。所以电压差或频率差只要有一个不符合并列条件, 就不允许合闸, 在下一个 U_s 的脉动周期内重新检测, 重复上述过程, 直到并列条件都满足, 如果符合并列条件, 则 H1 的输入逻辑值均为“0”, 其输出逻辑值为“1”, 与门 Y1 不被闭锁, 这时所产生的越前时间信号 W 就可通过 Y1 输出合闸信号。所以, 当电压差和频率差都符合条件时, 就在为发出合闸信号, 从而完成并列操作的合闸控制任务。应用图 1-3 (a) 逻辑框图, 就很容易把自动并列装置的控制原理阐述清楚。在微机数字式自动并列装置中, 虽然应用的是存储逻辑, 编制的软件与布线逻辑在形式上有较大的差别, 但在制作软件框图时, 也得遵循上述基本原理所阐述的控制逻辑。

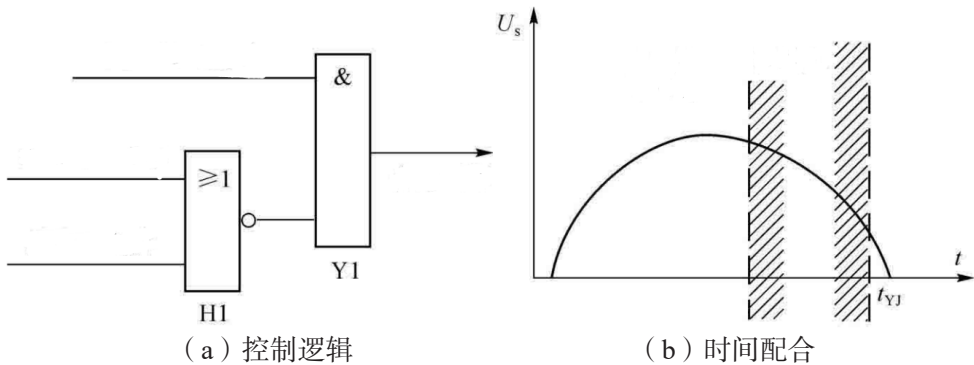


图 1-3 并列装置控制逻辑

二、并列的检测信号

(一) 整步电压

自动并列装置检测并列条件的电压，人们常称为整步电压。

随着元器件更新以及自动控制和检测技术的进步，整步电压也随之不同。为了对自动并列装置发展有较系统认识，这里做简要介绍。

1. 正弦型整步电压

电压互感器二次侧 $\dot{U}_G$ 和 $\dot{U}_x$ 的电压差接线，因为它的包络线波形是正弦型的，称为正弦型整步电压，它是早期准同期并列装置所采用的测量信号。

$\dot{U}_{Ga}$ 和 $\dot{U}_{xa}$ 之间的电压即为其差值电压也 $\dot{U}_b$ 。经整流后，直流侧的电压波形 U_{sz} ，所测得的直流电压反映了脉动电压 U_s 的幅值。

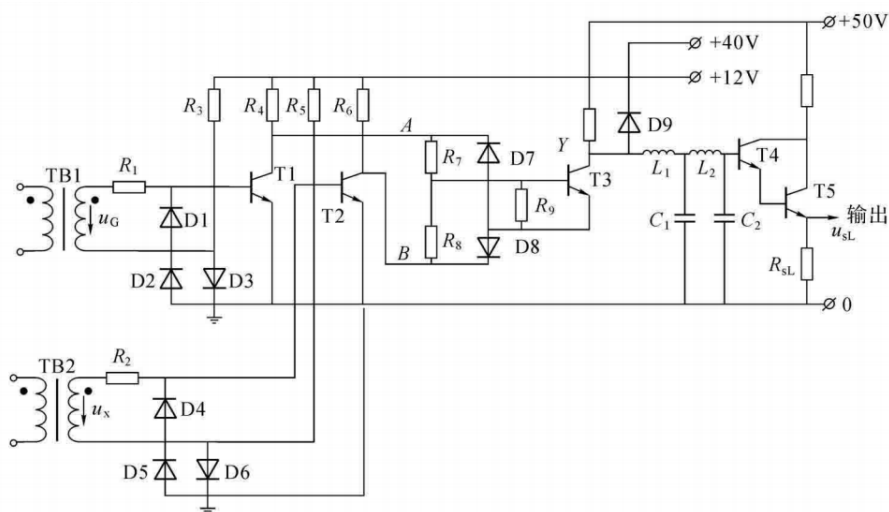
设 $U_G = U_x$ ，则正弦型整步电压 U_{sz} 为

$$U_{sz} = 2U_x K_Z \sin \frac{\omega_s t}{2} = 2U_x K_Z \sin \frac{\delta_e}{2}$$

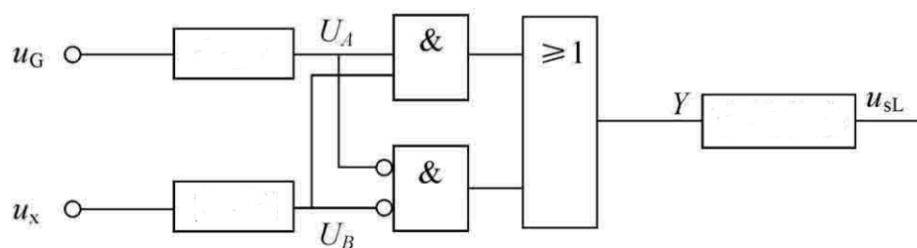
式中： K_Z 为整流系数。

2. 线性整步电压

线性整步电压只反映 $\dot{U}_G$ 和 $\dot{U}_x$ 间的相角差特性，而与它们的电压幅值无关，从而使越前时间信号和频率差的检测不受电压幅值的影响，提高了并列装置的控制性能，因而被模拟式自动并列装置广泛使用。



(a) 电路图



(b) 逻辑图

图 1-4 全波线性整步电压形成电路

图 1-4 (a) 为全波线性整步电压的形成电路示例，它由电压变换、整形电路、相敏电路、低通滤波器和射极跟随器组成。

整形电路（形成方波）。电压互感器二次侧电压经变压器 TB1、TB2 输出电压分别为 u_G 和 u_x 。三极管 T1、T2 工作在正偏置工况下，只要 u_G 或 u_x 微偏正，即在电压的正半周时间内，T1 或 T2 就导通，A 点或 E 点处于低电平。反之，当 u_G 或 u_x 处于负半周期时，A 点或 B 点处于高电平。可见，整形电路是将 u_G 和 u_x 的正弦波转换成与之频率和相位相同的一系列方波，方波的幅值与 u_G 、 u_x 的幅值无关。

相敏电路。由三极管 T3，电阻 $R_7 \sim R_9$ ，二极管 D7、D8 组成。当 A 点、B

点电压同时处于高电平或同时处于低电平时，对称性电路使 T3 得不到偏置而截止，其集电极上 Y 点为高电平。若 A 点和 B 点的电平高低不一致，即相异时，T3 导通，Y 点为低电平。

其逻辑框图可以表示为图 1-4 (b)，Y 点逻辑为 $Y = A \cdot B + \bar{A} \cdot \bar{B} = \overline{A \oplus B}$ ，脉冲间隔反映了相角差 δ_e 的大小，这个相敏电路的工作由逻辑表达式可知在正、负周期内共获得两次相位比较机会。必须注意的是当 $\delta_e = 0$ 时，Y 点高电平时间最长，即矩形脉冲最宽，脉冲间的间隔最小， u_{sl} 输出最大。当 $\delta_e = \pi$ 时，矩形脉冲宽度为零，脉冲间隔为最大， u_{sl} 输出为零。如果任一输入接线的极性改变，即两输入电压的极性不一致，则 u_{sl} 特性也就相移 π (180°)。

(二) 恒定越前时间

恒定越前时间部分是由 R、C 组成的比例 - 微分回路和电平检测器构成，如图 1-5 所示。

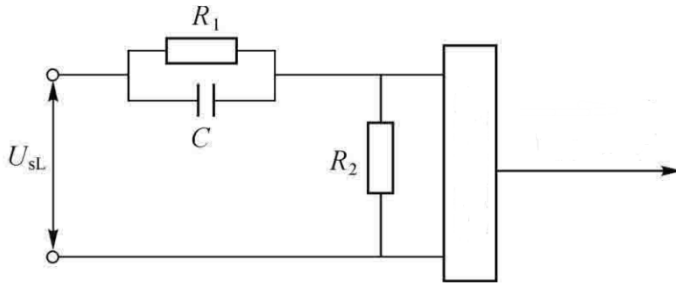


图 1-5 恒定越的时间部分

当整步电压加至比例-微分回路后，在电阻 R_2 上的输出电压 U_{R_2} 可以利用叠加原理来求出，即图 1-6 (a) 所示 U_{R_2} 为图 1-6 (b) 和图 1-6 (c) 所示输出电压 U'_{R_2} 与 U''_{R_2} 的叠加。

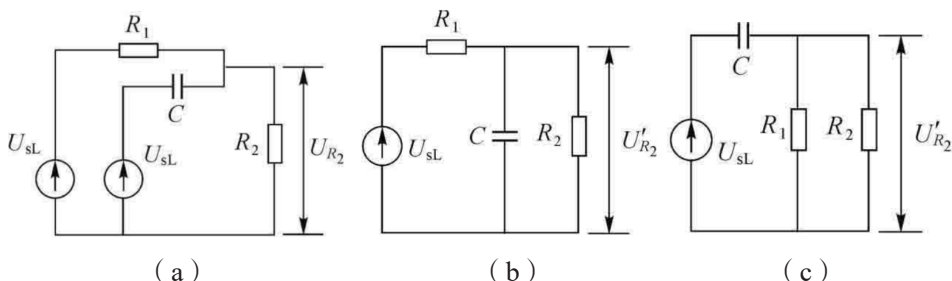
在图 1-6 (b) 中，由于电容 C 的容量很小，容抗很大，其作用可以忽略，故

$$U'_{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{sl} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times \frac{U_{sl.m}}{\pi} (\pi + \omega_s t) \quad (-\pi < \omega_s t < 0)$$

在图 1-6 (c) 中，若 $T_s \gg \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot C$ ，则

$$U''_{R_2} = I_C \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times R_2 = C \times \frac{dU_{sl}}{dt} \times \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$= \frac{U_{sm} \cdot \omega_s}{\pi} \times \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot C \quad (-\pi < \omega_s t < 0)$$

图 1-6 利用叠加原理求 U_{R_2} 示意图

现讨论在 $-\pi < \omega_s t < 0$ 区间，若电平检测器翻转电平为 $\frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{sLm}$ ，翻转时间为 t_{YJ} ，则动作的临时条件为

$$U'_{R_2} + U''_{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{sLm}$$

即

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \times \frac{U_{sLm}}{\pi} (\pi + \omega_s t_{YJ}) + \frac{U_{sLm} \cdot \omega_s}{\pi} \times \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot C = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{sLm}$$

$$1 + \frac{\omega_s t_{YJ}}{\pi} + \frac{\omega_s R_1 C}{\pi} = 1$$

$$\omega_s t_{YJ} + \omega_s R_1 C = 0$$

$$t_{YJ} = -R_1 C$$

由此表明，电平检测器翻转时间 t_{YJ} 的值与 ω_s 无关，而是仅与 R_1 及 C 的数值有关的常量。等号右端的负号表示与所取时间标尺的方向相反，即为“越前”时间，故 t_{YJ} 为恒定越前时间。

三、滑差检测

滑差检测是自动准同期装置在发出合闸脉冲前要做的检测。滑差检测的作用是对待发电机与系统之间的频率差是否满足准同期条件做出判断。滑差检测有以下两种实现方法。

恒定越前相角电平检测器输入线性整步电压 U_{sL} ，当输入电压等于或大于整定电平 U_{sLk} 时，电平检测器动作，输出低电平，随着滑差的不断减小，即 $T_{s1} < T_{s2}$ ，恒定越前相角检测器动作时间 t_{A1}, t_{A2} 随之不断加大。

如果将 U_{slk} 按允许滑差 ω_{sY} 下恒定时间越前 t_{YJ} 的相应角差值 δ_{YJ} 进行整定，则有

$$\omega_{SY} t_{YJ} = \omega_s t_A$$

即

$$t_A = \frac{\omega_s}{\omega_{SY}} t_{YJ}$$

当 $\omega_s > \omega_{SY}$ 时， $|t_A| < |t_{YJ}|$ ；

当 $\omega_s = \omega_{SY}$ 时， $|t_A| = |t_{YJ}|$ ；

当 $\omega_s < \omega_{SY}$ 时， $|t_A| > |t_{YJ}|$ 。

只有当 $|t_A| > |t_{YJ}|$ ，即恒定越前相角电平检测器先于恒定超前时间电平检测器动作时，才说明这时的 ω_s 小于允许滑差的频率 ω_{SY} ，从而做出频率差符合并列条件的判断。反之，如果处信号到来时尚未获得恒定越前相角电平检测器的翻转信号，就可做出频率差不符合并列条件的判断。

检测线性整步电压的斜率来判别滑差大小。

由线性整步电压数学表达式分析可知，线性整步电压的斜率与滑差成正比，故可通过检测线性整步电压的斜率来实现滑差检测。

由比较恒定越前时间电平检测器和恒定越前相角电平检测器的动作次序来实现滑差检测的方法，越前相角脉冲 U_{slk} 的宽度范围为对应的 $-\delta_{YJ} \sim +\delta_{YJ}$ 。因此越前时间脉 U_{YJ} 对应的 δ_i 只有在 $-\delta_{YJ} \sim +\delta_{YJ}$ 范围内才起作用，即在 $-\delta_{YJ} < \delta_i < +\delta_{YJ}$ 时发合闸命令才起作用。在这个区间外，即使误发越前时间脉冲，也不会发合闸命令使合闸闭锁。因此，只要选择合理的 δ_{YJ} ，就不会产生太大的冲击电流或损坏发电机。而用检测线性整步电压斜率来检测滑差的方法，如果频率不满足条件时，只有在 $180^\circ < \delta_i < 360^\circ$ 区间内，合闸闭锁，在 $0^\circ < \delta_i < 180^\circ$ 区间内合闸不被闭锁。因此，如果在 $0^\circ < \delta_i < 180^\circ$ 区间内误发合闸脉冲，都会使同期点断路器误合闸，若 δ 在 180° 附近合闸，将对发电机产生严重危害，所以这两种方法是有区别的。

第四节 数字式并列装置

一、概述

用大规模集成电路等器件构成的数字式并列装置，由于硬件简单、编程方便灵活、运行可靠且技术上已经成熟，成为当前自动并列装置的主流。中央处理单元（CPU）具有高速运算和逻辑判断能力，它的指令周期以微秒计，这对于发电机频率为 50Hz，每周期 20ms 的信号来说，可以具有足够充裕的时间进行相角差 δ_e 和滑差角频率 ω_s 近乎瞬时值的运算，并按照频率差值的大小和方向、电压差值的大小和方向，确定相应的调节量，对机组进行调节，以达到较满意的并列控制效果。一般模拟式并列装置为了简化电路，在一个滑差周期 T_s 内，把 ω_s 假设为恒定。而数字式并列装置可以克服这一假设的局限性，采用较为严密的公式，考虑相角差 δ_e 可能具有加速运动等问题，能按照 δ_e 当时的变化规律，选择最佳的越前时间发出合闸信号，可以缩短并列操作的过程，提高了自动并列装置的技术性能和运行可靠性。并列装置引入了计算机技术后，可以较方便地应用检测和诊断技术对装置进行自检，提高了装置的维护水平。

数字式并列装置由硬件和软件组成，两者协调配合完成同步发电机组的并列控制任务。

二、硬件电路

以中央处理单元（CPU）为核心的数字式并列装置，就是一台专用的计算机控制系统。因此按照计算机控制系统的组成原则，硬件的基本配置由主机，输入、输出接口，输入、输出过程通道等部件组成。

（一）主机

中央处理单元（CPU）是控制装置的核心，它和存储器（RAM、EPROM）以及接口电路一起组成主机。控制对象运行变量的采样输入存放在可读写的随机存储器（RAM）内，固定的系数和设定值以及编制的程序则固化存放在可擦写只读存储器（EPROM）内。自动并列装置的重要参数，如断路器合闸时间、频率差和电压差允许并列的阈值、滑差角加速度计算系数、频率和电压控制调节的脉冲宽度系数等，为了既能固定存储，又便于设置和整定值的修改，亦存储在

EPROM 中。

（二）输入、输出接口电路

在计算机控制系统中，输入、输出过程通道的信息不能直接与主机的总线相接，必须由接口电路来完成信息传递的任务。现在各种型号的 CPU 芯片都有相应的通用接口芯片供选用。它们有串行接口、并行接口、管理接口（计数/定时、中断管理等）、模拟量与数字量间转换（A/D、D/A）等电路。这些接口电路与主机总线相连接，供主机读写。有关这些通用接口电路的介绍，可参阅相关微机原理等教材。

（三）输入、输出过程通道

为了实现发电机自动并列操作，须将电网和待并发电机的电压、频率等物理量按要求送到接口电路进入主机。

1. 输入通道

并列装置在现场工作时，需输入的信息有下列几项。

（1）状态变量

按发电机并列条件，分别从发电机和母线电压互感器二次侧交流电压信号中提取电压幅值、频率和相角差 δ_e 三种信息，经隔离及电路转换后送到接口电路，作为并列操作的依据。

①电压差检测

由于在频率差和相角差 δ_e 检测电路中，不载有并列点两侧电压幅值的信息，所以需要设置专门的电压差检测电路。近年来传感器技术发展很快，可方便地通过接口电路把交流电压值读入主机，因此直接读入 u_G 和 u_x 值然后做计算比较的方案较为简单。

②频率差检测

频率差检测可用直接测量 u_G 和 u_x 并列电压频率的方法，求得频率差值以及频率高低的信息。数字电路测量频率的基本方法是测量交流信号的周期 T 。把交流电压正弦信号转换为方波，经二分频后，它的半波时间即为交流电压的周期 T_0 具体的实施可利用正半周高电平作为可编程定时/计数器开始计数的控制信号，其下降沿即停止计数并作为中断请求信号，由 CPU 读取其中计数值 N ，并使计数器复位，以便为下一个周期计数做好准备。

如可编程定时 / 计数器的计时脉冲频率为 f_c ，则交流电压的周期 T 为

$$T = \frac{1}{f_c} N$$

于是求得交流电压的频率为

$$f = \frac{f_c}{N}$$

为了简化并列装置输入接线并且能与 $\delta_c(t)$ 测量电路合用起见，可省略二分频环节，把交流电压正弦信号转换成方波后，就去控制定时 / 计数电路，此时的计数时间只有半个周期 ($T/2$)，所以计算机也可很方便地求得频率值、频差大小和频率高低。只有在频率差允许的条件下，才进行恒定越前时间的计算。

(2) 并列点参数调用的地址 (数字量)

自动并列装置在现场运行时，还需要输入具有并列点地址意义的信息，用于调用与并列点对应的一套参数，如越前时间 t_{rd} 、允许滑差角频率 ω_s 、允许电压幅值差 ΔU_{set} 频率差控制和电压差控制的调整系数等。当操作控制对象确定后，由运行人员就近操作或远方控制，给出一组编码 (数字量) 通过接口电路输入。自动并列装置按地址调用各项参数。为了安全可靠起见，输入地址的编码宜采用特定规则 (容错技术)，如出现错码也不会调错参数，以防止引起不良操作后果。

(3) 工作状态及复位按钮

微机型自动并列装置，按程序执行操作任务，其工作状态有参数设定调试和并列操作之分，为此设置相应的工作状态输入信号，引导程序走向。装置启动后，通过输入接口读入。

微机型自动并列装置启动后一般都有自检，在自检或工作中可能由于硬件、软件或某种偶然原因，导致出错或死机，为此，需设置一个复位按钮，能使装置重新启动。操作复位后，装置重新运行，有可能正常，这说明装置本身无故障，属偶然因素；也有可能仍旧出错或死机，说明装置确有问题，应检查排除故障。

2. 输出通道

自动并列装置的输出控制信号有：①并列断路器合闸脉冲控制信号。②调节发电机转速的增速、减速信号。③调节发电机电压的升压、降压信号。

这些控制信号可由接口电路输出，经转换后驱动继电器，用触点控制相应的电路。

(四) 人机接口

这是计算机控制系统必备的设施，属常规外部设备。其配置则视具体情况而定。自动并列装置的人机接口主要用于程序调试、设置或修改参数。装置运行时，用于显示发电机并列过程的主要变量，如相角差 δ_e 、频率差、电压差的大小和方向，以及调速、调压的情况。总之，应为运行操作人员监控装置的运行提供方便。

其常用的设备有：①键盘—用于输入程序、数据和命令。②数码管、发光二极管、显示器—为操作人员提供直观的显示，以利于对并列过程的监控，以及生产厂家调试程序时需要。例如，两电压间相角差用 LED 发光做圆周运动显示，直观醒目，较受欢迎。③操作设备—为运行人员提供控制的设备，如按钮、开关等。

三、并列装置软件

数字式自动并列装置借助于中央处理单元的高速信息处理能力，利用编制的程序（软件），在硬件配合下实现发电机的并列操作，因此软件在控制系统中占有十分重要的地位。自动并列装置按所制订的软件流程进行工作，然而程序流程细节可能因人而异，无标准可循，这和每个人处理问题的方式方法一样，各有“个性”，不会完全一致。

设系统频率为额定值 50Hz，待并发电机的频率低于 50Hz。

数字式自动并列装置利用 $\delta_e(t)$ 轨迹，利用较严密的数学模型，计算求得的恒定越前时间为较符合脉动电压的实际规律，具有相当的准确性。首先可按下式计算求得恒定越前时间所对应的最佳越前合闸相角为，还可很方便地计及左含有加速度的情况。为计算式为

$$\delta_{YJ} = \omega_{sl} t_{DC} + \frac{1}{2} \times \frac{\Delta \omega_{sl}}{\Delta t} t_{DC}^2$$

其中

$$\omega_{sl} = \frac{\Delta \delta_i}{\Delta t} = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{2\tau_x}$$

式中： ω_{sl} 为计算点的滑差角速度， δ_i, δ_{i-1} 分别为本计算点和上一计算点的角度值， $2\tau_x$ 为两个计算点间的时间， t_{DC} 为中央处理单元发出合闸信号到断路器主触头闭合时需经历的时间。

设 t_c 为出口继电器动作时间, t_{QF} 为断路器的合闸时间, 则

$$t_{DC} = t_{QF} + t_c$$

由于两相邻计算点间的 ω_s 变化甚微, 因此 $\Delta\omega_{si}$ 一般可经若干计算点后才计算

一次, 所以式 $\delta_{YJ} = \omega_{si} t_{DC} + \frac{1}{2} \times \frac{\Delta\omega_{si}}{\Delta t} t_{DC}^2$ 的可表示为

$$\frac{\Delta\omega_{si}}{\Delta t} = \frac{\omega_{si} - \omega_{si-n}}{2\tau_x n}$$

式中: ω_{si} 、 ω_{si-n} 分别为本计算点和前 n 个计算点求得的 ω_s 值。

第二章 同步发电机的励磁自动控制系统

第一节 励磁控制系统的任务和要求

同步发电机的运行特性与它的空载电动势 E_0 值的大小有关，而 E_0 的值是发电机励磁电流 I_{EF} 的函数，改变励磁电流就可影响同步发电机在电力系统中的运行特性。因此，对同步发电机的励磁进行控制，是对发电机的运行实行控制的重要内容之一。

电力系统在正常运行时，发电机励磁电流的变化主要影响电网的电压水平和并联运行机组间无功功率的分配。在某些故障情况下，发电机端电压降低将导致电力系统稳定水平下降。为此，当系统发生故障时，要求发电机迅速增大励磁电流，以维持电网的电压水平及稳定性。可见，同步发电机励磁的自动控制在保证电能质量、无功功率的合理分配和提高电力系统运行的可靠性方面都起着十分重要的作用。

同步发电机的励磁系统一般由励磁功率单元和励磁调节器两个部分组成。励磁功率单元向同步发电机转子提供直流电流，即励磁电流；励磁调节器根据输入信号和给定的调节准则控制励磁功率单元的输出。整个励磁自动控制系统是由自动励磁调节器（AER）励磁功率单元和发电机构成的一个反馈控制系统。

一、同步发电机励磁控制系统的任务

在电力系统正常运行或事故运行中，同步发电机的励磁控制系统起着重要的作用。优良的励磁控制系统不仅可以保证发电机可靠运行，提供合格的电能，而且还可有效地提高系统的技术指标。根据运行方面的要求，励磁控制系统应该承担如下任务。

（一）电压控制

电力系统在正常运行时，负荷总是经常波动的，同步发电机的功率也就发生相应变化。随着负荷的波动，需要对励磁电流进行调节，以维持机端或系统中某

一点的电压在给定的水平。励磁自动控制系统担负了维持电压水平的任务。为了阐明它的基本概念，可用最简单的单机运行系统来进行分析。

同步发电机运行原理：GEW 是励磁绕组，机端电压为 $\dot{U}_G$ ，电流为 $\dot{I}_G$ 。在正常情况下，流经 GEW 的励磁电流为 I_{EF} ，由它建立的磁场使定子产生的空载感应电动势为 $\dot{E}_q$ ，改变 I_{EF} 的大小， $\dot{E}_q$ 值就相应地改变。 $\dot{E}_q$ 与 $\dot{U}_G$ 之间的关系可为

$$\dot{U}_G + j\dot{I}_G X_d = \dot{E}_q$$

式中： X_d 为发电机的直轴电抗。

发电机感应电动势 $\dot{E}_q$ 与端电压 $\dot{U}_G$ 的幅值关系为

$$E_q \cos \delta_G = U_G + I_Q X_d$$

式中： δ_G 为 $\dot{E}_q$ 与 $\dot{U}_G$ 间的相角，即发电机的功率角； I_Q 为发电机的无功电流。

一般 δ_G 的值很小，可近似认为 $\cos \hat{\delta}_G = 1$ 。于是，可得简化的运算式为

$$E_q \approx U_G + I_Q X_d$$

式 $E_q \approx U_G + I_Q X_d$ 说明，负荷的无功电流是造成 E_q 和 U_G 幅值差的主要原因，发电机的无功电流越大，两者间的差值也越大。

由式 $E_q \approx U_G + I_Q X_d$ 可看出，同步发电机的外特性必然是下降的。当励磁电流 I_{EF} 一定时，发电机端电压 U_G 随无功负荷增大而下降。

（二）控制无功功率的分配

为了使分析简单起见，设同步发电机与无限大母线并联运行，即发电机端电压不随负荷大小而变，是一个恒定值。

由于发电机发出的有功功率只受调速器控制，与励磁电流的大小无关。故无论励磁电流如何变化，发电机的有功功率 P_G 均为常数，即

$$P_G = U_G I_G \cos \varphi = \text{常数}$$

式中： φ 为功率因数角。

当不考虑定子电阻和凸极效应时，发电机功率又可用下式表示：

$$P_G = \frac{E_q U_G}{X_d} \sin \delta = \text{常数}$$

式中： δ 为发电机的功率角。

式 $P_G = U_G I_G \cos \varphi = \text{常数}$ 和式 $P_G = \frac{E_q U_G}{X_d} \sin \delta = \text{常数}$ 分别说明当励磁电流改变时， $I_G \cos \varphi$ 和 $E_q \sin \delta$ 的值均保持恒定，即

$$I_G \cos \varphi = K_1$$

$$E_q \sin \delta = K_2$$

感应电动势 $\dot{E}_q$ 的端点只能沿着虚线 AA' 变化, 而发电机电流 I_G 的端点则沿着虚线 BB' 变化。因为发电机端电压 U_G 为定值, 所以发电机励磁电流的变化只是改变了机组的无功功率和功率角 δ 值大小。

由此可见, 与无限大母线并联运行的机组, 调节它的励磁电流可以改变发电机无功功率的数值。

在实际运行中, 与发电机并联运行的母线并不是无限大母线, 即系统等值阻抗并不等于零, 母线的电压将随着负荷波动而改变。电厂输出的无功电流与它的母线电压水平有关, 改变其中一台发电机的励磁电流不但影响发电机电压和无功功率, 而且也将影响与之并联运行机组的无功功率, 其影响程度与系统情况有关。因此, 同步发电机的励磁自动控制系统还担负着并联运行机组间无功功率合理分配的任务。

(三) 提高同步发电机并联运行的稳定性

保持同步发电机稳定运行是保证电力系统可靠供电的首要条件。电力系统在运行中随时都可能遭受各种干扰, 在扰动消失后, 发电机组能够恢复到原来的运行状态或者过渡到另一个新的运行状态, 则称系统是稳定的。其主要标志是在暂态过程结束后, 同步发电机能维持或恢复同步运行。

为了便于研究, 将电力系统的稳定分为静态稳定和暂态稳定两类。

电力系统静态稳定与自动控制中的稳定概念一样, 是指电力系统在正常运行状态下, 经受微小扰动后恢复到原来的运行状态的能力。可采用自动控制理论所介绍的方法, 用微分方程建立该动态系统的数学模型。

电力系统暂态稳定是指电力系统在某一正常方式下突然遭受大扰动后能否过渡到一个新的稳定运行状态或者恢复到原来运行状态的能力。这里, 所谓大的扰动是指电力系统发生某种事故, 如高压电网发生短路或发电机被切除等。现在也把电力系统受到小的或大的干扰后, 计及自动调节和控制装置作用的长过程的运行稳定问题称为动态稳定。

在分析电力系统稳定性问题时, 不论静态稳定或暂态稳定, 在数学模型表达式中总含有发电机空载电动势 $\dot{E}_q$, 而 $\dot{E}_q$ 与励磁电流有关。可见, 励磁自动控制系统是通过改变励磁电流从而改变 $\dot{E}_q$ 值来改善系统稳定性的。

下面我们分别分析励磁对静态稳定和暂态稳定的影响。

1. 励磁对静态稳定的影响

发电机的输出功率按式 $P_G = \frac{E_q U_G}{X_d} \sin \delta$ = 常数可写成

$$P_G = \frac{E_q U_G}{X_\Sigma} \sin \delta$$

式中： X_Σ 为系统总电抗，一般为发电机、变压器、输电线电抗之和； δ 为发电机空载电动势 $\dot{E}_q$ ，和受端电压 $\dot{U}$ 间的相角。

当空载电动势 $\dot{E}_q$ 为某一固定值时，发电机传输功率 P_G 是功率角的正弦函数，称为同步发电机的功率特性或发电机功角特性。

当 δ 小于 90° 时，发电机是静态稳定的。当 δ 大于 90° 时，发电机不能稳定运行。 $\delta = 90^\circ$ 时为临界稳定状态。所以最大可能传输的功率极限为 P_m ，即

$$P_m = \frac{E_y U}{X_\Sigma}$$

实际运行时，为了可靠起见会留有一定裕度，运行点总是低于对应的功率极限值。

上述分析表明，静态稳定极限功率 P_m 与发电机空载电动势 $\dot{E}_q$ 的幅值成正比，而 $\dot{E}_q$ 的幅值与励磁电流有关。无自动调节励磁时，因励磁电流恒定， $\dot{E}_q$ 为常数，此时的功角特性称为内功率特性；若有灵敏和快速的励磁调节器，则可视作保持发电机端电压为恒定， $\dot{E}_q$ 为常数。

由于励磁调节装置能有效地提高系统静态稳定的功率极限，因而要求所有运行的发电机组都要装设励磁调节器。

2. 励磁对暂态稳定的影响

电力系统遭受大的扰动以后，发电机组能否继续保持同步运行，这是暂态稳定所研究的课题。由于现代继电保护装置能快速切除故障，一般的励磁自动控制系统对暂态稳定的影响不如它对静态稳定的影响那样显著，但在一定条件下，仍然可以看出它的明显作用。现以单机接无限大系统为例，设在正常运行情况下，发电机输送功率为 P_{G0} ，在功角特性的 a 点运行。由于动力输入部分存在惯性，输入功率仍为 P_{G0} ，于是发电机轴上将出现过剩转矩使转子加速，系统运行点由 b 沿曲线 II 向 F 点移动。过了 F 点后，发电机输出功率大于 P_{G0} ，转子轴上将出现制动转矩，使转子减速。发电机能否稳定运行决定于曲线 II 与 P_{G0} 。直线间所形成的上、下两块面积（见图 2-1 中阴影部分）是否相等，即所谓等面积法则。

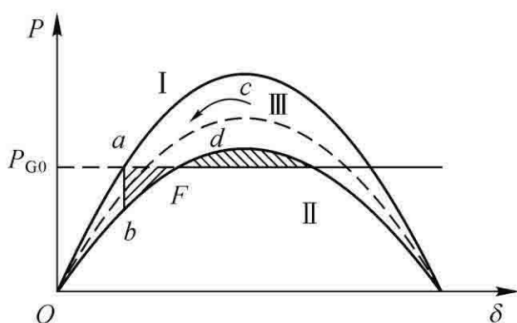


图 2-1 发电机的暂态稳定等面积法则

在上述过程中,发电机如能强行增加励磁,使受到扰动后的发电机组的运行点移到功角曲线Ⅲ上,就不但减小了加速面积,而且还增大减速面积,因此使发电机第一次摇摆时功角 δ 的幅值减小,改善了发电机的暂态稳定性。当往回摆动时,过大的减速面积并不有利,这时如能让它回到特性曲线Ⅱ上的 d 点运行,就可以减小回程振幅,对稳定更为有利。上述极简单的示例,使我们得到启示:在一定的条件下,励磁自动控制系统如果能按照要求进行某种适当的控制,同样可以改善电力系统的暂态稳定性。

然而,由于发电机励磁系统受时间常数等因素的影响,要使它在短暂过程中完成符合要求的控制也很不容易,这要求励磁系统首先必须具备快速响应的条件。为此,一方面要求缩小励磁系统的时间常数,另一方面要尽可能提高强行励磁的倍数。

(四) 改善电力系统的运行条件

当电力系统由于某种原因,出现短时低电压时,励磁自动控制系统可以发挥其调节功能,即大幅度地增加励磁以提高系统电压。这在下述情况下可以改善系统的运行条件。

1. 改善异步电动机的自启动条件

短路切除后可以加速系统电压的恢复过程,改善异步电动机的自启动条件。电网发生短路等故障时,电网电压降低,使大多数用户的电动机处于制动状态。故障切除后,由于电动机自启动时需要吸收大量无功功率,以致延缓了电网电压的恢复过程。发电机强行励磁的作用可以加速电网电压的恢复,有效地改善电动机的运行条件。

2. 为发电机异步运行创造条件

同步发电机失去励磁时，需要从系统中吸收大量无功功率，造成系统电压大幅度下降，严重时甚至危及系统的安全运行。在此情况下，如果系统中其他发电机组能提供足够的无功功率，以维持系统电压水平，则失磁的发电机还可以在一定时间内以异步运行方式维持运行，这不但可以确保系统安全运行，而且有利于机组热力设备的运行。

3. 提高继电保护装置工作的正确性

当系统处于低负荷运行状态时，发电机的励磁电流不大，若系统此时发生短路故障，其短路电流较小，且随时间衰减，以致带时限的继电保护不能正确动作。励磁自动控制系统就可以通过调节发电机励磁以增大短路电流，使继电保护正确动作。

由此可见，发电机励磁自动控制系统在改善电力系统运行方面起了十分重要的作用。

（五）水轮发电机组要求实行强行减磁

当水轮发电机组发生故障突然跳闸时，由于它的调速系统具有较大的惯性，不能迅速关闭导水叶，因而会使转速急剧上升。如果不采取措施迅速降低发电机的励磁电流，则发电机电压有可能升高到危及定子绝缘的程度。所以，在这种情况下，要求励磁自动控制系统能实现强行减磁。

二、对励磁系统的基本要求

前面已经分析了同步发电机励磁自动控制系统的主要任务，这些任务主要由励磁系统来实现。励磁系统是由励磁调节器和励磁功率单元两部分组成的，为了充分发挥它们的作用，完成发电机励磁自动控制系统的各项任务，对励磁调节器和励磁功率单元性能分别提出如下的要求。

（一）对励磁调节器的要求

励磁调节器的主要任务是检测和综合系统运行状态的信息，以产生相应的控制信号，经处理放大后控制励磁功率单元以得到所要求的发电机励磁电流。所以对它的要求如下：①系统正常运行时，励磁调节器应能反映发电机电压高低，以维持发电机电压在给定水平。通常认为，自动励磁调节器应能保证同步发电机端电压静差率：半导体型的小于 1%，电磁型的小于 3%。②励磁调节器应能合理

分配机组的无功功率。为此，励磁调节器应保证同步发电机端电压调差率可以在下列范围内进行调整：半导体型的为 $\pm 10\%$ ，电磁型的为 $\pm 5\%$ 。③远距离输电的发电机组，为了能在人工稳定区域运行，要求励磁调节器没有失灵区。④励磁调节器应能迅速反映系统故障、具备强行励磁等控制功能，以提高暂态稳定和改善系统运行条件。⑤具有较小的时间常数，能迅速响应输入信息的变化。⑥励磁调节器正常工作与否，直接影响到发电机组的安全运行，因此要求能够长期可靠工作。

（二）对励磁功率单元的要求

励磁功率单元受励磁调节器控制，对它的要求如下：①要求励磁功率单元有足够的可靠性并具有一定的调节容量。在电力系统运行中，发电机依靠励磁电流的变化进行系统电压和本身无功功率的控制。因此，励磁功率单元应具备足够的调节容量，以适应电力系统中各种运行工况的要求。②具有足够的励磁峰值电压和电压上升速度。

第二节 励磁系统的分类与原理

同步发电机的励磁电源实质上是一个可控的直流电源。为了满足正常运行要求，发电机励磁电源必须具备足够的调节容量，并且要有一定的强励倍数和励磁电压响应速度。在设计励磁系统方案时，首先应考虑它的可靠性。为了防止系统电网故障对它的影响，励磁功率单元往往作为发电机专用电源。另外，它的启励方式也应力求简单方便。

在电力系统发展初期，同步发电机的容量不大，励磁电流由与发电机组同轴的直流发电机供给，即所谓直流励磁机励磁系统。随着发电机容量的提高，所需励磁电流也相应增大，机械整流子在换流方面遇到了困难，而大功率半导体整流元件制造工艺又日益成熟，于是大容量机组的励磁功率单元就采用了交流发电机和半导体整流元件组成的交流励磁机励磁系统。

不论是直流励磁机励磁系统还是交流励磁机励磁系统，励磁机一般是与主机同轴旋转的。为了缩短主轴长度、降低造价、减少环节，又出现用发电机自身作为励磁电源的方法，即发电机自并励系统，又称为静止励磁系统。这种励磁系统对于水轮发电机尤为适用。

下面对几种常用的励磁系统做简要介绍。由于在励磁系统中励磁功率单元往往起主导作用，因此下面着重分析励磁功率单元。

一、直流励磁机励磁系统

直流励磁机励磁系统是过去常用的一种励磁系统。由于它是靠机械整流子换向整流的，当励磁电流过大时，换向就很困难，所以这种方式只能在 100MW 以下小容量机组中采用。直流励磁机大多与发电机同轴，它是靠剩磁来建立电压的，按励磁机励磁绕组供电方式的不同，又可分为自励式和他励式两种。

（一）自励直流励磁机励磁系统

发电机转子绕组由专用的直流励磁机 DE 供电，调整励磁机磁场电阻 R_c 可改变励磁机励磁电流中的 I_{R_c} ，从而达到人工调整发电机转子电流的目的，实现对发电机励磁的手动调节。在正常工作时， I_{AVR} 与 I_{R_c} 同时负担励磁机的励磁绕组 EEW 的调节功率，这样可以减小励磁调节器的容量，这对于功率放大系数较小、由电磁元件组成的励磁调节器来说是很必要的。

（二）他励直流励磁机励磁系统

他励直流励磁机励磁绕组是由副励磁机供电的，副励磁机 PE 与励磁机 DE 都与发电机同轴。

自励与他励的区别在于励磁机的励磁方式不同，他励比自励多用了一台副励磁机。由于他励方式取消了励磁机的自并励，励磁单元的时间常数就是励磁机励磁绕组的时间常数，与自励方式相比，时间常数减小了，即提高了励磁系统的电压增长速率。他励直流励磁机励磁系统一般用于水轮发电机组。

直流励磁机有电刷、整流子等转动接触部件，运行维护繁杂，从可靠性来说，它又是励磁系统中的薄弱环节。在直流励磁机励磁系统中，以往常采用电磁型调节器，这种调节器以磁放大器作为功率放大和综合信号的元件，反应速度较慢，但工作较可靠。

二、交流励磁机励磁系统

目前，容量在 100MW 以上的同步发电机组都普遍采用交流励磁机励磁系统，同步发电机的励磁机也是一台交流同步发电机，其输出电压经大功率整流器整流后供给发电机转子。交流励磁机励磁系统的核心是励磁机，它的频率、电压等参

数是根据需要特殊设计的,其频率一般为 100Hz 或更高。

交流励磁机励磁系统根据励磁机电源整流方式及整流器状态的不同又可分为以下几种。

(一) 他励交流励磁机励磁系统

他励交流励磁机励磁系统是指交流励磁机备有他励电源—中频副励磁机或永磁副励磁机。在此励磁系统中,交流励磁机经硅整流器供给发电机励磁,其中硅整流器可以是静止的,也可以是旋转的,因此又可分为下列两种方式。

1. 交流励磁机静止整流器励磁系统

励磁自动控制系统是由与主机同轴的交流励磁机、中频副励磁机和调节器等组成。在这个系统中,发电机 G 的励磁电流由频率为 100Hz 的交流励磁机 AE 经硅整流器 U 供给,交流励磁机的励磁电流由晶闸管可控整流器供给,其电源由副励磁机提供。副励磁机是自励式中频交流发电机,用自励恒压调节器保持其端电压恒定。由于副励磁机的启励电压较高,不能像直流励磁机那样能依靠剩磁启励,所以在机组启动时必须外加启励电源,直到副励磁机输出电压足以使自励恒压调节器正常工作时,启励电源方可退出。在此励磁系统中,励磁调节器控制晶闸管元件的控制角,来改变交流励磁机的励磁电流,达到控制发电机励磁的目的。

这种励磁系统的性能和特点如下:①交流励磁机和副励磁机与发电机同轴,是独立的励磁电源,不受电网干扰,可靠性高。②交流励磁机时间常数较大,为了提高励磁系统快速响应,励磁机转子采用叠片结构,以减小其时间常数和因整流器换相引起的涡流损耗;频率采用 100Hz 或 150Hz,因为 100Hz 叠片式转子与相同尺寸的 50Hz 实心转子相比,励磁机时间常数可减小约一半。交流副励磁机频率为 400 ~ 500Hz。③同轴交流励磁机、副励磁机加长了发电机主轴的长度,使厂房长度增加,因此造价较高。④仍有转动部件,需要一定的维护工作量。⑤一旦副励磁机或自励恒压调节器发生故障,均可导致发电机组失磁。如果采用永磁发电机作为副励磁机,不但可以简化调节设备,而且励磁系统的可靠性也可大为提高。

2. 交流励磁机旋转整流器励磁系统(无刷励磁)

交流励磁机励磁系统是国内运行经验最丰富的一种系统,但它有一个薄弱环节—滑环。滑环是一种滑动接触元件,随着发电机容量的增大,转子电流也相应

增大，这给滑环的正常运行和维护带来了困难。为了提高励磁系统的可靠性，就必须设法取消滑环，使整个励磁系统都无滑动接触元件，即所谓无刷励磁系统。

无刷励磁系统的原理：它的副励磁机是永磁发电机，其磁极是旋转的，电枢是静止的，而交流励磁机正好相反。交流励磁机电枢、硅整流元件、发电机的励磁绕组都在同一根轴上旋转，所以它们之间不需要任何滑环与电刷等滑动接触元件，这就实现了无刷励磁。

无刷励磁系统没有滑环与炭刷等滑动接触元件，转子电流不再受接触元件技术条件的限制，因此特别适合大容量发电机组。此种励磁系统的性能和特点有：
①无炭刷和滑环，维护工作量可大为减少。②发电机励磁由励磁机独立供电，供电可靠性高。并且由于无刷，整个励磁系统可靠性更高。③发电机励磁控制是通过调节交流励磁机的励磁实现的，因而励磁系统的响应速度较慢。为提高其响应速度，除前述励磁机转子采用叠片结构外，还采用减小绕组电感、取消极面阻尼绕组等措施。另外，在发电机励磁控制策略上还采取相应措施—增加励磁机励磁绕组峰值电压，引入转子电压深度负反馈以减小励磁机的等值时间常数。④发电机转子及其励磁电路都随轴旋转，因此在转子回路中不能接入灭磁设备，发电机转子回路无法实现直接灭磁，也无法实现对励磁系统的常规检测（如转子电流、电压，转子绝缘，熔断器熔断信号等），必须采用特殊的检测方法。⑤要求旋转整流器和快速熔断器等有良好的机械性能，能承受高速旋转的离心力。⑤因为没有接触部件的磨损，也就没有炭粉和铜末引起的对电机绕组的污染，故电机的绝缘寿命较长。

（二）自励交流励磁机励磁系统

与自励直流励磁机一样，自励交流励磁机的励磁电源也是从本机直接获得的。所不同的是，自励直流励磁机为了调整电压需要用一个磁场电阻；而自励交流励磁机为了维持其端电压恒定，则改用了可控整流元件。

1. 自励交流励磁机静止可控整流器励磁系统

发电机 G 的励磁电流由交流励磁机 AE 经晶闸管整流装置 VS 供给。交流励磁机的励磁一般采用晶闸管自励恒压方式。励磁调节器 AVR 直接控制晶闸管整流装置。采用电子励磁调节器及晶闸管整流装置，其时间常数很小，与励磁方式相比，励磁调节的快速性较好。

2. 自励交流励磁机静止整流器励磁系统

这种励磁方式的原理：发电机 G 的励磁电流由交流励磁机 AE 经硅整流装置 U 供给，电子型励磁调节器控制晶闸管整流装置 VS，以达到调节发电机励磁的目的。其响应速度较慢，因为在这里还增加了交流励磁机自励回路环节，使动态响应速度受到影响。交流励磁机自并励方式使励磁系统结构大为简化，是汽轮发电机常用的励磁方式。

三、静止励磁系统（发电机自并励系统）

静止励磁系统（发电机自并励系统）中发电机的励磁电源不用励磁机，而由机端励磁变压器供给整流装置。这类励磁装置采用大功率晶闸管元件，没有转动部分，故称静止励磁系统。由于励磁电源是由发电机本身提供的，故又称为发电机自并励系统。

它由机端励磁变压器供电给整流器电源，经三相全控整流桥直接控制发电机的励磁。它具有明显的优点，被推荐用于大型发电机组，特别是水轮发电机组。国外某些公司把这种方式列为大型机组的定型励磁方式。我国已在一些机组上以及引进的一些大型机组上采用静止励磁方式。

静止励磁系统的主要优点有：①励磁系统接线和设备比较简单，无转动部分，维护费用低，可靠性高。②不需要同轴励磁机，可缩短主轴长度，这样可减小基建投资。③直接用晶闸管控制转子电压，可获得很快的励磁电压响应速度，可近似认为具有阶跃函数那样的响应速度。④由发电机端取得励磁能量。机端电压与机组转速的一次方成正比，故静止励磁系统输出的励磁电压与机组转速的一次方成比例。而同轴励磁机励磁系统输出的励磁电压与转速的平方成正比。这样，当机组甩负荷时静止励磁系统机组的过电压就低。

对于静止励磁系统，人们曾有过两点疑虑：

第一，静止励磁系统的峰值电压受发电机端和系统侧故障的影响，在发电机近端三相短路而切除时间又较长的情况下，不能及时提供足够的励磁，以致影响电力系统的暂态稳定。

第二，由于短路电流的迅速衰减，带时限的继电保护是否能正确动作。

国内外的分析研究和试验表明，静止励磁系统的缺点并非像原先设想的那么严重。对于大、中容量机组，由于其转子时间常数较大，转子电流要在短路 0.5s

后才显著衰减。因此，在短路刚开始的 0.5s 内静止励磁方式与他励方式的励磁电流是很接近的，只是在短路 0.5s 后才有明显差异。考虑到高压电网中重要设备的主保护动作时间都在 0.1s 之内，且都设双重保护，因此没有必要担心。至于接在地区网络的发电机，由于短路电流衰减快，继电保护的配合较复杂，要采取一定的技术措施以保证其正确动作。

静止励磁系统特别适宜用于发电机与系统间有升压变压器的单元接线中。由于发电机引出线采用封闭母线，机端电压引出线故障的可能性极小，设计时只需考虑在变压器高压侧三相短路时励磁系统有足够的电压即可。

第三节 励磁系统中转子磁场的建立和灭磁

事故情况下，系统母线电压极度降低，这说明电力系统无功功率的缺额很大。为了使系统迅速恢复正常，就要求有关的发电机转子磁场能够迅速增强，达到尽可能高的数值，以弥补系统无功功率的缺额。因此，在事故情况下，转子励磁电压的最大值及其磁场建立的速度（也可以说是响应速度）问题，是两个十分重要的指标，一般称之为强励顶值与响应比。强励顶值一般为额定励磁电压的 1.8 ~ 2 倍。当机端电压降低为额定电压的 0.8 ~ 0.85 倍时，强励装置动作，使励磁系统实行强行励磁。要使发电机强励的效果能够及时发挥，还必须考虑两个因素：一是励磁机的响应速度要快，即励磁机的时间常数要小；二是发电机转子磁场的建立速度要快，一般用励磁电压响应比来表示转子磁场建立的快慢。

当转子磁场已经建立起来后，如果由于某种原因（如发电机绕组内部故障等）需强迫发电机立即退出工作时，在断开发电机断路器的同时，必须使转子磁场尽快消失，否则发电机

会因过励磁而产生过电压，或者会使定子绕组内部的故障继续扩大。如何能在很短的时间内使转子磁场内存储的大量能量迅速消失，而不致在发电机内产生危险的过电压，这也是一个很重要的问题，一般称为灭磁问题。下面就讨论这两方面的问题。

一、强励作用及电压响应比

强励作用是强行励磁作用的简称。当系统发生短路性故障时，有关发电机的

端电压都会剧烈下降，这时励磁系统进行强行励磁，向发电机的转子回路送出远比正常额定值多的励磁电流，即向系统输送尽可能多的无功功率，以利于系统的安全运行，励磁系统的这种功能称为强励作用。强励作用有助于继电保护的正确动作，特别有益于故障消除后用户电动机的自启动过程，缩短电力系统恢复到正常运行的时间。因此，强行励磁对电力系统的安全运行是十分重要的。强励作用是自动调节励磁系统的一项重要功能，这里只介绍在直流励磁机系统使用的继电器强行励磁。

从改善电力系统运行条件和提高电力系统暂态稳定性来说，希望励磁功率单元具有较大的强励能力和快速的响应能力。因此在励磁系统中，励磁顶值电压和电压上升速度是两项重要的技术指标。

励磁顶值电压 U_{EFq} 是励磁功率单元在强行励磁时可能提供的最高输出电压值。该值与额定励磁电压 U_{EFN} 之比称为强励倍数。其值的大小涉及制造和成本等因素，一般取 $1.8 \sim 2$ 。

励磁电压上升速度是衡量励磁功率单元动态行为的一项指标，它与试验条件和所用的定义有关。具有直流励磁机的励磁系统，当励磁电压初值为发电机额定负载励磁电压时，阶跃建立励磁顶值电压（继电器强励装置动作）。

发电机的励磁绕组是一个电感性负载。为了简单起见，在忽略发电机转子电阻和定子回路对它影响的条件下，转子磁场方程可简化为

和定子回路对它影响的条件下，转子磁场方程可简化为

$$\Delta u_{EF}(t) = K \frac{d\Delta\Phi_G}{dt}$$

$$\Delta\Phi_G = \frac{1}{K} \int_0^t \Delta u_{EF}(t) dt$$

式中： $\Delta u_{EF}(t)$ 为励磁电压增量的时间响应， $\Delta\Phi_G$ 为转子磁通增量， K 为与转子参数有关的常数。

在暂态过程中，励磁功率单元对发电机运行产生实际影响的最主要的物理量是转子磁通增量 $\Delta\Phi_G$ ， U_{EF0} 为强行励磁初始值，取等于额定工况下的励磁电压值 U_{EFN} ，于是励磁电压响应比可以定义为

$$R_R = \left(\frac{U_c - U_b}{U_a} \right) / 0.5 = 2\Delta U_{bx}^* (1/s)$$

式中： ΔU_k^* 为电压标么值。

一般 U_a 为额定工况下的励磁电压，则 $\frac{U_{Eq}}{U_a}$ 为强励倍数。

励磁电压响应比粗略地反映了励磁系统的动态指标。用上升过程来定义励磁电压响应比，是因为在大多数情况下，人们对发电机强行励磁作用更为关注。其实，在暂态稳定过程中，励磁自动控制系统的减磁过程也同样重要。

现在一般大容量机组往往采用快速励磁系统。励磁系统电压响应时间（励磁电压达到 95% 顶值电压所需时间）为 0.1s 或更短的励磁系统，称为高起始响应励磁系统（或称快速励磁系统）。在这里，用响应时间作为动态性能评定指标。

由于励磁系统的强励倍数和电压上升速度涉及励磁系统的结构和造价等，所以在选择方案时应根据发电机在系统中的地位和作用等因素，提出恰当的指标以适应运行上的要求，过高的要求有时也未必合理。

二、转子回路的灭磁问题

（一）励磁绕组对恒定电阻放电灭磁

所谓灭磁就是将发电机转子励磁绕组的磁场尽快地减弱到最小。当然，最快的方式是将励磁回路断开，但由于励磁绕组是一个大电感，突然断开必将产生很高的过电压，危及转子绕组绝缘。所以，用断开转子回路的办法来灭磁是不恰当的。将转子励磁绕组自动接到放电电阻灭磁的方法是可行的。

很显然，对灭磁提出的第一个要求是灭磁时间要短，这是评价灭磁装置的重要技术指标。其次是灭磁过程中转子电压不应超过允许值，通常取额定励磁电压的 4 ~ 5 倍。

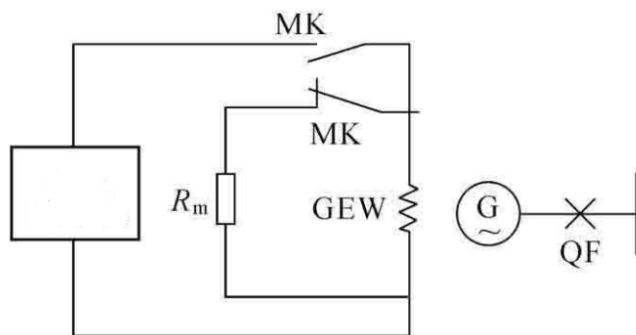


图 2-2 灭磁开关接线图

灭磁控制电路如图 2-2 所示。灭磁时，先给发电机转子绕组 GEW 并联一灭磁电阻 R_m 然后再断开励磁回路。有了 R_m 后，转子绕组 GEW 的电流就按照指数曲线衰减，并将转子绕组内的磁场能量几乎全部转变为热能，消耗在 R_m 上，因而使灭磁开关 MK 断开触头的负担大大减轻。

由于 $GEW - R_m$ 回路的电流是按指数衰减的，在灭磁过程中，转子绕组 GEW 的端电压始终与 R_m 两端的电压 e_m 相等，即

$$e_{GEW} = e_m = iR_m$$

式中： i 为灭磁回路的瞬时电流值。

e_{GEW} 的最大值为

$$e_{GEW0} = i_0 R_m$$

式中： i_0 为灭磁回路电流 i 的初始值。

这样在灭磁过程中， e_{GEW} 就是可以控制的了，其最大值与 R_m 的数值成正比。 R_m 值越大，衰减得越快，灭磁过程就越快，但 e_{GEW0} 也就越大； R_m 越小， e_{GEW0} 就越小，转子绕组比较安全，但灭磁过程就慢些。 R_m 的数值一般为转子绕组热状态电阻值的 4 ~ 5 倍，灭磁时间约为 5 ~ 7s。

（二）理想的灭磁过程

理想的灭磁过程，就是在整个灭磁过程中始终保持转子绕组 GEW 的端电压为最大允许值不变，直至励磁回路断开为止。由于

$$e_{GEW} = L_{GEW} \frac{di}{dt}$$

式中： L_{GEW} 为转子回路的电感。

使 e_{GEW} 不变，就是使 $\frac{di}{dt}$ 为一常数。这就是说，在灭磁过程中，转子回路的电流应始终以等速度减小，直至为零（而不是再按指数曲线减小）。

比如在转子最大允许电压值下（用 R_{GEW} 表示转子回路电阻； $e_{GEW \cdot N}$ 表示转子端电压的额定值），即在

$$R_m = (4 \sim 5) R_{GEW}$$

$$e_{GEW,0} = i_0 R_m = (4 \sim 5) e_{GEW \cdot N}$$

的条件下，灭磁速度越来越慢。磁场电流衰减的时间常数为

$$\tau = \frac{t_{GEW}}{(5 \sim 6)} = (0.167 \sim 0.2) t_{GEW}$$

式中： t_{GEW} 为转子本身的时间常数。

（三）交流励磁机系统的逆变灭磁

在交流励磁系统中（不论有无励磁机），如果采用了晶间管整流桥向转子供应励磁电流时，就可以考虑应用晶闸管的有源逆变特性来进行转子回路的快速灭磁。虽然对晶闸管的投资增加了，但在主回路内能不增添设备就可进行快速灭磁，也是其优点。

要保证逆变过程不致“颠覆”，逆变角 β 一般取 40° ，即 α 取 140° ，并有使 β 不小于 30° 的限制元件。其次，在逆变灭磁过程中，交流电源的电压不能消失。很明显，外加电压消失了，就不称其为有源逆变过程了。在这方面，外加电源为交流励磁机时，由于在逆变灭磁过程中，励磁机的端电压不变，所以灭磁过程就快，这样的逆变灭磁过程是一个理想的灭磁过程。而当励磁电压取自发电机端电压时，则随着灭磁过程的进行，发电机电压随之降低，灭磁速度也随之减慢，总过程不如交流励磁机的系统快，对于逆变灭磁，当逆变进行到发电机励磁绕组中的剩余磁场能量不能再维持逆变时，逆变便结束，通常将剩余的能量向并联的电阻放电，此时磁场电流已很小，直到转子励磁电流衰减到零，灭磁结束。因此在这种灭磁方式下，在发电机励磁回路中还装设有容量小、阻值较大的灭磁电阻。

第四节 励磁控制系统调节特性和并联机组间的无功分配

一、励磁调节器的基本特性

励磁调节器最基本的功能是调节发电机的端电压。常用的励磁调节器是比例式调节器，它的主要输入量是发电机端电压 U_G ，其输出用来控制励磁功率单元。

发电机如果没有自动励磁调节器，就只能依靠人工改变直流励磁机的磁场电阻 R_C 来调整其端电压。当运行人员发现发电机电压偏高，就进行增大 R_C 值的操作，减小励磁机的励磁电流 I_{EE} 随着励磁机电压 U_E 的下降，发电机励磁电流 I_{EE} 将减小，从而使发电机端电压下降。反之，当发电机电压偏低时，就进行减小 R_C 值的操作，使发电机端电压上升。

可见，在人工调节发电机电压的过程中，可以分解为测量、判断、执行三个步骤。

比例式励磁调节器就是依照上述步骤对发电机电压进行调节的，发电机电压

U_G 升高时, 调节器经测量后, 减小输出电流。当 U_G 降低时, 它的输出电流就增大。它与励磁机配合, 控制发电机的转子电流, 组成闭环控制回路, 实现对发电机端电压的自动调节。

控制理论是比例式自动励磁调节器共有的基本调节特性, 各类调节器都必须具有负斜率调节特性, 才能稳定运行。

二、励磁调节器的静态工作特性

静态工作特性的合成。电子模拟式励磁调节器由硬件实现其静态特性。在数字式励磁调节器中用软件算法实现, 下面从分析模拟式励磁调节器入手。

测量比较单元的工作输出电压 U'_{de} 和发电机电压 U_G 之间的关系为

$$U_{de} = K_1 (U_{REF} - U_G)$$

式中: K_1 为测量比较单元的放大倍数, U_{REF} 为发电机电压的整定值。

综合放大单元是线性元件, 在其工作范围内有

$$U_{SM} = K_2 U_{de}$$

式中: K_2 为综合放大单元的放大系数。

三相桥式全控整流电路采用具有线性特性的触发电路, 因此

$$U_{AVR} = K_4 \alpha = K_3 K_4 U_{SM}$$

式中: K_3, K_4 分别为移相触发和可控整流单元的放大倍数, α 为移相触发单元的控制角。

输入—输出单元特性: 将它与测量比较单元、综合放大单元特性相配合, 就可方便地求出励磁调节器的静态工作特性。

励磁调节器的特性曲线在工作区内的陡度, 是调节器性能的主要指标之一, 即

$$K = \frac{\Delta U_{AVR}}{U_{REF} - U_G}$$

式中: K 为调节器的放大倍数。

调节器放大系数 K 与组成调节器的各单元增益的关系为

$$K = \frac{\Delta U_{AVR}}{U_{REF} - U_G} = \frac{\Delta U_{de}}{U_{REF} - U_G} \times \frac{\Delta U_{SM}}{\Delta U_{de}} \times \frac{\Delta \alpha}{\Delta U_{SM}} \times \frac{\Delta U_{AVR}}{\Delta \alpha} = K_1 K_2 K_3 K_4$$

可见励磁调节器总的放大倍数等于各组成单元放大倍数的乘积。

三、励磁调节器静态特性的调整

对自动励磁调节器工作特性进行调整,主要是为了满足运行方面的要求。这些要求是:①保证并列运行发电机组间无功电流的合理分配,即改变调差系数;②保证发电机能平稳地投入和退出工作,平稳地改变无功负荷,而不发生无功功率的冲击现象,即上下平移无功调节特性。

由式 $K = \frac{\Delta U_{AVR}}{U_{REF} - U_G} = \frac{\Delta U_{de}}{U_{REF} - U_G} \times \frac{\Delta U_{SM}}{\Delta U_{de}} \times \frac{\Delta \alpha}{\Delta U_{SM}} \times \frac{\Delta U_{AVR}}{\Delta \alpha} = K_1 K_2 K_3 K_4$ 可见,发电机的调差系数决定于自动励磁调节系统总的放大倍数。实际上,一般自动励磁调节系统的总的放大倍数是足够大的,因而发电机带有励磁调节器时的调差系数一般都小于 1%,近似为无差调节。这种特性不利于发电机组在并列运行时无功负荷的稳定分配,因此发电机的调差系数要根据运行的需要,人为地加以调整,使调差系数加大到 3% ~ 5%。

当调差系数 $\delta > 0$, 即为正调差系数时,其调节特性下倾,即发电机端电压随无功电流增大而降低;当 $\delta < 0$, 即为负调差系数时,其调节特性上翘,即发电机端电压随无功电流增大而上升; $\delta = 0$ 称为无差特性,这时发电机端电压恒为定值。

在实际运行中,发电机一般采用正调差系数,因为它具有系统电压下降而发电机的无功电流增加的这一特性,这对于维持稳定运行是十分必要的。至于负调差系数,一般只能在大型发电机-变压器组单元接线时采用,这时发电机外特性具有负调差系数。但考虑变压器阻抗压降以后,在变压器高压侧母线上看,仍具有正调差系数。因此负调差系数主要是用来补偿变压器阻抗上的压降,使发电机—变压器组的外特性下倾度不致太厉害,这对于大型机组是必要的。

正、负调差系数可以通过改变调差接线极性来获得,调差系数一般在 $\pm 5\%$ 以内。调差系数的调节原理如下。

在不改变调压器内部元件结构的条件下,在测量元件的输入量中(有时改在放大元件的输入量中),除 U_G 外,再增加一个与无功电流 I_Q 成正比的分量,就获得了调整调差系数的效果。

测量单元的内部结构并未改变,其放大倍数仍为 K_1 , 只是将输入量改为 $U_G \pm K_\delta I_Q$, 于是测量输入变为

$$U_{REF} - (U_G \pm K_\delta I_Q) = \Delta U_G \mp K I_Q$$

由于测量单元的放大倍数 K_1 并未变化, 所以可适当选择系数 K_s , 就可以改变调差系数 δ 的大小。

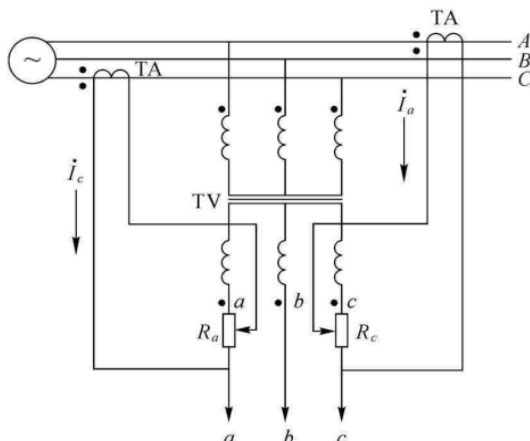


图 2-3 两相式正调差原理接线

在发电机电压互感器的二次侧, A 、 C 两相中分别串入电阻 R_a 和 R_c , 并且 R_a 和 R_c 是同轴调节的, 在 R_a 上引入 C 相电流 $\dot{I}_c$, 在 R_c 上引入 A 相电流 $\dot{I}_a$ 。这些电流在电阻上产生的压降与电压互感器二次侧三相电压按相位组合后, 送入测量单元的测量变压器。

在正调差接线时, 其接线极性为 $\dot{U}_a + \dot{I}_c R_a$ 和 $\dot{U}_c - \dot{I}_a R_c$ 。

四、自动励磁调节器的辅助控制

随着电力系统的发展, 发电机容量不断增大, 大容量发电机组对励磁控制提出了更高要求。例如, 在超高压电力系统中输电线路的电压等级很高, 此时输电线路的电容电流也相应增大。因此, 当线路输送功率较小时, 线路的容性电流引起的剩余无功功率使系统电压上升, 以致超过允许的电压范围。使发电机进相运行吸收剩余无功功率是一个比较经济的办法, 但发电机进相运行时, 允许吸收的无功功率和发出的有功功率有关, 此时发电机最小励磁电流值应限制在发电机静态稳定极限及发电机定子端部发热允许的范围内。为此, 在自动励磁装置中设置了最小励磁限制。又如, 对大容量发电机组由于系统稳定的要求, 励磁系统应具有高起始响应特性, 这对于带有交流励磁机的无刷励磁系统而言, 必须采取相应措施才能达到高起始响应特性。这些措施之一是提高晶闸管整流装置电压, 使发

电机励磁顶值电压大大超过其允许值。励磁电流过大，超过规定的强励电流会危及发电机的安全。为此，在调节器中都必须设置瞬时电流限制器以限制强励顶值电流。对励磁调节器这些功能的要求，由调节器的辅助控制完成。

辅助控制与励磁调节器在正常情况下的自动控制的区别是，辅助控制不参与正常情况下的自动控制，仅在发生非正常运行工况、需要励磁调节器具有某些特有的限制功能时起相应控制作用。

励磁调节器中的辅助控制对提高励磁系统的稳定性，提高电力系统的稳定性，以及保护发电机、变压器、励磁机的安全运行有极重要的作用。下面对几种常用的励磁限制功能做一些简述。

（一）瞬时电流限制和最大励磁限制

1. 瞬时电流限制

由于电力系统稳定性的要求，大容量发电机组的励磁系统必须具有高起始响应的性能。交流励磁机-旋转整流器励磁系统（无刷励磁）在通常情况下很难满足这一要求。唯有采用高励磁顶值的方法才能提高励磁机输出电压的起始增长速度。当加在励磁机励磁绕组上的励磁顶值电压 $U_{EEq2} > U_{EEq1}$ 时，对于同一时间 t_1 而言， $U_{E2} > U_{E1}$ ，即 U_{EEq} 之值越高，励磁机输出电压 U_E 的起始增长速度越快。这样，励磁系统的响应速度得到了改善。但是高值励磁电压将会危及励磁机及发电机的安全，为此，当励磁机电压达到发电机允许的励磁顶值电压倍数时，应立即对励磁机的励磁电流加以限制，以防止危及发电机的安全运行。

励磁调节器内设置的瞬时电流限制器检测励磁机的励磁电流，一旦该值超出发电机允许的强励顶值，限制器输出立即使励磁电流限制在 I_{fmax} 。

2. 最大励磁限制器

最大励磁限制是为了防止发电机转子绕组长时间过励磁而采取的安全措施。按规程规定，当发电机电压下降为额定电压的 80% ~ 85% 时，发电机励磁应迅速强励到顶值电流，一般为 1.6 ~ 2 倍额定励磁电流。由于受发电机转子绕组发热的限制，强励时间不允许超过规定值。制造厂给出的发电机转子绕组在不同励磁

为使机组安全运行，对过励磁应按允许发热时间运行，若超过允许时间，励磁电流仍不能自动降下来，则由最大励磁限制器执行限制功能，它具有反时限特性。

微型反时限特性可以由不同的数学模型来描述。最大励磁限制器主要有两个不同的设定值，一个是强励顶值电流限制值 $I_{f\max}$ ，另一个是连续运行允许的过热限制值 I_{fr} 。过热限制值由转子的等效过热时间常数 T_e 和转子的等效冷却时间常数 T_c 控制。那么励磁绕组最大允许的热能 $\Delta W_{\max}$ 为

$$\Delta W_{\max} = K_R I_{fr}^2 T_e$$

式中： K_R 为具有电阻量纲的比例系数。

同步发电机正常运行过程中，限制器不起作用。最大励磁电流限制器有效的控制点是强励顶值电流限制值 $I_{f\max}$ ，说明自动励磁调节器无论何时都能达到强励顶值电流。现在假定出现故障需要强励，只要励磁电流的实际值超出过热限制值，那么调节器就会启动一个过热电流积分器，它将电流偏差值 Δi^2 积分，即

$$\Delta W = K_R \int \Delta i^2 dt$$

式中： $\Delta i = I_F - I_{fr}$ ， I_F 为励磁电流的实际值， I_{fr} 为励磁电流过热限制值。

这个积分的结果与励磁电流超限引起的发热有关。如果励磁电流高于过热限制值一定时间，那么积分器的输出值 ΔW 将会增加。当积分器的输出值超过 $\Delta W_{\max}$ ，最大励磁电流限制器限制励磁电流从 $I_{f\max}$ 即减小到 I_{fr} 。如果励磁电流降到的过热限制值以下，那么积分器的输出将随着冷却时间常数 T_c 降低。

可见，当 $\Delta W < \Delta W_{\max}$ 时，励磁电流 I_F 限值为 $I_{f\max}$ ，调节器按恒励磁电流运行；当 $\Delta W \geq \Delta W_{\max}$ 时，励磁电流 I_F 限值为 I_{fr} ，调节器按恒励磁电流 I_{fr} 运行。励磁电流的设定值分别为 $I_{f\max}$ 和 I_{fr} 。

因此，离散化后的恒励磁调节数学模型为

$$\Delta U(KT) = K_{Rf} [I_{fREF}(KT) - I_F(KT)]$$

式中： K_{Rf} 为具有电阻量纲的比例系数， $I_{fREF}(KT)$ 根据限制条件分别用 $I_{f\max}$ 、 I_{fr} 代入。

如果系统中出现了另一个故障，强励电流在冷却时间结束前再次高于 I_{fr} ，那么在这个强励电流下所允许的时间显然比第一个故障中的时间短，因为将会较早地到达 $\Delta W_{\max}$ 值。如果冷却时间已经结束，那么限制器将允许励磁电流在强励时间段中保持在顶值水平。

（二）最小励磁限制器

同步发电机欠励磁运行时，由滞后功率因数变为超前功率因数，发电机从系统吸收无功功率，这种运行方式称为进相运行。吸收的无功功率随励磁电流的减

小而增加。发电机进相运行受静态稳定极限限制。

设发电机内电动势（励磁电动势）为 $\dot{E}_q$ ，负荷电流为 I ，发电机端电压为 $\dot{U}_G$ ，无穷大母线电压为 $\dot{U}$ ， X_d 为发电机同步电抗， $X_e = X_T + X_L$ ，为包括变压器和线路电抗的发电机外电抗。

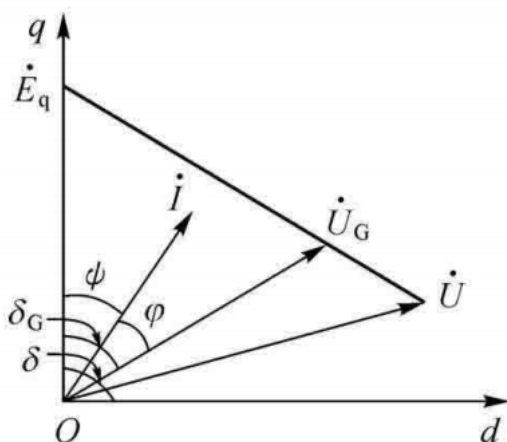


图 2-4 相量图

根据图 2-4 推导出进相运行时有功和无功功率的表达式为

$$P = U_G I \cos \varphi = U_G I \cos (\delta_G - \psi) = U_G I (\cos \delta_G \cos \psi + \sin \delta_G \sin \psi)$$

$$Q = U_G I \sin \varphi = U_G I \sin (\delta_G - \psi) = U_G I (\sin \delta_G \cos \psi - \cos \delta_G \sin \psi)$$

而

$$I \sin \psi = I_d = (U_G \cos \hat{\sigma}_G - U \cos \delta) / X_e$$

$$I \cos \psi = I_q = (U_G \sin \delta_G) / X_d$$

将式

$$I \sin \psi = I_d = (U_G \cos \hat{\sigma}_G - U \cos \delta) / X_e$$

$$I \cos \psi = I_q = (U_G \sin \delta_G) / X_d$$

代入式

$$P = U_G I \cos \varphi = U_G I \cos (\delta_G - \psi) = U_G I (\cos \delta_G \cos \psi + \sin \delta_G \sin \psi)$$

$$Q = U_G I \sin \varphi = U_G I \sin (\delta_G - \psi) = U_G I (\sin \delta_G \cos \psi - \cos \delta_G \sin \psi)$$

得

$$P_G = \frac{U_G^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta_G - \frac{U_G U}{X_e} \sin \delta_G \cos \hat{\sigma}$$

$$Q_G = \frac{U_G^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_d} \right) + \frac{U_G^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\delta_G - \frac{U_G U}{X_e} \cos \delta \cos \delta_G$$

当处于静稳极限时, $\delta = 90^\circ$, $\cos \delta = 0$, 则式子简化为

$$P_m = \frac{U_G^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

$$Q_m = \frac{U_G^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_d} \right) + \frac{U_G^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\delta_G$$

或

$$Q_m - \frac{U_G^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_d} \right) = \frac{U_G^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\delta_G$$

将式

$$P_m = \frac{U_G^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

两边平方后与式

$$Q_m - \frac{U_G^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_d} \right) = \frac{U_G^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\delta_G$$

两边平方后相加得到静稳状态下功率圆图方程为

$$P_m^2 + \left[Q_m - \frac{U_G^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 = \left[\frac{U_G^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_d} \right) \right]^2$$

发电机进相运行要考虑发电机定子端部发热在允许范围内。发电机由滞相转进相运行时, 转子电流减少, 吸收无功增加, 使定子端部合成磁通越来越大, 造成端部发热。现代大型汽轮发电机定子铁芯采用氢冷, 并在端部采取了防止局部发热的措施, 进相运行时定子端部铁芯及金属件温升一般不再是限制低励磁运行的主要因素。

(三) 电压 / 频率限制和保护

电压 / 频率限制器亦称磁通限制器, 它的作用是限制发电机端电压和频率的比值, 防止发电机及与其连接的主变压器由于电压过高和频率过低, 引起铁芯饱和发热。

交流电压 $U = kf\phi_m$, 所以 $\dot{\phi}_m = \frac{U}{kf}$ 。可见, 磁通量与机端电压 / 频率成正比, 所以 U_G / f_G 愈大, 发电机和变压器铁芯饱和愈严重, 而铁芯饱和, 励磁电流会增大, 造成铁芯发热加剧, 所以必须加以限制。

正常并网运行的发电机, U_G / f_G 比值一般不会超过允许值。引起电压过高和

频率过低的主要原因有以下几点：①发电机甩负荷或解列，电枢反应去磁作用减弱，因而使电压升高。②机组启动时，国内外都曾发生过发电机在转动前由于误操作投入的励磁开关，以致烧坏励磁绕组事故。③系统性事故导致频率降低。

（四）发电机失磁监控

发电机“失磁”是指发电机在运行中全部或部分失去励磁电流，使转子磁场减弱或消失。这是发电机运行过程中可能发生的一种故障运行状态。

造成发电机失磁的原因可能是由于励磁开关误跳闸、励磁机或晶闸管励磁系统元件损坏或发生故障、自动灭磁开关误跳闸、转子回路某处断线及误操作等。

发电机正常运行时，定子磁场和转子磁场同步旋转。失磁后，励磁电流逐渐衰减到零，原动机的驱动转矩使发电机加速，导致功 δ 加大，发电机失步，进入异步发电运行状态。

发电机在异步运行下，在向系统送出有功功率的同时，还从系统吸收无功功率，对系统和发电机本身产生如下不良影响：①发电机失步，在转子和励磁回路中产生差频电流，使转子铁芯、转子绕组及其他励磁回路产生附加损耗，引起过热。转差越大，过热越严重。②正常运行时，发电机要向系统输出无功功率；失磁后，要从系统吸收无功功率。如果系统无功功率储备不足，将引起系统电压下降，甚至造成因电压崩溃而使系统瓦解。③其他发电机会力图补偿上述无功功率差额，容易造成过电流。如果失磁的是一台大容量发电机，则承担补偿无功功率的发电机过电流就更严重。

汽轮发电机组异步功率比较大，调速器也较灵敏，因此当发电机超速时，调速器会立即关小气门，使汽轮机的输出功率和发电机的异步功率很快达到平衡，可在较小的转差下稳定运行。而水轮机组，因其异步功率较小，在较大的转差下才能达到功率平衡。

在实际运行中，水轮发电机一般不允许失磁运行。汽轮发电机失磁后，适当降低其有功功率输出，在很小的转差下，可以异步运行一段时间（例如10 ~ 30min），使运行、调度人员有一段时间来排除失磁故障、采取措施恢复励磁，尽量减少对电力系统运行和用户供电的影响。但是否允许其异步运行，还应根据电力系统具体情况而定。大型机组失磁的后果是很严重的，机组本身的热容量相对较小，无励磁运行的能力也较低，系统很难提供所需的无功功率，因此，大型机组通常不允许失磁运行。

大机组大多配置有失磁保护，现代发电机组励磁系统中都设置了失磁监视功能。

第五节 励磁系统稳定器

一、励磁控制系统的传递函数

为了分析励磁自动控制系统的动态特性及其对电力系统稳定性的影响，应首先列出控制系统各个单元的传递函数。

（一）励磁机的传递函数

励磁机有直流励磁机和交流励磁机两类。直流励磁机有他励和自励两种方式，描述它们的动态特性方程式是不同的。现以他励直流励磁机为例，说明传递函数的推导过程。

励磁调节器的输出加于励磁绕组输入端，输出为励磁机电压 u_E 。励磁机励磁绕组两端的电压方程为

$$\frac{d\lambda_E}{dt} + R_E i_{EE} = u_{EE}$$

式中： λ_E 为励磁机励磁绕组的磁链， R_E 为励磁机励磁绕组的电阻， i_{EE} 为励磁机励磁绕组的电流， u_{EE} 为励磁绕组的输入电压。

用磁通 ϕ_E 代换磁链 λ_E ，并且假定磁通与 N 匝键链，则可得

$$N \frac{d\phi_E}{dt} + R_E i_{EE} = u_{EE}$$

只要把 ϕ_E, i_{EE} 用 u_{EE} 表示，就可求得励磁机电压 u_E 与 u_{EE} 之间的微分方程式。由于励磁电流 i_{EE} 与励磁机电压 u_E 之间是非线性关系，通常采用励磁机的饱和特性曲线来计及其饱和影响。定义饱和函数为

$$S_E = \frac{I_A - I_B}{I_B}$$

于是可写出

$$\begin{aligned} I_A &= (1 + S_E) I_B \\ E_A &= (1 + S_E) E_B \quad \text{w} \end{aligned}$$

S_E 随运行点而变，它是非线性的，在整个运行范围内可用某一线性函数来

近似表示。如果气隙特性的斜率是 $1/G$ ，则可写出励磁机电压与励磁电流间的关系式，即

$$i_{EE} = Gu_E(1 + S_E) = Gu_E + Gu_E S_E$$

在恒定转速下，电压 u_E 、 ϕ_E 磁通与气隙磁通 ϕ_a 成正比，即

$$u_E = K\phi_u$$

$$\phi_E = \sigma\phi_a$$

式中： σ 为分散系数，取 $1.1 \sim 31.2$ 。

将式 $i_{EE} = Gu_E(1 + S_E) = Gu_E + Gu_E S_E$ 、 $u_E = K\phi_u$ 、 $\phi_E = \sigma\phi_a$ 代入式

$$N \frac{d\phi_E}{dt} + R_E i_{EE} = u_{EE}$$

得

$$T_E \frac{du_E}{dt} = u_{EE} - R_E i_{EE} = u_{EE} - R_E Gu_E$$

表示为传递函数，则为

$$G_E(s) = \frac{u_E(s)}{u_{EE}(s)} = \frac{1}{T_E s + R_E G + R_E G S_E} = \frac{1}{T_E s + K_E + S'_E}$$

式中： $T_E = N\sigma / K$ ， $K_E = R_E G$ ， $S'_E = R_E G S_E$ 。

(二) 励磁调节器各单元的传递函数

励磁调节器主要由电压测量比较、综合放大及功率放大等单元组成。这里仍以电子模拟式励磁调节器电路为例，列出它们的传递函数。各种励磁调节器可能采用不同的元件，但可参照所介绍的方法求得它们的传递函数。

1. 电压测量比较单元的传递函数

电压测量比较单元由测量变压器、整流滤波电路及测量比较电路组成。测量比较电路可用一阶惯性环节来近似描述，传递函数可表示为

$$G_R(s) = \frac{U_{de}(s)}{U_G(s)} = \frac{K_R}{1 + T_R s}$$

式中： K_R 为电压比例系数； T_R 为电压测量回路的时间常数，由滤波电路引起，通常为 $0.02 \sim 0.06s$ 。

2. 综合放大单元的传递函数

综合放大单元在电子型调节器中由运算放大器组成，在电磁型调节器中则采用磁放大器。它们的传递函数通常都可视为放大系数为 K_A 的一阶惯性环节，其

传递函数为

$$G_A(s) = \frac{K_A}{1 + T_{As}}$$

式中： K_A 为电压放大系数， T_A 为放大器的时间常数。

对于运算放大器，由于其响应快，可近似地认为 $T_A = 0$ 。此外，放大器具有一定的工作范围，输出电压 U_{SM} 范围为

$$U_{SM\min}, u_{SM}, U_{SM\max}$$

3. 功率放大单元的传递函数

电子型励磁调节器的功率放大单元是晶闸管整流器，由于晶闸管整流元件工作是断续的，因而它的输出与控制信号间存在着时滞。通过分析可得最大可能滞后时间可确定为

$$T_z = \frac{1}{mf}$$

式中： m 为整流电路控制的相数， f 为电源的频率。

按上述分析可以得到晶闸管整流电路输出电压的方程为

$$u_d = K_z u_{SM}(t - T_z)$$

式中： K_z 为 u_d 和 u_{SM} 之间的放大系数， u_d 为输出平均电压， u_{SM} 为触发器控制电压。

（三）同步发电机的传递函数

要仔细分析同步发电机的传递函数是相当复杂的，但如果我们只研究发电机空载时励磁控制系统的有关性能，则可对发电机的数学描述进行简化。发电机的传递函数可以用一阶滞后环节来表示。若忽略饱和现象，则得同步发电机的传递函数为

$$G_G(s) = \frac{K_G}{1 + T'_{d0}s}$$

式中： K_G 为发电机的放大倍数， T'_{d0} 为发电机空载时的时间常数。

二、励磁自动控制系统的稳定性

对任一线性自动控制系统，求得其传递函数后，可根据特征方程式，按照稳定判据来确定其稳定性。当系统稳定性不满足要求时，须采用适当的校正措施加以改善。在这方面根轨迹法是较为有用的方法，利用它能迅速地获得近似的结果。

为了得到高阶系统动态特性的精确结果，也可列出状态方程，直接求解系统的特征值。随着计算机应用的普及，这种方法已得到了广泛的应用。

发电机空载条件下，励磁控制系统的稳定性是励磁调节器工作的先决条件。根据励磁控制系统的传递函数，对系统的稳定性分析可以有多种方法，这里运用根轨迹法对典型机组的空载稳定性进行剖析。

（一）典型励磁控制系统的稳定性计算

设某励磁控制系统的参数如下：

$$T_A = 0s, T'_{d0} = 8.38s, T_E = 0.69s, T_R = 0.04s, K_E = 1, K_G = 1$$

系统的开环传递函数为

$$G(s)H(s) = \frac{4.32K_A K_G K_R}{(s + 0.12)(s + 1.45)(s + 25)}$$

运用自动控制原理课程所学知识，易得：

开环极点为 $s = -0.12, s = -1.45, s = -25$ ，它们是根轨迹的起始点。

根轨迹渐近线与实轴的交点及倾角：

$$\sigma = -8.86, \beta = \frac{(2k+1)\pi}{3} (k = 0, \pm 1)$$

根轨迹在实轴上的分离点： $s = -0.775$ 。

与虚轴的交叉点： $\pm 6.28j$ 。

（二）励磁系统稳定器电路

模拟式励磁系统稳定器原理接线由一级微分放大器组成。励磁机磁场电流经分流器、直流变换器由端子 1 输入，经微分放大器获得励磁机磁场电流的速率信号。微分放大器的传递函数是

$$H(s) = \frac{R_6 + R_5}{R_6 + \alpha R_5} \times \frac{s(R_3 + R_4)C_1}{[1 + s(R_1 + R_2)C_1]} \quad (\alpha < 1)$$

从式子可知，改变电位器 R_1 、 R_3 （两者同轴且阻值相等），即可改变微分时间常数，其范围是 $0.2 \sim 2s$ 。而改变电位器 R_5 ，即可改变励磁系统稳定器的增益。

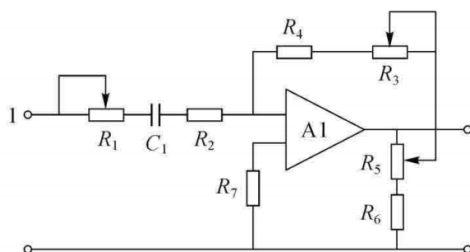


图 2-5 模拟式励磁系统稳定器原理接线图

A1 输出励磁机磁场电流速率信号到电压测量比较单元的输入端。当磁场电流跃增时,励磁系统稳定器输出正微分信号,使电压测量比较单元瞬时输出负信号去减弱励磁机磁场电流。反之,则增强励磁机磁场电流,而在稳态运行时励磁系统稳定器无输出。从而构成了软反馈,改善了系统的阻尼特性。

第六节 励磁自动控制系统对电力系统稳定的影响

一、励磁控制对电力系统静态稳定的影响

(一) 同步发电机的固有特性

所谓同步发电机的固有特性,是指不计励磁调节时发电机所具有的动态特性。

为了研究的方便,暂不考虑转子相位角变化所引起的去磁效应,即认为 $\Delta E'_q = 0$, 其特征方程为 $T_j s^2 + K_1 \omega_0 = 0$, 特征方程的根为

$$s = \pm j \sqrt{\frac{K_1 \omega_0}{T_j}}$$

十分明显, K_1 必须大于零,否则发电机就是不稳定的。当 $K_1 > 0$ 时,发电机处于稳定的边界。它的动态特性是振荡的,其振荡频率称为同步发电机的固有振荡频率,可以从方程直接求得。

(二) 计及励磁调节后的系统特性

现在进一步讨论励磁控制对电力系统静态稳定的影响。励磁调节器是通过改变 $\Delta E'_q$ 来改变转矩增量 ΔM 的,在框图上则表示为因变化而产生的转矩变化, G_e 代表励磁系统的传递函数。

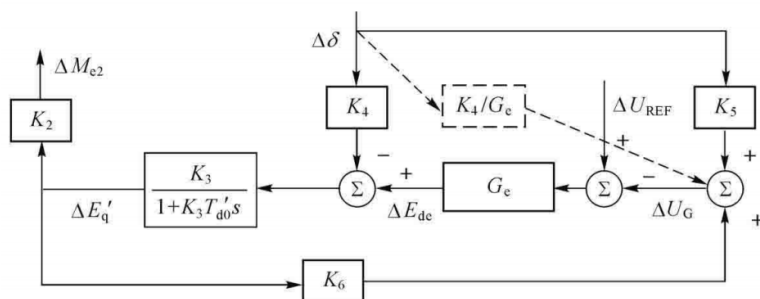


图 2-6 计及励磁系统发电机反馈传递函数

反馈回路的传递函数为

$$\frac{\Delta M_e(s)}{\Delta \delta(s)} = -\frac{K_2 G_3 (K_t + K_5 G_e)}{1 + G_3 G_e K_6}$$

式中: $G_3 = K_3 / (1 + K_3 T_{d0}' s)$ 。

图 2-6 所示整个系统的闭环传递函数为

$$\frac{\Delta \delta(s)}{\Delta M_e(s)} = \frac{\omega_0 (1 + G_3 G_e K_6)}{(T_j s^2 + K_1 \omega_0) (1 + G_3 G_e K_6) - K_2 G_3 \omega_0 (K_4 + K_5 G_e)}$$

由闭环传递函数可得系统的特征方程为

$$T_j T_{d0}' s^3 + T_j \left(\frac{1}{K_3} + G_e K_6 \right) s^2 + K_1 T_{d0}' \omega_0 s + K_1 K_6 \omega_0 G_e + \frac{K_1 \omega_0}{K_3} - K_2 K_4 \omega_0 - K_2 K_5 \omega_0 G_e = 0$$

在快速励磁控制系统中, K_e 的值较大, 而时间系数 T_e 很小, 以 $G_e = K_e$ 代入式

$$T_j T_{d0}' s^3 + T_j \left(\frac{1}{K_3} + G_e K_6 \right) s^2 + K_1 T_{d0}' \omega_0 s + K_1 K_6 \omega_0 G_e + \frac{K_1 \omega_0}{K_3} - K_2 K_4 \omega_0 - K_2 K_5 \omega_0 G_e = 0$$

并写成一般形式, 式子转化成

$$a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = 0$$

式中: a_0, a_1, a_2, a_3 与式子各相应项的系数对应。

二、改善电力系统稳定性的措施

在远距离输电系统中, 励磁控制系统会减弱系统的阻尼能力, 引起低频振荡。其原因可以归结为两条: ①励磁调节器按电压偏差比例调节; ②励磁控制系统具有惯性。

当输电线路负荷较重、转子相位角发生振荡时, 由于励磁调节器是采用按电压偏差比例调节方式, 所以提供的附加励磁电流的相位具有使振荡角度加大的趋势。但是, 励磁调节器维持电压是发电机运行中对其最基本的要求, 又不能取消其维持电压的功能。研究表明, 采用电力系统稳定器 (PSS) 去产生正阻尼转矩以抵消励磁控制系统引起的负阻尼转矩, 是一个比较有效的办法。

第三章 电力系统频率及有功功率的自动调节

第一节 电力系统的频率特性

一、负荷的调节效应

当系统频率变化时，整个系统的有功负荷也要随之改变，这种有功负荷随频率而改变的特性叫作负荷的功率—频率特性，是负荷的静态频率特性，也称为负荷的调节效应。

电力系统的负荷由各种用电设备组成。电阻性负荷，比如电灯和加热设备，消耗的电能与频率无关。电机负荷对频率的变化比较敏感，其敏感程度取决于驱动设备的功率—频率特性的总和。综合负荷的功率—频率特性近似表示为

$$P_L = P_{LN} (a_0 + a_1 f_N^1 + a_2 f_N^2 + a_3 f_N^3)$$

式中： P_{LN} 额定频率时负荷功率；

a_0, a_1, a_2, a_3 与频率的 0、1、2、3 次方成正比的负荷占比， $a_0 + a_1 + a_2 + a_3 = 1$ ；

P_L 系统综合负荷。

频率上升时，负荷需求功率随之增加，阻止频率的上升；频率下降时，负荷需求功率跟着降低，抑制频率的下降。负荷的频率效应起到减轻系统能量不平衡的作用，其可用负荷曲线斜率 δ 进行描述，称为负荷的频率调节效应系数。电力系统运行频率变化的范围很小，可以用基准功率处的斜率表示负荷的静态频率特性。

二、发电机组的功率—频率特性

（一）调差系数

发电机组转速的调节是由原动机的调速系统来实现的。因此，发电机组的功率—频率特性取决于调速系统的特性。当系统的负荷变化引起频率改变时，发电机组的调速系统工作，改变原动机进汽量（或进水量），调节发电机组的输入功率以适应负荷的需要。通常把由于频率变化而引起发电机组输出功率变化的关系

称为发电机组的功率—频率特性或调节特性。

(二) 调节特性的失灵区

实际上, 由于测量元件的不灵敏性, 对微小的转速变化没有反应, 特别是机械式调速器尤为明显。这就是说, 调速器具有一定的失灵区, 因而调节特性实际上是一条具有一定宽度的带状区。

失灵区的宽度可以用失灵度 ε 来描述, 即

$$\varepsilon = \frac{\Delta f_w}{f_N}$$

式中: Δf_w 调速器的最大频率呆滞。

由于调速器的频率调节特性是带状区, 因此导致并联运行的发电机组间有功功率分配产生误差。由失灵区产生的分配功率上的误差为

$$\Delta P_w = \frac{\varepsilon}{R}$$

由式 $\Delta P_w = \frac{\varepsilon}{R}$ 可知, ΔP_w 与失灵度 ε 成正比, 与调差系数 R 成反比。过小的调差系数将会引起较大的功率分配误差, 所以 R 不能太小。

还必须指出, 失灵区的存在虽然会引起一定的功率误差或频率误差, 但是, 如果失灵区太小或完全没有, 那么当系统频率发生微小波动时, 调速器也要调节, 这样会使阀门的调节过分频繁, 因而在一些非常灵敏的电液调速器中, 通常要采用外加措施, 形成一个人为的失灵区。

通常, 汽轮发电机组调速器的失灵区为基准频率的 0.1%-0.5%, 水轮发电机组调速器的失灵区为基准频率的 0.1% ~ 0.7%。

第二节 调频与调频方程式

一、有差调频法

有差调频法指用有差调频器并联运行, 达到系统调频的目的的方法。有差调频器的稳态工作特性可以用下式表示:

$$\Delta f + R\Delta P_{ref} = 0 (\Delta f = f - f_N)$$

式中: Δf 调频过程结束时系统频率的增量;

ΔP_{ref} 调频机组有功功率设定值的增量;

R 有差调频器的调差系数。

应该明确，只有稳态方程式 $\Delta f + R\Delta P_{\text{ref}} = 0 (\Delta f = f - f_N)$ 得到满足时，调频器才结束其调节过程。调频器的调节是向着满足式 $\Delta f + R\Delta P_{\text{ref}} = 0 (\Delta f = f - f_N)$ 的方向进行的，下面根据式 $\Delta f + R\Delta P_{\text{ref}} = 0 (\Delta f = f - f_N)$ 来分析装有有差调频器的发电机组的工作情况。先假定发电机组工作的点 1，其对应的系统频率为 f_1 ，发电机组功率为 $P_{\text{ref}1}$ 。这时满足式 $\Delta f + R\Delta P_{\text{ref}} = 0 (\Delta f = f - f_N)$ ，

即 $\Delta f_1 + R\Delta P_{\text{ref}1} = 0$ ($\Delta f_1 < 0, \Delta P_{\text{ref}1} > 0$)。现在系统负荷增加了，则系统频率低于 f_1 ，式 $\Delta f + R\Delta P_{\text{ref}} = 0 (\Delta f = f - f_N)$ 左端出现了负值，破坏了原有的平衡状态，于是调频器就向满足式 $\Delta f + R\Delta P_{\text{ref}} = 0 (\Delta f = f - f_N)$ 的方向进行调节，使 ΔP_{ref} 获得新的正值，即增加进入机组的动力元素，直至式 $\Delta f + R\Delta P_{\text{ref}} = 0 (\Delta f = f - f_N)$ 重新得到满足时，调节过程才能结束。

用调频方程式 $\Delta f + R\Delta P_{\text{ref}} = 0 (\Delta f = f - f_N)$ 来分析有差调频机组并联调频时的优缺点。

当系统中有 n 台机组参加调频，每台机组各配有一套式 $\Delta f + R\Delta P_{\text{ref}} = 0 (\Delta f = f - f_N)$ 表示的有差调频器时，全系统的调频方程式可用下面的联立方程组来表示：

$$\begin{cases} \Delta f + R_1 \Delta P_{\text{ref}1} = 0 \\ \Delta f + R_2 \Delta P_{\text{ref}2} = 0 \\ \vdots \\ \Delta f + R_n \Delta P_{\text{ref}n} = 0 \end{cases}$$

式中： Δf 系统的频率增量；

R_i 第 i 台机组调频器的调差系数；

$\Delta P_{\text{ref}i}$ 第 i 台机组的有功功率增量（调频功率）。

设系统的负荷增量（即计划外的负荷）为 ΔP_L ，则调节过程结束时，必有

$$\Delta P_L = \Delta P_{\text{ref}1} + \Delta P_{\text{ref}2} + \cdots + \Delta P_{\text{ref}n} = -\Delta f \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \right) = -\frac{\Delta f}{R_x}$$

其中

$$R_x = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}}$$

是系统的等值调差系数。

式

$$\begin{cases} \Delta f + R_1 \Delta P_{\text{ref}1} = 0 \\ \Delta f + R_2 \Delta P_{\text{ref}2} = 0 \\ \vdots \\ \Delta f + R_n \Delta P_{\text{ref}n} = 0 \end{cases}$$

也可以写为

$$\Delta f + R_x \Delta P_{\text{ref}} = 0$$

将式 $\Delta f + R_x \Delta P_{\text{ref}} = 0$ 代入式

$$\begin{cases} \Delta f + R_1 \Delta P_{\text{ref}1} = 0 \\ \Delta f + R_2 \Delta P_{\text{ref}2} = 0 \\ \vdots \\ \Delta f + R_n \Delta P_{\text{ref}n} = 0 \end{cases}$$

可以求得每台调频机组所承担的计划外负荷为

$$\Delta P_{\text{ref}i} = \frac{R_x}{R_i} \Delta P_L = \frac{\Delta P_L}{R_i \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \right)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

各调频机组同时参加调频，没有先后之分式

$$\begin{cases} \Delta f + R_1 \Delta P_{\text{ref}1} = 0 \\ \Delta f + R_2 \Delta P_{\text{ref}2} = 0 \\ \vdots \\ \Delta f + R_n \Delta P_{\text{ref}n} = 0 \end{cases}$$

说明，当系统出现新的频率差值时，各调频器方程式的原有平衡状态被同时打破，因此各调频器都向着同一个满足方程式的方向进行调节，同时发出改变有功出力增量的命令。调频器动作的同时，可以在机组间均衡地分担计划外负荷，有利于充分利用调频容量。

计划外负荷在调频机组间按一定比例分配式

$$\Delta P_{\text{ref}i} = \frac{R_x}{R_i} \Delta P_L = \frac{\Delta P_L}{R_i \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \right)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

说明各调频器机组最终负担的计划外负荷部与其调差系数 & 成反比。要改变各机组间调频容量的分配比例，可以通过改变调差系数来实现。负荷的分配是可以控制的，这是有差调频器固有的优点。

频率稳定值的偏差较大式 $\Delta f + R\Delta P_{ref} = 0 (\Delta f = f - f_N)$ 说明有差调频器不能使频率稳定在额定值，负荷增量越大，频率的偏差值也就越大，这是有差调频器固有的缺点。例如系统的等值调差系数 $R_x = 3\%$ ，当计划外负荷 $\Delta P_L = 20\%$ 时，频率稳定值的偏差值 $\Delta f = 0.6\%$ ，即 0.3Hz ，大大超过自动调频的允许范围。

二、主导发电机法

为了克服有差调频的缺点，很自然地会想到运用无差调频器。无差调频器的调节方程式为

$$\Delta f = 0$$

无差调频器虽具有频率偏差值为零的优点，但无差调频器不能并联运行。为此，只可在一台主要的调频机组上使用无差调频器，而在其余的调频机组上均只安装功率分配器，这样的调频方法称为主导发电机法，其调节方程组为

$$\Delta f = 0 \quad (\text{发电机 } 1, \text{ 主导发电机})$$

$$\Delta P_{ref\ 2} = K_1 \Delta P_{ref\ 1} \quad (\text{发电机 } 2)$$

$$\Delta P_{ref\ n} = K_{n-1} \Delta P_{ref\ 1} \quad (\text{发电机 } n)$$

式中： $\Delta P_{ref\ i}$ 第 i 个调频发电机组的有功增量；

K_i 功率分配系数。

三、积差调频法（同步时间法）

积差调频法是一种现在用得比较普遍的调频方法，它兼有无差调频法和有差调频法的优点，即不但能够做到无差，并且能够做到调频没有先后之分。

积差调频法（或称同步时间法）是根据系统频率偏差的累积值进行工作的。为了对积差调频法获得一个明确的概念，可先研究一台发电机组积差调节的工作过程。一台发电机组积差调节的工作方程式为

$$\int \Delta f dt + K \Delta P_{ref} = 0 (\Delta f = f - f_N)$$

式中： K 调频功率比例系数。

四、改进积差调频法

当频率偏差较大时，调节速度就应该快些，为此，在频率积差调节的基础上增加频率瞬时偏差的信息，这样就得到了改进的频率积差调节方程式，即

$$\Delta f + R \left(\Delta P_{ref} + \int K \Delta f \Delta t \right) = 0$$

式中： ΔP_{ref} 发电机组功率设定值；

R 调差系数；

K 功率频率换算系数。

在式 $\Delta f + R \left(\Delta P_{ref} + \int K \Delta f \Delta t \right) = 0$ 中，可认为 $\int K \Delta f \Delta t$ 代表了系统计划外负荷的数值（ K 是一个换算系数）。上述概念也有利于说明积差调节过程中调速器与调频器的关系，当系统频率变化时，按 Δf 启动的调速器会比按积差工作的调频器先进行大幅度的调节，但远不会达到额定频率，到频差积累到一定值时，调频器会取代调速器的工作特性，使其按照积差调频的方程式进行调节。因此，一般称调速器的作用为一次调频，积差调频器的作用为二次调频。

改进的积差调频方法，是按照一定比例分配计划外负荷的。调频过程按下式进行：

$$\Delta f + R_i \left(\Delta P_{refi} + \alpha_i \int K \Delta f \Delta t \right) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

第三节 电力系统的经济负荷分配

电力系统的频率调节涉及系统中有功功率平衡和潮流分布。在保证频率质量和系统安全运行的前提下，如何使电力系统运行具有良好的经济性，这就是 EDC 的任务。它是联合自动调频的重要目标之一，因此也有人把 EDC 列为 AGC 功能的一部分，称之为 AGC/EDC 功能。可见，EDC 是按数学模型编制的程序，调用时需一定的时间开销，但它可以较 K 时间起动一次（一般在 5min 以上）。有人称 EDC 为三次经济调节。

一、等微增率分配负荷的基本概念

在一个大型互联电力系统中，目标是找到发电机组有功出力 and 无功出力的分配方案，使整个系统在保证安全稳定的情况下运行费用最小。通常，根据发电机容量和无功补偿容量，在保持整个系统良好运行的状态下，取一个目标函数的最小值。目标函数，又称成本函数，可表示经济成本、系统安全性或者其他目标。完善的无功功率计划兼顾经济运行和安全运行两项指标。

影响发电厂成本的因素有发电机组的运行参数、燃料成本、传输损耗等。系

统中发电效率高的发电厂成本不一定最小，因为它可能建在燃料费用高的地区。并且，如果发电厂建在离负荷中心较远的地方，传输损耗将很大，也降低了发电厂的经济性。因此，我们的任务是确定不同发电厂的发电机组的发电量，使整个电网的发电成本最低。发电厂的运行成本在系统经济负荷分配中起重要的作用。

发电燃料成本可以表示成有功功率的二次函数，即

$$C_i = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2$$

其中， α_i 、 β_i 、 γ_i 分别为第 i 台火电机组的燃料成本的常数项、一次项系数和二次项系数，其取值可从调度中心获取。

燃料成本曲线上某一点切线的斜率称为燃料成本微增率 λ ，有

$$\frac{dC_i}{dP_i} = 2\gamma_i P_i + \beta_i$$

燃料成本微增率可用来测量输出一定增量的功率需要增加多少费用。总的成本包括燃料成本、劳动力成本、供给成本和储存成本等。

等燃料成本微增率法则，就是运行的发电机组按微增率相等的原则来分配负荷，这样就可使系统总的燃料消耗（或费用）为最小，从而是最经济的方式。

二、不考虑网损时负荷的经济分配

忽略线路损耗，总的负荷需求 P_D 等于总的发电机有功出力。 C_i 是每一个发电厂的成本函数，并且是已知的。问题就转化成求每一个发电厂的有功功率，使目标函数

$$C_t = \sum_{i=1}^{n_g} C_i = \sum_{i=1}^{n_g} \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2$$

式中： C_t 为总的发电成本；

C_i 为第 i 个发电厂的发电成本；

P_i 为第 i 个发电厂的有功出力；

n_g 为发电厂的总数量。

最小，目标约束函数为

$$\sum_{i=1}^{n_g} P_i = P_D$$

式中： P_D 为总的负荷需求。

构造拉格朗日函数，把约束条件增加到目标函数中，有

$$L = C_t + \lambda \left(P_D - \sum_{i=1}^{n_g} P_i \right)$$

取极值的条件为偏导数为零，即

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$$

首先，由式 $\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0$ 得

$$\frac{\partial C_t}{\partial P_i} + \lambda(0-1) = 0$$

由于 $C_t = C_1 + C_2 + \cdots + C_{n_g}$ ，所以有

$$\frac{\partial C_t}{\partial P_i} = \frac{dC_i}{dP_i} = \lambda$$

因此，最优分配的条件变为

$$\frac{dC_i}{dP_i} = \lambda \quad i = 1, \cdots, n_g$$

或者

$$\beta_i + 2\gamma_i P_i = \lambda$$

再由式 $\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$ 得

$$\sum_{i=1}^{n_g} P_i = P_D$$

式

$$\sum_{i=1}^{n_g} P_i = P_D$$

是最初的等式约束条件。总的来说，当忽略线路损耗并且无发电机组出力限制的情况下，为使总费用最小，应按相等的燃料成本微增率在发电设备或发电厂之间分配负荷。

三、考虑网损时负荷的经济分配

在一个大的互联电力系统中，由于传输距离较长并且负荷密度较小，这时传输损耗是影响发电机组的最优分配的一个主要因素，在考虑最优分配问题时不能忽略线路损耗。经济分配问题目的是为了使总的发电成本 C_t 最小，为

$$C_t = \sum_{i=1}^{n_g} C_i = \sum_{i=1}^{n_g} a_i + b_i P_i + g_i P_i^2$$

式子的约束条件为发电出力，等于负荷与损耗的和

$$\sum_{i=1}^{n_k} P_i = P_D + P_L$$

构造拉格朗日函数为

$$L = C_t + l \left(P_D + P_L - \sum_{i=1}^{n_k} P_i \right)$$

最小值可由其偏导数为 0 时得到，即

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0, \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$$

由式 $\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$ 得第二个条件为

$$\sum_{i=1}^{n_E} P_i = P_D + P_L$$

由式 $\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0$ 得到第一个条件为

$$\frac{\partial C_t}{\partial P_i} + \lambda \left(0 + \frac{\partial P_L}{\partial P_i} - 1 \right) = 0$$

由于

$$C_1 = C_1 + C_2 + \cdots + C_{n_B}$$

所以有

$$\frac{\partial C_t}{\partial P_i} = \frac{dC_i}{dP_i}$$

因此，最优分配条件是

$$\frac{dC_i}{dP_i} + \lambda \frac{\partial P_L}{\partial P_i} = \lambda \quad i = 1, \cdots, n_g$$

其中， $\frac{\partial P_L}{\partial P_i}$ 是网损微增率。

一般情况下，式 $\frac{dC_i}{dP_i} + \lambda \frac{\partial P_L}{\partial P_i} = \lambda \quad i = 1, \cdots, n_g$ 子也可以写成下面的形式

$$\frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}} \frac{dC_i}{dP_i} = \lambda \quad i = 1, \cdots, n_g$$

或

$$L_i \frac{dC_i}{dP_i} = \lambda \quad i = 1, \cdots, n_g$$

其中， L_i 是发电厂 i 的惩罚因子，计算式为

$$L_i = \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}}$$

为了估计线路损耗，这里引入了一个惩罚因子，其值取决于发电厂的位置。式

$$L_i \frac{dC_i}{dP_i} = \lambda \quad i=1, \dots, n_g$$

表明获得最小成本的条件是，各个发电厂增量成本与其惩罚因子的积相等。

经济负荷分配没有考虑输电线路和变压器等设备的传输限制。但由于输电线路有发热，电压和传输稳定性问题，就不能不考虑输电线路的传输极限。一般来说，在经济负荷分配的功率情况下，输电线路的设计传输功率是完全满足要求的，不应该有任何过负荷的问题。最优潮流就是优化发电计划。它在考虑经济负荷分配的同时，也考虑潮流限制问题。

第四节 电力系统低频减负荷

一、概述

通常电力系统均具有热备用容量，正常运行时，如系统产生正常的有功缺额，可以通过对有功功率的调节来保持系统频率在额定值附近。但是在事故情况下，系统可能产生严重的有功缺额，因而导致系统频率大幅度下降。这是因为所缺功率已经大大超过系统热备用容量，系统已无可调出力以资利用，因此只能在系统频率降到某值以下时，采取切除相应用户的办法来减少系统的有功缺额，使系统频率保持在事故允许的限额之内，这种办法称为低频减负荷。

二、系统频率的事故限额

电力系统的频率是反映其有功功率是否平衡的质量指标。当系统的有功功率有盈余时，频率就会上升并超过额定频率 f_N ；当发送的有功功率有缺额时，频率就会下降至低于额定频率；当电力系统因事故而出现严重的有功功率缺额时，其频率也会随之急剧下降。频率降低较大对电力系统的运行是很不利的，有时甚至是十分有害的，主要表现在以下几个方面：

第一，系统频率降低使厂用机械的出力大为下降。厂用机械出力的下降，必然使系统所有发电机组的有功出力进一步降低，有时可能形成恶性循环，直至频率雪崩。

第二，系统频率降低使励磁机等的转速也相应降低。当励磁电流一定时，发送的无功功率会随着频率的降低而减少，运行经验说明，当频率降至 45Hz 时，系统的电压水平就会受到严重影响，可能造成系统稳定的破坏，使系统濒临崩溃。这种有功功率的严重缺额可能是由于一台或某几台起关键作用的发电机组因故退出工作而导致的。这说明发生在局部的或某个厂的有功电源方面的事故可能演变成整个电力系统的灾难，所以有功功率的平衡问题始终是系统调度工作的重要内容。

第三，电力系统频率变化对用户的不利影响主要表现在以下几个方面：①频率变化将引起异步电动机转速的变化，这些电动机驱动的纺织、造纸等机械产品的质量将受到影响，甚至出现残次品；②系统频率降低将使电动机的转速和功率降低，导致传动机械的出力降低；③国防部门和工业使用的测量、控制等电子设备将因为频率的波动而影响准确性和工作性能，频率过低时甚至无法工作。

第四，汽轮机对频率的限制。频率下降会危及汽轮机叶片的安全，因此一般汽轮机叶片的设计都要求其自然频率躲开它的额定转速及其倍率值。系统频率下降时，因机械共振造成过大的振动应力有可能使叶片损伤。容量在 300MW 以上的大型汽轮发电机组对频率的变化尤为敏感。

第五，频率升高对大发电机组的影响。电力系统因故障被解列成几个部分时，有的区域因有功功率严重缺额而造成频率下降，但有的区域却因有功功率过剩而造成频率升高，从而危及大机组的安全运行。

第六，频率降低对核能电厂的影响。核能电厂的反应堆冷却介质泵对供电频率有严格要求，如果不能满足，这些泵将自动断开，使反应堆停止运行。

综上所述，运行规程要求电力系统的频率不能长时间地运行在 49Hz 以下；事故情况下不能较长时间地停留在 47Hz 以下，瞬时值则不能低于 45Hz。所以在电力系统发生有功功率缺额的事故时，必须迅速断开相应的用户，使频率维持在运行人员可以从容处理事故的水平上，然后再逐步恢复到正常值。综上，UFLS 是电力系统一种有力的反事故措施。

三、最大功率缺额的确定

按上述原理工作的自动减负荷装置，必须保证在系统发生可能的最大功率缺额时，也能断开相应的用户，避免系统的瓦解，使频率趋于稳定。因此，确定最大功率缺额是减负荷装置正确动作的必要条件。

对系统中可能发生的最大功率缺额应作具体分析，有的按系统中断开最大容量的机组来考虑，有的要按断开发电厂高压母线来考虑，等等。如果系统有可能解列成几部分运行时，还必须考虑解列后各部分可能发生的最大功率缺额，这时整个系统的最大功率缺额应按各部分最大功率缺额之和来考虑，所以这是一项要从系统调度角度进行协调处理的任任务。

系统功率最大缺额确定以后，就可以考虑接在减负荷装置上的负荷的总数。因为在自动减载动作后，并不希望系统频率完全恢复到额定频率 f_N ，而是恢复到低于额定频率的某一频率数值 f_{hf} ，考虑负荷调节效应后，接在减负荷装置上的负荷总功率 P_{JH} 可以比最大缺额功率小些。根据负荷调节效应系数公式

$$\delta = \frac{(P_{f_{hf}} - P_{f_{he}}) / P_{f_{he}}}{(f - f_N) / f_N} = \frac{P_{f_{hf}}}{\Delta f^*} = \frac{\Delta P_{f_{hf}} \%}{\Delta f \%}$$

式中： $P_{f_{he}}, P_{f_{hf}}$ 为导致功率缺额事件发生前和发生后的系统总功率；

f 为事件发生后不采取任何控制措施时的系统稳态频率；

$P_{f_{hf}}, \Delta f^*$ 为事件发生前后系统功率和频率的标么值变化量；

$\Delta P_{f_{hf}} \%, \Delta f \%$ ：系统功率和频率变化量的百分比数值。

低频减负荷装置动作前后，假定系统的负荷调节效应系数不变，则由式

$$\delta = \frac{(P_{f_{hf}} - P_{f_{he}}) / P_{f_{he}}}{(f - f_N) / f_N} = \frac{P_{f_{hf}}}{\Delta f^*} = \frac{\Delta P_{f_{hf}} \%}{\Delta f \%}$$

可以得到

$$\frac{P_{qe} - P_{JH}}{P_x - P_{JH}} = \delta \frac{f_N - f_{hf}}{f_N} = \delta \Delta f_{hf}^*$$

或

$$P_{JH} = \frac{P_{qe} - \delta P_x \Delta f_{hf}^*}{1 - \delta \Delta f_{hf}^*}$$

式中： Δf_{hf}^* 为复频率偏差的相对值， $\Delta f_{hf}^* = \frac{f_N - f_{hf}}{f_N}$ ；

P_x 为减负荷前系统用户的总功率。

式 $P_{HI} = \frac{P_{qe} - \delta P_x \Delta f_{hf}}{1 - \delta \Delta f_{hf}}$ 中所有功率都是额定频率下的数值。

四、各轮动作频率的选择

一般第一轮动作频率选择要高一些，减负荷控制装置的效果就好一些。但是这样又可能在系统备用容量还未来得及发挥作用，而使系统频率暂时下降时，不必要地断开部分用户。一般的一轮动作频率整定在 49Hz 左右。

对高温高压火电厂，在频率低于 46Hz 时，厂用电已不能正常工作。在频率低于 45Hz 时，电压可能大量降低，严重时，可能使电力网瓦解。因此，自动减负荷装置最后一轮的动作频率最好不低于 46Hz。但是，对于备用容量充裕的火电系统和以水电为主的系统，如果必要，频率也允许稍低一些，但不应低于 45Hz。

在现代电力系统中，减负荷装置最后一轮动作后，系统频率不应低到使大机组跳闸的程度，以保证大机组的运行。关于最后一轮动作频率，由于大机组的要求，最后一轮动作频率应大于或等于 48Hz。

在一个实际的减负荷控制装置中，前后两级动作的时间间隔是受频率测量元件的动作误差和开关固有跳闸时间限制的。最严重的情况是前一轮频率继电器具有最大的负误差，后一轮频率继电器具有最大的正误差。考虑选择性（前一轮切除负荷后，如果频率不继续下降，则下一轮就不切除负荷）的最小频率误差为

$$\Delta f = 2\Delta f_{\sigma} + \Delta f_t + \Delta f_y$$

式中： Δf_{σ} 为频率继电器的最大误差；

Δf_t 为 Δt 时间内的频率变化，一般可取 0.15Hz；

Δf_y 为两级间留有的频率裕度，一般可取 0.05Hz。

五、特殊轮的功用与断开功率的选择

在自动减负荷装置动作的过程中，可能出现这样的情况：第 i 轮动作后，系统频率稳定在低于恢复频率的下限 $f_{hf} \cdot \min \cdot i$ ，但又不足以使 $i+1$ 轮减负荷装置动作。

系统频率长期低于 47Hz 是不允许的，为了使系统频率恢复到 $f_{hr} \cdot \min$ （一般可取 47Hz）以上，可采用带时限的特殊轮。特殊轮的动作频率 $f_{opts} = f_{hf \cdot \min}$ ，它是在系统频率已比较稳定时动作的，因此其动作时限可以取系统频率时间常数 T_f 的

2 ~ 3 倍，一般为 15 ~ 25s。特殊轮断开功率可按以下两个极限条件来选择：

第一，当倒数第二轮即 $n-1$ 轮动作后，系统频率不回升，反而降到最后一轮，即第 n 轮动作频率 f_{opn} 附近，但又不足以使第 n 轮动作时，则在特殊轮动作断开其所接用户功率后，系统频率应恢复到 $f_{hf} \cdot \min$ 以上，因此特殊轮应断开的用户功率为

$$\Delta P_{is} \% \dots \left(100 - \sum_{k=1}^{n-1} \Delta P_k \% \right) \frac{\delta(f_{hf} \cdot \min - f_{opn})}{f_N - \delta(f_N - f_{hf} \cdot \min)}$$

第二，当系统频率在第 i 轮动作后稳定在稍低于特殊轮的动作频率 f_{opts} 时，特殊轮动作并断开其用户后，系统频率不应高于 f_{hfo} ，因此

$$\Delta P_{is} \% \dots \left(100 - \sum_{k=1}^i \Delta P_k \% \right) \frac{\delta(f_{hf0} - f_{opts})}{f_N - \delta(f_N - f_{hff})}$$

只有按上式算出 $\Delta P_{is} \%$ 的小于式 $\Delta P_{is} \% \dots \left(100 - \sum_{k=1}^{n-1} \Delta P_k \% \right) \frac{\delta(f_{hf} \cdot \min - f_{opn})}{f_N - \delta(f_N - f_{hf} \cdot \min)}$ 的数值时才按后者选择 $\Delta P_{is} \%$ 。

第五节 电力系统频率控制技术体系

一、概述

为了能够使频率维持在目标值，需要对产生或者消耗的有功功率进行控制，以保障负荷和发电的平衡，正频率控制可以使有功功率备用补偿频率下降，负频率控制备用有助于降低频率。

使用三级频率控制来维持负荷和发电的平衡，一次调频是进行局部自动控制，调整有功功率的产生和消耗，进而在短时间内恢复负荷和发电的平衡，并抵消频率的变化。一次调频适用于严重的发电停运以及负荷停运后的调频控制，是促进电力系统频率稳定的最经济有效的方式，所有配置调速器的发电机均需要投入一次调频。需求侧也通过感应电机的频率敏感负荷的自动调节作用，或者给定频率阈值断开或连接负荷的频率继电器的动作，参与一次调频。

二次调频是集中式的自动控制，调节有功功率的产生以使系统频率能在扰动之后恢复到目标值。可以说，一次调频阻止了频率的持续下降，而二次调频则将

频率恢复到目标值。理想情况下,仅需要处于扰动发生区域的发电机参与二次调频,负荷不参与二次调频。不同于一次调频,二次调频不是必需的。因此,在仅应用一次调频以及三次调频的系统中,不需要进行二次调频。然而,由于手动控制维持联络线口子的效率较低,二次调频用于所有大型互联电力系统。

三次调频包括发电机组调度以及机组组合的手动调节。三次调频主要用来恢复一次和二次调频控制备用,管理输电网阻塞,负责在二次调频失败时将频率恢复到目标值。三次调频控制的某些方面涉及目标平衡的能源交易。

在一个大型的互联电力系统中,大扰动频率的恢复需要通过发电机组以及互联电力系统频率控制体系中的各组成部分来协调控制完成。除了电网三级调频手段之外,作为电网事故下的控制手段还有发电机频率异常保护以及电网第三道防线低频减负荷装置。

在满足电网频率控制目标的前提下,经过固定的控制策略规划,前面小节所述的电网频率调节手段就可以按照一定的动作流程构成完整的电力系统频率控制体系。因此,频率控制技术的具体实现主要体现为正常情况下的频率控制以及异常情况下的频率恢复,即交流互联电网的联络线偏差控制、机组一次调频、二次调频、事故情况下的发电机频率保护以及低频减负荷装置等。

二、电网频率控制体系控制目标

(一) 确定频率指标以及控制要求需考虑的因素

为了满足发电厂设备、用户设备以及电力系统正常运行的需要,需根据电力系统的运行特点提出频率指标以及控制要求,如准稳态频率、低频减负荷动作值、一次调频与二次调频的协调控制、频率偏差范围、事故响应要求等。为此需要考虑的问题有:

1. 基准频率和频率的正常范围

基准频率由设计决定,在各个电力系统中,所有的发电机以及用电设备都需要按在基准频率下运行效率最高的原则来设计。电力系统绝大部分时间运行在频率的正常控制范围之内。因此,确定频率的正常控制范围对电力系统的正常运行十分重要,如果放宽范围要求,则会降低对维持正常频率的辅助服务的要求,但是增加了电力系统发生故障时将频率维持在频率允许范围内的难度。

2. 确定频率的正常控制范围应当考虑三个因素

①对发电、用电设备的影响；②对于故障状态下频率允许范围的影响，电力系统发生故障时，频率不应当越出相应故障状态允许的范围；③对安全性和经济性的综合分析。

3. 故障状态下的频率允许范围

故障状态下的频率允许范围需要考虑的因素有：①不能影响发电、用电设备的正常运行；②不能影响发电、用电设备的安全性；③不能影响电力系统运行的安全性，即不能因为频率异常造成整个系统的解列。

4. 故障越限的允许时间

规定频率越限之后恢复到正常允许范围内的允许时间需要考虑的因素有：①频率越限的延续时间对旋转设备寿命的影响；②在频率越限故障处理期间发生第二次事件的危险性。如果发生第二次事件，可能会导致系统频率越出相应故障状态下的频率允许范围，从而产生切负荷装置动作等严重后果。

(二) 厂网协调频率控制策略

1. 一次调频

一次调频率是局部自动控制，调整有功功率的产生和消耗，从而快速恢复负荷和发电的平衡并抵消频率的变化。一次调频适用于严重的发电停运以及负荷停运后的频率稳定，因此它是电力系统频率稳定控制所需的手段。机组一次调频的参数设置会引起频率稳定控制作用的不同。当系统发生功率缺额时，系统频率将会降低。快速一次调频备用对于电网的频率稳定意义重大，机组的不同参数设定对于一次调频的效果有显著影响。因为互联的电力系统共享一次调频，因此，互联电网统一机组的一次调频参数设置十分重要。

2. 低频减负荷控制

低频减负荷装置是电网安全运行的第三道防线，其主要作用是在发生特重大事故引起有功功率的严重缺额，普通调频都不能发生作用时，能在系统频率崩溃之前，迅速按照之前定好的控制策略，切除部分负荷。确保系统的安全经济运行以及用户的不间断供电，使系统恢复有功功率的平衡，避免事故的进一步扩大。

3. 发电机频率保护

汽轮发电机的低频保护应当能记录并指示频率异常的累计运行时间，每个频率分别进行累计。按照相关规定，当频率异常保护需要动作于发电机解列的时候，

其低频段的动作频率以及延时应当注意与低频减负荷装置间的协调配合。一般情况下,应当能通过低频减负荷装置减少负荷,使得系统频率及时恢复。发电机仅在低频减负荷装置不起作用的情况下进行机组解列。因此,要求在进行低频减负荷的过程中不应低频解列,以防止出现频率的连锁恶化。核电厂的汽轮发电机以及水电厂的水轮机也都应满足以上要求。

(三) 第三道防线控制体系的实施要求

1. 合理设置负荷分区

电源以及负荷严重不平衡的地区,在大负荷的情况下,该地区即使有大量的低频/低压减负荷装置,也只能保留住小部分负荷;在小负荷的情况下,也会造成过切问题。合理分配负荷的供电分区,改善电力系统的网络拓扑结构,使可能形成孤网的区域内发电量和负荷量基本持平,对于提高低频减负荷装置的效率具有重要意义。

2. 合理配置协调孤网系统中的低频/低压减负荷装置

孤网系统往往需要同时配置低频减负荷系统和低压减负荷系统,因此如何在电网运行中优化低频减负荷和低压减负荷装置,改善控制策略,以最少的切负荷量带来最好的恢复效果具有重要意义。它应当在综合考虑暂态安全性以及长期动态可靠性的基础上进行的考虑。

目前的决策方法是在确定运行方式、系统参数以及典型故障的基础上,依靠积分试探以及工程经验进行的。为了保证控制效果,往往采用保守的过量控制方法。国内外提出的各种低频减负荷动作方案均假设动态过程中的母线频率相同,在简化的单机单负荷系统以及暂态过程模型,或者采用中长期动态模型忽略暂态过程。基于单机模型整定的方法有传统法、半适应法和自适应法等。单机模型的频率动态过程简单直观,但是忽略了机群的振荡以及动态过程中电压的影响。相对于长输电线路较多的大型电力系统来说,这种模型误差较大,且不能够直观反映不同用户的电能质量要求。基于多机系统的设计可以采用试凑法、非线性规划法、智能优化法以及基于实际受扰轨迹的优化方法。

关于低频减负荷和低压减负荷装置的优化控制策略应当考虑装置的布点、优先动作地点、轮次参数以及切负荷量的整定等。其中,布点的优化是整个策略的考虑前提。电网受到扰动后电压以及频率的摆动跌落都有复杂的分布特性。因此,只有在确定了每个装置布点的前提下,对其他参数的优化才有意义。由于系统在

不同工况以及扰动下的切负荷控制性能不同，需要考虑不同情景出现的概率。反馈控制的策略是多轮次的，每轮的动作参数中都包含信号的自启动值、延时和切负荷值。通过每一轮不同的参数整定可以尽量满足装置动作的选择性、经济性、可靠性和快速性要求。低频减负荷装置的启动信号分为实际频率值和频率变化率两种；低压减负荷装置的启动信号有电压、电压变化率和间接反映电压稳定性的信号等。通过切负荷信号的启动值以及延时的配合来达到多轮次减负荷的要求。如果某一轮的切负荷量过小，会影响电力系统的恢复过程，不能保证系统的安全运行，过大则会造成过切问题，引发负效应。

若地区发生严重的有功功率缺额且无功不足，则在发生暂态频率跌落的同时也会发生电压跌落，引起低频减负荷装置与低压减负荷装置同时动作，此时需要协调两者的动作时间、切负荷量以及闭锁条件等。

三、控制策略

（一）经典控制策略

经典控制策略主要研究系统运动的稳定性，时间域和频率域中系统的运动特性（见过渡过程、频率响应），控制系统的设计原理和校正方法（见控制系统校正方法）。

在涉及负荷频率控制的研究中，传统的控制策略为比例积分微分（PID）控制策略。二十世纪五十年代就已经创建了基于传递函数原理的互联网电力系统负荷频率控制模型，同时对比例积分控制也进行了一定探索。PID 控制策略作为最传统的控制策略之一，算法设计简洁，鲁棒性强且算法可靠性高的特点使其具有很高的实际应用价值。但是整个系统的动态性能的好坏在一定程度上取决于 PID 参数的优化和整定。例如，积分增益增大将导致超调量过大，调节时间相对来说较长，难以满足系统的动态性能指标。目前，可以优化 PID 控制器参数的算法主要有：基于模糊集合理论的模糊优化算法、基于内模控制算法的 PID 参数优化方法、基于进化算法的遗传算法优化（GA）、粒子群算法（PSOA）以及细菌觅食算法（BFOA）等，这些优化的技术理论不仅促进了智能控制算法水平的提高，也通过优化智能 PID 控制器的学习和适应能力扩大了其适用范围。这些控制方法可以使电力系统获得较好的动态响应，但是被控系统对控制性能有明确规定和要求时，上述整定优化算法常常难以同时考虑被控系统快速性、稳定性以及鲁棒

性等。

（二）自适应控制策略

对于更加复杂的互联电力系统，系统模型的阶次和需要调节的控制器参数个数大幅增长，因为高阶复杂的电力系统在建立模型时，系统模型以及参数近似是不可缺少的。因而，处理模型的不确定性、内外干扰的鲁棒性适应性是控制器设计中的重要问题。在实际工程应用中，被控对象或者过程的数学模型事先难以只用简单的数学模型来确定，条件改变之后，模型的动态参数甚至结构都会发生变化。针对拥有已知变化规律的简化电力系统模型，需要一种能够自动补偿模型阶次、参数以及输入信号变化的特殊控制。因此，近年来自适应控制策略被引入电力系统负荷频率控制中来解决此类问题。自适应控制系统，指的是根据控制对象本身参数或周围环境的变化，自动调整控制器参数以获得满意性能的自动控制系统。

自适应控制研究的电力系统通常是具有不确定性的系统，其中包含一些未知因素和随机因素。导致这些未知因素和随机因素的根源是简化包含全部可能因素的大型随机控制系统的非线性微分方程组式，形成只针对主要矛盾、次要矛盾等因素，而不考虑可完全忽略不计矛盾等建立数学模型。如果一个电力系统在结构参数和初始条件发生变化或目标函数的极值点发生变化时，能够自动调节并维持在最优工作状态，该自适应控制系统需要具备 3 个主要功能：决定控制应按何种法则进行修改；在线调整控制器的可变参数；在线测量性能指标或辨识对象的动态特性。

用于电力系统频率控制的自适应控制策略有三个显著特点：①控制器可调：与常规反馈控制策略的固定结构和参数不同，自适应控制策略使用的控制器在控制过程中根据自适应规则不断进行更改调整；②增加自适应回路：自适应控制系统在常规的系统基础上增加了自适应回路（又称自适应外环），用于根据系统的运行情况，自动调整以适应对象特征变化；③适用对象：自适应控制策略适用于被控对象特性不明确或者扰动变化过大的情况，同时要求经常保持高性能指标的电力系统，不需要完全确定被控对象的数学模型即可应用。

自适应控制策略可以使负荷频率控制系统的动态性能优良，但是其设计起来比较复杂，难以在实际工业中大范围推广。现阶段应用较多的是简单的比例积分（PI）自适应控制器，能够根据模型的状态和输出信息进行设计，将负荷频率控

制在较小的范围内,具有良好的鲁棒性和抗干扰性。

(三) 鲁棒控制策略

鲁棒控制方面的研究始于二十世纪五十年代。在过去的多年中,鲁棒控制一直是国际自控界的研究热点。所谓“鲁棒性”是指控制系统在一定(结构、大小)的参数摄动下,维持某些性能的特性。根据对性能的不同定义,可分为稳定鲁棒性和性能鲁棒性。以闭环系统的鲁棒性作为目标设计得到的固定控制器称为鲁棒控制器。

鲁棒控制的早期研究,主要针对单变量系统的在微小摄动下的不确定性,然而,实际工业过程中故障导致系统中参数的变化,这种变化是有界摄动而不是无穷小摄动,因此产生了以讨论参数在有界摄动下系统性能保持和控制为内容的现代鲁棒控制。现代鲁棒控制是一个着重控制算法可靠性研究的控制器设计方法,其设计目标是找到在实际环境中为保证安全要求,控制系统最小必须满足的要求。一旦设计好这个控制器,它的参数不能改变而且控制性能能够保证。

鲁棒控制方法适用于以稳定性和可靠性作为首要目标的应用,同时过程的动态特性已知且不确定因素的变化范围可以预估。飞机和空间飞行器的控制是这类系统的例子。

鲁棒控制策略考虑多区域互联电力系统较大的模型不确定性下的鲁棒性以及整个系统的全局稳定性。一般鲁棒控制策略是以一些最差的情况为基础,因此一般情况下电力系统并不工作在最优状态。

虽然上述控制策略可以使负荷频率控制系统取得较好的动态响应,但是系统的鲁棒性达不到系统要求并且控制器设计过于复杂,不易于工业应用。同时,鲁棒控制系统的设计要由高级专家完成。一旦设计成功,就不需太多的人工干预。另一方面,如果要升级或进行重大调整,系统就要重新设计。因此,研究一种控制算法设计简单又不完全依赖被控对象的模型、抗扰动性和鲁棒性强的控制策略,对于提高现有负荷频率控制系统的工程自动化水平以及促进控制理论的发展都有着十分重要的意义。

(四) 滑模变结构控制策略

滑模变结构控制也叫变结构控制,本质上是一类特殊的非线性控制,且非线性表现为控制的不连续性。这种控制策略与其他控制的不同之处在于系统的结构并不固定,而是可以在动态过程中,根据系统当前的状态(如偏差及其各阶导数等)

有目的地不断变化,迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动。由于滑动模态可以进行设计且与对象参数及扰动无关,这就使得滑模变结构控制具有快速响应、对应参数变化及扰动不灵敏、无须系统在线辨识、物理实现简单等优点。

滑模变结构控制涉及多个研究问题,并随着计算机、大型电子器件、大型电机和机器人技术的飞速发展,被广泛应用于大型电磁控制器设计、导弹制导律设计、智能电网设计及机器人控制等领域中。

滑模变结构控制在系统设计时,由于其滑动模态与受控对象参数扰动和系统内部参数摄动无关,使得滑模变结构控制有鲁棒性强、响应迅速、无须在线辨识以及物理建模简单等特性。近年来,这种设计策略在自动发电技术中广泛应用,主要通过频率控制系统中应用变结构控制技术来解决系统负荷频率控制中的暂态响应问题,但这些控制方法现在还停留在单区域或者两区域系统中,缺乏对多区域的互联系统的考虑,并且控制器设计起来比较复杂。

(五) 人工智能控制策略

本来客观存在着一个受控系统及其相关系统的数学模型,如果建立非线性数学模型,涉及不同的学科领域,不同的概念以及原理等,工作量和计算量巨大。而简化的非线性数学模型则会有大量的不确定性、随机性以及未知因素。

其中,以人工神经网络(FC)为代表的人工智能技术在近些年得到了迅猛发展,并逐渐开始广泛应用于电力系统。

人工神经网络具有逼近任何非线性函数的能力,运算速度快、容错性高、多输入多输出,利用具有多种变量的系统进行控制,能够自适应学习;可系统模拟动物脑进行信息处理、学习、联想、模式识别、记忆等功能。人工神经网络作为数学工具而用于控制律设计,该基于神经网络的控制技术能够解决非线性、不确定性、未知复杂系统的控制问题。

模糊控制是指根据经验进行设计的方法,以计算机模糊集合论、模糊语言变量以及模糊逻辑推理作为基础,以人的经验为依据制定系统的控制律,其控制律与运动状态以“对”“错”这种模糊变量作为判断结果,没有量化的标准。模糊控制系统的核心是模糊控制器的结构(包括模糊规则、合成推理算法以及模糊决策方法等因素),能够解决很多无法精确建模的系统控制问题。

在设计控制系统时,模糊控制不需要知道受控对象的精确模型,只需要建立相关操作人员的经验知识以及相关数据。其容错能力与鲁棒性较强,将数字变量

转化为直观的文字信息。模糊控制策略能够高度模拟人类思维，借助人类的工程经验进行大致推理。

近年来，模糊控制得到了广泛发展，针对模型不确定的控制对象也能够满足系统复杂的非线性任务要求。现在，模糊控制正在形成以下的控制算法：模糊—PID 复合控制、变结构模糊控制器、模糊 H 控制器、自适应模糊控制器、与神经网络相结合的模糊控制。近年来，模糊控制在电力系统中的应用越来越广泛，比较常见的是将模糊控制与 PI 控制相结合，得到的模糊 PI 控制器应用于电力系统频率控制体系。

四、电力系统稳定控制装置

电力系统发生事故时，突然造成了系统有功功率的不平衡，引起系统频率的剧烈变化，会破坏系统运行的稳定性。

负荷和电源之间有功功率的不平衡，会造成系统频率的急剧变化，威胁系统的安全运行。系统调度人员需要监视系统频率的变化并及时进行调度指挥。系统频率过高时，及时切除部分电源可以防止频率继续下降；系统频率过低时，可能会造成系统的崩溃，需要在保证尽可能多的用户供电的情况下尽量防止频率下降。在这种情况下，一方面要增加旋转备用容量的发电机的有功功率；另一方面，引入特殊的稳定控制装置，对故障切除时间进行加速，保证系统的暂态稳定性。也就是说，既要保证功率平衡使送端机组不至于加速而与系统失步，又要保证受端系统不至于功率缺额而导致电压、频率崩溃等恶性事故的发生。

电网的稳定控制系统经历了从普通继电器、微机型，到现在可以根据调度端能量管理系统（EMS）的信息识别运行方式，选取对应的匹配策略表并将其远传至厂站端的稳定控制装置的微机型稳定控制系统的发展过程。

（一）常规稳定装置

常规的稳定装置原理简单，主要包括保护装置的出口跳闸点、相应二次回路、收发信通道以及重动中间继电器等。二十世纪八十年代，因为网络结构薄弱、电网稳定性不强，电网基本依靠常规的稳定装置维持电网的安全稳定运行。常规的稳定装置主要分为以下几种：

①低频自启动发电机装置水轮机的辅助设备较为简单，机组控制自动化水平更高，一般都设有低频自启动装置。对于处在低频自启动备用状态的水轮发电机，

在系统频率下降到低频起动的整定值时，低频起动装置会自动起动发电机，并以自同期方式并入电力系统，这个过程可以在几十秒内将水轮发电机的转速上升到额定值，并接入负荷。燃气发电机也能够在规定时间内起动并投入电力系统。②低频调相改发电装置水轮发电机可以根据系统需要调相运行，此时的发电机不会产生有功功率。当系统的频率下降时，可以通过低频继电器起动这个装置，使处于调相运行的发电机迅速转为发电运行，此装置实际上是水轮发电机控制回路的一部分。③低频降低电压装置系统频率降低到一定程度上时，低频降低电压装置起动并调节变压器分接头，降低用户侧电压。负荷吸收的有功功率随之减小，可以借助负荷的调节作用缓解有功功率的供求不平衡，抑制系统频率下降。④低频抽水改发电装置在抽水蓄能水电厂，当系统的频率下降时，由于抽水蓄能发电机都是可逆的，发电机能够利用继电器从抽水运行方式变为发电运行方式。⑤自动低频减负荷装置自动低频减负荷装置是维持系统运行的最后一道防线，失灵就会造成系统的崩溃。为了保证厂用电，在发电机中设置低频自动解列装置，使一些发电机在系统频率下降到某个定值的时候自动和系统解列，专门带厂用电负荷以及部分重要负荷。⑥高频切机装置系统频率超过某一定值时，利用高频继电器起动，将部分运行的发电机退出运行，防止系统频率过高。⑦高频减出力装置系统频率超过某一定值时，暂时减小汽轮机主汽门或者水轮机导水叶的开放程度以减小发电机出力，故障切除之后可以再恢复出力。由此看出，高频减出力装置在灵活性上要优于高频切机装置。

（二）微机稳定装置

随着电力工业的发展，单机容量不断增大，超高压、特高压输电线路相继推广，电力系统结构日益复杂，常规稳定装置难以满足电力系统安全控制的要求。常规稳定装置仅能够检测就地异常信息，缺乏装置间的协调配合以及全网的信息采集，其利用频率下降作为重要的起动条件，往往会因为发电机的机电惯性造成控制效果的延时。除此之外，常规稳定装置只能够按照固定的逻辑算法进行整定，此时就需要引入微机稳定装置。

微机稳定装置是一种能够根据电力系统实际运行状态进行快速控制的具有自动识别事故能力的自动化系统。其包括信息采集以及系统运行方式计算、事故对策计算、事故识别以及决策执行的环节。控制方式包括周期性的实时采样以及计算与随机性事故识别决策相结合的方式。

①信息采集以及系统运行方式计算目前主要根据从配电 SCADA 系统或者 EMS 中获得的电网实时数据,包括各发电厂的出力、抽水蓄能负荷、全网负荷、线路潮流以及网络结构信息等,得出系统的实时潮流分布。②事故对策计算事故对策计算在潮流分布的基础上设想各类事故,选择减负荷的对象以及数值并进行整定。③事故识别以及决策执行系统根据事故跳闸信号,查阅事故对策表或进行计算,找到相应的控制对象并发出命令。

因为这种控制采用的是查阅对策表或计算的方式,所以能够在发生故障之后立即发出控制指令,无需拖延到系统的安全稳定被破坏之后。这种控制对各类事故来说可以根据具体的情况分别对待,而且迅速起动有效防止了系统的失稳。

控制策略表的生成对系统能否快速精准动作至关重要。控制策略表可以分为“实时计算、实时控制”“离线决策、实时匹配”“在线决策、实时匹配”等方案。

随着电网的发展,系统的稳定控制越发复杂,目前在线稳定控制的研究已经取得了一定的成果。基于 EMS 获取电网的实时状态数据,进行在线决策,监测当前的运行状态并匹配相应的运行策略表,运行策略表选定之后将发送至各区域稳定控制系统,各区域稳定控制系统可以根据最优策略表和实际的故障情况确定本区域的稳定措施并向各就地执行装置发出命令,从而构成分层决策、分区控制的全网在线稳定控制系统。

微机稳定装置的特点有:①抗干扰能力强,不会因为通道干扰而误动作;②能够自动识别故障类型,避免单相故障造成的误切;③能根据实时系统的信息判断其故障的区域、性质、严重程度并采取对应措施;④能根据稳定措施自动执行,无须人工干预。

第六节 频率控制系统虚拟实验与仿真

一、实验平台的功能实现

（一）包含参数动态特性

低频减负荷的动态特性主要是基于采用单机带分布负荷模型下的单机模式实现，这种模型可以直观表现负荷切除的选择性以及切除不同负荷对系统频率动态特性的影响。除此之外，系统参数的不同以及动作方案的选择会导致其特性曲线的变化速率、频率最低值、振荡幅度以及恢复时间的差异，这些参数主要包括发电机的类型和规格、负荷的种类、负荷切除顺序以及切除负荷量等。

（二）包含调速系统模型选择对频率变化的影响

调速系统的选择也会影响其动态特性，特别是选用忽略无功、电压的简化静态负荷模型时，影响最为明显。可供选择的低频减负荷实验模块的调速系统模型主要分为经典模型、IEEEG1 汽轮机模型和 IEEEG3 水轮机模型。经典模型结构简单，适用范围广，但忽略了很多惯性调节环节，频率振荡幅度较大；水轮机模型系统频率变化的惯性较大，因此频率下降的最低值较低，稳定较慢；汽轮机模型稳定特性较好，且精度较高。

（三）包含风机渗透率对系统频率的影响

新能源与分布式电源迅速发展，风机、光伏等新兴能源的接入对电力系统的影响逐渐增大，因此在低频减负荷实验模块的设计中加入了风机渗透率对系统频率变化过程的影响。对实验模块采用的风机模型进行了简化，不考虑其频率控制策略，双馈风机采用 PWM 控制策略实现转子转速与电网频率的解耦控制，其转子转速也不受频率变化的影响。在进行实验时，只需要确定是否选择风机并网即可，其余的动作部分与单机系统模式完全相同。

二、模型的建立与解析

实验平台低频减负荷模块的模型主要分为单机系统模型和多机系统模型，下面分别进行讲解。

（一）单机系统模型

对于简单的孤立系统，如果发电区域和负荷区域分布均匀，发电机联系紧密，

线路与网络的影响不计，或系统内发电机联系不够紧密但各区域系统与扰动之间的距离相等且参数相同，可以认为全系统是刚性连接的，因此可以用单机等值模型分析系统惯性中心频率的动态过程，并得到该单机等值系统模型的方程组，即

$$\begin{cases} T_s \frac{d\Delta f^*}{dt} = P_{G^*} - P_{L^*} \\ T_G \frac{d\Delta P_{G^*}}{dt} = -\Delta P_{G^*} - K_{G^*} \Delta f^* \\ P_{G^*} - P_{L^*} = (P_{G^*} + \Delta P_{G^*}) - (P_{L^*} + \Delta P_{L^*}) + \Delta P_{d^*} = \Delta P_{G^*} - \Delta P_{L^*} + \Delta P_{d^*} \\ \Delta P_{L^*} = K_{L^*} \Delta f^* \end{cases}$$

式中： T_s, T_G 为系统、调速器的惯性时间常数；

P_{G^*}, P_{L^*} 为标么值下发电机输出的有功功率、负荷的有功功率；

ΔP_{d^*} 为系统扰动产生的有功功率缺额。

(二) 多机系统模型

单机系统模型适用于负荷集中且分布均匀的情况下，但是随着电网覆盖区域的扩大，网络结构逐渐复杂，需要对复杂的系统构建新的算法模型。实验平台低频减负荷仿真模块采用基于平均系统频率（ASF）的多机系统仿真模型来解决这一问题。

相对于能够全面反映系统动态过程、计算量大的全时域仿真这一电力系统稳定分析的基本方法，ASF模型重点在于研究频率响应的统一性和频率稳定的独立性，忽略了电压、无功和网络的影响，在保证仿真精度的同时大大减少了计算量和仿真时间，对实现电力系统频率的在线预测和自动发电控制具有重要意义。

在ASF模型中，整个系统的频率响应是统一变化的，每台发电机在有功控制过程中独立。其中， ΔP_{di^*} 是系统初始时刻对发电机 i 的扰动有功功率； ΔP_{ei^*} 是发电机 i 电磁有功功率的变化量； ΔP_{mi}^* 是发电机 i 产生的机械功率的变化量； Δf_i^* 是发电机 i 产生的频率偏移量； Δf_{ave}^* 是系统的平均频率偏差。

部分参数之间的关系可以写作如下表达式：

$$\begin{aligned} 2H_1 \frac{d\Delta f_1^*}{dt} &= \Delta P_{m1}^* - \Delta P_{e1}^* - \Delta P_{d1}^* \\ 2H_2 \frac{d\Delta f_2^*}{dt} &= \Delta P_{m2}^* - \Delta P_{e2}^* - \Delta P_{d2}^* \\ 2H_n \frac{d\Delta f_n^*}{dt} &= \Delta P_{mn}^* - \Delta P_{en}^* - \Delta P_{dn}^* \end{aligned}$$

各式相加可得

$$\begin{aligned}
 2 \left(H_1 \frac{d\Delta f_1^*}{dt} + H_2 \frac{d\Delta f_2^*}{dt} + \cdots + H_n \frac{d\Delta f_n^*}{dt} \right) &= 2 \frac{d \sum_{i=1}^n H_i \Delta f_i^*}{dt} \\
 &= 2 \sum_{i=1}^n H_i \frac{d\Delta f_{ave}^*}{dt} \\
 &= \sum_{i=1}^n \Delta P_{mi}^* - \sum_{i=1}^n \Delta P_{ei}^* - \sum_{i=1}^n \Delta P_{di}^*
 \end{aligned}$$

第七节 光伏发电功率控制及参与电网的频率调节

光伏电站功率预测是解决光伏电源随机波动性对电力系统影响的重要手段，也是电站有功功率控制顺利进行的基础。同时，电站功率预测结果的准确度对调度端发电计划的制定以及电站端有功功率控制系统控制目标实现都有着重要的影响。

在短期功率预测研究中，针对基于直接功率预测方法中的相似日算法进行改进，用以提高在非理想天气条件下功率预测精度。改进工作围绕历史功率样本类型和相似日算法实现方法两个角度展开。为了改善相似日算法中相似日样本间由于时间跨度过大，造成的在时间连续性上信息缺失，以及相似日样本无法计及电站设备运行状态的不足，引入包含电站功率时间连续性信息的相邻日样本。由于相邻日间存在天气类型变化的可能，为了降低由于天气类型变化对相邻日样本中时间连续性造成的影响，通过引入电站发电量偏差比，将非理想天气下日总功率折算到理想天气条件下。以相邻日样本为基础，通过灰色系统进行预测日日总功率预测。通过对功率历史数据和灰色系统预测结果的统计分析，获取灰色系统进行预测的日总功率结果分布信息，进而设置日总功率修正区间，对使用相似日算法的预测的日总功率值进行修正，从而将时间连续性信息引入到相似日算法。在相似日算法实现的角度，则采用通过采用小波神经网络代替经典的 BP 神经网络，更精确地提取相似日中功率曲线趋势信息。

在超短期功率预测研究中，以电站实时功率序列为基础进行超短期预测的时间序列模型选择，用以计及电站实时工况和天气要素对超短期功率预测值的影响。以电站功率序列值为基础，进行时序模型的选择。采用新陈代谢的方式，进行功率序列的修正以及对时间序列模型参数进行更新，使得预测模型紧密跟随电站实

时功率序列变化, 保证预测模型能够精确反应电站实时运行工况。

一、光伏阵列故障检测及功率数据修正

光伏阵列故障检测不仅可以提高光伏电站的整体运行效率, 而且是光伏阵列故障定位、检修计划等工作开展的基础。同时, 光伏阵列故障检测信息在电站功率预测结果、预测所依赖的功率数据修正方面的应用, 将对提高电站功率控制效率、完成率起到重要作用。

在光伏阵列故障检测方法的研究中, 考虑到故障类型的划分粒度对故障样本产生的影响, 在分析光伏阵列故障类型的基础上, 采用两级结构的故障类型划分。第一级故障类型划分标准较为宽泛, 便于电站运维的实际操作。同时, 第一级故障类型也为功率数据修正提供基础信息。第二级故障类型是对第一级故障类型进行了细化, 可以为故障定位、故障维修提供更精确的信息。故障特征量选择过程中, 考虑了利用 SCADA 中数据进行推导的因素, 降低了故障检测工作开展所需的成本。故障样本数据则是通过使用 Matlab 软件搭建光伏阵列仿真模型, 获得光伏阵列在各种类型下的故障样本。最后提出了一种基于模糊 C 均值聚类的在线故障检测方法。通过事前聚类分析的方式, 分析故障类型与故障特征量之间的对应关系。通过将历史故障数据聚类, 按故障类型自动分类。将实时采集到的特征量与聚类后的故障类型通过比较隶属度大小判别发生的故障类型, 考虑了故障特征量的随机性和不确定性, 提高了故障检测精度。

功率数据修正分别从功率历史数据修正和超短期功率预测修正两个角度展开研究。光伏阵列故障后的处理措施直接影响到光伏阵列拓扑结构, 进而对电站的实际运行的光伏阵列容量(电站基准功率)产生影响。因此, 功率数据修正本质是对电站功率基准值进行修正。首先设定电站发生第一级故障类型故障时电站的处理策略。在确定电站功率历史值记录形式的基础上, 根据电站处理策略, 研究以光伏组件串单元为单位的不同类型故障情况下光伏组件串的功率基准值和功率历史值的确定公式。按照故障检测区域的范围, 确定区域性功率历史记录值的计算公式。根据功率历史值和超短期预测值的各自特点, 确定功率数据修正的具体公式。

(一) 光伏阵列故障类型一级分类

光伏组件常见三种故障类型包括: 主要由于制造工艺引起的太阳能电池裂片、

由于长期运行导致器件老化引起的失配问题、由热斑效应引起的电池故障、效率降低。光伏组件根据引起故障的内外在因素，又可将故障类型分为两类：①由于环境因素引起的，如建筑物、树木、云朵、灰尘、鸟类的排泄物等造成的阴影；②光伏阵列自身因长期运行导致器件老化带来的组件短路、开路及光伏组件不匹配等故障。上述每类故障进一步又可分为硬故障和软故障两类。其中，硬故障是指故障不随时间变化的故障，如灰尘、鸟类排泄物及短路开路故障等，因此需要及时排除。软故障是指故障随时间变化而变化的故障，如飘过的云或建筑物的影子，这种故障无需排除。

另根据光伏阵列的衰降和失效模式、故障点位置进行分类，光伏阵列可能发生的故障如下：①组件内部故障。太阳电池的衰降老化、光伏电池短路、光伏电池开路、组件玻璃破碎、接线盒脱落、组件分层、热斑失效、旁路二极管失效（旁路二极管短路、旁路二极管接反）、密封剂失效、电池片或电极发黄、电池栅线断裂、铝边框开裂。②组件之间故障。组件短路及组件开路（通常由导线老化、短路及断路造成）、接地故障等。

（二）基于模糊 C 均值聚类的光伏阵列故障检测

1. 模糊 C 均值聚类算法介绍

模糊 C 均值聚类（FCM）算法的基本思想是通过隶属度函数进行每个数据点归属某个聚类的程度判别的聚类算法。其本质是使被划分到同一簇或同一类的对象之间的相似度最大，而不同簇或类的对象之间的相似度最小，从而可以定量地确定被研究对象之间的亲属关系，以达到对光伏阵列故障样本按照故障类别自动分类的目的。

FCM 算法将数据样本 $x_j (j=1,2,\dots,n)$ 分成 C 个模糊簇，并求得每个簇的聚类中心，使得非相似性指标的价值函数达到最小，FCM 的价值函数（或目标函数）的一般形式：

$$J(U, c_1, \dots, c_c) = \sum_{i=1}^c J_i = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m d_{ij}^2$$

式中： u_{ij} 为第 j 个样本隶属于第 i 簇的隶属度， $u_{ij} \in [0,1]$ ， $\sum_{j=1}^n u_{ij} = 1, \forall j=1, \dots, n$ ； c_i 为模糊簇 i 的聚类中心； m 为加权指数， $m \in [1, \infty]$ ； d_{ij} 为第 i 个聚类中心与第 j 个数据点间的欧几里德距离， $d_{ij} = \|c_i - x_j\|$ ；

使 $J(U, c_1, \dots, c_c) = \sum_{i=1}^c J_i = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m d_{ij}^2$ 有最小值的目标函数表达式为

$$\begin{aligned}\bar{J}(U, c_1, \dots, c_c, \lambda_1, \dots, \lambda_n) \\ &= J(U, c_1, \dots, c_c) + \sum_{j=1}^n \lambda_j \left(\sum_{i=1}^c u_{ij} - 1 \right) \\ &= \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m d_{ij}^2 + \sum_{j=1}^n \lambda_j \left(\sum_{i=1}^c u_{ij} - 1 \right)\end{aligned}$$

式中： λ_j 拉格朗日乘数。

对所有输入参量求导，使上式达到最小的必要条件为：

$$\begin{aligned}c_i &= \sum_{j=1}^n u_{ij}^m x_j / \sum_{j=1}^n u_{ij}^m \\ u_{ij} &= 1 / \sum_{k=1}^c \left(\frac{d_{ij}}{d_{kj}} \right)^{2/(m-1)}\end{aligned}$$

根据上述两个必要条件，可以看出，模糊 C 均值聚类算法是一个简单的迭代过程，即用下列步骤确定聚类中心 c_i 和隶属矩阵 U ：

第一步：采用属于 $(0, 1)$ 区间的随机数初始化隶属矩阵 U ，使其满足 u_{ij} 的约束条件。

第二步：用 $c_i = \sum_{j=1}^n u_{ij}^m x_j / \sum_{j=1}^n u_{ij}^m$ 计算 c_i 。

第三步：根据 $J(U, c_1, \dots, c_c) = \sum_{i=1}^c J_i = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m d_{ij}^2$ 计算价值函数。若它小于事先设定的阈值，或相对上次价值函数值的改变量小于某个阈值，则算法停止。

第四步：用 $u_{ij} = 1 / \sum_{k=1}^c \left(\frac{d_{ij}}{d_{kj}} \right)^{2/(m-1)}$ 计算新的 U 矩阵。返回第二步。

FCM 算法的输出包括两个部分。第一个部分为 C 个聚类中心点向量，第二个部分为模糊划分矩阵，表示每个样本点属于每个类的隶属度。按照模糊集最大隶属原则，根据模糊划分矩阵可以确定每个样本点归属的类。聚类中心则表示每个类的平均特征，其可作为该类模式下的典型值。

2. 光伏阵列的模糊 C 均值聚类故障检测

第一步：运用模糊 C 均值聚类将故障样本集聚类成 C 种故障模式

模糊 C 均值聚类分析在光伏阵列故障检测中的应用过程是：对历史已有的检测记录进行分类，建立若干类检测模式，即聚类中心，然后对当前要检测的状态进行模式识别。光伏阵列的模糊 C 均值聚类故障检测其根本上是一个采用最大隶属度原则的模糊模式识别问题。按照 FCM 步骤将故障样本数据集

进行聚类分析, 得到光伏阵列的各种故障模式及每种故障类型下的聚类中心 $c_{qj} = (V_{moj}, I_{mjj}, I_{scqj}, V_{\infty qj})$, $j = 1, 2, \dots, C$ 。所得聚类中心 c_{qj} 可看成第 j 种故障特征量的典型值。

第二步: 利用基于正态分布的隶属度函数算法进行故障模式识别

为了判别某一待检测样本 $x = (V_m, I_m, I_{sc}, V_{oc})$ 归属于哪一类故障模式, 需要判别待检测本与各聚类中心 c_j 的隶属度大小。待检测样本与各聚类中心的隶属度大小采用基于正态分布的隶属度函数法进行计算, 正态分布的隶属度函数形式:

$$\mu_{Fj}(x) = \exp\left[-(x - \mu_{Fj})^2 / 2\sigma^2\right] \times 100\%$$

式中: $\mu_{Fj}(x)$ 为样本 x 与第 Fj 种故障模式的隶属度大小; μ_{Fj} 为第 Fj 种故障模式的特征向量的期望值, c_{qj} 的对应分量; σ 为标准差, 由高斯函数 “ 3σ 准则” 推出, 该文采用 6σ 作为函数的定义域其可由下式求得:

$$\sigma = \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{6}$$

式中: $\mu_{\max}$, $\mu_{\min}$ 为各特征分量的最大值和最小值。

由式 $\mu_{Fj}(x) = \exp\left[-(x - \mu_{Fj})^2 / 2\sigma^2\right] \times 100\%$ 计算出待检测样本与聚类得到的 C 种故障模式的隶属度向量用 $\mu_{Fj}(x) (j = 1, 2, \dots, C)$ 如下:

$$\mu_{Fj}(x) = (\mu_{Fj}(V_m), \mu_{Fj}(I_m), \mu_{Fj}(I_{sc}), \mu_{Fj}(V_{oc}))$$

再按下式计算出各特征向量的总隶属度大小

$$\mu_{Fj} = \frac{\sum \alpha_i g \mu_{Fji}}{\sum \alpha_i}$$

式中: μ_{Fji} 为用 μ_{Fj} 中第 i 个分量, 按从大到小的顺序排列, 其中隶属度最大的即为发生该种故障; α_i 为第 i 个特征值对应的权重, $\sum \alpha_i = 1, i = 1, 2, 3, 4$ 。

二、快速调频控制策略

随着可再生能源的持续快速增长, 光伏在电网中的渗透率逐渐增加, 挤占了同步发电机组的空间, 由于光伏并网发电系统是由电力电子设备连接组成, 其有功功率的输出与电网频率解耦, 因此无法像同步发电机一样在系统受到扰动产生功率不平衡时及时迅速的为系统提供响应, 无法维持电网频率的稳定, 随着光伏发电在电网中的占比日益加大, 电网中具有“调频能力”的机组越来越少, 若光伏不能提供频率支持, 系统的总惯性会降低, 致使频率调节的能力下降, 威胁电

网的频率稳定,甚至严重时会导致频率的急剧变化,进而会给电网安全稳定的运行带来一些不利的影响。因此,为了提升电网频率安全水平,迫切需要光伏具有一定的调频能力,响应电网频率的变化。

(一) 减载控制

为了提高光伏发电系统的利用率,在目前实际运行的光伏电站中,通常将光伏电站运行在最大功率点下工作。在这种情况下,若系统发电侧和负荷侧的功率平衡受到破坏,会使系统发生功率缺额,从而使得频率发生波动,当出现频率下降时,若此时光伏运行在最大功率点处,则无法增加有功功率来参与电网频率的调节,无法提供频率支撑。因此,通常通过在光伏侧增加储能或者让光伏发电系统自身能提供一定的备用功率来实现光伏的调频能力,但是储能设备价格比较高,寿命较短,在一些地方会存在“弃光”的现象,因此,可以采用减载控制方法,使得光伏发电系统能提供备用功率来参与电网频率的调节。

由光伏阵列的 P-U 特性曲线可知,当光伏偏离最大功率点时,就可以提供多余的备用功率。因此,定义光伏阵列实际工作电压稍高于或低于最大功率点处的电压为 U_1 , U_2 , 记光伏在最大功率点下的电压为 U_m , 功率为 P_m , 将在稍高于或低于 U_m 的电压 U_1 , U_2 下工作的功率记为 P_1 , 则 P_1 与 P_m 之差称为备用功率 ΔP , $\Delta P = P_m - P_1$ 这个过程称为光伏的减载控制,通过减载控制,使光伏预留一定的备用功率来参与电网频率的调节,如图 3-1 所示。

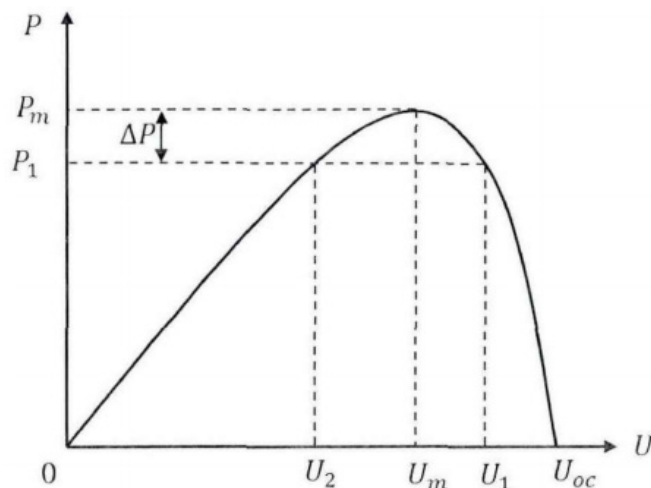


图 3-1 光伏阵列的备用功率示意图

通过上述分析,要使光伏发电参与电网频率的调节,首先得留有一定的有功功率备用容量,即将光伏运行在减载控制的模式下。这里定义光伏的减载率为 $\sigma\%$,此时光伏的减载水平可表示为:

$$\sigma\% = \frac{\Delta P}{P_m}$$

式中 P_m 为光伏的最大输出功率; ΔP 为光伏的减载功率。

则在减载控制运行下,光伏的输出功率为:

$$P_{pv} = P_m(1 - \sigma\%)$$

需要特别考虑的是,光照强度具有一定的随机性、波动性,因此将光照强度变量引入到减载率中,用以缓解由于光照强度的变化给电网频率带来波动的影响。因此根据上述分析,设定变减载率为:

$$\sigma\% = \sigma_0\% * \frac{S}{1000}$$

式中, $\sigma_0\%$ 为初始减载率; S 为光照强度;1000为STC下的光照强度的参考值。

则在变减载控制运行下,光伏的输出功率为:

$$P_{pv} = P_m(1 - \sigma\%) = P_m \left(1 - \sigma_0\% * \frac{S}{1000} \right)$$

当确定好所使用的电池型号时,参考其名牌可确定该电池在STC下(1000 W/m^2 , 25°C)所对应的最大功率点电压 U_m 以及最大功率点电流 I_m 。但是在实际情况下,环境因素中的光照强度 S 和温度 T 不是固定不变的,为了使减载控制能够在任何环境因素下都能轻松实现,因此通过引入实时 S 和 T 来对最大功率点下的电压 U_m 以及最大功率点下的电流 I_m 进行改进,得到改进后的包含 S 、 T 的最大功率点下的电压 U'_m 以及最大功率点下的电流 I'_m 的信息,他们的乘积即可得到包含环境因素的光伏最大可发功率 P_m 。

$$\begin{cases} U'_m = U_m(1 - \gamma\Delta T)\ln(e + \beta\Delta S) \\ I'_m = I_m \frac{S}{S_{\text{ref}}}(1 + \alpha\Delta T) \\ P_m = U'_m I'_m \end{cases}$$

其中

$$\begin{cases} \Delta T = T - T_{\text{ref}} \\ \Delta S = \frac{S}{S_{\text{ref}}} - 1 \\ T_{\text{ref}} = 25, S_{\text{ref}} = 1000 \\ \alpha = 0.0025, \beta = 0.5, \gamma = 0.00288 \end{cases}$$

（二）下垂控制

在系统稳定运行中，当电网负荷发生变化时，由于发电侧和负荷侧的功率不平衡，导致电网频率发生或大或小的波动，偏离标称频率，此时，并网运行的同步发电机组利用自身的“调频能力”自动的增加或者减小有功功率的输出，减少频率的偏差，进而达到新的平衡点，该过程称为一次调频。在电力系统中，下垂控制是常用的一次调频控制策略。功频静态特性指当电网频率下降，所对应的输出功率则增加，当频率上升，所对应的输出功率减少，其关系式如：

$$k_G^* = -\frac{\Delta P_G / P_{GN}}{\Delta f / f_N} = -\frac{\Delta P_G^*}{\Delta f^*}$$

式中， ΔP_G 为发电机的功率变化量； Δf 为频率变化量。

随着光伏渗透率的提高，为了减轻由于光伏替代部分同步发电机而使电网的“调频能力”下降，在备用一定有功功率的基础上，将频率的偏差作为辅助频率控制信号引入到变换器的控制环节中，修改有功功率的参考值，进而使光伏具有一定的调频能力。

传统上，同步发电机的调差系数设置是固定的，不同地区的同步发电机组其调差系数设置也不太一样，一般设置在 2% 到 8% 之间。

当电网存在较小的扰动使频率产生微小的变化时，死区的存在可以过滤这些较小的扰动，避免阀门动作过于频繁，使机组受到损害，使得发电机组输出功率稳定；但是死区的设置也不能过大，过大就会使当需要发电机参与电网调频时却不提供调频动作，影响电网的一次调频。

（三）虚拟惯量控制

在物理学中，通常将物体抵抗其运动状态变化称为惯性，在电力系统中，当系统出现功率缺额使得电网频率发生波动时，惯性则是反映了系统阻止电网频率变化的能力，是保障频率稳定的重要措施。

然而，由于光伏等新能源是利用电力电子设备连接并网，其有功功率与电网频率没有直接耦合，使得光伏并网发电系统不能主动地提供惯性支持。要想使光伏并网发电系统具有惯性的能力，可通过修改变换器侧的控制策略，将电网频率的变化率作为辅助频率控制信号引入到变换器的控制环节中，修改有功功率的参考值，进而模拟同步发电机组的惯性控制。

当系统正常工作时，系统频率不变，频率变化率为 0，此时光伏按照原定的

功率输出；当系统发生功率缺额时，频率发生突变，此时通过引入的频率变化率辅助频率控制向系统瞬时注入或吸收有功功率，从而实现光伏的虚拟惯量控制。根据《东北细则》中《新能源场站、虚拟惯量响应技术指标要求》规定，光伏电站虚拟惯量响应有功功率变化量应满足公式：

$$\Delta P \approx -\frac{T_J}{f_N} \frac{df}{dt} P_n$$

式中， T_J 为光伏的虚拟惯量响应时间常数，一般取 $4 \sim 8\text{s}$ ； f_N 为系统额定频率，取 50Hz ； P_n 为光伏的额定功率。

光伏电站虚拟惯量响应有功功率变化量的表达式见式：

$$\begin{aligned} f &= \frac{U_{iq}}{2\pi} \left(k_{p4} + \int k_{i4} dt \right) \\ \frac{df}{dt} &= \frac{U_{iq} k_{i4}}{2\pi} \\ \Delta P_{PV} &= -\frac{T_J}{f_N} \frac{U_{iq} k_{i4}}{2\pi} P_n = -K * U_{iq} \end{aligned}$$

通常引入低通滤波器来滤除 U_{iq} 中的噪声，使输入信号更加的平缓，因此通过引入低通滤波器来实现光伏的虚拟惯量控制，即：

$$\Delta P_2 = -K * U_{iq} * \frac{1}{1+Ts}$$

式中， U_{iq} 为 q 轴分量； k_{p4} ， k_{i4} 为 PLL 控制的比例，积分系数； K 为虚拟惯量系数； T 为时间常数。

三、新型控制策略

（一）基于逆变器侧直流电容虚拟惯量控制策略

当发电侧和负荷侧功率的平衡受到破坏时，电网的频率会发生变化，在此过程中，同步发电机会感受到功率不平衡的作用，根据旋转物体的力学定律，同步发电机转子的机械角速度 Ω 和不平衡机械转矩 M_T 以及电磁转矩 M_E 的关系如下：

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \Delta M = M_T - M_E$$

式中， J 为转子的转动惯量。

当转子以额定转速 Ω_0 转动时，其动能为：

$$W_K = \frac{1}{2} J \Omega_0^2$$

式中, W_K 为在额定转速时的动能。

将式 $W_K = \frac{1}{2} J \Omega_0^2$ 代入到式 $J \frac{d\Omega}{dt} = \Delta M = M_T - M_E$ 中, 再采用转矩标么值可得:

$$\frac{2W_K}{\Omega_0 S_B} \frac{d\Omega}{dt} = \Delta M \frac{\Omega_0}{S_B} = \Delta M_*$$

机械角速度 ε 和电角速度 ω 存在以下关系:

$$\Omega = \frac{\omega}{p}; \Omega_0 = \frac{\omega_0}{p}$$

式中, p 为同步发电机转子的极对数。

因此, 式 $\frac{2W_K}{\Omega_0 S_B} \frac{d\Omega}{dt} = \Delta M \frac{\Omega_0}{S_B} = \Delta M_*$ 可写成:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = \Delta M_*$$

式中, $H = W_K / S_B$, 为发电机组的惯性时间常数。

当 ω 不等于 ω_0 有以下关系式:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{d^2\sigma}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} \end{cases}$$

将式

$$\begin{cases} \frac{d\sigma}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{d^2\sigma}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} \end{cases}$$

代入到式 $\frac{2H}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = \Delta M_*$ 中:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\sigma}{dt^2} = \Delta M_*$$

近似的认为转矩的标么值等于功率的标么值, 因此 ΔM_* 可以写成

$$\Delta M_* = \frac{\Delta M \Omega_0}{S_B} \approx \frac{\Delta M \Omega}{S_B} = \frac{\Delta P}{S_B} = P_{T*} - P_{E*}$$

代入到 $\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\sigma}{dt^2} = \Delta M_*$, 并忽略下标 *, 写成状态方程式:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\sigma}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0}{2H} (P_T - P_E) \end{array} \right.$$

令 $\omega^* = \frac{\omega}{\omega_0}$ ，并忽略下标 *，式

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\sigma}{dt} = \omega - \omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0}{2H} (P_T - P_E) \end{array} \right.$$

可以写成

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\sigma}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ 2H \frac{d\omega}{dt} = (P_T - P_E) \end{array} \right.$$

式中， σ 为转子功角； ω 为转子角速度； ω_0 为额定电角速度； H 为发电机组惯性时间常数； P_T 和 P_E 分别为机械功率和电磁功率。

当发电侧和负荷侧功率的平衡受到破坏的时候，同步发电机将加速或者减速以减小或抵消频率变化，即；

$$2H \frac{d\omega}{dt} = 2H \frac{df}{dt} = P_T - P_E$$

假设光伏逆变器无损耗，双级式光伏并网发电系统的逆变器侧直流电容电压方程为：

$$P_{pv} - P_g = C_{b2} U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt}$$

式中， P_{pv} 为光伏阵列侧输出功率； P_g 为并网侧输出功率； C_{b2} 为逆变器侧直流电容； U_{dc} 逆变器侧直流电压。

可以利用光伏逆变器侧直流电容来模拟同步发电机的转子运动方程，则有：

$$\begin{aligned} C_{b2} U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} &= 2H_{dc} \frac{df}{dt} \\ \int_{U_{dc0}}^{U_{dc}} C_{b2} U_{dc} dU_{dc} &= 2 \int_{f_N}^f H_{dc} df \\ \frac{1}{2} C_{b2} (U_{dc}^2 - U_{dc0}^2) &= 2H_{dc} (f - f_N) \end{aligned}$$

式中， H_{dc} 为虚拟惯量时间常数。

对式 $\frac{1}{2} C_{b2} (U_{dc}^2 - U_{dc0}^2) = 2H_{dc} (f - f_N)$ 进行线性化处理，并忽略高阶项可得：

$$\begin{cases} C_{b2}U_{dc0}\Delta U_{dc} = 2H_{dc}\Delta f \\ \Delta U_{dc} = U_{dc} - U_{dc0} \\ \Delta f = f - f_N \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{dc} = \frac{2H_{dc}}{C_{b2}U_{dc0}}(f - f_N) + U_{dc0} = k(f - f_N) + U_{dc0} \\ k = \frac{2H_{dc}}{C_{b2}U_{dc0}} \end{cases}$$

基于式

$$\begin{cases} U_{dc} = \frac{2H_{dc}}{C_{b2}U_{dc0}}(f - f_N) + U_{dc0} = k(f - f_N) + U_{dc0} \\ k = \frac{2H_{dc}}{C_{b2}U_{dc0}} \end{cases}$$

可以建立逆变器侧电压与频率 f — U_{dc} 之间的线性关系,在基于减载控制策略下,使得光伏留有一定的备用容量,通过频率的变化来修正逆变器侧直流电压 U_{dc} 的参考值,从而利用逆变器侧直流电容 C_{bz} 存储或吸收能量,进而使光伏具有一定的调频能力。

第八节 电网辅助服务的储能系统运行控制技术

一、储能系统辅助调峰调频的运行控制策略

(一) 区域电网模型

1. 电网调频模型

为实现区域电网的整体调频目标,还需考虑发电机组、可再生能源、负荷等对频率产生影响,并且将其他环节的动态过程进行建模,系统各环节动态模型如下:

区域电网频率响应模型为:

$$\Delta f = \frac{1}{2Hs + D} \left(\Delta P_m + \Delta P_{BESS} + \sum_{j=1}^m \Delta P_{PVj} - \Delta P_L \right)$$

式中, H 为电网惯性系数, D 为负荷阻尼系数, ΔP_L 为负荷偏差量。

发电机组调速器模型:

$$\Delta P_g = \frac{1}{1 + sT_g} \Delta P_{\phi_f} + \frac{1}{R} \Delta f$$

式中, T_g 为调速器时间常数, ΔP_g 为调速器阀门偏差量, ΔP_{lpf} 为调速器控制输入, R 为一次调频下垂系数。

考虑机组的发电速率约束, 则有发电机组涡轮机模型为:

$$\Delta P_m = \frac{1}{1+sT_{ch}} \Delta P_g$$

$$\Delta \dot{P}_m \leq \delta$$

式中, ΔP_m 为发电机输出功率偏差量, T_{ch} 为涡轮机时间常数, δ 为常数。可再生能源光伏电站模型为:

$$\sum_{j=1}^m \Delta P_{PVj} = \sum_{j=1}^m \frac{1}{1+sT_{PV}} \Delta P_{solarj}$$

式中, ΔP_{PVj} 为光伏输出功率偏差量, T_{PV} 为光伏电源时间常数, ΔP_{solarj} 为光伏电源输入偏差量。

区域频率偏差信号模型:

$$\Delta ACE = \beta \Delta f$$

考虑在电网负荷频率控制过程中引入 PI 控制器, 建立其模型为:

$$u_{PI}(t) = K_p \Delta ACE(t) + K_I \int \Delta ACE(t)$$

负荷频率控制过程中状态的采集与信息传输过程中存在通信延迟问题, 则将上式变为:

$$u_{PI}(t-d) = K_p \Delta ACE(t-d) + K_I \int \Delta ACE(t-d)$$

式中, d 为通信延迟。

2. 电网调峰模型

储能电站作为新型能源系统中必不可少的重要设备, 能够平衡发电厂出力与用户侧需求在时空的差异, 进行削峰填谷, 从而提高电力系统的经济运行能力和安全稳定。当电力系统中引入大量随机性较强的可再生能源后, 储能也可平抑其功率波动。储能电站充放电模型如下:

$$\begin{cases} W_{bt,t} = W_{bt,t-1} (1 - \mu_{bt,loss}) + (\eta_{bt,ch} P_{bt,ch,t} - P_{bt,dis,t} / \eta_{bt,dis}) \cdot \Delta t \\ 0 \leq U_{bt,ch,t} P_{bt,ch,t} \leq P_{bt,ph}^{\max} \\ 0 \leq U_{bt,dis,t} P_{bt,dis,t} \leq P_{bt,dis}^{\max} \\ U_{bt,ch,t} + U_{bt,dis,t} \leq 1 \end{cases}$$

式中, W_t 为 t 时刻储能电站中剩余的电量, U_{loss} 为储能电站传输功率的能量

损耗率； η_{ch} 和 η_{dis} 分别为充、放电效率； $P_{ch,t}$ 、 $P_{dis,t}$ 分别为 t 时刻充电和放电状态的储能输出功率； Δt 为时间间隔； $P_{ch}^{\max}$ 、 $P_{dis}^{\max}$ 分别为储能电站的最大充、放电功率； $U_{ch,t}$ 、 $U_{dis,t}$ 为 0-1 变量，分别为 t 时刻储能电站充、放电状态。

储能系统可用容量虽然直接与储能设备的额定容量和剩余电量有直接关系，但均发生在储能所有者发起服务响应之后，设响应度 λ 为分布式储能实体参与响应电力系统互动的程度，其定义为实际参与互动的储能容量与现有市场上所知具备参与响应电力系统互动的储能装机总量的比值，即：

$$\lambda = \frac{N_{rs}}{N_s} \times 100\%$$

式中， N_s 为统计范围内可参与电力系统互动的储能容量， N_{rs} 为实际参与互动的储能设备容量。

影响 λ 数值的因素在于储能设备所有者参与响应的收益与储能设备的实体等效寿命折损的博弈。一般而言，对储能设备所有者的补贴越多，自愿参与电力系统响应的储能容量越大，对于分布式电源侧储能，若补贴方式为每 kWh 储能容量，按月补贴 a 元，有 $\beta\%$ 所有者愿意参与响应，则此时可用容量为：

$$E_{ds} = E_{ds,\max} \beta\%$$

式中， $E_{ds,\max}$ 为可参与响应的储能设备容量。

储能设备的电量递推关系如下：

充电过程：

$$S_{oc}(t) = (1 - \delta)S_{ac}(t-1) + P_{ch}\Delta t\eta_c / E_{cap}$$

放电过程：

$$S_{ac}(t) = (1 - \delta)S_{oc}(t-1) + P_{dis}\Delta t\eta_c / (E_{cap}\eta_d)$$

式中： $S_{ac}(t)$ 为第 t 个时段结束时储能系统的剩余电量； $S_{oc}(t-1)$ 为第 $t-1$ 个时段结束时储能系统的剩余电量； δ 为储能自放电率； E_{cap} 为储能额定容量。

研究面向电网辅助服务的储能系统运行控制需考虑传统机组、新能源场站、负荷等其他多类型系统与储能的协同互动，以便更好制定储能的工作模式与出力方式。

（二）储能辅助调频的运行控制策略

1. SOC 回归修正方法

基于常规模型的负荷频率控制将储能电站与传统机组等价，不能考虑其协调

出力的优势,无法在控制阶段实现 SOC 裕度调节的功能。

储能电站参与调频时,有必要控制电池的充放电动作使电池在适当的 SOC 水平上运行,以防止电池故障。因为在补偿可再生能源发电的快速变化方面起着重要作用的电池 SOC 裕度应保持相对稳定。光伏输出波动和负荷变化导致频率波动,其大小取决功率波动剧烈程度。若储能电站参与调节较长波动周期控制信号,则对储能电池的容量要求更高。可以认为通过改变分配给电池的控制信号周期的长度,对电池 SOC 产生影响。

同时设计根据储能电站 SOC 调整 LPF 时间常数的方法,以实现在适当的 SOC 水平上的运行:

$$\begin{cases} T_{LPF} = T'_{LPF} - \alpha \left(\frac{1}{1 + e^{-(SOC_{min} - SOC)}} + \frac{1}{1 + e^{-(SOC - SOC_{max})}} \right) \\ (SOC < 50, P_{BESS} > 0; SOC > 50, P_{BESS} < 0) \\ T_{LPF} = T'_{LPF} \\ (SOC < 50, P_{BESS} < 0; SOC > 50, P_{BESS} > 0) \end{cases}$$

T'_{LPF} 是调整前的 LPF 时间常数, T_{LPF} 是调整后的 LPF 时间常数 $SOC_{min} - SOC_{max}$ 是作为最优 SOC 工作范围, α 是 LPF 调整系数。当电池 SOC 低于下限值 SOC_{min} 时,储能输出 P_{BESS} 为正(放电),或电池 SOC 超过上限限值 SOC_{max} 时,储能输出 P_{BESS} 为负(充电)。

在储能电站内部各单元间的 SOC 均衡采用按比例分配的方式,即第 i, j 组储能单元电池组之间的功率分配为:

$$\begin{cases} P_{ref,i} : P_{ref,j} = SOC_i : SOC_j, \text{放电} \\ P_{ref,i} : P_{ref,j} = 1 - SOC_i : 1 - SOC_j, \text{充电} \end{cases}$$

式中, SOC_i 和 SOC_j 分别表示第 i 组、第 j 组储能电池组的荷电状态量。

2. 延迟边际计算方法

在储能电站参与电力系统的调频辅助过程中,当遥测信号从远程终端单元(RTU)发送到控制中心,控制信号从控制中心传输到单个单元,以及信号处理和控制律更新等其他来源时,通信信道将产生时间延迟。为了简化分析,将这些延迟组合为定位在前向回路中的单个延迟,并表示为指数形式 $e^{-sd(t)}$, $d(t)$ 为通信延迟时间。系统控制回路的性能和控制算法设计的复杂程度有关,还取决于网络资源的调度速度。通信要求每次传输只有一个节点可以访问网络并发送其信息。因此,许多现有的工作集中在一个系统应该安排多长时间来传输数据,以及以什么

优先级发送数据包。

含通信延迟的负荷频率控制系统需要考虑的是通信延迟对于系统的影响，储能电站的实际出力与调频性能指标的核定受延迟影响较大。延迟边际是影响负荷频率控制中调频指标的关键因素，储能电站参与系统调频时进行 SOC 回归修正时的通信总延迟必须小于系统延迟边际。可通过特征方程来判定通信延迟对于系统的影响，则储能电站参与负荷频率控制的区域电网模型特征方程如下：

$$\Delta(s, d) = \det[sI - A - A_d e^{-sd}] = a_0(s) + a_1(s)e^{-sd} = 0$$

式中， I 为单位矩阵， $a_0(s), a_1(s)$ 为区域电网负荷频率控制系统状态方程的特征多项式，表示如下：

$$a_0(s) = \sum_{i=0}^9 p_i s^i, a_1(s) = \sum_{i=0}^6 q_i s^i$$

式中， p_i, q_i 为与负荷频率控制系统参量相关的复杂多项式系数，具体关系见附录。

为保持系统的频率调控在较小偏差范围内运行，特征方程 $\Delta(s, d) = \det[sI - A - A_d e^{-sd}] = a_0(s) + a_1(s)e^{-sd} = 0$ 的特征根需要都保持在复平面的左半平面上。特征方程 $\Delta(s, d) = 0$ 是一个关于 s 和 τ 的隐函数。为方便研究，假设不含延迟的系统是正常运行情况，即 $\Delta(s, 0) = 0$ 的特征根都位于左半复平面，此时含储能电站的区域电力系统频率调节能够保持较高精度。对于有限的通信延迟 d ，假设特征方程 $\Delta(s, d) = 0$ 有一个根在虚轴上为 $s = j\omega_c$ 。由于复共轭特征根的对称性，特征方程 $\Delta(-s, d) = 0$ 在延迟 d 下有相同的特征根 $s = j\omega_c$ 。因此，问题转化为寻找特征方程 $\Delta(s, d) = 0$ 和 $\Delta(-s, d) = 0$ 的公共根 $s = j\omega_c$ ，则有：

$$\begin{aligned} a_0(j\omega_c) + a_1(j\omega_c)e^{-j\omega_c d} &= 0 \\ a_0(-j\omega_c) + a_1(-j\omega_c)e^{j\omega_c d} &= 0 \end{aligned}$$

消除指数项得到关于 ω_c^2 的增广特征方程：

$$W(\omega_c^2) = a_0(j\omega_c)a_0(-j\omega_c) - a_1(j\omega_c)a_1(-j\omega_c) = \sum_{i=0}^{15} m_{2i}\omega_c^{2i} = 0$$

式中， m_{2i} 为与负荷频率控制系统参量相关的复杂多项式系数。

（三）储能辅助调峰的运行控制策略

1. 优化目标

模型目标函数为系统发电成本以及系统启停成本等综合经济性指标最低：

$$C_{\text{cost}} = \min \left(\sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_g} C_g P_{\text{gen},it} + \sum_{j=1}^{N_w} C_w (P_{w,jt}^{\text{max}} - P_{w,jt}) + \sum_{k=1}^{N_b} (C_b - F_b) P_{b,kt} \right) \right)$$

式中, T 为优化周期内时段总数; i 为发电机组下标, 机组总数为 N_i ; j 为风电场站下标, 机组总数为 N_j ; k 为风电场站下标, 机组总数为 N_k ; C_g 为各发电机组对应的单位发电成本, $P_{gen,it}$ 为 t 时刻发电机组机组 i 的发电量; C_w 为风电场站弃风的单位功率成本, $P_{w,jt}^{\max}$ 为 t 时刻风电场站 j 的最大发电量, $P_{w,jt}$ 为 t 时刻风电场站 j 的实际发电量; C_b 为储能电站单位发电成本, F_b 为储能电站单位发电补贴, $P_{b,kt}$ 为储能电站实际发电量。

2. 控制约束

(1) 可再生能源场站输出功率约束

可再生能源场站与常规火电厂的区别在于其出力随机多变、不易控制。在调度运行中, 仅根据日前测值控制出力在预测值或者以下的范围内运行; 同时根据电网运行经济性和环保型的要求, 在满足电网安全稳定运行的前提下要求风电、光伏等可再生能源全额上网。本节对可再生能源场站的建模中引入可再生能源出力预测变量 P_{wf}^t , 并在模型中引入切除可再生能源的机制, 系统备用容量不足或场站送出功率受阻情况下切除部分并网的可再生能源机组。

$$\begin{cases} P_w^t + P_{ud}^t = P_{wf}^t \\ 0 \leq P_w^t \\ 0 \leq P_{wd}^t \\ \forall t \in T \end{cases}$$

式中, P_w^t 为 t 时段新能源, P_{wd}^t 为 t 时段切新能源功率, P_{wf}^t 为 t 时段新能源预测出力值。

(2) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{gen,it} + \sum_{j=1}^{N_w} P_{w,jt} + \sum_{k=1}^{N_b} P_{b,kt} = \sum_{m=1}^{N_l} P_{l,mt}$$

式中, $P_{l,mt}$ 为 t 时刻负荷 m 的实际用电量, N_l 为负荷节点数量;

(3) 机组出力上下限约束

$$P_{gen,it}^{\min} \leq P_{gen,it} \leq P_{gen,it}^{\max}$$

式中, $P_{gen,it}^{\min} > P_{gen,it}^{\max}$ 分别为传统机组出力的上下限。

(4) 机组爬坡约束

$$\begin{cases} \lambda_{gen,i,t} P_{gen,it} - \lambda_{gen,i,t-1} P_{gen,i,t-1} \leq R_i^{up} \\ \lambda_{gen,i,t-1} P_{gen,i,t-1} - \lambda_{gen,i,t} P_{gen,it} \leq R_i^{down} \end{cases}$$

式中 $\lambda_{gen,i,t}, \lambda_{gen,i,t-1}$ 分别为常规机组 i 在 t 和 $t-1$ 时段的开停机状态; R_i^{up} 、 R_i^{down} 为传统机组 i 的爬坡速率。

(5) 机组启停时间约束

$$\begin{cases} \sum_{s=t-T_U}^{t-1} \lambda_{gen,i,s} \geq (\lambda_{gen,i,t-1} - \lambda_{gen,i,t}) T_{gen,i,U} \\ \sum_{s=t-T_D}^{t-1} (1 - \lambda_{gen,i,s}) \geq (\lambda_{gen,i,t} - \lambda_{gen,i,t-1}) T_{gen,i,D} \end{cases}$$

式中 $T_{gen,i,U}$ 、 $T_{gen,i,D}$ 为常规机组 i 的最小连续启停时间。

(6) 储能出力约束

$$\begin{aligned} P_{b,kt}^{\min} &\leq P_{b,kt} \leq P_{gen,kt}^{\max} \\ S_{SOC}^{\min} &\leq S_{SOC} \leq S_{SOC}^{\max} \end{aligned}$$

式中, $P_{b,kt}^{\min}$ 、 $P_{b,kt}^{\max}$ 分别为储能电站出力的上下限 $S_{SOC}^{\min}$ 、 $S_{SOC}^{\max}$ 分别为储能电站 SOC 的上下限。

二、储能系统辅助配电网调压的运行控制策略

(一) 配电系统模型

对配电网的建模,在给定的工作点附近,可以通过计算关于控制输入和扰动的电压灵敏度矩阵来确定,描述分布式电源功率和电压变化之间的线性关系:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_{\theta P} & \Lambda_{\theta Q} \\ \Lambda_{VP} & \Lambda_{VQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

式中, $\Lambda_{\theta P}, \Lambda_{\theta Q}, \Lambda_{VP}, \Lambda_{VQ}$ 表示电压灵敏度系数, $\Delta q, \Delta V$ 指部分节点的相角、电压偏差量, $\Delta P, \Delta Q$ 指分布式光伏和储能连接节点的注入有功和无功功率。则有控制后的电压关系为:

$$V_r = V_0 + \Lambda_{VQ} \cdot x_Q + \Lambda_{VP} \cdot x_P$$

其中, V_0, V_r 为某节点调整前后的初始电压和参考电压, $x_Q = Q_r - Q_0, Q_0, Q_r$ 为某节点电压调整前后 DG 的无功输出, $x_P = P_r - P_0, P_0, P_r$ 为某节点电压调整前后 DG 的有功功率输出。将配电网模型写成如下形式:

$$\begin{aligned} V_i(k+1) &= V_i(k) + \Lambda_{ES} C_{ES} \left[(A_{ES} - I) x_{ES}(k) + B_{ES} u_{ES}(k) \right] \\ &\quad + A_{PV} C_{PV} \left[(A_{PV} - I) x_{PV}(k) + B_{PV} u_{PV}(k) + B_d d(k) \right] \end{aligned}$$

式中, $\Lambda_{ES}, \Lambda_{PV}$ 表示分布式储能、光伏对应所调节点电压的灵敏度矩阵。由此,建立含分布式电源动态特性的配电网整体状态空间方程如下:

$$x(k+1) = Ax(k) + B_u u(k) + B_d d(k)$$

(二) 储能辅助调压的运行控制策略

1. 基于 ε 分解的配电网络解耦方法

为避免对通信可靠性要求, 将系统分解为若干子系统, 进行分布式控制。通过 ε 分解法将一个系统分区为若干弱耦合子系统, 以矩阵 Λ_{VP} 为例:

$$\Lambda_{VP} = \Lambda'_{VP} + \varepsilon \cdot R$$

其中, Λ'_{VP} 为元素大于 ε 值的灵敏度矩阵, 描述系统的强耦合关系, $\varepsilon \cdot R$ 是描述系统弱耦合的残差矩阵。 ε 为描述系统耦合程度的阈值, R 为所有元素值不大于 1 的矩阵。对于矩阵 Λ'_{VP} , 可以得到一个置换矩阵 P 将 Λ'_{VP} 转换为 $\tilde{\Lambda}_{VP} = P^T \Lambda'_{VP} P$, 其中 $\tilde{\Lambda}_{VP} = \{\Lambda_{11}, \Lambda_{22}, \dots, \Lambda_{NN}\}$ 为分块对角矩阵, 且每个分块矩阵代表子系统的灵敏度关系。即通过先消除 Λ_{VP} 中不大于阈值 ε 的元素, 再合并经过消除后仍保持连接的点形成分块, 对矩阵的相应的行和列进行排列与聚类。

2. 控制约束条件

在控制实施的过程中, 各类分布式电源不同特性导致其出力具备不同的约束情况需要考虑。一般情况下, 控制时域中不同时间步长之间控制输入相关变化量计算如下:

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$$

式中, u 是得到的控制变量的通过测量得到的近似值。考虑动态调压过程中各类设备的物理限制形成以下各控制变量约束:

$$P_{BESS}^{\min} \leq P_{BESSref} \leq P_{BESS}^{\max}$$

$$Q_{BESS}^{\min} \leq Q_{BESSref} \leq Q_{BESS}^{\max}$$

$$Q_{PV}^{\min} \leq Q_0 \leq Q_{PV}^{\max}$$

式子分别为储能有功出力约束、为储能无功出力约束、为光伏无功出力约束。考虑储能和光伏的总容量限制, 因此:

$$P_{BESSref}^2 + Q_{BESSref}^2 \leq S_{NBESS}^2$$

$$Q_0^2 \leq S_{NPV}^2 - P_{MPPT}^2$$

式中, S_{NBESS} 为储能变流器额定容量, S_{NPV} 为光伏逆变器额定容量。

考虑储能 SOC 和电压偏差调节效果, 将其作为输出约束对控制予以限制:

$$\Delta V^{\min} \leq \Delta V \leq \Delta V^{\max}$$

$$S_{OC}^{\min} \leq S_{OC} \leq S_{OC}^{\max}$$

式子分别为为节点电压偏差约束、为储能 SOC 约束。

第九节 电化学储能电站参与电力系统二次调频功率分配的策略

一、效率最大化功率分配策略

电化学储能电站由电化学储能单元群构成，建立电化学储能单元等效电路图如图 3-2。所示。图中： i_i, P_i 和 $P_{i,ref}$ 分别为第 i 个电化学储能单元的电池组充放电电流、端口功率和承担的电网有功功率需求。

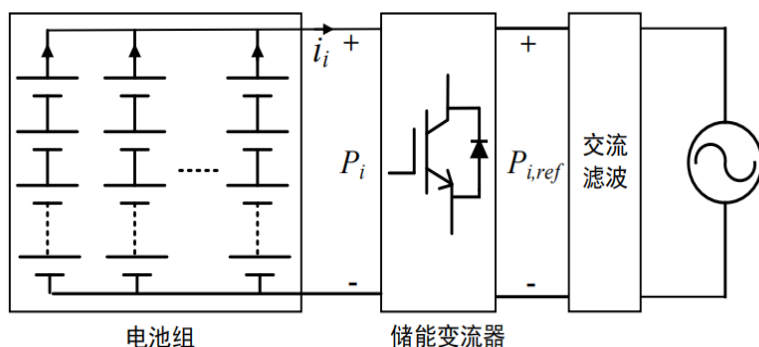


图 3-2 电化学储能单元等效电路图

(一) 目标函数

将图 3-2 中的串并联电池组视为整体，根据电池等效电路模型，第 i 个电池储能单元的电池组端口功率为：

$$P_i = (U_{i,0cV} - i_i \cdot R_i) \times i_i$$

式中： $U_{i,0cV}$ ， i_i, R_i 分别为第 i 个电池储能单元的开路电压、充放电电流和内阻。储能变流器直流侧功率与交流侧功率存在以下关系：

$$P_{i,ref} = \begin{cases} P_i \times \eta_{i,PCS}^{inv}, & (P_{ref} > 0) \\ P_i / \eta_{i,PCS}^{conv}, & (P_{ref} < 0) \end{cases}$$

式中： P_{ref} 为参考功率，放电为正； $\eta_{i,PCS}^{inv}$ 、 $\eta_{i,PCS}^{conv}$ 分别为第 i 个储能变流器逆变效率和整流效率。

计及电池组与储能变流器的功率损失，当电池储能单元放电时，有功功率损

失为电池组内部功率与注入电网功率之差

$$P_{i, loss}^{disch} = |P_i| \times \frac{1}{\eta_{i, bat}^{disch}} - P_{i, ref}$$

当电池储能单元充电时，有功功率损失为来自电网的功率与存储到电池组内部功率之差

$$P_{i, loss}^{cha} = |P_{i, ref}| - |P_i| \times \eta_{i, bat}^{cha}$$

式中： $P_{i, loss}^{disch}$ 、 $P_{i, loss}^{cha}$ 分别为第 i 个电池储能单元放电功率损耗和充电功率损耗， $\eta_{i, bat}^{disch}$ 、 $\eta_{i, bat}^{cha}$ 分别为第 i 个电池组放电效率和充电效率。

以电池储能电站效率最大化为目标—即功率损耗最小，建立目标函数

$$f = \begin{cases} \min \sum_{i=1}^N (\alpha_i P_{i, loss}^{disch}) & P_{ref} > 0 \\ \min \sum_{i=1}^N (\alpha_i P_{i, loss}^{cha}) & P_{ref} < 0 \end{cases}$$

式中： α_i 为第 i 个电池储能单元的开关因子， $\alpha_i = 0$ 表示第 i 个电池储能单元不工作， $\alpha_i = 1$ 表示第 i 个电池储能单元工作。

（二）约束条件

电池储能单元中的电池组和 PCS 需满足充放电功率、SOC 等多个约束条件。

1. 功率平衡约束

参与调频的各电池储能单元需服从如下功率平衡约束：

$$P_{ref} = \sum_{i=1}^N (\alpha_i \times P_{i, ref})$$

式中： N 为参与调频的电池储能单元数量。

2. 电池充放电功率约束

储能电池工作过程中，除 SOC 约束外，必须有电池充放电功率约束，电池功率状态 SOP 可以为电池提供输出和输入的极限参考功率，使电池在规定的电流、电压范围内工作，以确保电池安全、经济运行。

电池最大充放电功率可由充放电电流和电池端电压得到，充放电电流随外部功率需求的变化而变化，电池端电压与工况即荷电状态有关，因此最大充放电功率并不是恒定不变的。

电压与 SOC 有关，在电池电压约束条件下，电流不受 SOC 约束对应的 SOC 范围定义为非边界 SOC 范围，在非边界 SOC 范围内，只要电流在规定值内，电

压一定不会越限，此时最大充放电功率不受 SOC 约束，电池工作在此范围内，只要保证工作电流低于最大允许电流即可保证电池安全运行；电流受 SOC 约束对应的 SOC 范围定义为边界 SOC 范围，当 SOC 在边界范围内时，充放电功率受 SOC 约束，即最大充放电功率与 SOC 有关需根据 SOC 设置最大充电电流和最大放电电流，即最大充电功率和最大放电功率，否则会因过充或者过放而损坏电池。

电池恒流充电时，随着 SOC 增大端电压逐渐升高，充电功率逐渐增大；从恒流过渡到恒压时，电流减小导致功率逐渐衰减。电池恒流放电时，随 SOC 减小端电压逐渐减小，放电功率逐渐减小，端电压达到放电截止电压后，若要继续放电需减小放电电流，导致放电功率衰减。

电池充放电功率约束如下：

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max}$$

式中： $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 分别为电池最小、最大充放电功率。

二、考虑 SOC 差异调整的“部分 SOC 比例”功率分配策略

电池储能系统具有双向调节能力，是优质的调频资源。当电池储能单元群中电池储能单元 SOC 差异较大时，电池储能单元群的双向调节能力将受到影响，甚至部分电池储能单元率先达到安全充电上限，降低储能系统调节能力。

（一）电化学储能单元群双向调节能力

1. 电化学储能单元群双向调节能力

电化学储能单元群的双向调节能力可以从能量、功率两个角度衡量，相比调峰对电化学储能单元群的能量需求，调频周期短，对参与调频的电化学储能单元群功率需求更高。当电池储能单元处于边界 SOC 范围时，电池最大充放电功率因受 SOC 限制降低，而电池储能电站需要同时承担多种应用类型任务，各应用场景对功率、容量和工作时长的需求各不相同，导致电池储能单元之间荷电状态存在差异，部分处于边界 SOC 的电池储能单元充放电功率下降，造成整个电池储能单元群最大充放电功率受限，双向调节能力降低，无法提供足够的功率参与调频。同时，由于荷电状态差异增大，在较大的调频需求 Ref 情况下充放电，部分电池储能单元 SOC 逐渐升高至安全 SOC 上限，或者 SOC 逐渐降低至安全 SOC 下限，从而退出运行，导致电化学储能单元群整体可提供的充放电功率进一

步降低。

2. 电化学储能单元群 SOC 分散度

电化学储能系统承担电网调频信号中的高频分量可以提高系统调频精度，高频分量在控制周期的分布具有方差较大，均值为 0 的特征。由于电网调频需求高频分量具有均值为 0 的特点，即充电需求和放电需求是对等的，为提升电化学储能电站的双向调节能力，参与调频的电化学储能单元群 SOC 差异应尽可能小并接近 0.5。

为衡量电化学储能单元群整体荷电状态水平，引入 SOC 均值，定义如下：

$$\overline{S(t)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i(t)$$

式中： $\overline{S(t)}$ 为包含 N 个电化学储能单元的电池储能单元群平均 SOC。

为衡量电化学储能单元群 SOC 分散度，引入 SOC 极差 r 和标准差 δ ，定义如下：

$$r = \max S_i(t) - \min S_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i(t) - \overline{S(t)})^2}{N-1}}$$

r 表示电化学储能单元群中电化学储能单元最大 SOC 与最小 SOC 差值，SOC 最大的电化学储能单元限制电化学储能单元群的充电容量，SOC 最小的电化学储能单元限制了电化学储能单元群的放电容量， r 越大电化学储能单元群的 SOC 差异越大，电化学储能单元群实际可用双向调节能力越差。 δ 表示电化学储能单元群中电化学储能单元 SOC 的分散程度， δ 越小电化学储能单元群 SOC 分散程度越小，电化学储能单元群整体出力越好。

（二）部分 SOC 比例功率分配策略

基于电化学储能单元剩余可用电量的功率分配策略有利于各电池储能单元 SOC 趋于一致，其分配思路是使 SOC 大的电化学储能单元优先放电或承担更多的放电需求，SOC 小的电化学储能单元优先充电或承担更多的充电需求。基于电化学储能单元剩余可用电量的功率分配策略原理如下：

根据电化学储能单元的剩余可用电量定义分配系数 f_i ，获取各电化学储能单元实时分配系数后，一方面可用按照分配系数大小，成比例地计算各电化学储能

单元充放电功率 P_{fi} ，与最大充电功率 $P_{i,\max}^{cha}$ 和最大放电功率 $P_{i,\max}^{dis}$ 校验后，下发至各电化学储能单元，这里称为“SOC 比例分配策略”；另一方面可以按照分配系数由大到小，依次按照最大充电功率 $P_{i,\max}^{cha}$ 和最大放电功率 $P_{i,\max}^{dis}$ 分配至各电化学储能单元，这里称为“SOC 排序分配策略”。

$$f_i = \begin{cases} S_i - S_{\min} & P_{\text{ref}} \geq 0 \\ S_{\max} - S_i & P_{\text{ref}} < 0 \end{cases}$$

$$P_{fi} = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^k f_i} P_{\text{ref}}$$

当电化学储能单元群 SOC 差异较大时，上述功率分配策略能够较好的缩小 SOC 差异，有利于各电化学储能单元 SOC 趋于一致。然而，“SOC 比例功率分配策略”默认全部电化学储能单元参与调节，无疑扩大了电化学储能单元响应数量，降低了电化学储能单元群整体运行效率，频繁充放电也会加速电池寿命衰减；“SOC 排序功率分配策略”虽然优化了电化学储能单元的响应数量，但长期以最大充放电功率运行，不利于减缓电池寿命衰减。

考虑 SOC 差异调整的部分 SOC 比例功率分配策略，在缩小电化学储能单元群 SOC 基础上，改善上述功率分配策略存在的电化学储能单元响应数量冗余、加速电池寿命衰减问题。该分配策略的主要目标是：实现电化学储能单元群 SOC 差异调节功能，在此基础上尽量减少电化学储能单元响应数量、非必要不满功率充放电，从而提高电化学储能单元群运行效率，延缓电池寿命。

第四章 电力系统数据平台

第一节 IEC61850/61968/61970 一体化建模

一、统一公共信息模型

与设备状态信息相关的生产 MIS 系统、调度自动化系统和在线监测系统的信息模型是不统一的。生产 MIS 系统主要管理设备的台账、运行记录、检修记录、缺陷记录和预防性试验记录等基本信息，其数据特点是静态和离线的，资产管理模型主要遵循 IEC 61968 标准。调度自动化系统主要管理电网的实时运行数据，其数据特点是动态和在线的，电网信息模型主要遵循 IEC 61970 标准。在线监测系统则主要管理设备运行情况下的状态连续测量参数，其数据特点是准实时数据，其信息模型主要遵循 IEC 61850 标准。

由于这些 IEC 标准都单独定义了自己的信息模型，使得如果没有统一的建模设计，将使得平台系统在每一类信息接入时，都要进行单独的信息建模。并且一旦源端信息模型发生改变后，平台系统无法自动完成维护，造成信息交互困难。为此，需要基于一体化建模思路，对所有电力设备相关信息采用统一的标准化建模，以适应不同信息系统的信息交互需求。

IEC 61970 和 IEC 61968 虽然存在差异，但均遵循了 IEC TC57 CIM 模型。而 IEC 61850 采用面向对象建模，不仅包含了各数据点的数据值，而且包含了采用了自描述的设备模型本身的信息。IEC TC57 CIM 和 IEC 61850 SCD 由于演化历史和侧重点不同，建模方式和模型内容都有差别，因此不能直接作为一个集成模型使用，可以针对特定系统需求对两个模型协调或者在映射的基础上集成。

平台系统在接收到基于 IEC 61850 通信规约的数据模型后，可以通过模型转换功能，将基于 IEC 61850 标准的变电站数据模型转换为基于 IEC 61970 标准的数据模型，包括设备模型、采集模型和测点模型。因此，在扩展性和面向对象化程度较高的 CIM 框架的基础上，兼容现有的 IEC 61970/61968 并覆盖 IEC 61850，实现一体化建模是可行的。

IEC TC57 CIM 和 IEC 61850 SCD 两个模型覆盖了电力信息化的主要应用领域。在构建统一公共信息模型（简称 UCIM）时，可以这两个模型为基础，按以下步骤构建：

基础信息模型形成，以 IEC TC57 的 CIM11 为基础，做必要调整。

融合 IEC 61850 SCD 模型到基础信息模型：①参考 IEC 61850 SCD 的模型层次调整 CIM 的层次体系；②相同或类似的类型描述采用 CIM 类型；③补充 IEC 61850 中存在而 CIM 缺少的类型、属性和关联。

增加应用系统需要但信息模型中不包含的内容，包括缺失的属性取值枚举、缺失的属性定义及关联定义和缺失的类型。

基于上述原则构建的 UCIM 作为信息模型合集，与 IEC TC57 CIM 和 IEC 61850 SCD 模型的映射关系是明确、可描述的，由此基于 UCIM 的模型与基于 CIM 或 SCD 的模型可以方便地转换。

二、SCD、CIM 与 UCIM 的映射

在建立统一公共信息模型之后，需定义规则实现基于 SCD、TC57CIM 的模型到基于 UCIM 的模型之间的转换。

（一）SCD 模型到 UCIM 模型的映射

SCD 模型是一个层次化的树型结构，可从树根开始逐级遍历整个模型，映射规则只需给出 SCD 文件中每个元素如何映射到统一模型类，以及类对象间关联的建立方式。SCD 模型的层次化结构由模式文件定义，这些模式文件应视作 SCD 模型到统一模型映射规则的一部分。

根据上述映射内容建立每个 SCD 类到 UCIM 类的映射，形成 SCD 模型到 UCIM 模型的映射规则。该映射规则用于指导 SCD 模型到 UCIM 模型的转换。

在对象层级 / 关联的处理上，采用上级关联、下级关联相结合的处理方式。如果某类对象层次结构上级类对象只有一种，则采用对象到层次结构上级的关联；如果多于一种到上级类的关联，可采用到上级对象的关联，也可在上级对象处描述关联。同一个关联或者在上级对象处描述或者在下级对象处描述，但只能描述一次。

UCIM 对象需要使用确定的 URI 标识每个对象。从 SCD 模型到 UCIM 模型转换时考虑的是用已有的变电站模型建立整个电网模型。变电站名称信息能够提

供一定范围内的唯一性，在变电站名称基础上形成的层级对象路径名也因此具有唯一性，因而路径名可直接用作部分对象的 URL 实际转换时，根据对象类型的不同分别使用路径名、类型结合对象序列号、UUID 等多种不同形式。最理想的情况是能够根据对象的特征值确定对象编码，但这需要一个集中式的编码管理中心的支持。

（二）CIM 模型到 UCIM 模型的映射

TC 57 CIM 是 UCIM 的子集，基于 TC 57 CIM 的模型到 UCIM 模型的映射采用的描述与 SCD 到 UCIM 的方式类同。基于 TC 57 CIM 的模型中各对象本身具有 URI，映射规则中无须定义 URI 生成规则。

（三）UCIM 模型提取与 UCIM 到 SCD 模型的映射

基于 UCIM 模型生成 SCD 模型，是从网状模型转换成树状模型的过程，也是从全集模型提取子集模型的过程。

在 UCIM 模型中，类之间的关联关系形成网状，选取一个树状层次结构作为对象提取路径。配合类映射规则，形成完整的 UCIM 模型到 SCD 模型的转换规则。根据提取路径定义获得树状组织的部分 UCIM 模型，这部分模型中的类与 SCD 类型一一对应，再根据类映射规则将这些类的对象转换成 SCD 类型对象，即完成从 UCIM 模型提取信息转换成 SCD 模型。

信息提取树状结构包括对需要提取的 UCIM 对象的类型、属性性质以及关联性质的约束的描述。具体而言，信息提取树状结构规定信息提取的起始类或起始对象、定位到下级对象使用的关联，每类对象需要处理的属性和对象选择过滤条件等。

UCIM 信息提取配置模型设计为两个部分：信息提取模式和信息提取路径。信息提取模式指某种类型的对象在被提取时需要处理的性质集合，是对提取内容类、性质范围的约束。提取模式主要有两个子节点：性质的包含序列与排除序列。信息提取路径也称为交换路径，由一组用于限定所要交换的对象范围的路径节点组成。存在三种类型的路径节点：类起始交换路径节点、对象起始交换路径节点以及关联交换路径节点。每一个交换路径总是由一个类起始交换路径节点或对象起始交换路径节点起始，后跟一个或多个关联交换节点链。信息提取配置中可以使用 IEC 61970—403 中规定的所有过滤条件定义。

从 UCIM 到 SCD 的类映射规则与从 SCD 到 UCIM 的类映射规则相似，是“SCD

模型到 UCIM 模型的映射”的反向映射。

（四）UCIM 模型提取与 UCIM 到 CIM 模型的映射

利用信息提取树状结构定义的提取模式和提取路径，可以完成从 UCIM 模型提取 CIM 模型。

三、在线监测模型和调度模型的拼接

从 EMS 系统采集的电网模型与量测数据，包括变电站的模型，厂站一次接线图以及遥测、遥信数据（包括电压、电流、有功功率、无功功率、断路器位置、刀开关位置等），不包括设备在线监测数据。地调模型采用 IEC 61970 模型，主要用于描述电网一次设备模型。

设备在线监测实时量测数据建模和通信采用 IEC 61850。IEC 61850 的子站对象模型主要分三个基本对象层次，用基于 XML 的变电站配置描述语言 SCL 来描述：变电站模型，描述一次设备的相互关联以及它们的连接关系；IED 装置模型，描述了变电站二次智能电子装置的模型和功能等；通信系统模型，描述了与通信相关的对象模型。IEC61850 只是作为二次装置模型和通信模型，用于各个变电站更新在线监测的量测值。

对于在线监测信息中的每一个 LN，通过标准化建模时增加一个统一资源标识符 URI 属性（这里的 URI 是一次设备的电力系统资源编码），这样就与 IEC 61970 地调模型的一次设备对象唯一标识相匹配。

进一步结合地调模型，与一次设备 CIM 对象进行关联，包括 cim: Breaker（断路器）、cim: PowerTransformer（变压器）和 cim: BusbarSection（母线）。

从地调获得的量测及从综合处理单元获得的监测信息统一进入平台系统，都作为设备所属的量测，通过量测类型（MeasurementType=P, Q, I, C02, H2 等）区别采集信息类型。最终，完成了基于 IEC 61970 CIM 调度模型、E 格式调度量测模型和 IEC 61850 二次模型（在线监测设备模型）的自动增量导入与整合，从而形成完整的调度模型数据、在线监测模型数据的统一建模，为综合应用、展示奠定了基础。

四、基于 CIM 的生产模型与调度模型的统一构建

平台将从公司生产 MIS 系统获取的设备台账模型和从地调系统获取的调度

模型，基于 IEC 61968 和 IEC 61970 统一建模、整合，方便其他软件模块的应用。

整合的信息模型以 CIM 10 为基础，根据状态分析与故障诊断的需求及整合数据的实际情况，进行适当的扩展。对信息模型的扩展主要包括：设备试验数据、缺陷数据、资产、技术参数、状态分析结果等。在扩充信息模型时，根据生产管理系统 MIS 提供的 CIM XML 数据，进行提取、归纳、抽象信息模型需要扩展的部分，提高建模的效率和质量。

五、建模工具

建模工具用于管理统一公共信息模型（UCIM），遵循 UML、IEC 61970 系列标准，能够方便地编辑、分析信息模型（又称为模式）。模式资源包括包、类、属性、角色、元属性，该工具以树状结构的形式将这些模式资源以及模式资源间的关系展现出来。

建模工具主要有以下几个功能模式。①导入模式：既支持从 RDF 文件导入，也支持从数据库中导入。②编辑模式：支持对各种模式资源的新建、编辑、删除等基本的维护操作，也支持统计类数量、查找子类或者继承树等高级查询功能。③模式比较：支持将不同的模式进行比较的功能，还可以通过过滤，只关注特定类型的模式差异。

模式资源中，每个包资源都可以包含一张或多张类图。每张类图以图形化的方式展示类以及类之间的关系，通过编辑类图，进而编辑类以及类之间关系的信息。图形化的建模方式，简化了用户的建模操作，并且通过类图更容易让用户理解信息模型。

第二节 基于模型源端维护的信息交互

平台需要采集、接入、集成多个专业领域的的数据信息，主要包括：①通过 IEC 61850 MMS 通信的多个变电站的在线监测数据、谱图文件；② EMS 的 CIM 模型、E 格式量测数据及 SVG 厂站图；③生产 MIS 数据。这些信息不仅数据量大，而且采用的标准和方式也不相同。平台系统通过采用标准化建模技术，以“源端维护、自动上传、智能应用”方式可减轻维护工作量、降低维护出错的可能性，使专业人员从日常的信息维护工作向系统的运行管理提升。

一、与综合处理单元 IEC 61850 通信的免维护

以往常采用的通信规约由于没有采用对象建模以及设备自描述规范，各变电站上送到主站的数据基本上是测点数据，缺少电力设备模型信息和设备间的关系信息，因而不能完全反映电力系统的全部模型信息。在这种传统模式下，需要在平台系统中单独进行建模，并建立设备模型与测点数据之间的对应关系，以便获取各变电站的实时数据。这种方式存在如下缺点：①需要建立两套数据模型，各变电站建立一套数据模型，平台系统建立另一套数据模型，并且需要对数据模型进行各自维护，从而增加了模型维护的复杂性；②由于平台系统和变电站的模型是各自建立、各自维护的，因而需要建立两者之间的对应关系，当任一方的数据模型发生变化时，如果未及时维护数据模型之间的一致性，将很容易导致数据采集和控制的错误，危害电力系统的安全生产。

而 IEC 61850 则确立了电力系统的建模标准，定义了统一的信息模型和信息交换模型。平台系统不再需要进行数据建模，而是在数据源端一次完成数据模型的维护。平台前置系统在支持 IEC 104、IEC 103、CDT 等规约的基础上，还支持 IEC 61850 通信规约，实现平台系统与综合处理单元通过 IEC 61850 MMS 的远动通信。

平台的 IEC 61850 规约插件，主要负责从前置通信库或从通信装置中获取 IEC 61850 通信模型，与 IEC 61850 装置或网关机通信，接收通信装置发送的报告控制块信息，转换成 IEC 61970 采集模型的遥测、遥信、遥脉数据，转发到后台 Scada 数据库。同时，接收从后台下发的遥控、遥调命令转换成 IEC 61850 模型数据下发到装置，以及接收和下发装置定值管理、故障信息、录波数据等功能。规约插件初始化负责从 IEC 61850 模型库中装载各采集厂站以及服务单元信息，并根据条件从通信数据库或与装置通信获取整个服务单元通信模型过程。

各变电站安装的综合数据处理单元，负责集中该变电站内所有一次设备监测采集装置数据，并通过 IEC 61850 MMS 通信标准直接发送至平台的前置服务器。综合数据处理单元上传至平台的数据内容包含在线监测设备产生的量测、状态、控制等信号量以及谱图等文件。数据内容通过建立符合 IEC 61850 通信标准的数据集、报告控制块方式，当变化时或周期上送。平台系统前置服务器收到子站数据内容后经过一定的处理后存入平台实时数据库和历史数据

库中。录波、谱图等文件采用 ftp 文件服务方式或 mms 文件服务方式传送到平台前置服务器内。

平台系统与各变电站综合数据处理单元通信时，其 IEC 61850 通信模型可采用离线 SCD 文件建立或直接通过通信召唤在线生成。在通信链路刚通时，首先召唤综合数据处理单元生成 SCD 文件，查看其版本信息。若版本信息与平台系统数据库中版本发生变化，则认为子站综合数据处理单元通信模型发生变化，需要重新召唤通信模型，再进行通信交互数据库；否则认为通信模型未变，直接采用平台系统已有的通信模型直接通信。通过该流程确保了平台系统与子站综合数据处理单元 IEC 61850 通信时通信模型的一致性和平台系统通信模型的免维护流程。

平台系统与综合处理单元通过 IEC 61850 规约进行通信，实现 IEC 61850 通信规约在主站与子站端的大规模工程应用。通过自动召唤 SCD 文件，根据 SCD 版本号自动进行 SCD 解析、模型召唤、装载、验证，发布流程，实现免维护。

二、与地调 Web 系统接口的免维护

各个调度自动化系统可能是由不同的厂商开发，具有不同的系统型号和技术架构。平台要实现与各个调度自动化系统的统一信息交互，首先要明确平台与地调 Web 系统的接口规范。接口规范中定义各地调系统上传至平台系统的电网模型、变电站 SVG 图形、E 格式量测文件的格式，同时明确相应的内容要求。例如：CIM 模型中对象的 rdf: ID，与 SVG 图形文件中的 ObjectID 属性值相一致。CIM 模型中厂站名、设备名使用 Naming，name 属性，与 SVG 图形文件中的。bjectName 一致，并与 E 格式量测文件中的厂站名、设备名相一致。CIM 模型及 SVG 图形文件中的设备编码应保持唯一性和持久性，即对于同一变电站或同一设备，新上传的 CIM 模型及 SVG 图形文件中的编码应与上一次 CIM 模型及 SVG 图形文件中的编码一致。

三、与生产 MIS 系统的信息交互

生产 MIS 系统将 CIM/XML 文件主动传输给平台系统。数据采集方式分为全量数据采集和增量数据采集两种。

第一种：全量数据采集：应用于对数据源的首次采集（系统初始化），需要

从数据源中按规定格式将数据全部采集出来,以全模型方式传输给平台系统。

第二种:增量数据采集:增量数据采集只采集自上次采集以来数据源中新增或修改的数据。增量数据采集可以是定期的,优先采用在数据源中创建触发器记录关键表的数据变化情况,依据数据变化情况以增量模型方式传输给平台系统。

平台与生产 MIS 系统进行数据交互,获取各地区供电局的设备生产管理数据。平台与生产 MIS 通过综合数据网互联,采用 ftp 协议传输。双方采用松散耦合的互联,通过 CIM/XML 方式传输模型实例和数据。由平台系统负责向生产 MIS 系统提供/更新 CIM 模式文件,数据类型定义包括设备台账、缺陷记录、试验报告三大类的数据。

第三节 基于 SOA 的统一 CIS 服务

一、SOA 应用架构

平台系统基于 SOA 架构,采用面向对象实时数据库建模,实现了统一的数据展示、系统管理和 Web 发布。采用数据层、视图层、服务层三层结构设计,以统一设备模型为基础联通各专业数据库,构建完整的输变电设备全景数据库。

电力设备相关数据包括模型、图形及实时/历史运行数据和事件、告警等各类信息,通过全景视图技术从时间、空间、对象等维度收集并整合相关信息,确保数据及模型和图形的一致性,促进信息范围的全面覆盖和各类数据在全网的共享。

SOA 提供的公共模型和数据服务,为综合应用和外部系统提供了高效、完善的模型和数据服务。外部系统也可以通过建立遵循统一标准的应用库或通过代理建立相应的数据库纳入统一管理,直接将其管理和产生的数据融入全景数据库中,为各种专业提供各类视图及综合应用。

系统采用基于 SOA 的双总线架构,高速数据总线保证实时应用效率,标准集成总线能实现异构系统集成。一方面,以一体化信息模型为基础构建了应用数据库;另一方面,按照统一模型服务的需求,定义了全景视图,依靠该视图可以获得整个平台内的所有信息。即使信息存在于第三方系统,也可以通过代理服务进行转化,保证所有应用集成化运行。

电网全景视图是一个逻辑上的电网全模型，而实现上是由独立的应用系统模型组合而成，从而综合了分布式建模可扩展性和集中式建模数据一致性的优点。综合信息视图定义工具对各应用模型进行组合，并把应用内部属性开放为公共属性。电网全景视图把分布于各个子系统的电网模型、实时数据、历史数据进行统一描述，可保证子系统运行独立性和可扩展性，同时可随着子系统模型在线扩展电网全景模型。

二、多源数据整合

平台系统的数据源主要为地区局调度系统、在线监测、生产管理系统。各数据源的提供方式为：调度系统，CIM XML 文件模型数据和 E 语言文件实时数据；生产管理系统，CIM XML 文件模型数据；在线监测数据，IEC 61850 通信获得的模型、实时、谱图等数据。由于这几个系统之间是相互孤立的，并且在维护上存在不一致性，因此数据的整合便是“分析整理 - 抽取模式 - 拼接匹配 - 接入系统”的过程。

对所有调度、生产数据进行分析，抽取其信息模式，通过建模工具对数据库表进行初始化。整理分析接入生产数据时，考虑到生产数据量之大，因此首先需要分析导入生产数据的顺序，然后解析每个文件并进行联合整理、清洗、修补数据。接入调度模型数据过程中，根据对象编码、调度号及模型层次进行数据匹配，将调度数据信息合并。接入 E 文件格式实时数据，根据文件中提供的调度模型信息名称进行匹配。接入在线监测数据时，根据模型名称信息进行匹配，建立在线监测数据量测对象模型，同时将告警信息转为 GES 事件信息。

由于信息源在数据编码、命名规范上有着各自的特点，数据的拼接与匹配成为难点。不同系统的数据如果不能采用唯一编码标识进行匹配，只能采用各个系统中都一致的调度号进行匹配，即通过抽取规范化设备名称作为匹配标识。

三、统一 CIS 服务

平台系统应能够为应用软件系统提供标准化的信息访问支持，即基于 IEC 61970 标准为高级应用提供以公共信息模型（CIM）为语义定义基础、以组件接口规范（CIS）为访问语法的标准化接口服务。通过这一系列接口，开放平台系统的模型数据、实时数据、历史数据和事件数据，实现标准化的数据发布。遵循

IEC 61970 CIS 标准实现平台系统数据的 GDA、TSDA、HSDA 以及 GES 的标准输出和输入，实现平台系统数据信息的共享。遵循 SVG 国际标准、IEC 61970 实现图形的标准输入和输出，实现平台系统图形信息的共享。

标准 CIS 服务以关系数据库存储的电网模型为基础，以 GDA 服务为核心，涵盖元数据（模式）管理、对象编码（URI）管理、电网模型数据、实时数据、历史数据管理、数据整合与交换、系统管理等数据管理功能，实现电网模型、实时数据、历史数据、事件数据的在线标准接口发布。

统一 CIS 服务将 IEC 61970 CIM 和 CIS 系列标准应用到平台系统，实现了数据的模型统一和访问接口统一。统一 CIS 服务首先从模型入手，采用 CIM 基准模型，在此基础上通过模型扩展工具对模型进行扩充，使之符合平台系统的需求。统一 CIS 服务严格按照 IEC 61970 403、404、405、407 系列标准实现 GDA、HSDA、GES 和 TSDA 接口，并通过第三方的测试，确保了语义的一致性。

统一 CIS 服务实现了数据自动汇集和整合。数据汇集任务将生产、调度数据等汇集起来，经过分析、清洗和转换，按照统一的信息模型组织起来写入平台系统。各应用系统直接通过标准接口从平台系统获取数据，并将设备评价、分析结果等数据回写入平台系统。如此，摒弃了和各系统制定私有接口的方式。

第四节 基于智慧城市的电力数据平台建设

一、智慧城市建设的 data 内容

智慧城市的发展建立在城市数据充分开发的基础之上，通过对城市数据资源的采集、整合、组织、挖掘、分析和利用，提高城市管理和服务水平。城市数据主要包括地图与兴趣点数据（POI）、GPS 数据、客流数据、手机数据、LBS 位置服务数据、视频监控数据、环境与气象数据、社会活动数据等，具有时空多维性、多尺度与多粒度、多元与异构性等特征。因此，智慧城市建设中的 data 主要涉及到两方面的内容：大数据和规政府开放 data。大数据指城市 data 大规模、复杂和不断变化的 data 集的持续积累。

开放政府是智慧城市的前提，政府开放 data 是智慧城市建设的切入点，城市政府 data 的开放性是智慧城市评价的重要指标。上述两类 data 都是智慧城市建设

中的重要突破口，通过对它们的采集、管理、分析和可视化，可提供更先进、更大规模、更细粒度和实时的方式来了解和控制城市。

二、智慧城市建设的电力需求侧响应管理

城市作为各类产业集群的聚集体，随着城市经济的快速发展，企业和居民对电力的需求量一直呈现持续增加的趋势，但电力供应却因种种原因，无法完美地匹配需求，因此总会表现出地域、产业等各种形式的用电紧张形势。智慧城市的建设基础为数据，通过对数据的开放、共享、挖掘、协同实现对电力资源的综合规划，从企业客户电力需求出发，实施需求侧管理，有效缓解电力能源紧缺问题。

电力数据的采集是需求侧响应的首要前提。目前，我国各级城市的电力数据采集主要有三种形式：一是使用电力低压载波技术实现数据传递和信息交换，即高频的通信信号与电力工频电流通过占用不同的频段来共用电力线网络进行传输。二是使用需求响应终端，通过传统稳定可靠的 RS485 通信进行有线的数据传输。三是通过安装智能电表，把现场的数据通过网络传到远端，改变了传统电表不能传输数据的缺陷，同时采集的电力参数也更为全面准确。

电力数据的公开是需求侧响应得以实施的重要条件。企业通过了解用电数据，例如本市日最高用电负荷、最高可用电力、预计电力供需平衡情况等预测信息可以得知产业和行业动态，进而对本企业采取有针对性的产品规划、采购生产，有利于降低库存、加快资金回收、加快进行资源整合，同时能动态地适应未来市场的各种变化，在供应链中准确地进行定位，确定企业的核心业务及发展方向，进而推动智慧产业聚合升级。例如北京市公开的“全社会用电量情况”就分年度显示了每年在第一产业、第二产业和第三产业的用电量情况。而“电力平衡表”，则更为详细地介绍了加工转换投入产出量、运输和输配损失、终端消费、平衡差额等情况。

三、依托政府数据开放平台的电力数据平台建设

在政府数据开放平台上聚集了高密度高价值的城市数据，有利于吸引社会各方基于城市实际需求和应用场景对开数据进行融合利用，创造社会经济价值。因此电力数据平台可以依托于发展较为成熟的政府数据开放平台进行建设。

首先，注重顶层设计，制定电力数据开放政策，加强各部门协作。电力数据

作为国民经济建设的关键领域和民生领域的重要组成部分，可制定不同的阶段性目标，分步实施电力数据开放。另外，应设置专门机构负责推进电力数据开放工作。从排名前列的数据开放城市电力数据开放情况来看，电网系统企业的缺位非常严重。五个城市的电力相关数据主要由城市统计局、物价局、经济和信息化部门、发展与改革部门发布，没有一个数据是由电网系统企业发布。同属领域的燃气、燃料和水的相关企业，如水利局等在政府数据开放平台上表现则非常活跃，上传数据量大，更新频率快。因此，应改变行政机构条块分割治理结构的现状，成立专门的电力数据发布小组或委员会，加强电力数据与其它领域数据利用的统筹规划。

其次，统一数据平台，制定详细的数据开放规范。电力数据采集之后应采用统一标准进行规范化，保障数据的准确性及时效性，并将数据提交统一的平台开放。关于开放数据的格式标准，万维网发明者 T.B.Lee 提出了一个开放数据五星标准，目前的电力开放数据提供可下载的数据集格式主要以 DOC、XLS、csv、JSON 和 AIP 为主，属于一星和二星的数据格式，离标准化可互操作的数据集的目标还有较大差距。

最后，关注电力数据安全，注重数据的计算挖掘。目前，没有具体规定在开放过程中何种数据是可供开发的，可能会导致数据安全问题。例如“用电客户电量信息”会列举企业名、用户号、用户名、合同容量、用电分类、计量点用电分类、计量点行业、是否重点耗能企业、是否保用电企业、每月用电量、用电年份、用电月份等数据，但这些数据开放的程度应予以界定。另外，为了释放数据红利，电力数据应与其他各种来源数据进行组合，例如 GPS 数据与电力数据的组合可以提供丰富的位置服务，为企业的选址生产物流等决策提供依据。同时，应主动结合云计算、大数据技术，利用海量数据，挖掘数据价值，使数据由简单开放到实现价值潜能，为社会提供新的经济增长点。

第五节 基于电力数据中心数据流转的可视化途径

一、平台总体架构与技术架构设计

（一）平台总体架构设计

平台主要包括源数据层、数据采集层、数据存储层、应用服务层和用户层。

用户层：数据资产运营管控平台系统的用户，实现访问控制。

应用服务层：数据资产运营管控平台系统部署在该层，实现监控指标的展示和系统的管理功能。

数据采集层：将源数据加工为指标数据，实现指标数据收集和指标数据计算的功能。

数据存储层：存储计算后的指标数据。

源数据层：数据资产运营管控平台的基础数据来源，包含：①数据资产管理子工具的数据，如资产清单，资产申请单等。②大数据平台的各指标数据，如平台 CPU、内存、存储使用量等。③各组件作业运行信息的数据，如 Workflow 调度工具的作业信息和作业运行信息，Ogg 数据同步工具的任务信息和任务执行信息等。

（二）平台技术架构设计

可视化平台主要包括展示层，应用层，模型层和基础层。①展示层：前端框架采用 Vue 2 6.10 + ElementUI2.13.2 + Echarts 4 8.0。②应用层：应用层框架采用 SpringBoot 2 2.4+Mybatis 3.3.1+Quartz 2 3.0 + Druid 1 1.13,集成短信告警服务，使用 AOP 技术实现系统日志服务，应用层是由具体实现各种业务逻辑的类实现的，这些类必须实现框架指定的接口方法，主要功能是完成用户实际的业务功能。③模型层；使用 UDM 建模思想进行数据建模。④基础层：支撑 UDM 模型落地，完成应用层的数据交互。

二、可视化功能模块设计

模块主要包括：数据中心大屏展示模块，应用监控模块、数据监控模块、作业监控模块、专项监控模块、租户监控模块、平台监控模块和系统运维管理模块。

①数据中心大屏显示模块：以可视化图形方式显示数据中心的运转情况；包

括接入的数据源，接入作业、数据中心各层级表、数据中心各层级加工作业、数据服务接口数及数据服务接口加工作业。②应用监控模块：使用表格和图形方式展示大数据中心和非大数据中心应用各项指标。③数据监控模块；使用表格和图像方式展示数据资产各项指标、数据接入表数量和作业数等指标，数据服务各项指标、数据质量各项指标和数据质量检查规则运行情况等。④作业监控模块：使用表格和图像方式展示作业运行汇总指标、ETL 作业各项指标和异常作业处理等。⑤专项监控模块；使用表格和图像方式展示元数据各项指标，⑥租户和平台监控模块；主要展示租户和平台的各项指标，并进行租户和平台切换查询。⑦系统运维管理模块：主要进行用户管理、调度管理、Excel 导入，菜单管理、字典管理，角色管理、定时任务、日志管理和流程管理等。

第六节 电网调度中心图形信息跨平台共享

一、调度中心电力图形共享方法

电网调度中心自动化系统本身包含了众多电力应用软件，用于支撑电力系统的潮流计算、稳定分析、电网规划、负荷预测、继电保护整定计算等需求。随着我国电力系统的发展需要，多应用分布在不同服务器独立运行的模式逐步被综合自动化模式取代，即由各级调度自动化主站基于内部统一的综合信息平台，规范各类电力应用的基础数据与应用环境。

电网结构由于新设备的投入、新线路的架设和新电站的建设，总是在不断变化中，电力图形的描述也会随之进行改变。为了保证与电力系统结构实时同步，并保证电力调度人员在不同应用中查看的图形较为一致，独立应用更倾向于采用和调度中心相同的电力图形，这使得电网调度中心图形的共享导出成为了一项重要的工作。本章所讨论的共享过程是指从源系统中将未经转换的相关图形信息文件，通过预处理与打包压缩等方式，将数据传输到目标系统以供解析与进一步应用的过程。

（一）调度中心图形系统

为解决电力系统领域各类独立应用图形系统不相兼容的问题，电网调度中心采用了 IEC61970 系列标准，公共信息模型 CIM 在实际应用中又发展为电力系统

数据模型描述语言 CIM/E 和电力系统图形描述语言 CIM/G。调度中心图形系统的图形系统以文本文件形式存在, 包含了图形、图元、数据、图表、间隔模板等类型, 分布在操作系统图形文件夹的各级目录中。在用户使用智能电网调度支持系统时, 根据前端操作, 系统实时调用并解析对应的文件, 在前端形成展示界面, 供电网调度人员查看与使用。

1. 图形数据结构

调度中心图形文件遵循统一的命名规则用以区别不同图形, 常用命名形式如: (名称)+(归属)+(类型)+(g)+(后缀)。该命名规则采用分段描述格式, 通过不同的信息段来表征图形文件在整个图形系统中的作用。

2. 模型数据结构

调度中心数据模型文件跟图形文件的存储形式不同, 它是以单个基于 CIM/E 语言描述的文本文件形式存在, 其内部遵守 XML 规则, 通过标签分割各个子表, 以对应不同类型数据的模型描述。

尽管不同调度中心模型信息的表名及表格内的对象属性列表会存在一定的差异, 但在常用的模型表中, 各调度中心使用的规范具有较好的一致性。通常一个模型中会有十几个表格至几十个表格, 它们所包含的模型信息可分为三类: 拓扑类表, 表述不同控制区域厂站之间通过交流线段连接的主要拓扑关系; 设备类表, 描述设备的基本属性以及部分设备数据; 数据类表, 描述详细电力数据, 这部分表的信息数量最多, 类型最复杂, 占用了模型文件超过一半的空间, 有统筹全局变量类型的表格, 也有各类采集设备返回的具体数据。一般模型文件的大小由几 MB 到几百 MB 不等, 根据所在调度中心等级不同、信息表格构成不同呈现一定的差异。

模型数据作为图形数据的重要支撑, 图形化界面的各项应用操作以及数据显示都需要在模型的辅助下完成。独立应用软件根据实际软件的开发方案, 在应用升级中用到的表的类型有所不同。如采用调度中心拓扑图形, 并使用私有数据模型来描述设备的软件只需要读取拓扑类表; 采用调度中心拓扑图形, 并在调度中心设备模型基础上附加私有数据的软件则需要同时读取拓扑类表与设备类表; 数据类表则一般较少为独立软件所使用, 原因是大部分数据表仅在调度中心内部有效, 在共享导出的时候并不具有太大的实用价值。

（二）最小可用图形集合

调度中心自动化系统面向所有高级应用的特点导致其需要涵盖各级调度中心的各类电气元件，图形系统呈现出文件数量大、体积小、文件层次结构复杂的特点。模型信息除了包含基本拓扑以外，还带有各个设备的基本信息以及大量的实时数据信息，其中大部分信息只有在调度中心内部系统才能起到作用。图形共享导出作为执行频次高、数据体量大的传输过程，需要关注效率问题。这就要求导出图形的时候尽可能在保证图形可用性的前提下，尽可能的精简图形数据和模型数据文件，以保证共享过程的效率。

1. 共享拓扑设计模式

该类型软件采用调度中心拓扑图形，并使用私有数据模型来描述设备。共享导出只需要包含核心的拓扑数据，即选定的系统拓扑图、属于该系统图的厂站拓扑图，被系统图与厂站图所引用的背景图片、图元、间隔模板以及模型中的拓扑类表。

2. 共享模型设计模式

该类型软件采用调度中心拓扑图形，并在调度中心设备模型基础上附加私有数据。除拓扑数据以外，还需要包含调度中心的设备模型。

3. 共享数据设计模式

该类型软件完全采用调度中心图形和模型，在此基础上附加私有数据，共享导出应该包含所有独立软件需要的可用信息。

（三）集合文件的提取

确定最小可用图形集合的元素后，需要在调度中心纷繁复杂的图形系统文件中，提取出对应集合元素的文件集合。

1. 根据独立软件需求，指定系统拓扑图

以指定的一张或多张系统拓扑图为初始文件，对文件内容进行逐行遍历。根据遍历过程中标签内容的不同，取出系统图所依赖的相应图形文件。

2. 遍历系统拓扑图内的元素

逐行读取系统拓扑图，识别对应标签的内容后，做出对应的处理：〈Substation〉是厂站图形标签，每一个该标签下面都存储着一个依赖于该系统拓扑图的厂站拓扑图，通过 `ahref` 字段的内容，可以在调度中心图形系统的“/display/fac”文件夹中检索对应的厂站图形，将检索到的图形取出到共享厂站图集合；〈image〉

是外部图形引用标签，用于在矢量图形中调用外部位图图形作为背景以丰富图形显示，`ahref` 字段中包含背景图形名称，对应检索路径是“/image”，检索结果取出至背景图形集合；系统图内并没有具体设备，〈设备标签〉代表的是存有厂站对应图元的标签，该类标签中含 `devref` 字段，可以通过该字段内容在“/element/”中找到厂站图元，由于图元的重复引用频率较高，取出图元的过程会进行简单的去重操作，以减小导出过程的开销，检索到的图元存放至图元集合。重复该过程直至各系统拓扑图都经过遍历，进入下一个步骤。

3. 读取从系统拓扑图中取出的厂站图形列表

以取出的场站拓扑集合作为初始文件，对各文件内容进行逐行遍历。

4. 遍历厂站拓扑图内的元素

逐行读取厂站拓扑图，识别对应标签的内容，对应的处理与系统拓扑图类似。相比之下，厂站拓扑图中的标签更多的是对图元与间隔模板的描述：〈设备标签〉指代厂站内部各类设备的标签如 < Transformer2 > 和 < Generator > 等，通过 `devref` 字段内容在“/element/”中找到对应设备图元取出至图元集合；< Bay > 标签用于引用间隔模板，它在拓扑上由若干相互关联的设备按照特定排布方式组合而成，本质上是图元的组合，根据 `devref` 在“/Bay/”文件夹中检索完成后，将其放至间隔模集合。重复该过程直至各厂站拓扑图的数据都经过遍历，至此，通过图形索引来获取有效图形文件的过程完成，进入下一个步骤处理模型文件。

5. 从模型中取出拓扑类表

拓扑类表主要是描述线路与厂站之间的拓扑联系，`ControlArea` 表描述了各个图形之间的从属关系，`Substation` 则描述了厂站名称、数据 ID 和图形名称，`ACLLineDot` 和 `ACLLineSegment` 描述了厂站内和厂站间的交流线路各端的连接属性。

6. 从模型中取出设备类表

设备类表主要是厂站内部设备的基本属性和设备之间的拓扑连接关系。通常各个设备的表名和设备名相同，包含 `PowerTranformer`、`Breaker` 等表，根据调度中心不同，设备类型会有所增减，内部信息也有所不同。独立软件可根据实际面向的设备类型选取设备信息表格，通过〈类名：实体名〉标签来取出对应的表格。

7. 集合文件提取完成。提取完成的集合文件包含了系统拓扑图，厂站拓扑图，各类图元、间隔模板、背景图形以及模型表格的集合。通过该提取过程，极大地

精简了在向独立软件共享图形时候的无关文件，并梳理了文件层级结构。

（四）基于标签序列法的共享模型

传统共享方法是简单地将可能用到的文件经过粗略的筛选直接进行压缩打包，并传送到目标系统，该过程并不能很好地适配调度中心的需求。从传输的角度，应当优化文件构成，避免大量小文件占用大量 IO 资源；从解析的角度，应当梳理文件层次结构，保持集合内文件版本的一致性；从占用空间和带宽的角度，应当对文件进行存储大小优化。本节针对传统方法的不足，结合上节已取得的最小图形集合，对共享图形文件做出进一步的优化，提出了基于标签序列法的共享模型。

1. 共享模型的构建

（1）共享模型的存储形式

标签序列模型采用了 SequenceFile 的存储形式，以元数据标签作为 key，文件内容作为 value，XML 文本格式作为载体。灵活地组织小文件有序合并为单个大文件，可以有效改善文件传输与读写的系统资源占用。

单个文件在序列内由两个部分构成，文件的元数据被提取至元数据标签，用于描述文件的基本属性，文件内容则存储在 < Data > 标签内。尽管这样的存储格式，在搜寻单个文件的时候需要通过遍历来完成，但是考虑到图形系统解析的时候本身就需要读取各个文件，在效率上的影响并不明显。由于不同平台的系统中文编码可能不同，将文件合并成序列文件，在规避中文文件名的乱码问题上有着非常特殊的意义。

（2）元数据标签内容的制定

元数据标签借鉴 HAR 的 index 索引机制，相比于 SequenceFile 仅用文件名作为 key 的形式，扩展的元数据标签可以更好地描述电力文件的信息。根据不同类型文件的特点，对元数据标签的内容构成进行了对应的设计。

系统拓扑图与厂站拓扑图属于核心图形文件，文件名用于区别图形和表达图形含义，存储路径用于表达图形间的层级关系和方便图形的统一引用，由于各类拓扑图中会有中文内容，所以还需要明确中文编码以排除不同系统在解析过程中的乱码现象。图元文件与间隔模板都是被拓扑图引用的对象，不存在层级上的关系，只需要明确其引用名称即可。背景图片属于比较特殊的一类文件，共享模型内的文件只有它不是用文本描述的，在解析的时候将其还原成原本的位图文件需

要文件名与扩展名。所有的图形文件都需要明确的版本号，确保图形描述的版本一致性。模型文件中含有大量夹带中文的文本显示，所以编码类型标识尤为重要，模型类型用以区分对拓扑模型、设备模型与数据模型。在模型中无法用到版本号是因为模型在调度中心是实时导出的，所以还需要通过修改日期确认不同版本的模型与图形的一致性问题。

（3）数据内容的压缩方法

在共享的过程中，如果生成的实时数据量太大，则会占用大量网络带宽，降低信息传输的速率和实时性。序列标签模型的内容是由大量的文本构成的，常用的压缩工具对于 *.jpg 和 *.png 等类型的位图文件压缩效果并不好，但是对文本的压缩效率非常高。本模型采用跨平台特性较好的压缩工具 gzip，利用该工具将已经合并完成的单文件进一步压缩为 *.tar.gz 文件，缩小共享文件体积。

2. 共享模型的解析

标签序列共享模型在单个文件中集成了调度中心的图形信息，用户可以根据自己的需求对模型进行解析。一般独立应用软件对图形的使用方法分为两种：一种是直接将调度中心图形系统一次性读取，在内存中做后续操作；另一种是将模型内容还原后，对调度中心特定图形文件有针对性地读取。

（1）直接解析法

独立软件基于内存进行图形系统的操作，所以只需要通过遍历标签序列模型的文件内容实现完整读取即可。通过元数据标签识别对应的文件采取不同的解析策略，识别到下一个文件的元数据标签则结束上一个文件的解析。将所有文件信息读入软件内存后，软件通过使用内存中的对象集合来完成图形的后续解析操作。作为一次性整体读取方案，适用于大型软件，效率较高。

（2）反序列法

独立软件基于文件进行图形系统操作，在解压缩以后，需要根据元数据标签和文件内容将共享模型还原至最小可用图形集合的形态，查找到指定的文件后，进行后续的解析操作。作为较为灵活的多次读取方案，适用于中小型软件，效率较低，但占用的系统内存较少。

二、跨平台集成设计过程

本节将以继电保护定值在线校核系统与智能电网调度技术支持系统集成过

程作为调度中心图形信息共享与应用实例，介绍独立应用软件跨平台集成的设计过程。

（一）技术方案分析

原有继电保护定值在线校核系统基于微软的 Windows Sever 服务器操作系统平台，使用 SQL Server 数据库，主要软件系统采用 VB.NET 完成，软件中大量程序组件依赖于 Windows 系统。该系统图形信息采用私有设计模式，需要通过转换算法才能在其他系统复用；因为需要实现复杂的计算功能，软件复杂度极高，对硬件配置依赖度也较高。而智能电网调度支持系统基于银河麒麟 Linux 操作系统，采用跨平台语言 C++、Java 编写，由 CIM/G 图形库、CIM/G 图元库与 CIM/E 模型库三类文件共同形成标准化图形系统。

由于两个系统间存在巨大的平台差异，要求不影响原有在线校核系统在继电保护部门正常运行的同时将校核功能集成到调度端并在调度中心图形中实现信息展示，需要一种松耦合的、符合跨平台设计规则的技术方案。

新在线校核系统基于 Java、Html5 等跨平台技术手段，采用多主机联合运行的模式，将新系统从结构上分为应用功能服务器、计算功能服务器组和在线校核工作站。

（二）硬件结构规划

新在线校核系统运行于智能电网调度支持系统平台，它从硬件上包含了提供电网实时数据的调度中心数据服务器，接受实时数据并实现在线校核功能的应用功能服务器，实时展示功能界面供调度人员执行操作的在线校核工作站。原有在线校核系统通过隔离装置的文件接口，作为单独整体实现主系统的计算需求。该部分系统由整定计算系统，计算功能服务器构成，通过处理基于接口数据的计算请求，返回计算结果。新老系统的多主机联合运行，实现完整功能。

（三）数据获取过程设计

继电保护定值在线校核系统以电网的实时数据为基础，进行校核计算并展示结果。智能电网调度技术支持系统作为实时数据源，系统平台的数据服务器为在线校核系统提供了两类数据：一类是用于表达图形的标签序列共享模型数据，另一类是用于校核计算的电网实时断面数据。

图形数据的获取围绕基于标签序列法的共享模型进行。由于新在线校核系统的图形系统拟采用共享拓扑设计模式（使用调度中心拓扑图形，并使用私有数据

模型来描述设备），所以其最小可用图形集合 MUGS 仅需包含核心拓扑数据以及拓扑类表。调度中心的图形系统以文本文件形式分布在图形系统的众多文件夹内，每当电网拓扑发生改变时，运行于数据服务器后台的 Java 程序就对整个图形系统做一次最小可用图形集合提取，构建新的共享模型文件，通过局域网络传输到应用功能服务器中。应用功能服务器接收到共享模型之后，采用直接解析法进行图形数据预处理，将文件内容解析到程序内存，形成基本的图形信息与模型信息以供程序进一步处理。

电网实时断面数据包含了某一特定时间，电力系统的方式信息、定值信息以及各类电力设备的实时参数。断面数据的导出是调度中心平台的一项基本功能，不需要外部程序介入处理。断面数据以 *.QS 格式的文本文件形式存在，通过 *.sh 远程传输脚本，定时发送到应用功能服务器供校核计算使用。

（四）图形应用过程设计

继电保护定值在线校核系统的图形解析与应用过程主要依赖应用功能服务器。图形的应用需要经过数据获取、结果更新、预处理解析、应用数据匹配、图模数据融合、电力图形综合构建与界面发布等一系列过程。

应用功能服务器获取到的电网断面数据，经过预处理之后形成在线校核接口数据发送至计算功能服务器。计算功能服务器根据接口数据以及校核请求状态执行校核过程，生成校核结果，再将结果信息返回至应用功能服务器。

应用功能服务器获取到的图形数据是标签序列共享模型格式，以直接解析的方式遍历标签序列模型文件。文件内容的处理采用本文介绍的电力图形解析方法，将图形内容解析为 SVG 拓扑图形信息，模型内容则直接读入软件对象中。要在图形中体现校核信息，还需在此基础上做进一步的处理：应用功能服务器将返回的校核结果信息与内存对象中的模型信息进行电力元件名称的差异性匹配，确认校核结果描述的元件与软件内部描述元件一致；应用信息通过 Keyid 与 mRID 在图形中找到对应的电力元件，修改之前已经生成的 SVG 图形内容实现应用数据展示。程序在满足基本显示的前提上，还需要加入如跳转链接、线路闪烁、弹出信息等高级动态特效，最终形成供用户查看的图形系统，发布到前端界面中。

（五）软件系统整体设计

多主机联合运行的方案围绕应用功能服务器作为核心来处理整个软件的运行流程。调度中心数据服务器、在线校核计算功能服务器和在线校核工作站，以文

件或操作的形式，驱动应用功能服务器相关功能模块执行响应，最终完成整个软件系统的功能。

1. 基本运行流程

应用功能服务器在启动的时候，需要经历程序初始化与界面初始化两个过程。它们的主要功能是检查系统环境变量、各部分网络的连通性、初始数据的完整性，调用系统命令启动运行相关的一些后台服务。初始化工作完成后，主程序循环开始运行，通过等待各主机的文件或操作，驱动程序的对应功能模块。

2. 图模解析功能模块

该功能模块由调度中心数据服务器发来的图形共享文件信息驱动。当电网结构发生改变时，数据服务器会向应用功能服务器发送一套新的标签序列共享模型文件。ImportGraph（）函数识别到新文件后，通过gzip命令解压并通过FileStream读取文件内容提供给其子函数作进一步解析。该模块使用的是标签序列模型的直接解析法：G2SVG_Import（）子函数对文件内的图形信息进行解析后形成不带应用数据的完整拓扑图形，UpdateCIME（）子函数将文件内的模型信息读取到内存中以便程序调用。图模解析功能模块确保了在线校核系统拥有调度中心最新的拓扑图形。

3. 数据处理功能模块

该功能模块由调度中心数据服务器发来的电网实时断面数据文件驱动。数据服务器会定时向应用功能服务器发送最新的断面文件，ImportData（）函数解析该文件并形成供其他模块使用的功能信息文件。功能信息文件分为两部分：第一部分是后缀名为*.data的接口数据，用于与计算功能服务器通信，更新服务器的数据库；第二部分是后缀名为*.xml的方式信息列表与定值信息列表，这部分列表将存到前端Html5的过程信息路径中，形成信息列表数据源，以便调度人员在前端查阅特定时间的电网方式信息与定值信息。

4. 应用数据附加模块

该功能模块由计算功能服务器返回的在线校核计算结果文件驱动。每当一个新的校核过程完成，该模块就会接收到一个新的结果文件。ImportVerify（）函数将结果信息读入内存中并生成供前端Html5界面使用的校核结果列表信息文件。DataMatch（）将校核应用信息和模型信息进行数据匹配。匹配完成的应用数据与图形信息通过G2SVG_Update（）函数附加到电网拓扑图中。最终形成的

在线校核系统图形以 SVG 通用格式存储在前端 Html5 的对应校核过程目录中。

5. 前端界面与 Apache 服务

在线校核系统前端界面基于以 Html5 为核心的 Web 技术，它与 SVG 图形格式、XML 数据格式兼容，具有完全意义上的跨平台支持，并且可以实现诸多高级操作和动态效果。Web 页面的构成本质是分散在目录中的各文件被浏览器读取并集中展现，应用功能服务器通过操作修改对应文件来改变其显示内容。

前端界面中，图形信息系统由 SVG 拓扑图形构成，用以图形化展示校核结果；列表信息系统则由前端界面读取 XML 数据源形成的统计表格构成，方便调度人员查询。除了显示和查询功能外，前端界面还有一系列的设置与操作功能，相应功能在调度人员确认后，系统以文件形式将指令传送到计算功能服务器，触发新的校核过程。

调度人员使用在线校核工作站客户端查看到的前端界面依赖于 Web 服务 Apache 展现，应用功能服务器相当于一个网页服务器，它将界面同步发布到各客户端中，而各客户端的在界面上的操作又集中反应在服务器端。

6. 各主机的协作

调度中心数据服务器为应用功能服务器提供调度端数据的实时更新，包括最新的拓扑图形与电网断面信息。

计算功能服务器继承原有继电保护系统的计算内核，通过隔离装置的文件通信，修改校核设置、升级数据库、执行定时的自动校核或者按照用户的请求执行人工设定的自定义校核。

在线校核工作站则运行在线校核系统客户端，提供图形化的前端界面供调度人员查看与操作。

第五章 设备在线监测及智能诊断

第一节 状态参量数据优化

在统一的设备监测诊断数据平台的基础上，可根据业务需求开发多种功能、不同规模、不同算法的设备监测诊断智能应用系统。多样化的设备监测诊断智能应用系统均通过数据平台提供的标准 CIS 服务，获取各类设备状态信息，继而可开展设备状态参量质量优化、基于统一阈值管理与趋势分析的动态预警、设备状态智能诊断与评价、设备状态检修策略等多个领域的技术研究和生产应用工作。通过多样的监测诊断智能应用系统，服务于电网设备管理各个业务领域，可保障电网设备安全运行、提高设备资产精益化水平、提升设备管理智能化水平。

在设备监测诊断智能应用系统中，相关数据的质量直接决定了分析评价结果的准确性和有效性。由于输变电设备诊断分析所需数据种类繁多，直接从各业务系统抽取出来的源数据存在录入不规范、数据不完整、编码不准确和格式错误等问题，因此数据必须经过校验、过滤、换算、组合等加工和处理，才能形成满足设备状态检修后续模块要求的状态量。

为此需要开展数据质量核查，对来自生产管理信息系统和在线监测系统的数据，检查数据完整性、准确性和规范性。通过建立严格的数据质量管理流程进行数据确认，保证进入设备监测诊断智能应用系统的数据质量满足系统应用要求。

一、在线监测数据预处理

虽然通过监测规范化工作，各在线监测装置输出数据质量较以往大为改观，但仍存在传感器描述不规范、监测数据不完整、设备编码不准确和格式错误等问题，造成信息缺失、冗余、错误、不匹配等。因此，可采用检索过滤和定位识别，采用合理的数据清洗策略，经过校验、过滤、换算、组合等加工和处理使数据规范、清晰、正确后，采取自动化检查、补齐和人工修正等多种手段，形成有效的设备信息。

对最初获得的源端信息进行处理，可规避大量不合理的在线监测数据，增强了在线监测数据和设备的关联度，减少不必要的误报警，保证了监测信息的有效性。

二、设备台账信息质量优化

从生产管理信息系统获得的源数据包括设备台账、技术参数、缺陷历史、检修历史、试验报告、带电检测记录等。这些信息特别是设备台账信息可能存在录入不规范、数据不完整、编码不准确和格式错误等问题，如设备命名不规范、大小写错误等。

依据电网台账规范，采用合理的数据清洗策略，经过必要的校验、过滤、换算、组合等数据加工和处理使数据规范、清晰、正确后，采取自动化检查、补齐和人工修正等多种手段，形成有效的设备信息。按照供电局、变电站、电压等级区域、间隔、功能位置、设备理顺逻辑层次关系，展现了直观简洁的设备树，设备功能位置信息层次清晰、信息完整、满足业务需求。对投运日期、电压等级等判断是否为空，并使用日期函数和数值函数进行有效性检查。在专业人员不断的修改调整后，为状态评价和风险评估提供有效数据依据。

三、缺陷记录规范化

建立缺陷知识库和设备故障树知识库，通过手工和局部识别进行匹配关联，以便进行设备评价、评估和诊断时，能快速准确定位到相应的缺陷，提供准确的评价评估分析结论和故障诊断树。规范缺陷统一关联到主设备，通过递归算法，对仅关联到部件的缺陷进行关联主设备，以保证一次设备分析时可以统计到相应的缺陷。

四、试验数据规范化

建立试验专业、试验性质、试验项目、试验子项目，通过接口采集试验数据和技术处理形成规范的试验数据结构。按标准试验表格格式展示，对缺少试验时间和试验设备的项目进行统计，对存在不一致的试验子项目编码进行统计，对缺失试验设备的试验进行统计。

第二节 设备监测动态预警

对设备状态的正确预警是进行有效监测、准确评价、正确决策的基础。虽然输变电设备缺陷的出现具有很强的随机性，但绝大多故障都有一个发生、发展的过程。设备发生故障前，会产生各种前期征兆，表现为其电气、物理、化学等特性发生渐进的量变。通过实时监测能够表征设备健康状态的特征量及变化趋势，即可对设备是否存在异常做出及时准确的判断，从而提前采取措施消除设备隐患，避免事故的发生。

由于目前在线监测装置普遍存在分析手段不健全、依据标准差异大、阈值设定不规范等问题，因此常常出现大量不合理告警信息，难以对运行管理和统计分析提供有价值的指导性信息。通过建立统一的阈值集中管理机制和趋势预警策略，根据实际情况可以对阈值进行修改调整。结合监测数据的历史变化趋势进行深入分析，可实现对超出阈值范围的在线监测数据和出现变化率异常的监测数据点进行二次告警，过滤掉不合理的告警数据，从而给出客观准确的预警信息。

一、监测阈值统一管理

如何保证所设定的阈值能够真实、可靠地反映设备是否存在故障，是阈值报警的关键。为解决多个不同厂家的监测装置所获得的监测信息告警标准不一致、在线监测误报警等问题，要结合规程以及在线监测运行经验，实现对在线监测信息统一的二次预警阈值管理。

对于关键设备，为了避免随机扰动带来误报警的风险，可采用多级别报警策略，以提高报警的信息量和警示效果。通过统一的监测阈值管理，在当前在线监测装置所提供的初步简单告警信息的基础上，最大程度上避免了误报警、漏报警现象。

预警阈值管理包括以下几个方面：①设定预警阈值、级别和机制：依据状态评价导则和相关试验规程规定的状态量指标注意值，设置告警阈值区间，配置消息类别、消息级别和消息发送方式。②阈值比较：采用适当的方式（定时或触发）监控设备状态量指标变化，与基准值或极限值比较，并触发产生各类预警信息。③预警发布和查询：预警信息通过平台系统进行发布，按照告警信息类别、预警级别发送给各级设备管理人员。预警消息可分层监控并可查询到详细信息。

如对于电容型套管在发生一屏击穿故障时,电容量会发生变化。对在线监测得到的大量数据进行分析表明,良好绝缘套管的电容量变化范围小于 $\pm 3\%$, 否则认为发生异常缺陷。通过建立统一的阈值设置和集中管理机制,根据实际情况对阈值进行手工修改调整,同时利用应用软件系统自动地对历史上重复出现的不正确报警点和报警范围进行校正,对超过阈值的数据结合历史变化趋势进行智能分析。

二、监测参量趋势预警

对于运行设备来说,监测参量的不安全或不可接受的水平一直是一个有争议的问题,很难把判断有无故障这样一个复杂的具体问题,简单化为仅由一个数值界限去机械地判断。实际运行经验表明:在某些情况下,监测量虽未达到注意值,但有的监测参量增长很快,往往很值得重视;反之,即使监测参量略有超过注意值而历年来很少增长的设备,其危险程度也就小得多。在线监测为实现故障的连续追踪,提供了良好的技术保证。为了能够准确把握设备状态的变化趋势,可用异常数据剔除、趋势估计和季节差分等算法消除监测数据随机波动的影响。

(一) 异常值剔除

由于受到运行环境、运行方式等影响,在线监测数据常常出现不规则波动,甚至偶尔出现远超过报警阈值的错误记录。为了避免这些粗大监测误差的影响,可采用拉依达准则作为判断粗大误差的基本方法。以给定的置信概率 99.17% 为标准,以三倍测量列的标准偏差限为依据,凡超过此界限的误差,就认为它不属于随机误差的范畴,而是粗大误差。含有粗大误差的测量值称为异常值,将其从监测数据中剔除。在判断和删除含有粗大误差的异常值时,应先算出等精度独立测量列的平均值及参与误差,并按贝塞尔公式算出测量列的标准偏差,如果某测量值的参与误差大于三倍的标准偏差,则认为此测量值为异常值。这里仅当监测次数大于 15 次时本方法才适用。

(二) 趋势估计

通常一旦根据检测信号上升梯度所做的预测值持续偏离正常值,就可以认为设备处于“故障前兆期”。通过准确地截获故障的前兆信息及时报警,就可以有效地控制故障的蔓延,避免事故的发生。通过监测量移动平均分析可反映设备状态变化的平均趋势,进一步减少各类随机干扰。

选择移动时距时, 需要从监测灵敏度和抗干扰性两方面折中选择, 当信号特征参数变化一定时, 窗长越短, 灵敏度越高, 但干扰影响越大; 窗长越长, 虽可更好平滑干扰的影响, 但也会造成监测延迟过大甚至出现漏报。

(三) 季节差分

介质损耗、泄漏电流、气体密度等在线监测量常常因温度、湿度等季节因素而呈现周期性变化, 这些波动并非设备状态的真实反映。采用季节差分的方法可以较准确地把握监测量变化的真实趋势, 将监测数据的季节性变化分量的周期设为 T (如 $T=12$ 月), 每周期内有 $j=1, 2, \dots, T$ 个不同的测量值, 由于 x_t 与 x_{t+T} 处于相同的测量季节, 所以

$$\nabla_T x_t = (1 - B^T) x_t = x_{t+T} - x_t$$

式中, x_t 为基准年度监测值; x_{t+T} 为当前监测值。

采用这种方法可以将不同监测时刻的季节效应消除, 准确地把握监测量变化的真实趋势。

三、监测参量关联预警

关联预警也称横向比较或显著性差异预警。当设备内部存在缺陷时, 各类主要状态特征量的变化不是孤立的, 其增长过程之间的相互关系符合一定的规律。若对同厂家、同型号、同批次设备进行全网统计, 由于设计、工艺和材质都相同, 各台设备的同一状态量应该视为源自同一母体的不同样本。如果被分析设备的状态量值与其他设备存在显著性差异, 必然存在原因, 且很可能是早期缺陷的征兆, 因此采取二次预警。在状态量未超过注意值和警示值情况下, 对于 A 、 B 、 C 三相分体设备, 如果存在至少两次监测值, 分别记为 a_1, b_1, c_1 (上次监测值) 和 a_2, b_2, c_2 (本次监测值); 可计算 $a_2/(b_1+c_1)$ 与 $a_1/(a_2+b_2)$ 的偏差, 如果超过 30%, 可判定为异常, 进行二次预警。

通过建立同相、同类型设备监测数据的“关联指数”, 可定量描述出监测数据之间的相似程度, 作为分析设备运行状态的有效判断工具。对设备的两组监测数据进行计算, 相关指数大说明三相之间的关联程度较一致, 否则认为三相的变化规律不同, 可能存在缺陷, 发出报警。

第三节 基于信息融合的设备故障智能诊断

智能诊断能够在设备故障初期对故障的发展情况做出分析和预测。其目的是在充分掌握设备实际状况的基础上，正确评价设备状态、预测故障风险、制定合理的维修策略，以便在允许的条件下充分挖掘设备潜力，延长其服役期限和使用寿命，降低设备全寿命周期费用。

各种在线监测项目只是从不同状态特征侧面反映设备缺陷，且其灵敏度也各不相同，因此难以孤立地由单项监测结果得出结论。为了正确地对故障进行分析，必须尽可能全面地收集有关设备故障的各种信息及设备的运行经历，包括设备的铭牌信息、交接试验、预防性试验、巡检结果、检修记录、在线监测、运行工况以及运行环境数据，为输变电设备综合诊断提供全面的信息支撑。

由于目前设备缺陷原因分析主要依赖阈值判定和人工估测，诊断结论过于主观粗糙，因此无法有效指导检修维护工作。输变电设备智能诊断系统结合专家系统、故障树分析、置信推理、神经网络决策树和模糊诊断等技术手段，推理机制简洁、有效，能够模仿人类专家在故障诊断过程中采用层次渐进的思维方式；具有较强的容错能力和默认推理能力，在数据信息不完全的情况下也能够进行有效工作，最大限度地避免了误诊和漏诊；充分利用设备全景信息，根据运行工况、运行环境、监测数据和定检试验对设备可能发生的故障进行全方位综合诊断，为故障定位及设备检修提供决策支持。

一、诊断系统知识库

输变电设备智能诊断专家系统的核心是故障诊断知识规则库。输变电设备结构复杂，各功能部件以及故障模式间的关系紧密，结构和功能上的多层次性，参数的时变性以及故障征兆与故障模式间关系的错综复杂，导致知识获取一直是故障诊断研究中的瓶颈问题。因此，可以说设备诊断知识的复杂性，限制了对知识的组织和利用。因而在目前的设备故障诊断研究中，存在诊断模型过于简单或诊断规则不够全面的问题，使得诊断不能达到预期效果。结合输变电设备诊断的需要，故障树分析（FTA）具有能全面反映系统故障关系的特点，其分析结果明晰，具有良好的扩展性，是收集和记录各方专家经验性知识的良好途径。因此以故障树为基础可实现对知识的组织，从而达到故障模式相对全面而逻辑关系又较为清

晰的目的。

依据收集到的有关变电设备故障的各种资料，分析变电设备的模式定义方式及其分析项目，以此可建立知识的基本描述。为了更好地指导电力设备维修工作，对常规 FMEA（故障模式分析）的内容进行改进和补充，包括故障征兆、检测方法、故障原因、故障影响、维修措施等 5 项内容。

（一）故障征兆

故障征兆是对故障各种特征属性值表现为异常时的一种定性或定量的描述。故障征兆是诊断的重要依据，通过它可反映有关设备状态的信息。故障征兆有两种表现形式，第一种为温度、电磁、振动、噪声等能量形式，可通过装置来检测；第二种为可直接观测到的物态形式，可由人的感官（视觉、听觉、触感和嗅觉）判断。

（二）检测方法

检测方法是获得故障征兆的手段。对应于不同表现形式的故障征兆，检测方法既可以是人工巡检和预防性试验，也可以是在线监测和带电测量。

（三）故障原因

故障原因是指导致设备可能发生故障或无法达到期望的性能标准的所有可能因素，可能属于制造方面的因素，可能属于运行维护不当，也可能是系统或环境等外界因素。

（四）故障影响

故障影响是在假设不进行预防性维修情况下对故障后果的描述，包括对上一级及整个设备的危害。通过对故障后果的分析，可以在故障预防过程中集中主要力量避免或降低影响严重的故障模式。

（五）维修措施

维修措施是指发生故障时应该采取怎样的处理措施，针对不同的故障模式可采用的维修和故障排除方案。

采用基于面向对象的知识表示方式建设诊断知识库，将故障树上的每个结点当作一个对象，有关该结点的信息封装在一个框架中，与该结点相关的信息包含故障征兆、检测方法、故障原因、故障影响、维修措施等。面向对象的知识表示方式具有很强的表达能力、良好的继承性和封装性，知识的独立性好，易于模块化、结构化，具有良好的扩展性。

二、基于可信度模型的智能诊断

任何诊断问题都是以征兆为线索的，输变电设备故障诊断的困难在于：一般说来，故障和征兆之间并不存在简单的一一对应关系，一种故障可能对应多种征兆，而一种征兆也可能对应着多种故障。序贯推理模拟人类专家的推理行为，采用“假设—测试”循环为核心的推理过程。首先根据有关诊断问题的初始信息，产生一组可能的故障假设，这些假设应能够解释所有初始信息；然后，根据这些假设设计进一步的试验计划对初步诊断结论进行证实，指导获取更多的故障信息，直到得到一个对各种故障现象最优的解释，作为最终的诊断结论。

故障诊断问题可由一个四元式来表示：

$$DP = \langle D, M, K, M^+ \rangle$$

其中， $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 表示设备故障的穷举集合，每一个 $d_i \in D$ 代表一种故障状态； $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 表示有限非空的设备故障征兆集合；

$K \subseteq D \times M = \{\dots, \langle d_i, m_j \rangle, \dots\}$ ，表示故障与征兆之间的因果关系映射集合，是关于诊断对象的领域知识的描述； $M^+ \subseteq M$ ，表示已观测到的征兆集合； $f(d_i) = \{m_j | m_j \in M\}$ ，是设备在故障状态 d_i 时所产生的征兆集合。

对于任何一个具体的故障诊断问题，如果一个故障状态 d_i 满足： $f(d_i) \supseteq M^+$ 且 d_i 符合由推理规则所设定的准则，则称 d_i 是诊断问题 P 关于 M^+ 的一个解释。

可信度方法是一种简单、实用的方法，尤其适用于证据为增量式增加的情况。在可信度方法中，诊断知识是由产生式规则表示的。对任一推理规则 k_{ij} ，其标准形式如下：

$$\text{IF } m_j \text{ THEN } d_i \text{ WITH } CF(d_i | m_j)$$

其中， m_j 表示证据； d_i 表示故障结论；可信度 $CF(d_i | m_j)$ 表示在证据存在的情况下假设故障 i 为真的可相信程度。

由条件概率和先验概率可将 $CF(d_i | m_j)$ 定义为：

$$CF(d_i | m_j) = \begin{cases} \frac{P(d_i | m_j) - P(d_i)}{1 - P(d_i)}, & \text{当 } P(d_i | m_j) > P(d_i) \text{ 时} \\ \frac{P(d_i | m_j) - P(d_i)}{P(d_i)}, & \text{当 } P(d_i | m_j) < P(d_i) \text{ 时} \end{cases}$$

在实际建立诊断模型时,对于可信度函数 CF 的赋值方法比较灵活,既可采用对经验数据的统计结果,也可用专家提供的经验值来代替,克服了 Bayes 方法对先验概率和证据独立性等方面要求过于严格、难以应用的缺点。信度函数 CF 应满足如下基本性质:

第一, $-1 \leq CF(d_i | m_j) \leq 1, CF < 0$ 表示对命题的不信任程度。

第二,若 $d_1, d_2, \dots, d_m$ 是相互独立的故障假设, m_j 为对它们有利的证据,则 $\sum_{i=1}^m CF(d_i | m_j) \leq 1$ 。

第三,若 m_2 为未知的证据,则 $CF(d_i | m_1 \wedge m_2) = CF(d_i | m_1)$ 。

在故障诊断过程中,如果存在多个证据支持或否定 D 中的某一故障 d_i ,就需要对这些证据的可信度进行综合。假设存在两条规则:

IF m_1 THEN $d_i, CF(d_i | m_1)$

IF m_2 THEN $d_i, CF(d_i | m_2)$

有关 d_i 的合成可信度定义为

$$CF(d_i | m_1 \wedge m_2) = \begin{cases} X + Y(1 - X), & \text{if } X \geq 0 \text{ and } Y > 0 \\ \frac{X + Y}{1 - \min(|X|, |Y|)}, & \text{if } X \cdot Y < 0 \\ X + Y(1 + X), & \text{if } X < 0 \text{ and } Y < 0 \end{cases}$$

采用可信度模型对输变电设备运行中出现的各种异常信息进行分析时,首先要对各种证据模式赋予基本可信度。通过对故障实例的统计,可以获得各类型故障的先验概率和各种检查结果对各故障的条件概率,即可计算出各种基本可信度。

对于变电设备的运行经历,主要考虑:设备是否遭受出口短路、过电压冲击、较长时间的过负荷以及停运时间过长等情况。通过对故障可信度加权的形式,可以将这些运行经历对设备可能产生的影响引入诊断推理过程中。当变电设备存在某种运行经历时,应将上述的预防性试验结果对某些故障 F_j 的可信度进一步表示为: $CF^*(F_j | C_i) = (1 + \lambda) \cdot CF(F_j | C_i)$ 。

三、模糊推理

输变电设备的故障征兆是一个从无到有、从弱到强的逐渐发展过程,所以对其判断采用模糊推理的方法是非常有效的。

根据故障征兆 $K_j, j=1,2,\dots,n$ 可定义征兆模糊向量 $K(mK_1, mK_2, \dots, mK_n)$ ；而对于故障状态 $D_i, i=1,2,\dots,m$ ，则可定义状态模糊向量 $D(mD_1, mD_2, \dots, mD_m)$ 。

可认为在故障征兆和故障状态之间具有模糊关系 $R: D = K \circ R$

上式中，

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij})_{m \times n}$$

就是故障诊断的模糊关系矩阵，体现了诊断专家的经验知识。如何准确地构造诊断矩阵 R 是模糊推理的核心问题。

(一) 由专家经验设定初始值

集中多名专家分析故障集与征兆集的关系，建立每一种故障与各征兆的联系 $r_{ij}, j=1,\dots,n$ 。当 $r_{ij}=0$ 时，代表征兆与故障无关； r_{ij} 越大，则故障原因与征兆之间的关联性就越强。

(二) 在实际诊断过程中，根据经验积累对权值进行修正

由于专家之间的意见或专家意见与事实之间出现矛盾，并且诊断对象的应用环境和结构特点也会发生变化，因此在很多情况下，权值矩阵需定期修正。

四、基于判决树的组合人工神经网络

在电力变压器油中溶，解气体分析（DGA）中广泛使用的 IEC 三比值法，其故障类型的设定主要基于故障点的物理特性，具有与故障机理对应明确、规则简明的优点。但这种方法所能够反映的故障内容非常有限，只能指出故障点的征兆（如过热或放电），因而对进一步故障定位及维修策略的制定缺乏指导性。在实际的故障诊断中，对于如此众多和复杂的故障类型想直接构造类似三比值法那样统一的判别规则是非常困难的。为了实现有效的分类，对故障采用逐级划分的方法，将有助于故障的分析。

决策树为确定故障类别的序贯分析法提供了清晰的陈述。决策树的判定级别是自上而下的：初始节点仅需判断变压器是否存在异常；而决策树的每一叶（即终止节点）都对应着一种具体的故障模式和正常老化项。这不仅可以充分地利用对变压器故障的先验知识，同时由于每一个判别规则都被充分地简化，从而使分

类效率大大提高。决策树中各非终止节点的判别规则选取如下：

判别规则 0—根据电力系统多年的运行经验，采用 DL/T 722—2000《变压器油中溶解气体分析和判断导则》规定的色谱试验结果的“注意值”（总烃 $< 150\mu\text{L/L}$ 、 $\text{H}_2 < 150\mu\text{L/L}$ $\text{C}_2\text{H}_2 < 5\mu\text{L/L}$ ，对 500kV 等级 $\text{C}_2\text{H}_2 < 1\mu\text{L/L}$ ）作为判断变压器是正常老化（A0）还是存在异常的标准。

第四节 基于全景信息的多维度状态评价

综合考虑设备运行数据、在线监测、带电测试、家族缺陷、试验数据及历史检修数据，可更加科学地评价设备当前的运行状况及健康状况。

状态评价功能对反映设备健康状态的各指标项数据进行分析评价，最终得出设备总体健康状态等级。通过自动触发和人工触发功能，对单个设备或多个设备，根据多种导则方法灵活配置，进行评价（包括按单元间隔、变电站及按某查询条件的结果集）。

一、基于模糊隶属度的状态评价

当前状态评价扣分制模式由于判断标准过于简单机械，常因人员或者仪器的偏差，导致等级评判差异及较大的扣分偏差。为此，以下介绍一种基于模糊隶属度扣分制的输变电设备状态评价方法，采用模糊隶属函数对设备劣化程度进行了模糊化，并将劣化程度的模糊隶属度与基本扣分值相结合，解决传统扣分制评价因基本扣分等级阶梯的跳跃造成的不良影响，降低评价扣分中的人为主观成分。

首先将设备按功能的独立性划分为部件的组合，将设备及其部件的状态评价结果分为正常状态、注意状态、异常状态、严重状态，以及注意趋异常状态、异常趋严重状态两种过渡状态。将模糊隶属度函数与劣化程度相结合，对状态量的劣化程度进行模糊化调整，避免不同劣化程度等级分界点处阶梯跳跃对评估结果造成的波动，进而影响设备的风险评估及检修计划安排。

模糊隶属度扣分评价方法中，采用了梯形的模糊隶属度函数，对设备状态量信息按函数图形进行劣化程度模糊化评价，获得各劣化等级的模糊隶属度向量，定量状态量劣化程度的模糊隶属度函数处理。

对于采用梯形模糊隶属度函数进行劣化程度判定的状态量，各个劣化等级划

分的边界在劣化扣分评价方法中已有规定（边界划分数值由《电力设备预防性试验规程》规定），通过梯形模糊隶属度函数将边界划分数值进行模糊处理，得到模拟的 a, b, c, e, d, f, g, h ，则可得到状态评价的隶属度

向量 $pi = [mi(I), mi(II), mi(III), mi(IV),]$ 。

得到状态量的模糊隶属度判断向量 $pi = [mi(I), mi(II), mi(III), mi(IV)]$ ，展后，将其与各等级基本扣分向量相乘得到扣分值，再与权重系数结合，得到状态量的单项扣分，计算公式如下： $F = p_i \times [24810]^T \times w_i$ ，其中， F 为该状态量扣分值；加为模糊隶属度判断向量； pi 为该状态量权重系数。

设备部件状态评价将得到的状态量单项扣分值及部件合计得分值，与各设备的部件状态与评价扣分对应表相比对，获得部件状态。整体评价应综合其部件的评价结果。当所有部件评价为正常状态时，整体评价为正常状态；当任一部件状态为注意状态、异常状态、严重状态或其间过渡状态时，整体评价应为其中最严重的状态。

二、基于故障模式诊断的状态评价

状态评估是状态检修成功实施的基础和关键。针对状态检修工作进一步精益化实施和管理的实际需求，以下介绍一种基于故障模式的电力设备状态评估方法，以改善现行打分制状态评估方法缺乏检修指导性方面的不足。

（一）故障模式状态评价

为了状态评估建模的准确和方便，根据各状态量的自身属性及其对评估设备状态作用形式，将其分为状态特征参量和状态影响参量。状态特征参量是指能够反映设备状态好坏的特征状态量，主要包括各类试验项目、巡检信息等；状态影响参量是指能够对设备状态产生影响的因素，主要是指家族缺陷、不良工况、运行时间等信息。

进一步综合所有的状态量与故障模式的对应关系，则可得基于故障模式的状态评估指标。状态特征参量分为正状态量、负状态量和偏差状态量。

正状态量：介质损耗因数、油中溶解气体量、空载损耗、局部放电量、铁心接地电流、糠醛量等。

负状态量：各类绝缘电阻、低聚合度等。

偏差状态量：三相不平衡系数、绕组频率响应、电容量等。

状态评价分为状态量异常评价、状态量趋势评价、状态量偏差程度评价三部分。

状态量异常评价采用阈值法,即通过与规程规定的注意值或警示值比较,当状态量不满足阈值要求时,认为设备可能存在缺陷,这是因为状态量的量值是设备状态最直接的表现,所以在状态评估中有必要首先进行状态量劣化的量值评估。

介绍一种基于统计的状态量量值劣化评估的方法。假定单状态量统计数据中至少有 $\rho\%$ 处于正常状态,而另外的 $1-\rho\%$ 则存在某种特定程度的劣化缺陷或者故障的嫌疑。按照不同的状态量,统计大量运行中电力变压器的状态量数据,将其按从小到大排序并统计其台次数,进行拟合以获知各状态量的分布情况。将处于 $\rho\%$ 点处的状态量值称为正常限值,记为 μ 。若电力变压器状态量远超过正常限值,电力变压器缺陷可能性非常高,取其极限将其定为 100% 缺陷,称为劣化限值,记为 θ 。此时可认定电力变压器的该状态量的相对劣化度为 100%。

关于正常限值和劣化限值的取值,不同地区、不同电压等级、不同的设备制造厂商等,可能导致 μ 有一定的差异, θ 有一定的差异,可以根据电力公司的设备实际情况对各状态量做出适当的选择,并根据应用情况进行调整。

由于统计的范围局限正在正常运行中的电力变压器,其中严重缺陷的设备只占了 2% ~ 3%,发生事故的只占了 0.1% 左右,因此可以认为至少有 90% ~ 95% 的设备是属于正常设备。为了避免漏判,暂取 $\rho\%=90\%$,其对应的状态量值作为正常限值用 μ ,比注意值或者警示值都要保守。由于无法真正确定对应于 100% 缺陷的劣化限值。在电力变压器状态量的基础研究未得出定论之前,为了应对并解决这个问题,必须做适当的假设。考虑到规程标准中对各状态量规定的注意值或警示值已经经过多年来大量工程实践的检验,而且劣化限值至少应超过注意值或警示值的阈值限制,所以暂取各状态量的注意值或警示值的一定倍数作为劣化限值,记注意值为警示值为 θ 。需要强调的是,该倍数应根据不同状态量确定不同的数值,而且不应是一成不变的,必须随着应用实践经验的累积,不断地修正。而对于规程中没有规定注意值或警示值的状态量,只能根据专家经验提出劣化限值,应根据应用情况予以反馈调整以得到合适的值。

因状态量自身的属性不同,不同类型的状态特征参量的正常限值和劣化限值的选取和劣化度计算处理的方法略有不同。

状态量趋势评价引入趋势指数 k ,考虑到劣化过程的累积效应和非线性特性,

当状态量在正常限值范围内时,其表征的相对劣化度随状态量的量值增加缓慢增大;但当状态量接近劣化限值时,其表征的劣化度常常会快速增大。劣化度计算公式如下:

$$k_i = \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$$

这一评价指标对在线监测类特征量尤为有效,但对于预防性试验结果,如果试验周期较长,数据一般无法要求,则对设备状态评估的意义不大。

状态量偏差程度评价中,状态量的差异性为评判设备状态的重要依据。设 $n(n \geq 5)$ 次测量中,若某个状态量 X 的当前试验值的平均值为 $\bar{X}$,样本标准差为 S ;被评估设备的当前试验值为如,对于偏差性劣化状态参量,差异性劣化度为 θ_x ,对于偏差性劣化状态参量,差异性劣化度为:

$$d_c(\theta_x) = 0, \quad |\theta_x - \bar{X}| \leq mS$$

$$d_c(\theta_x) = \left(\frac{|\theta_x - \bar{X}| - mS}{rS - mS} \right), \quad mS < |\theta_x - \bar{X}| < rS$$

$$d_c(\theta_x) = 1, \quad |\theta_x - \bar{X}| \geq rS$$

(二) 故障模式严重程度的评价

故障模式的严重程度评估由多种状态量综合表征,针对状态量,紧密结合应用实践经验和现有规程标准等,综合考虑量值、趋势和差异性等方面的评估标准,建立了劣化评估方法,对其相对劣化程度和严重程度进行了科学合理的评估。

在基于故障模式的状态评估指标基础上,结合单状态量的严重程度评估结果,一个故障模式 m 的危急度 C_m 可以由与其相关的 n 个单状态量表征其发生的概率综合,即

$$C_m = \sum_{i=1}^n c_i - \sum_{1 \leq i < j \leq n} c_i c_j + \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} c_i c_j c_k + \cdots + (-1)^{n-1} c_1 c_2 c_3 \cdots c_n$$

式中, C_i 为单状态量 i 表征的严重程度。

若设备某部件发生任何一种故障模式,则该部件处于故障状态,同一部件的各故障模式间存在串联关系,从而可得部件 i 的严重程度与各故障模式严重程度间的关系:

$$C_{ci} = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - C_j)$$

式中, C_{ci} 为部件 i 的危急度; C_i 为该部件共 n 个故障模式中的第 i 个故障模式的严重程度。

(三) 状态评估是个严谨而复杂的工作, 需要紧密结合实际情况才能成功。基于故障模式的状态评估方法是以实用化为目标建立标准流程, 首先对获得的数据进行预处理, 主要包括将对环境敏感的状态量转化为标准条件下的状态量值, 进行综合诊断, 从而得到各故障模式的置信度, 确定可能发生的故障模式。进一步根据关键状态量进行劣化程度评估、趋势劣化评估和差异性劣化评估, 确定怀疑的故障模式的严重程度。

第五节 基于故障模式诊断的风险评估

风险评估在设备状态评价之后进行, 通过风险评估确定设备面临的和可能导致的危险, 为输变电设备运行、维护、检修、试验、技改等生产工作的决策提供依据。基于设备状态评价的风险评估方法是以量化风险值的方法对输变电设备进行风险评估, 从工程应用的角度量化输变电设备的运行状态, 以货币单位定量评估电力系统存在的风险, 评估电力系统设备运行的可靠性。

目前国内电网对输变电设备的风评估方法主要是基于企业标准, 凭借专业管理人员的经验和直觉, 为风险各相关要素(资产价值、威胁、脆弱性等)的大小或高低程度定性分级, 对相关咨询人员的经验和能力提出了更高的要求。尤其设备自身的故障隐患比较隐蔽, 受环境、人为等因素影响, 在风险分析时造成统计分析不及时和结论不够准确的问题, 从而对确保电网的安全运行造成一定程度的影响。

针对以上问题, 这里提出了基于故障模式的风险评估方法。故障模式反映了设备故障的原因、部位、程度和后果等关键信息, 这些信息对检修决策具有重要意义, 弥补了传统风险评估方法缺乏针对性, 难以指导检修等不足。

综合考虑设备的各类异常征兆和所经历的不良工况, 利用可信度故障诊断模型, 确定设备的故障模式及其概率。在此基础上, 评估故障后果的严重性, 综合分析设备故障造成的资产损失、电网损失、社会损失和环境损失四个方面的后果, 形成对设备的风险评估值, 从而及早发现输变电设备存在的隐患, 避免不必要的人为因素、环境因素的影响, 确保分析结果的及时准确, 还可以对设备进行周期

性自动风险评估,并统计历史评估结果及趋势,从而对输变电设备的状态进行跟踪,适时安排检修,减少事故发生,提高设备的管理水平,保障电网安全稳定运行。

一、资产损失程度与故障概率

资产损失程度由成本、环境、人身安全、电网安全四个要素的损失程度确定。具体计算方法见设备状态评价与风险评估的相关技术导则。在缺少设备的运行经历和故障征兆等信息时,可以根据以往的统计数据对设备的故障概率进行粗糙估计。电网公司发布的可靠性指标,为故障概率的估计提供了依据。

在可靠性统计中,单相变压器每相为一台。对设备可能发生故障的全面了解是实现风险评估的基础,综合巡检记录、继电保护动作情况、预防性试验、在线监测等数据,可利用前述的可信度推理方法,对设备可能发生的故障模式进行综合诊断,按可信度高低确定可能的故障模式和故障概率。

二、不良工况对设备可靠性的影响

设备所经历的异常工况是导致设备故障的主要原因之一。下面分析了不良工况可能造成的故障模式,以及由此造成设备故障的概率。以变压器为例,其运行经历主要考虑以下三个方面:变压器是否遭受出口短路、雷电或操作过电压冲击、较长时间的过负荷。

(一) 雷电或过电压冲击影响

电力变压器运行过程中往往会遭受雷电、过电压等侵入波的冲击。由于这类过电压作用的时间极短,单次侵入波可能不足以使变压器主绝缘或纵绝缘发生击穿,但如果多次承受此类冲击电压的作用,绝缘纸(板)的介电性能将逐渐下降,最终导致绝缘击穿事故。

对那些遭受过雷电或者操作冲击电压作用过的变压器,即使其所有试验结果都正常,此时设备可能也已存在安全隐患。因此,研究雷电冲击电压对油纸绝缘的累积影响,有助于对变压器绝缘性能进行合理评估。试验研究结果表明,多次雷电冲击对绝缘损伤存在一定的积效应。

试验研究结果证明,可利用下式评估多次遭受雷电冲击后油纸绝缘的安全水平。

$$R = R_0^{\sqrt{n}} \times 100\%$$

该公式主要考虑侵入波的累积效应, n 为避雷器动作次数。

(二) 负荷水平对变压器绝缘的影响

负荷水平对变压器的影响主要是热应力对纸绝缘的老化作用。通过对变压器内部热源和热传播过程的分析, 可建立变压器绕组热点温度计算方法, 主要根据变压器运行时的环境温度、负荷水平及顶层油温对变压器内部的热点温度进行估算。

对于自然油循环冷却方式 (ON) 的变压器, 任何负载下的绕组最热点温度等于环境温度、顶层油温温升和热点与顶层油之间温度差三者之和。

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{or} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x + Hg_r K^y$$

对于强迫油循环冷却方式 (OF) 的变压器:

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{br} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x + 2(\Delta\theta_{imr} - \Delta\theta_{br}) K^y + Hg_r K^y$$

对于强迫油循环导向冷却方式 (OD) 的变压器, 计算公式基本与

$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{br} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x + 2(\Delta\theta_{imr} - \Delta\theta_{br}) K^y + Hg_r K^y$ 相同, 但考虑到导线电阻随温度的变化, 还需加上矫正系数, 于是:

$$\theta'_h = \theta_h + 0.15(\theta_h - \theta_{hr}), \quad (\text{当 } K > 1 \text{ 时})$$

式中, 负载系数 K 为负载电流与额定电流的比值; $\Delta\theta_{or}$ 为额定负载下顶层油温升; R 为额定电流下负载损耗与空载损耗的比值; θ_h 为不考虑导线电阻影响的计算值; θ_{hr} 为额定条件下的热点温度。

根据油纸绝缘热老化寿命规律, 可建立变压器故障率与热点温度的关系, 对于长期较高负荷设备, 首先需要根据环境温度、顶层油温和负荷水平估算绕组热点温度, 进而利用下式评估设备的可靠性水平。

$$R = e^{-\lambda t} \times 100\%$$

式中, 在确定的热点温度下故障率 λ 为常量, t 为承受过负荷的时间。

而对于短期急救负荷, 可认为对绝缘的单次影响基本一致, 利用下式对设备的可靠性进行评估。

$$R = R_0^{\sqrt{n}} \times 100\%$$

该公式主要考虑热老化的累积效应, n 为承受短期急救负荷次数。

（三）出口短路影响

出口短路是造成变压器事故的主要原因之一。对那些遭受较少次数短路冲击的变压器，其各项试验指标可能并无异常，或者绕组变形程度不能为当前的检测手段所发现，但此时通常绕组结构的稳定性已被破坏，倘若再次遭受较强烈的短路冲击，便很有可能引发事故，危及设备和电网的安全。若能够根据设备所遭受的出口短路冲击次数、短路电流大小对其健康状况和风险进行评估，便能够及时地进行预警，消除安全隐患。

研究表明，随着短路电流的增加，绕组失稳的概率逐渐增大，当短路电流大于 0.8 倍允许短路电流时，失稳概率呈急剧增加的趋势。变压器绕组结构失稳与短路电流大小密切相关，单次短路冲击后设备的可靠性可用下式评估。

$$\frac{i}{I} < 0.8, \quad R = R_0$$
$$1 \leq \frac{i}{I} > 0.8, \quad R = \frac{I^2 - i^2}{0.65 I^2} \times 100\%$$

式中， I 为变压器允许短路电流； i 为实际发生的出口短路电流。

关于绕组失稳与短路冲击次数的关系，研究结果证明，可利用下式评估多次遭受短路冲击后变压器结构稳定的可靠性水平。

$$R = (R_1 \times R_2 \times \cdots \times R_n)^{\frac{1}{\sqrt{n}}} \times 100\%$$

该公式主要考虑短路冲击的累积效应， $R_1, R_2, \cdots, R_n$ 为遭受单次冲击后变压器的可靠性水平。

三、故障风险评估

故障模式对故障后果有很好的指向性。为了全面有针对性地评估故障后果，借鉴现有的评估方法，选定设备资产损失 l_1 、电网损失 l_2 、社会损失 l_3 和环境损失 l_4 作为评估故障后果的四个方面：①设备资产损失：主要考虑当设备故障发生后，设备恢复功能所需付出的成本，包括设备检修和设备更换。②电网损失：对电网的影响主要考虑因设备故障导致电网停运所造成的损失。设备故障发生后，常常导致非计划停运，从而给电力系统造成难以预计的供电量损失。③社会损失：指设备故障停运对社会造成的损失。④环境损失：指能够引起空气、土壤污染及噪声污染的风险。

采用货币化系数的方法将以上四个方面货币化。对于设备资产损失，主要考虑修复设备资产所需材料以及备件、人力等费用（ F_1 ）。对电网的影响主要考虑因设备故障导致电网停运所造成的损失。设备故障发生后，常常导致非计划停运，从而给电力系统造成难以预计的供电量损失。在此，考虑直接供电损失和间接供电损失，直接供电损失是指因停运造成的直接可统计的供电损失，间接损失是指其他难以直接统计的供电损失。对于间接损失，用供电区内产电比（GDP）和供电损失量两者乘积表示。社会责任考虑综合用户等级和影响时户数两个因素。环境损失则考虑油和气泄漏量，单位泄漏量对应着相应的货币化系数。

第六节 基于风险控制的检修策略

针对电网开展状态检修工作的需要，以下介绍了基于风险控制的检修策略。此检修策略可依据输变电设备故障诊断的结果，考虑输变电设备风险因素，动态制订输变电设备的检修计划，合理安排状态检修的内容和工期，大大提高了检修工作的针对性和有效性。

故障诊断是状态检修的核心，首先确定设备可能的故障模式及其概率，根据故障模式量化故障后果，然后整合设备的故障率与故障后果两个方面求取风险值，最后根据风险值大小对设备的检修周期进行调整。其中异常风险的故障模式主要是根据异常特征量与故障模式的关系进行故障诊断，故障模式反映了设备的故障状况，能够提供设备的故障部位、程度、后果等信息，使检修工作更具针对性。

风险的影响及危害程度按风险值大小进行区分，分为6个风险级别：Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅴ级、Ⅵ级，同类设备Ⅰ级为最高风险级别，Ⅵ级为最低风险级别。设备的风险评估工作完成后，可以获得设备风险值。计算获得设备风险值后，根据风险值大小可以确定设备风险级别。同类设备可以按照风险值大小排序，作为输变电设备运行、维护、检修、试验、技改的决策依据，同时考虑设备继续运行对风险值改变的影响。资产、资产损失程度、平均故障率也可以分别排序，作为生产决策的参考。

确定设备风险值后，根据风险值的大小将设备的风险划分为不同的等级，以指导检修周期的调整，设备实际检修周期 = f （基准周期，设备风险）。

在实际检修工作中，检修主要针对设备具体部件缺陷进行。设备检修模型能

够对设备在各种检修方式下的时间及资源需求做出预计。设备的检修模型包含设施、人员、备件、耗时、费用等有关检修工作的全面描述,为指导检修工作的执行提供全方位指导。

第七节 人工智能技术在电力设备状态分析中的应用

电力设备的良好运行状态是电力系统安全经济稳定运行的基础,设备故障引发的停电事故会严重影响电网的稳定运行,并造成巨大的经济损失。因此,对于运行在复杂工况与恶劣环境的设备,全面、及时、准确地对设备运行状态进行监测与分析是保障设备安全稳定运行的重中之重。随着电力系统智能化程度的不断提高,电力设备状态分析存在着设备种类多、数量大、状态类型多样化等挑战,面临的问题集中表现在以下几个方面:①信息系统分散,数据结构复杂多样。大量电力设备数据分散于不同的信息平台或系统,缺乏统一的渠道收集和融合分析,数据交互共享存在壁垒。数据类型包括文本、音频、图像、视频等多种结构,数据的异构性会影响设备的状态分析和评泛化,从而导致设备状态综合分析准确性较低,分析的置信度与效率也较低。②传感器技术和通信技术的快速发展与数据处理能力瓶颈之间的矛盾。随着传感器的广泛安装,电力设备持续产生海量的状态监测数据,而传统的数据分析算法难以应对日益堆积的待处理数据。③难以建立运行状态精细化的物理模型。传统电力设备状态分析通常基于机理建模,通过理论分析、机理解释等手段建立相应的因果模型。但是电力设备运行工况复杂,影响因素众多,因此精确的因果关系建模难度较大。④依赖于人工与专家判断,且诊断标准单一。运行数据复杂多样背景下,人工决断存在主观性较大、效率较低的问题,难以综合分析大量设备数据。由于人工经验有限,诊断标准多采用参数计算和阈值判断,在多工况下不同厂家设备的适应性不足。

随着电力物联网的建设与发展,大量传感器和测量设备投入使用,电网的运行数据、设备的监测数据、外部环境数据等剧增,逐渐形成了体量大、类型多、结构复杂的电力大数据体。目前,电力设备智能状态分析技术实施的主要矛盾已转化为日益增长的状态数据分析需求与传统方法处理维度、效率不匹配、不平衡之间的矛盾。以深度学习为代表的人工智能技术在基于数据驱动的海量数据深度挖掘及高维特征提取方面有着显著的优势。将数据驱动的人工智能技术引入到电

力设备状态分析中，会为上述矛盾的解决提供了一种全新的思路。

一、数据驱动的人工智能技术概述

人工智能是计算机科学中以机器为载体的智能形式，是融合了数学、统计学、概率、逻辑、伦理等多学科于一身的交叉学科，其基本思路是在相应的环境中采取行动以使达到目标的成功机率最大化。机器学习是数据驱动的人工智能技术的核心研究方向，主要基于经验和历史数据，能够不断自动改进算法在解决任务过程中的性能。当前应用广泛的机器学习方法包括传统机器学习、深度学习、强化学习、迁移学习等。数据驱动的人工智能技术研究与应用已从浅层的传统机器学习模型逐渐发展至当前以深度学习为代表的新一代机器学习技术，大大提升了电力设备状态分析的准确性和高效性。

（一）传统机器学习

根据学习数据对应分类标签的有无，传统机器学习可分为监督学习、无监督学习和半监督学习。为了应对单个学习模型无法精确估计、泛化能力差等缺点，集成学习通过训练一组基本学习器，然后利用模型的不同特点，按照策略组合结果，进一步提高了传统机器学习的泛化能力。典型的集成学习算法包括 Stacking、随机森林、Bagging、Boosting 等。

（二）深度学习

深度学习是人工智能技术连接主义学派的代表，起源于对人工神经网络的研究。深度学习方法是一类具有多隐层的自动从原始数据中挖掘规律的算法，通过组合各类非线性模块来构建深层网络模型。这些非线性模块从原始输入开始，将人工神经网络每层的特征提炼为更高、更抽象的属性，较高的隐层会放大输入中对输出有重要影响的方面，同时会抑制不相关的变化。深度学习通过逐层抽象提取和逐层迭代来实现深层次特征的学习。

当前具有代表性的深度学习网络包括：卷积神经网络（CNN）、深度置信网络（DBN）、堆叠自编码器（SAE）、长短期记忆网络（LSTM）、受限玻尔兹曼机（RBM）和生成式对抗网络（GAN）等。

（三）强化学习

强化学习是行为主义学派将控制论引入机器学习的代表，又称再励学习、评价学习，其本质是智能体根据环境来制定决策以使累积奖赏最大化。在不断迭代

和循环的过程中，强化学习通过环境反馈奖惩值，使智能体的决策不断优化直至达到平衡。强化学习不需要输入输出精确匹配，相比于其他机器学习算法而言，该方法具有更强大的在线学习能力。强化学习算法主要面向离散状态和行为空间的马尔可夫决策过程（MDP），目的是实现评价体系决策的连续优化。强化学习的理论研究包括时序差分学习和表格型强化学习收敛性、泛化方法。强化学习算法研究的代表为Q学习、深度Q网络、Sarsa方法等。基于深度神经网络（DNN）与强化学习的深度强化学习（DRL）。DRL结合了深度学习的感知能力和强化学习的决策能力，形成了人工智能技术领域新的研究热点。

（四）迁移学习

迁移学习的核心是通过分析已有模型与目标模型直接的关系，将机器在一个场景中学习到的知识迁移到新场景的应用中，模拟了人类通过学习有限知识和技能来解决新问题的能力。迁移学习允许在训练和测试中使用不同的数据域，大大提高了样本训练效率，并能有效缩短新模型的训练时间和改善算法性能，进而提升了模型和学习算法的泛化能力，可应用于解决小样本学习和个性化问题。模型间可迁移项主要分为样本迁移、特征迁移、参数模型迁移和关系迁移这4种。迁移学习的类型包括归纳式迁移学习、传递式迁移学习和无监督迁移学习，典型的迁移学习算法包括：TrAdaBoost、CoCC和自我学习等。

二、数据驱动的人工智能技术在电力设备状态分析中的应用

随着电力物联网的建设和不断发展，相关设备的监测手段日益丰富，电力设备运行状态的监测信息呈现出多源、异构的数据特征。以深度学习为代表的驱动的人工智能技术，在应对数据特征不明显、具有关联性的多维异构数据时，具有良好的非线性拟合能力。

（一）基于人工智能的电力设备状态特征提取技术

电力设备状态信息具有数据来源广泛、体量庞大、类型异构多样和关联复杂等特点，对海量多源异构数据的特征提取的效果决定了数据分析的有效性和准确性。运用人工智能技术，从数据内在规律分析的角度挖掘出对电力设备状态评估、故障诊断、状态预测等有价值的知识，从而为设备智能运维和电网优化运行提供有力支撑。本节主要阐述以深度学习、强化学习和迁移学习为代表的驱动人工智能技术在电力设备运行状态特征提取中的应用。

1. 电力设备运维数据的主要来源与特征

电力设备数据是评估设备状态的基础，根据电力设备状态信息的更新频率，可将设备状态数据分为3类：静态数据、动态数据和准动态数据。静态数据主要包括设备台帐、铭牌参数、投运前实验数据、地理位置等；动态数据通常按分钟、小时或天为周期更新，主要包括设备在线监测数据、运行数据、巡检记录、带电检测数据、环境气象数据等；准动态数据通常按月或年定期或不定期更新，主要包括故障缺陷数据、检修试验数据、设备隐患记录、检修记录等。

随着电力系统信息化平台采集数据的大量累积，电力设备运维状态数据所呈现的主要特征如下：①数据体量大，增长速度快。电力设备类型多，数量庞大。另一方面，随着在线监测传感器的大量部署，状态监测数据体量的增长趋势愈发明显。②设备数据来源广泛。随着数字化电网的不断发展，电力设备状态监测系统、能量管理系统、地理信息系统及气象信息系统等电力信息化平台逐步完善并广泛应用，使得电力设备运行状态数据的相关信息来源更加广泛，数据模型、格式和接口也更加多样。③数据类型异构多样。设备数据的异构性主要表现在数据结构的多样化上，除去结构化数据外，还包括如文本记录、音频数据、局部放电图谱、红外图像、巡线图像、监控视频、频响和波形曲线等在内的大量半结构化和非结构化数据。这些异构的设备状态数据中包含了大量电力设备实时运行信息和检修维护历史数据，从中可以挖掘电力设备局部过热、局部放电、机械特性受损等故障状态特征。

2. 针对电力设备运维状态的文本信息挖掘

电力设备长期运维过程中产生了大量周期性视日志、设备缺陷或故障日志以及检修运维报告；这些文本数据中蕴含了结构化数据之外的电力设备各种故障或缺陷状态信息。然而，在工作票、操作票、检修试验记录等文本数据中，夹杂大量数字、字母符号，从而加大了关键信息提取和分析的难度。

针对文本信息特征提取的问题，首先需要将文本按照段、句、词、标点符号等进行划分，然后运用对照表将文本数据转化为计算机编码形式，接着再进行关键词、句的提取。构建了基于语义框架的电力设备缺陷文本知识图谱，能够从缺陷语料中自动提取实体并进行关系抽取和关系筛选，实现了对文本浅层特征的提取。针对传统机器学习方法存在的数据处理与特征提取能力不足等问题。运用长短期记忆神经网络分析变压器分类模型提取事件句的深层语义特征，有效提取了

词前后长距离的依赖特征,为非结构化数据提供了更有效的分析方法。通过构建端到端的卷积神经网络网络结构,实现了特征提取与分类评估两部分的有机统一,可直接面向底层进行语义分析,体现了深度学习的显著优势和效率上的可行性。

3. 电力设备图像的特征识别

随着电力设备运行状态监测过程中高清视频监控和红外热成像检测技术的逐渐成熟,及无人机、巡视机器人的广泛应用,电力系统中的图像信息呈现多样化爆炸性增长。人工筛选和分析已经无法满足日益增长价值密度低、体量大的电力设备图像分析需求。传统的图像识别算法仅能提取设备图像的形状、方向和颜色等浅层特征,识别泛化能力较弱,难以挖掘图像的丰富内涵信息,从而影响了电力设备智能化巡检的准确率。而数据驱动的人工智能技术能够有效克服人工筛选的主观性、模糊性和不确定性,并能够充分挖掘图像数据的深层特征。当前,电力设备图像数据的特征挖掘方法主要针对图像分割、图像识别和语义分割这3个关键技术问题。在图像分割方面,由于电力设备图像背景的复杂性,图像分割技术首先把输入图像划分为统一的非重叠区域,从而将电力设备从干扰背景中剥离开来,有效提高了后续电力设备状态评估的准确性。

在图像识别方面,图像特征提取方法大致可分为人工设计的特征提取算法和基于深度网络的特征提取方法。其中,前者使用人工设计的算法来提取图像中选定的特征,如方向梯度直方图、尺度不变、特征变换等。利用梯度直方图、颜色特征来进行不同环境下绝缘子状态的检测。通过多层感知机对设备图像的位置关联特征和局部轮廓特征进行提取,实现了对绝缘子故障识别。通过融合全局和局部信息特征来检测图像梯度的方式,实现了无人机航拍视频中输电线的定位。然而,由于电力设备具有不同的电压等级,部件间联系关系多种多样,且外部环境复杂多变,因此传统的人工设计特征提取方法难以满足需求。深度学习的多层结构能够对图像特征进行逐层提取,具备复杂非线性建模、深层特征自动提取和表达能力。通过卷积神经网络来提取变压器等电力设备图像的特征,检验结果表明,与人工提取的特征相比,深层图像特征的表达力更强,可以获得高识别准确率。提出了一种基于CNN和霍夫变换的输电线航拍图像特征提取方法。通过对改进的区域卷积网络(Faster-region-CNN, Faster-RCNN)网络框的重新设计,构造了一种多角度的电力设备红外图像识别方法,为解决不同拍摄角度下电力设备图像特征的分析问题提供了可行的思路。

语义分割技术对图像数据深层特征识别提出了更高的要求,它需要区分电力设备图像中的每一个像素点,并在语义上理解每个像素点的角色。常规的语义分割方法主要是通过聚类、搜索匹配等方法来实现的,受分割样本的影响较大,不同数据样本和匹配方法将导致不同的语义分割结果。深度学习的发展为语义分割提供了新的方法。通过空间卷积神经网络(spatial-CNN, SCNN)和Faster R-CNN对绝缘子串进行语义分割,以提取多个深层的故障特征,从而提高诊断的准确率。构造一种基于全卷积神经网络的语义分割方法,实现了航拍图像中绝缘子、塔杆、金具等关键部件的有效分割。结合点卷积和空洞卷积的上采样结构,提出一种多信息融合的实时语义分割模型,该模型在移动端应用中取得了良好的效果。

4. 电力设备时空数据的特征挖掘

电力设备传感器记录的数据组成了时空大数据,其特点为兼具时间和空间相关性,且两者不可分割。传统方法对于时空数据的处理往往存在着难以兼顾数据的时空关系与因果关系、忽视多维时空数据间的关联性问题。

以深度学习为代表的人工智能技术借助其强大的非线性函数拟合与逼近能力,能够有效捕捉和学习高维时空数据中的隐含规律,并且能够结合自主训练和特有的信息传递方式,实现多维时间序列中相关性地自适应学习。利用支持向量机(SVM)分类器通过堆叠式稀疏自动编码器(SSAE)训练后,将PCA应用于特征识别,运用混淆矩阵实现具有从输电线路运维数据中挖掘特征进行可视化和分类的能力。基于动态亚当和压差的深度神经网络对电力变压器多维数据集进行故障特征提取和模式识别,该数据驱动方法可用于解决变压器内部绝缘难以直接检测和分析的难题。采用一种具有最近序列记忆的Q学习算法实现对时间序列数据的特征挖掘。提出一种深度迁移强化学习算法,该算法通过对历史时间序列的有效信息进行知识存储,利用深度学习实现高精度的非线性迁移学习,并借助分布式计算优势,可快速获得高质量的最优解。

(二) 电力设备状态智能分析的典型应用场景

以大数据为驱动的基于人工智能的电力设备状态分析技术,有助于全面、及时、准确地掌握电力设备的运行状态及发展趋势。与此同时,全方位、精细化的状态预测与故障识别结果可为电力设备运维决策提供更加可靠的科学依据,从而进一步完善电力设备的运维状态管理体系。本节针对电力设备状态分析的3个主要应用场景,对基于数据驱动的人工智能技术的典型应用场景进行了总结和分析。

1. 基于图像识别的电力设备智能巡检

常规的电力设备状态巡检方法一般是通过人工方式对电力设备进行定期的巡视和排查，如输电线路的人工巡检、变电站的人工巡视等。然而常规的人工巡检方法存在诸多问题：巡检人员的工作安全系数不高，大部分巡检设备常处于带电工作状态，且电压等级较高，因此巡检人员的工作安全难以得到保证；人工巡检容易受到主观判断的影响，且需要深厚的专业领域知识；人工巡检需要巡检人员用肉眼对电力设备的状态进行识别判断，巡检过程容易受到天气环境等诸多外部因素的干扰，巡检效率不高且巡检人员的工作强度较大。近年来，随着智能化设备在电力系统中的普及以及“互联网+智慧能源”项目的开展，国家电网和南方电网均开始采用无人机、机器人等先进技术手段来代替人工方式开展电力设备的智能巡检。智能巡检将采集回来的大量图像数据实时地传输到监控后台，再由监控中心工作人员根据图像或视频中的外观对设备的运行状态进行评估。然而，由于数据量庞大，人工识别的效率不高且工作量巨大。

随着深度学习技术的不断发展，越来越多的研究人员开始采用深度学习对电力巡检影像进行分析和处理。电力深度视觉旨在采用深度学习技术对无人机、机器人采集回来的海量图像数据进行分析，从而识别设备类型、异常运行状况，内外部缺陷等，进而实现电力设备的无人化智能巡检。通过人工智能技术对电力设备状态识别是实现电力设备智能巡检和诊断的首要步骤。基于深度学习的电力设备状态智能化识别的典型流程：首先对采集到的海量数据进行降噪、滤波、归一化等预处理，剔除异常数据和“脏”数据；然后分析待识别的设备形态特征，对数据样本进行标签化处理得到训练集；接着在公共数据集下对深度学习模型进行预训练，再使用标记好的训练集对模型进行微调和改进；最后将机器人、无人机等采集到的巡检测试图像传入微调后的模型，进而获得识别结果。在此过程中，图像采集、图像预处理方法均与传统方法无太大差异，故在此不做展开。电力设备状态智能识别的核心在于采用深度学习分析框架对目标的特征进行提取与挖掘，从而实现目标有效的检测。

目前，基于深度学习的电力设备图像识别方法主要分为2大类：一类是双阶法，首先构造深度卷积神经网络对目标进行特征提取，然后运用传统图像分割定位方法完成目标检测，如尺度不变特征转换（SIFT）、Fast-RCNN、Faster-RCNN。另一类为单阶法，该类方法是将特征提取、边框定位、目标分类融合为-

一个网络,构建一种端到端的训练模式,从而有效地减少图像特征提取过程中的重复计算,如 YOLO、SSD 等。

2. 基于多模异构数据的电力设备故障智能诊断

电力设备故障诊断旨在对已发生故障或存在征兆的潜伏性故障进行故障种类识别、故障定位、故障严重等级判定。准确的故障诊断有利于运维人员制定有针对性的运维策略,从而有效防止设备运行状态进一步恶化。传统的故障诊断方法主要利用既定的阈值公式和专家经验综合分析来判定。以电力变压器为例,传统故障诊断方法主要通过局部放电、油中溶解气体等相关试验指标参量,采用横向纵向比较和阈值判断等分析方法对设备故障进行诊断。但是,由于电力设备故障类型繁多、故障机理复杂,且电力设备所处的环境会对故障判断产生干扰,因此传统方法的诊断结果较为泛化,缺乏针对性。结合电力大数据分析与人工智能技术的电力设备故障智能诊断成为近年的研究热点。

电力设备故障智能诊断方法主要包括 2 类:一类是由贝叶斯网络、支持向量机、决策树、随机森林、神经网络等为核心算法的传统机器学习方法;另一类是以卷积神经网络、循环神经网络、深度置信网络、自动编码器为核心算法的深度学习方法。相比于传统机器学习方法,深度学习方法在故障特征提取、学习能力,以及对海量数据和高维数据的处理中有着明显的优势。

除此之外,随着小微智能传感器、物联网和工业互联网技术的推广和使用,电力设备状态采集数据逐渐从单一的结构化数据演变为以图像、文本、音频等为主的非结构化数据。因此,通过基于数据驱动的电力设备故障智能诊断技术分析状态监测所采集到的数据,实现电力设备全方位多角度的全景状态监测和故障诊断,是当前的行业热点研究方向。将故障时域信号数据转换成二维灰度图像来提取转换后的图像特征,提高了轴承故障诊断的效率和准确性。

基于数据驱动人工智能技术的电力设备故障诊断技术可以充分利用运维过程的在线监测、智能巡检和运维中的多模异构数据,从底层数据中挖掘设备的故障运行状态特征,有助于提升故障诊断的准确率。但是电力设备故障频率低、故障集数据量小且缺乏完备性,导致模型的泛化能力大大降低且易出现故障诊断偏差等问题,因此需要将电力设备故障机理与物理特性作为深度学习模型训练的辅助输入信息,以此来克服模型泛化能力低的难题。

3. 基于深度学习的电力设备运行状态预测

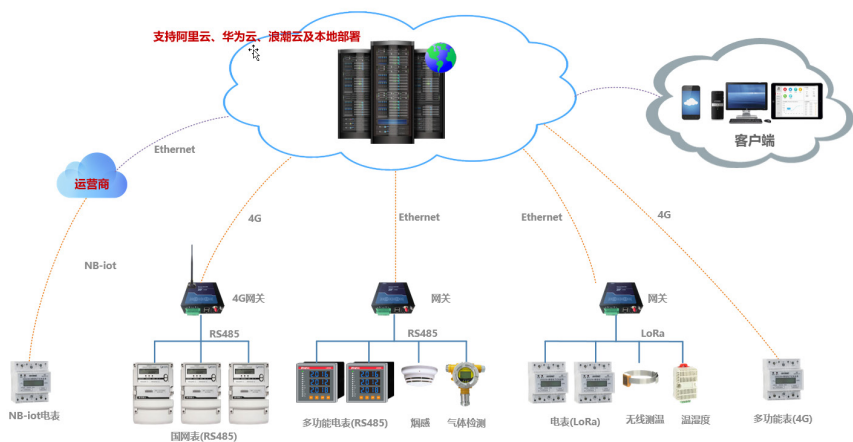
电力设备运行状态预测是从现有的运行状态数据出发，结合预测对象的检测信息、设备特点、运行工况及历史记录等，从时间序列中挖掘规律进而对设备未来的状态进行分析及预测。传统的电力设备状态预测主要利用单一或少数检测参量，通过构建分析模型来挖掘时间序列中的隐含规律，从而推断时间序列的发展趋势。

当前，电力设备运行状态预测的模型主要分为统计分析模型和学习模型。统计分析模型主要包括时间序列分析、回归分析和灰色模型，统计分析模型可以快速地对设备状态做出预测，但其在长期预测场景中准确度较低。学习模型的核心在于通过智能算法来拟合输入数据与输出数据之间的非线性关系。学习模型的典型代表包括支持向量机、神经网络、极限学习机等机器学习模型。此外，许多学者引入集成学习的技术思路，将数据预处理方法、模型参数优化方法、模型预测方法集成于单个模型来进一步提高设备状态预测的准确性，取得了优良的效果。然而，传统机器学习方法对长时间序列的处理能力较弱，面对特征性不明显且关联性较强的高维数据时收敛能力欠佳，故传统的学习模型仅能利用电力设备状态监测量本身的信息，而不能计及众多相关因素（如故障率、健康指数、环境因素等）的影响。

深度学习旨在构建更深层的网络结构，从而加强模型在海量数据中捕捉其隐含特征的能力。与传统的浅层神经网络相比，深度学习具有优秀的非线性函数拟合能力，因而在处理特征性不明显且关联性较强的多维数据时有着显著的优势。因此，以深度学习算法为核心的电力设备状态预测方法得到了众多研究人员的关注。

第八节 配电智能运维系统设计及其应用实例

一、系统总体方案设计



笔者结合物联网技术及自身在电力行业的工程经验，设计一套“基于电力物联网技术的配电智能运维云平台建设方案”以供读者参考。

平台依托物联网技术实现电力系统感知层的数据灵活实时接入，实现数据互联互通，对物联网数据进行实时分析应用并为其其他数据平台提供数据共享融合接口，运用本平台能够提升电网运行的智能化服务水平，提高设备的智能化运维管理水平。平台面向通讯协议和规约设计开发，支持多种通讯协议和电力规约，屏蔽硬件设备类型、型号等的差异，平台和设备之间通过协议和规约进行通讯连接，实现了电力物联网终端设备接入的无关性。平台采用大数据架构，支持内存、流计算、分布式存储。

平台数据采集设备层支持 NB-Iot，LoRa、LoRaWAN、2G-5G、PLC、GPRS 等通讯方式，支持 TCP/IP、UDP 通讯协议，整体遵循 IEC 标准，信息模型符合《国家电网公共信息模型 SG-CIM 标准（Q/GDW 703-2012）》，各类传感器信息建模符合《电力物联网传感器信息模型规范（DL/T 1732 -2017）》。

平台包括智能传感器、智能配电终端、主站前置软件、物联网监控云平台、大数据分析等软硬件设备，可实现电力物联网感知层“统一终端标准、跨专业数据同源采集”的要求；适用于电力系统中的配网智能化，变电站监控，智能运维服务，综合能源利用等业务领域。

二、系统设计原则

1. 可靠性

系统架构的设计和产品选型，秉承系统可靠性原则，均采用成熟的技术。

系统符合电磁兼容和电气隔离性能设计要求，不会影响被监控设备的正常工作。

系统具有自诊断功能，对软硬件故障能够自动重启恢复。

监控设备具有良好的接地，抗干扰能力强。

设备选用高可靠的工业级设备，保障系统 7×24 小时不间断运行。

系统成熟稳定，支持主流厂家设备的接口通讯协议。

2. 稳定性

系统采用多总线方式，某一子系统的故障不影响其它子系统的正常运行。

3. 经济性

若原有前端系统已投入使用，且未达到使用年限，平台可与原系统实现数据交互，保护原有投资，最大程度地降低系统造价和安装成本。

4. 扩展性

系统应充分考虑扩展性，采用标准化设计，严格遵循相关技术的国际、国内和行业标准，确保系统之间的透明性和互通互联，并充分考虑与其它系统的连接；在设计和设备选型时，科学预测未来扩容需求，进行余量设计，设备采用模块化结构，便于系统扩容、升级。

5. 易用性

系统采用全中文、图形化软件实现整个监控系统管理与维护，人机对话界面清晰、简洁、友好，操控简便、灵活，便于监控和配置；采用稳定易用的硬件和软件，不需借助任何专用维护工具，降低对管理人员进行专业知识的培训费用，节省日常维护费用。

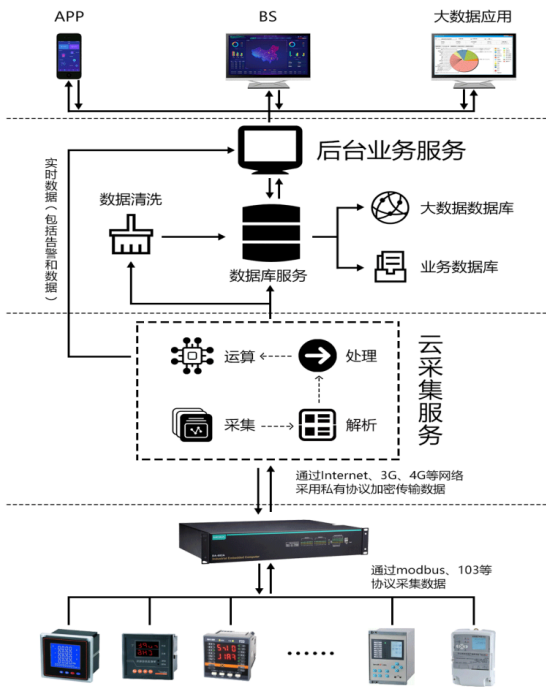
6. 安全性

平台需综合考虑设备安全、网络安全和数据安全。在前端采用完善的安全措施以保障前端设备的物理安全和应用安全，在前端与监控中心之间必须保障通信安全，采取可靠手段杜绝前端设备的非法访问、入侵或攻击行为。数据采取前端分布存储、监控中心集中存储管理相结合的方式，对数据的访问采用严格的用

户权限控制，并做好异常快速应急响应和日志记录。

此外，内网数据传输至手机终端 app 时，通过手持终端加 VPN，走专用通道，手持端改用加密卡等方式来保障网络数据安全。

三、系统架构



系统架构示意图

系统基于 BS 架构设计，架构中的服务划分为不同组件或应用服务，支持分布式的部署及扩展，通过 Nginx 组件实现负载均衡。

系统根据逻辑关联划分为：表现层、应用层和数据层。表现层负责系统与用户或者外部系统交互 (APP、BS 端、配置工具)；应用层服务于表现层，主要实现业务逻辑处理满足表现层的需求（实时监控、调度管理、运维作业管控、资产管理、综合分析等）；数据层负责系统数据的存储和处理。

系统支持各种云平台部署和本地部署。

系统支持通过有线网络、4G、及串行通道与远方的设备及网关机进行通讯，

实现变 / 配电站数据的收发。

系统支持 DL/T 634.5 101、DL/T 634.5 104、MQTT、MODBUS、CDT、DISA 协议，协议参数可灵活配置。

四、系统整体功能设计

1. 系统应具备完善的配电运行管理功能，包括一次系统图（遥信、遥测、电度量）、拓扑图、电能管理、历史数据等功能。

2. 系统应能汇总各个子系统的实时电参数、电能质量数据、能耗数据，通过监测实时电参数及时发现当前设备异常。

3. 应确保对数据采集、存储的可靠性、准确性及唯一性，保证系统数据与现场数据一致。

4. 系统应具备完善的角色及权限管理功能。

5. 系统应提供丰富多样的数据呈现方式，在具有良好用户体验的基础上也应具有良好的可扩展性和易维护性。

6. 系统应为多租户的系统，以满足不同用户使用需求。系统应做到不同用户间的数据隔离。

7. 系统应根据项目需求，充分考虑数据并发和多用户访问的并发。

8. 系统应支持 IEC60870-5-104，IEC60870-5-101，mqtt，MODBUS、CDT、DISA 等常见标准协议，协议参数可灵活配置。提供开放的、可以修改的动态规约库，可以方便进行新规约的添加和旧规约的修改；具有在线配置、修改参数功能；提供多种远动监测手段；可向多个地方进行数据转发；提供实时报文显示、解码、分析等功能。

9. 系统数据库应数据备份、恢复功能，对主备服务器实现自动定时备份和手工备份功能。

五、系统功能

1. 数据展示

一次系统图可以显示各回路的开关状态、遥测、遥信、电量、SOE 信息并进行遥控操作。

当开关状态变化、测量参数有报警产生时报警数据会闪烁提示用户，并触发

音响报警。

通过图形界面可以转到任一回路的实时数据，报警信息，电能数据以及参数整定界面。

可以定制并展示多种动态图形。包括一次接线图、曲线图、棒形图、饼形图、配置图、系统运行工况图、网络状态监视图、表格图、表盘显示画面等。

2. 图形服务

具备包括图元编辑器、图元管理器、画面编辑器和画面显示工具等功能。

图元编辑器可编辑各种基本的图素，如变压器、发电机、开关、刀闸以及潮流标志，使用图元编辑器可使得系统画面统一，标准化程度高，方便生成各种复杂的电力系统图形。

图元管理器对图元进行复制、粘贴、拷贝等管理工作。

画面编辑器应使用灵活、方便，可以编辑任意大小的画面如接线图、工况图、曲线、棒图等，图形具有多层次、多平面。可以制作特殊图形。

图形显示可以在同一屏幕上开出多幅显示窗口，以显示不同内容、不同大小、多层次的画面，各个画面窗口可在屏幕上随意拖动，画面也可进行无级缩放、平滑移动和快速漫游，可以实现动态着色、动态潮流等。

图形显示系统应提供多种画面调用方式，按名调用、自动更新、单键调用等，在发生事故的时候，可以自动推出画面。可利用鼠标对画面上的遥测、遥信、工况、分接头等信息进行操作，所有操作均伴有详细提示。

绘图、建模、图库一体化，元件连接自动感应，基于拓扑域快速建模、记忆联想、拖放式资源绑定、电力系统资源图形实用化等；

3. 系统拓扑

可查看整个系统的网络拓扑流程以及各回路的智能仪表、设备的通讯状态，红色表示通讯故障，绿色表示通讯正常。

4. 故障、告警、事件管理

- 1) 通讯故障与恢复
- 2) 遥测值越限（软件设置越限、硬件设备上报）
- 3) 开关位置变位（COS、SOE）
- 4) 遥控操作记录
- 5) 告警确认（需有相应权限）

5. 历史趋势

1) 选择相应的设备可查看所有量测的曲线，曲线支持放大和缩小功能，以及拖动功能，当鼠标静止在曲线某点不动时应显示出相应的遥测值和时间。

2) 同时支持报表功能，选择报表后，根据所选择的回路选择报表类型（日报、月报、年报），查询本回路的三相相电压和三相电流以及电能参数，报表支持打印功能。

6. 数据处理

1) 计算功能

提供的预定义公式和自定义公式计算功能，能够满足用户的各种需求。计算周期可由用户自定义，系统缺省的运算周期为 3 秒。

2) 统计功能

系统可对模拟量、状态量、电度量参数进行多种统计处理。主要有电压合格率统计；平均值统计；对模拟量统计其全天、全月及全年的最大值、最小值及发生时间；能耗统计分析等。

3) 事项报警处理功能

系统对模拟量可分别设置报警上、下限，有效上、下限，各时段的考核上、下限，当数据越限值时可生成报警记录。

当有遥信变位时系统生成变位报警事项，相应设备在画面上闪烁显示，报警窗口显示该事项。

7. 用电统计

1) 统计每个回路的用电量情况和历史用量。

2) 统计每个变压器的负荷率。

3) 可选取多个回路进行实时数据、历史能耗进行对比。

4) 对每个回路的电流情况和线缆温度进行对比。

5) 对每个回路的三项不平衡对进行曲线展示。

6) 逐时、逐日、逐月、逐年对回路的能耗数据进行汇总；

7) 对站点、电能类型、分项用能等各个维度的用能进行统计；

8) 以图形和报表的形式灵活呈现统计结果，并提供统计数据的打印导出功能。

8. 运维工单

提供巡检计划和派工单编制，经审核后生成巡检或任务推送到巡检人员的移

动终端,巡检人员执行巡检任务并登记巡检内容;平台提供检修策略,供运维参考。

支持用户需求、站电告警、故障转任务工单,保证第一时间送达运维人员,时刻保障电站安全稳定。针对不同用户、不同站点、不同任务提供标准化策略建议。对运维检修、抢修工作的进展、重要节点、关键环节进行监控,跟踪分析业务全过程,实现对运检工时、成本、成效等的挖掘分析。基于运行状态管控实现对异常情况的督办与主动预警,形成闭环主动检修管理。主要包括停电抢修分析、检修作业分析、带电作业分析、配网工程分析、主动检修管理、供电能力评估等功能。

9. 设备管理及运行状态分析

能够为各站点创建设备档案,管理设备信息、运行状态、运维检修记录,利用监测数据对设备运行状态进行智能分析、预测,为智能运维、事故抢修提供数据支持及策略建议。能够实现电站全周期智能管理。

1) 变压器设备状态分析评价

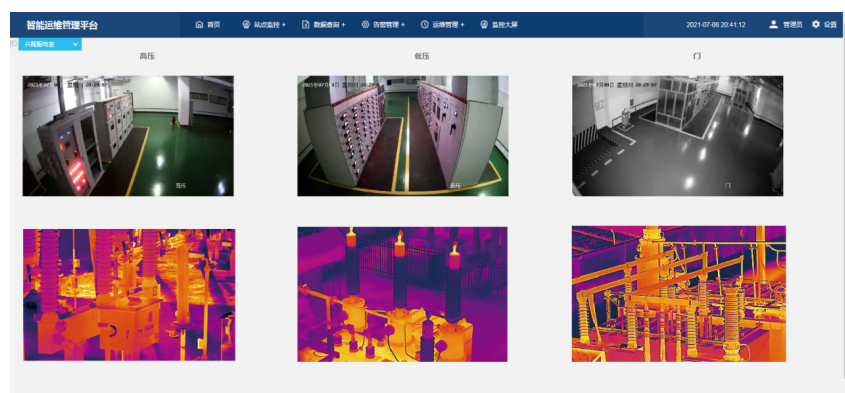
通过监控变压器温度、高/低压端三相电流、短路电流、短路冲击累计、局放水平等数据,运用人工智能算法来评估变压器的运行状态。通过三相电流判断电流三相不平衡的情况以及变压器目前是轻载、经济运行、重载、过载还是严重过载的状态。根据不同状态给出不同的运维策略和评价。

2) 开关柜设备状态分析评价

通过监控三相电流、触头温度、柜内电缆头温度、局放水平等数据,运用人工之恩算法评估开关柜的运行状态。三相电流可以判断目前设备的不平衡率,动静触头温度可以判断导电回路是否正常,电缆头温度可以判断电缆头绝缘及导电是否正常,局放水平可以判断柜内是否有局部放电现场,最终得出该设备的运维策略和评价意见。

10. 红外双视

系统接入红外双视数据,可以浏览实时视频,展示报警的图片,可以支持视频的图像识别功能,可以识别出人员是否佩戴安全帽,是否进入带电区域,压板状态和人脸识别等功能。



11. 环境监测

系统可以采集配电室的工作环境数据（如：温度、湿度、漏水、水位、有害气体（ CO ）等）；支持接入门禁、人员入侵、变压器带电箱体门自动闭锁、烟雾探测器等安防系统的监控。系统平台可以直观的显示出被监测量的大小或状态，以及被监测量的实时值。

12. 统计报表

系统应该提供抄电量报表、日负荷报表、分段电量报表、用电结构电量报表、小时电量报表。

13. 数据共享

系统数据可通过常见标准通信规约、标准通信接口共享给其他软件系统或平台，如 BAS 系统、能源管理系统、集中运维管理系统、上级指挥中心。

14. 权限验证

系统具备权限验证功能，不同角色的用户显示不同的功能，不同的用户只显示自己管辖的设备数据。项目角色及对应权限、界面可灵活配置。

15. 移动端

系统可通过手机 APP、手机浏览器、微信小程序等移动终端进行访问、操作。

第六章 神经网络在谐波检测和负载分配中的应用

第一节 神经网络基础

人脑中大量的神经细胞都不是孤立的，而是通过突触形式相互联系着，构成了结构与功能十分复杂的神经网络系统。为了便于从结构出发模拟人的智能，必须将一定数量的神经元模型适当地连接构成网络，从而建立起神经网络模型。神经网络就是从仿生学角度模拟人脑神经系统的运作方式，使机器具有人脑那样的感知、学习和推理能力。

神经网络系统是由大量的神经元，通过广泛地互相连接而形成的复杂网络系统。虽然神经元的结构和功能十分简单，但由大量神经元构成的网络系统的行为却是丰富多彩且十分复杂的。

神经网络在功能和运算上具有并行分布处理、非线性映射、通过训练进行学习、适应与集成及硬件实现等特点，这使得神经网络拥有学习和适应、自组织、函数逼近和大规模并行处理等能力，进而神经网络天生具有用于智能控制系统的潜力。

神经网络在控制领域的应用主要表现在以下几个方面：①基于神经网络的系统辨识。主要应用在以下两个方面：一是在已知常规模型结构的情况下，估计模型的参数；二是建立线性、非线性系统的静态、动态、逆动态及预测模型。②神经网络控制器。基于神经网络，作为实时控制系统的控制器，对不确定、不确定系统及扰动进行有效的控制，使控制系统达到所要求的动态静态特性。③集成智能控制技术。神经网络与其他方法相结合，如神经网络与专家系统、模糊控制等相结合集成智能控制技术。④优化计算。在常规控制系统的设计中，常遇到求解约束优化问题，神经网络为这类问题提供了有效的途径。⑤基于神经网络的故障诊断。随着对控制系统安全性、可靠性、可维护性要求的提高，对系统的故障检测与诊断问题的要求也越来越高。

通常所说的神经网络结构，主要指它的连接方式。根据连接方式的不同，神经网络可以分为前向网络（前馈网络）、反馈网络、相互结合型网络和混合型网络四种形式。

通过向环境学习、获取知识并改进自身性能是神经网络的一个重要特点。在一般情况下，性能的改善是按某种学习方式来调节自身参数（如权值）随时间逐步达到的。神经网络的学习方式通常有监督学习（有导师的学习）、非监督学习（无导师的学习）和再励学习（或强化学习）三种。

当然，对于具有固定权值的 Hopfield 等一类递归神经网络，由于其本身是一个动力系统，可利用其动态演化的特点实现优化计算、模式识别和联想记忆等功能，本质上是通过平衡态方程的代数性质来决定演化性征的。这样，固定权值的递归神经网络往往解决的是给定具体任务指标的、能够通过系统动态演化达到稳定平衡态的一类问题。如果是具有学习能力的变权值的递归神经网络，也将同样具有前向神经网络学习的几种方式。但由于递归网络本身是一个动力系统，因此，这类递归网络的学习及其性能分析要比前向神经网络复杂得多。

一、多层前向神经网络理论

多层前向神经网络中，每个神经元用一个节点表示。网络由输入层、隐层和输出层节点组成。隐层可以是一层，也可以是多层，前层至后层节点通过权连接，即拓扑结构为有向无环图的前向网络。由于采用 BP 学习算法，所以常称之为 BP 神经网络。

（一）多层前向神经网络的结构

多层前向神经网络由输入层、隐层（不少于 1 层）、输出层组成，信号沿输入到输出的方向逐层传递。以 3 层网络为例，多层前向 BP 神经网络的结构如图 6-1 所示。

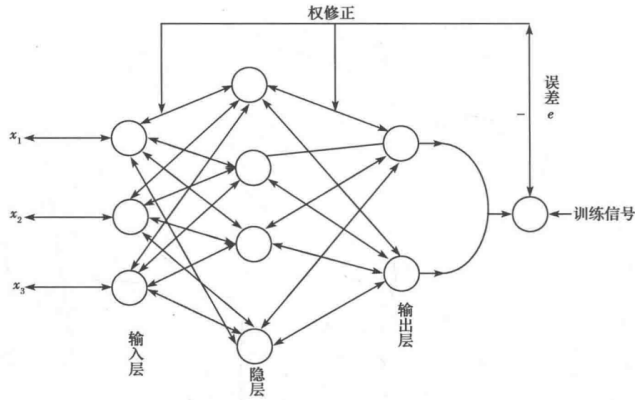


图 6-1 多层前向 BP 神经网络的结构

假设神经网络的输入层、隐层和输出层的神经元数量分别为 n, l 和 m ，沿信息的传播方向，用 $In_j^{(i)}, Out_j^{(i)}$ 分别表示第 i 层第 j 个神经元的输入和输出，则各层的输入、输出关系可描述为如下：

第 1 层（输入层）：输入引入网络

$$Out_i^{(1)} = In_i^{(1)} = x_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

第 2 层（隐层）：

$$I_j^{(2)} = \sum_{i=1}^n w_{ij}^{(1)} Out_i^{(1)} - \theta_j, Out_j^{(2)} = \varphi(In_j^{(2)}) \quad (j = 1, 2, \dots, l)$$

式中， $w_{ij}^{(1)}$ 为 1, 2 层神经元之间的连接权值； $\varphi(\cdot)$ 为隐层神经元的激发函数； θ_j 为神经元的阈值。

第 3 层（输出层）：

$$y_k = Out_k^{(3)} = I_k^{(3)} = \sum_{j=1}^l w_{jk}^{(2)} Out_j^{(2)} \quad (k = 1, 2, \dots, m)$$

式中， $w_{jk}^{(2)}$ 为隐层与输出层之间的连接权值。

因此，一个 3 层神经网络整个的输入、输出关系可以描述为

$$y_k = \sum_{j=1}^l w_{jk}^{(2)} \varphi \left(\sum_{i=1}^n w_{ij}^{(1)} x_i - \theta_j \right) \quad (k = 1, 2, 3, \dots, m)$$

多层前向网络的输入与输出之间的关系可以看成是一个映射关系，这个映射是一个高度非线性的映射。如果输入节点数为 n ，输出节点数为 m ，那么网络是从 n 维欧氏空间到 m 维欧氏空间的映射。

(二) BP 学习算法

1. BP 学习算法

BP 学习算法的基本思想是：通过一定的算法调整网络的权值，使网络的实际输出尽可能接近期望的输出。在本网络中，采用误差反传(BP)算法来调整权值。

假设有 m 个样本 $(\hat{X}_k, Y_k) (k=1, 2, \dots, m)$ ，将第 k 个样本的 $\hat{X}_k$ 输入网络，得到的网络输出为 Y_k ，则定义网络训练的目标函数为

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \|\hat{Y}_k - Y_k\|^2$$

网络训练的目标是使 J 最小，其网络权值 BP 训练算法可描述为

$$w(t+1) = w(t) - \eta \frac{\partial J}{\partial w(t)}$$

式中， η 为学习率。

针对 w_{jk} 和 w_{ij} 的具体情况，训练算法可分别描述为：

$$w_{jk}^{(2)}(t+1) = w_{jk}^{(2)}(t) - \eta_1 \frac{\partial J}{\partial w_{jk}^{(2)}(t)}$$

$$w_{ij}^{(1)}(t+1) = w_{ij}^{(1)}(t) - \eta_2 \frac{\partial J}{\partial w_{ij}^{(1)}(t)}$$

令 $J_k = \frac{1}{2} \|\hat{Y}_k - Y_k\|^2$ ，则

$$\frac{\partial J}{\partial w} = \sum_{k=1}^m \frac{\partial J_k}{\partial w}$$

$$\frac{\partial J_k}{\partial w_j^{(2)}} = \sum_i \frac{\partial J_k}{\partial Y_{ki}} \cdot \frac{\partial Y_{ki}}{\partial w_j^{(2)}} = - \sum_i (\hat{Y}_{ki} - Y_{ki}) Out_j^{(2)}$$

$$\frac{\partial J_k}{\partial w_{ij}^{(2)}} = \sum_i \frac{\partial J_k}{\partial Y_{ki}} \cdot \frac{\partial Y_{ki}}{\partial Out_j^{(2)}} \cdot \frac{\partial Out_j^{(2)}}{\partial I_j^{(2)}} \cdot \frac{\partial I_j^{(2)}}{\partial w_{ij}^{(1)}} = - \sum_i (\hat{Y}_{ki} - Y_{ki}) w_j^{(2)} f' Out_i^{(1)}$$

式中， Y_{ki} 和 $\hat{Y}_{ki}$ 分别为网络输出和样本输出的第 i 个分量， f 为激励函数。

上述训练算法可以总结如下：

第一步：依次取第 k 组样本 $(\hat{X}_k, Y_k) (k=1, 2, \dots, m)$ ，将 $\hat{X}_k$ 输入网络；

第二步：依次计算 $J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \|\hat{Y}_k - Y_k\|^2$ ，如果 $J < \varepsilon$ ，退出；

第三步：计算 $\frac{\partial J_k}{\partial w}$ ；

第四步：计算 $\frac{\partial J}{\partial w} = \sum_{k=1}^m \frac{\partial J_k}{\partial w}$ ；

第五步： $w(t+1) = w(t) - \eta \frac{\partial J}{\partial w(t)}$ ，修正权值，返回。

2. BP 算法的计算机实现

BP 算法的计算机实现流程如下：

第一步：初始化，对所有的权值赋以随机任意小的值，并对阈值设定初值；

第二步：给定训练数据集，即提供输入向量 X 和期望输出 Y ：

$$Y_i = f\left(\sum w_{ij} X_i\right)$$

第三步：计算实际输出 y ；

第四步：调整权值，按误差反向传播方向，基于权值修正公式，顺次进行输出层和隐层之间结合权重的调整，以及隐层和输入层之间结合权重的调整；

第五步：返回第二步重复，直至误差满足要求为止。

3. BP 算法讨论

在神经网络学习训练过程中，权系数的初值、学习方式、激励函数、学习速率、归一化处理等对训练过程有较大影响。

(1) 权系数的初值

一般情况下，权系数通常初始化成小的随机值，尽量覆盖整个权阵的空间域，从而可以避免出现初始权阵系数相同的情况。

(2) 学习方式

式 $w(t+1) = w(t) - \eta \frac{\partial J}{\partial w(t)}$ 的学习算法是根据广义误差计算式 $w_{jk}^{(2)}(t+1) = w_{jk}^{(2)}(t) - \eta_1 \frac{\partial J}{\partial w_{jk}^{(2)}(t)}$ 和式 $w_{ij}^{(1)}(t+1) = w_{ij}^{(1)}(t) - \eta_2 \frac{\partial J}{\partial w_{ij}^{(1)}(t)}$ 而获得的，这种学习算法又称为增量型学习算法。

若将误差定义为

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^p \sum_{j=1}^{n_0} (t_{pj} - y_{pj})^2$$

则有

$$\Delta w^r = \sum_{p=1}^p \Delta_p^r$$

这种学习方法称为累积型学习。

增量型学习的优点是其学习过程是真正的梯度法，而且在计算过程中不必记忆每个权值的变化量。它的缺点是学习过程中的权值调整只满足逼近最近的那个样本。累积型学习受样本的整体影响，只要学习速率充分小，它就能使网络收敛。对于随机的输入样本，采用增量型学习算法可望获得较好的训练结果。

（3）激励函数

激励函数的选择对训练有较大影响，由于常规 Sigmoid 函数的输入趋于 1 时其导数接近 0，从而会大大影响其训练速度，容易产生饱和现象，因此，可以通过调节 Sigmoid 函数的斜率或采用其他激励函数来改善网络的学习性能。

（4）学习速率

一般来说，学习速率越大，收敛越快，但容易产生振荡；而学习速率越小，收敛越慢。

（5）归一化处理

Sigmoid 型激励函数 $f(x)$ 随着 $|x|$ 的增大梯度下降，即 $|f'(x)|$ 减小并趋于 0，不利于权值的调整，因此希望 $|x|$ 工作在较小的区域，故应考虑网络的输入。若实际问题给网络的输入量较大，需作归一化处理，网络输出也要进行相应的处理。

（三）神经网络的泛化能力

泛化能力也称综合能力或概括能力，是指用较少的样本进行训练，使网络能在给定的区域内达到要求的精度，或者说是用较少的样本进行训练，使网络对未经训练的输入也能给出合适的输出。也可以这样理解，当神经网络输入矢量带有噪声，即与样本输入矢量存在差异时，神经网络的输出同样能够准确地呈现出应有的输出，这种能力称为神经网络的泛化能力。

采用适当的学习对神经网络进行学习训练，学习训练结束后，计算网络的实际输出与教师样本之间的误差 e_1 ，然后从全体样本（不包括教师样本）中随机地选取另一组样本，这组样本称为校验样本。用校验样本对训练好的神经网络进行校对，校验样本输入时的网络输出与校验样本输出的误差为 e_2 ，那么 $|e_1 - e_2|$ 就反映了神经网络的泛化能力。

影响神经网络泛化能力的主要因素是教师样本和网络结构，即网络的隐层数与隐层的节点数、初始权值的设定等。

二、Hopfield 神经网络理论

Hopfield 网络学习的过程实际上是一个从网络初始状态向其稳定状态过渡的过程，而网络的稳定性又是通过能量函数来描述的。下面以典型的 Hopfield 网络来讨论其能量函数和学习算法。

（一）离散型的 Hopfield 网络

离散型的 Hopfield 网络的输出为二值型，网络采用全连接结构， v_i 表示第 i 个神经元的输出， w_{ij} 为第 i 个神经元和第 j 个神经元之间的连接权， θ_i 为第 i 个神经元的阈值。

1. 二值型硬限幅器激励函数为

$$v_i = f\left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n w_{ji} v_j - \theta_i\right) = f(u_i) = \begin{cases} 1, & u_i \geq 0 \\ 0, & u_i < 0 \end{cases}$$

2. 双极型硬限幅器激励函数为

$$v_i = f\left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n w_{ji} v_j - \theta_i\right) = f(u_i) = \begin{cases} 1, & u_i \geq 0 \\ -1, & u_i < 0 \end{cases}$$

由于神经元之间为对称连接，且神经元自身无连接，因此有 $w_{ij} = \begin{cases} w_{ji}, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases}$ 。由该连接权组成的连接矩阵是一个零对角元的对称矩阵。

Hopfield 网络可以是同步工作方式，也可以是异步工作方式。即，神经元更新既可以同步（并行）进行，也可以异步（串行）进行。在同步进行时，神经网络中的所有神经元的更新同时进行；在异步进行时，在同一时刻只有一个神经元更新，而且这个神经元在网络中每个神经元都更新之前不会再次更新。在异步更新时，神经元的更新顺序可以是随机的。

在 Hopfield 网络中，虽然神经元自身无连接，但由于每个神经元都与其他神经元相连，即每个神经元的输出都将通过突触连接权值传递给其他的神经元，同时每个神经元都接受其他神经元传来的信息，这样，对每个神经元来说，其输出通过其他神经元之后，又有可能反馈给自身，因此，离散型式的 Hopfield 网络是一种反馈网络。

Hopfield 网络中的神经元相互作用，不断演化。如果神经网络在演化过程中，从某一时刻开始，神经网络中的所有神经元的状态不再改变，那么称该神经网络

络是稳定的。

稳定性: 若网络的状态 x 满足 $x = f(Wx - \theta)$, 则称 x 为网络的稳定点或吸引子。

引理 1: 对于离散时间 Hopfield 网络, 若按异步方式调整状态, 且连接权矩阵 W 为对称阵, 则对于任意的初态, 网络最终都收敛到一个吸引子。

引理 2: 对于离散时间 Hopfield 网络, 若按同步方式调整状态, 且连接权矩阵 W 为非负定对称阵, 则对于任意的初态, 网络最终都收敛到一个吸引子。

Hopfield 网络的能量函数是用来描述 Hopfield 网络稳定性的, 离散的 Hopfield 网络能量函数可以定义为

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} v_i v_j + \sum_{i=1}^n \theta_i v_i$$

式中, n 为网络中的神经元个数; w_{ij} 为第 i 个神经元和第 j 个神经元之间的连接权, 且有 $w_{ij} = w_{ji}$; v_i 和 v_j 分别是第 i 个神经元和第 j 个神经元的输出, 代表网络的状态; θ_i 为第 i 个神经元的阈值。

可以证明, 当某一神经元左的状态由 0 变为 1 时, 网络能量函数的变化为

$$\Delta E = \sum_{k=1}^n \frac{\partial E}{\partial v_k} \Delta v_k = - \sum_{k=1}^n \Delta v_k \left(\sum_{j=1, j \neq k}^n w_{kj} v_j - \theta_k \right)$$

即由抑制状态变为兴奋状态, 因此有

$$\sum_{j=1, j \neq k}^n w_{kj} v_j - \theta_k > 0$$

这样, 可知 $\Delta E < 0$ 。

当某一神经元 k 的状态由 1 变为 0 时, 网络能量函数的变化为

$$\Delta E = \sum_{j=1, j \neq k}^n w_{kj} v_j - \theta_k$$

即由兴奋状态变为抑制状态, 因此有

$$\sum_{j=1, j \neq k}^n w_{kj} v_j - \theta_k < 0$$

这样, 可知 $\Delta E < 0$ 。

可见, 离散 Hopfield 网络在运行中, 其能量函数总是在不断地降低, 最终将趋于稳定状态。

(二) 连续型 Hopfield 网络

离散型 Hopfield 网络中的神经元与生物神经元的差别较大, 因为生物神经

元的输入与输出都是连续的，而且生物神经元的信号传输存在时滞。1984 年，Hopfield 又提出了一种连续型 Hopfield 网络模型。在这种网络模型中，神经元的状态可以在 0 和 1 之间取任意实数值。

连续型 Hopfield 网络模型在简化了生物神经元性质的同时，重点突出了生物神经元的以下重要特性：①神经元作为一个输入输出变换，其传输特性具有 S 型函数的特性；②细胞膜具有时空整体作用；③神经元之间存在大量的兴奋（激励）和抑制性连接，这种连接主要通过反馈来实现；④具有既产生动作电位的神经元，又有代表渐近方式工作的神经元的能力。因此，连续型 Hopfield 神经网络准确地保留了生物神经网络的动态和非线性特性，并且有助于理解大量神经元之间的协同作用是怎样产生巨大的计算能力的。

连续型 Hopfield 网络的动态方程可描述为

$$\left. \begin{aligned} C_i \frac{du_i}{dt} &= \sum_{j=1}^n T_{ji} v_j - \frac{u_i}{R_i} + I_i \\ v_i &= g(u_i) \end{aligned} \right\}$$

式中： u_i, v_i 分别为第 i 个神经元的输入和输出； $g(u_i)$ 为具有连续且单调递增性质的神经元激励函数； T_{ji} 为第 j 个神经元到第 i 个神经元的连接权； I_i 为施加在第 i 个神经元上的外部偏置量。令 C_i 和 Q_i 分别为电容和电阻，则 $\frac{1}{R_i} = \frac{1}{Q_i} + \sum_{j=1}^n T_{ji}$ 。显然， C_i, Q_i, R_i 均为正值。

连续型 Hopfield 网络的能量函数如下定义：

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ij} v_i v_j - \sum_{i=1}^n I_i v_i + \sum_{i=1}^n \int_0^{v_i} \frac{1}{R_i} g^{-1}(s) ds$$

其中， $g^{-1}(v_i) = u_i$ 为激励函数 $g(u_i)$ 的逆函数。显然，逆函数 $g^{-1}(v_i)$ 也是连续且单调递增函数。

当运算放大器接近理想运放时，积分项可以忽略不计，网络的能量函数变为

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ij} v_i v_j - \sum_{i=1}^n I_i v_i$$

能量函数 E 对时间 t 的变化率为

$$\frac{dE}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial E}{\partial v_i} \cdot \frac{dv_i}{dt}$$

其中

$$\begin{aligned}
\frac{\partial E}{\partial v_i} &= -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n T_{ij} v_j - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n T_{ji} v_j + \frac{u_i}{R_i} - I_i \\
&= -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ji}) v_j - \left(\sum_{j=1}^n T_{ji} v_j - \frac{u_i}{R_i} + I_i \right) \\
&= -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ji}) v_j - C_i \frac{du_i}{dt} \\
&= -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ji}) v_j - C_i \frac{d(g^{-1}(v_i))}{dv_i} \cdot \frac{dv_i}{dt}
\end{aligned}$$

于是, 当 $T_{ij} = T_{ji}$ 时, 有

$$\frac{dE}{dt} = -C_i \frac{d(g^{-1}(v_i))}{dv_i} \left(\frac{dv_i}{dt} \right)^2, \quad 0$$

且当 $\frac{dv_i}{dt} = 0$ 时, $\frac{dE}{dt} = 0$ 。因此, 随着时间的增长, Hopfield 网络在状态空间中的轨迹总是向着能量函数减小的方向变化, 且网络的稳定点就是能量函数的极小点。

连续型 Hopfield 网络广泛应用于联想记忆和优化计算问题。当用于联想记忆时, 能量函数是给定的, 网络的运行过程通过确定合适的权值以满足最小能量函数的要求; 当用于优化计算时, 网络的连接权值是确定的, 首先将目标函数与能量函数相对应, 然后通过网络的运行使能量函数不断下降并最终达到最小, 从而得到问题对应的极小解。

基于 Hopfield 网络模型设计优化算法的出发点在于以下两方面: 一是神经网络是稳定的, 网络势必收敛到渐近平衡点; 二是神经网络的渐近平衡点恰好是能量函数的极小点。

但是, 从稳定性理论分析, Hopfield 模型优化方法并不严格, 虽然可以借助于 Lyapunov 方法的思想构造能量函数, 但并不知道网络平衡点的位置, 因此不能保证能量函数的极值点就是所考虑问题的真正全局极小点, 从而容易出现 Hopfield 网络不能收敛。然而, 在 Lyapunov 稳定理论中, 平衡点与函数极点预先已对应, 必然把运动轨迹趋于平衡点与 Lyapunov 函数趋于极小值相对应, 从而保证稳定理论的正确性。稳定性分析仍然是动态反馈网络应用的理论依据。利用 Hopfield 网络求解优化问题时, 若网络参数选择不好, 往往得不到最优解, 或是次优度很差, 甚至出现算法不收敛或者不符合约束条件要求的结果。因此, 研究参数对算法性能的影响很有意义, 这也是目前研究神经网络稳定性极为热门的原因之一。

不可否认的是，基于 Hopfield 网络模型的优化计算具有简单、规范、快速等优点，但为了克服其优化性和鲁棒性差等不足，还需要做大量的研究工作。修改能量函数的形式、确立网络参数的选取原则，以及把 Hopfield 网络与其他方法有效结合等，仍是有关 Hopfield 网络的重要研究课题。可以预见，鉴于人类智能活动快速、并行、分布等特点，递归神经网络将在控制、决策和判断等方面发挥更强大的作用。

（三）Hopfield 网络的学习算法

Hopfield 网络的学习过程是在系统向稳定性转化过程中逐步完成的。学习算法如下。

步骤一：设置连接权值：

$$w_{ij} = \begin{cases} \sum_{s=1}^m x_i^s x_j^s, & i \neq j \\ 0, & i = j, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

式中， x_i^s 为事先给定的 S 型样例（或记忆模式）的第 i 个分量，它可以为 1 或者 0。样例类别数为 m ，神经元个数为 n 。

步骤二：对未知类型的样例进行初始化：

$$y_i(k) = x_i \quad (1, i, n)$$

式中以 $y_i(k)$ 为神经元 i 在时刻 k 的输出， x_i 为输入样本的第 i 个分量。

步骤三：迭代运算：

$$y_i(k+1) = f \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} y_j(k) \right) \quad (1, j, n)$$

式中， $f(s)$ 为阈值型激励函数。

重复这一步骤，直到新的迭代不能再改变神经元的输出为止，即收敛为止。这样，各神经元的输出与输入样例达到了最佳匹配。

步骤四：转步骤二，继续。

三、Hopfield 神经网络的应用

（一）Hopfield 网络在联想记忆中的应用

Hopfield 网络的许多应用都是利用 Hopfield 神经网络能够收敛到它的一个稳定状态这一特性实现的。例如，利用 Hopfield 网络的稳定状态能够实现联想记忆、优化等应用。下面简要介绍这方面的内容。

如果将网络的一个稳态作为一个记忆样本，那么以后当给这个网络一个适当的激励时，网络能够收敛到和输入模式最为相似的样本模式。初态朝稳态的收敛过程便是寻找记忆样本的过程。初态可以认为是给定样本的部分信息，网络改变的过程可以认为是从部分信息找到全部信息，从而实现了联想记忆功能。

Hopfield 网络的联想记忆过程，就是非线性动力学系统朝某个稳定状态演化运行的过程。这就需要调整网络的连接权值，使得所要记忆的样本作为 Hopfield 网络的能量局部极小点（或全局最小点）。Hopfield 网络的联想记忆过程分为学习阶段和联想阶段。在给定样本的条件下，使得存储的样本成为 Hopfield 网络的稳定状态，这就是学习阶段。联想是指在已经调整好权值不变的情况下，给出部分不全或者受了干扰的信息，按照动力学规则改变神经元的状态，使神经网络最终收敛到某个稳定状态（真稳定态或者假稳定态，取决于网络的收敛算法及其稳定性能）。

实现 Hopfield 网络的联想记忆的关键是网络到达记忆样本能量函数的极小值时，决定网络的神经元之间的连接权值 w_{ij} 和阈值 θ_i 等。下面以 Hebb 学习规则来设计网络的连接权值。

设定 m 个样本 $x^{(k)} (k=1,2,\dots,m)$ ， $x_i^{(k)}$ 表示第 k 个样本的第 i 个元素。设约是神经元 i 到神经元 j 的权值。当神经元的输出 $x_i \in \{-1,+1\}$ 时，有

$$w_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^m x_i^{(k)} x_j^{(k)}, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases}$$

$$w_{ij}(k) = w_{ij}(k-1) + x_i^{(k)} x_j^{(k)} \quad (k=1,2,\dots,m)$$

$$w_{ij}(0) = 0, w_{ii}(0) = 0$$

当神经元的输出 $x_i \in \{0,+1\}$ 时，有

$$w_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^m (2x_i^{(k)} - 1)(2x_j^{(k)} - 1), & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases}$$

$$w_{ij}(k) = w_{ij}(k-1) + (2x_i^{(k)} - 1)(2x_j^{(k)} - 1) \quad (k=1,2,\dots,m)$$

依据上述算法的联想记忆功能，可用于模式识别。但当样本多且彼此接近时，容易引起混淆。网络所能存储的最大的样本数，称为网络的记忆容量。网络的记忆容量不仅与神经元的个数有关，还与连接权值的设计、要求的联想范围大小、样本的性质等有关。若网络要求存储的样本模式是两两正交的，可以有最大的记忆容量。

(二) Hopfield 网络的优化方法

如果将网络的稳态作为一个优化问题的目标函数的极小点,那么初态朝稳态的收敛过程便是优化计算的过程,该优化计算是在网络演化过程中自动完成的。

1. 基本思想

无论是离散型还是连续型 Hopfield 网络模型,能量函数都表征了网络的动力学演化过程,并揭示了该演化过程与网络稳定状态之间的内在联系。因此, Hopfield 网络能量函数的极小化过程表示了神经网络从初始状态到稳定状态的演化过程。通常,约束优化问题的求解过程实际上就是目标函数的极小化过程,选择合适的能量函数使其最小值对应于问题的最优解。因此,目标函数达到局部极小或者全局最小,相应的解即为约束优化问题的局部最优解或者全局最优解。如果将目标函数与能量函数相联系,并通过能量函数将约束优化问题的解映射到神经网络的一个稳定状态上去,那么就可以利用神经网络的演化过程来实现优化计算。这就是应用神经网络解决优化问题的基本思想。

用神经网络方法求解优化问题的关键是如何把待求解的优化问题映射为一个神经网络。一般可以将求解的优化组合问题的每一个可行解用换位矩阵表示。另一个关键问题是构造能量函数,使其最小值对应于问题的最优解。它决定了一个待定问题是否能够用神经网络方法求解。目前,还没有直接将约束优化问题映射为神经网络的方法,通常采用优化理论中的拉格朗日函数和乘子法,或者哈密顿方法,即利用优化问题的目标函数和约束条件构造相应的能量函数。一般使用在计算能量函数 E 中添加一些违反约束条件的惩罚项的简单方法,用罚函数法写出求解优化问题的能量函数,即

$$E = \sum_{i=1}^m C_i E_i + C_0 E_0$$

式中, E_i 为违反约束条件的惩罚函数; E_0 为优化的目标函数; C_i 和 C_0 分别为平衡 E_i 和 E_0 在总能量函数中的比重而给定的比例常数,且若最小化 E_0 , 则 $C_0 > 0$, 若最大化 E_0 , 则 $C_0 < 0$ 。

2. 一般步骤

基于上述基本思想,用神经网络方法求解优化问题的一般步骤为:①将求解的优化问题的每一个可行解用换位矩阵来表示;②将换位矩阵与由 n 个神经元构成的神经网络相对应,每一个可行解所对应的换位矩阵的各元素与相应的神经元稳态输出相对应;③构造能量函数,使其最小值对应于优化问题的最优解,并满

足约束条件；④用罚函数法构造目标函数，与 Hopfield 神经网络计算能量函数的表达式相等，确定各连接权值 w_{ij} 、偏置参数 I_i 、神经元的阈值 θ_i ；⑤给定网络的初始状态和网络参数，使网络（可以是计算机模拟）按照动态方程演化运行，直到达到稳定状态，并将它解释为优化问题的解。

当在计算机上实现上述演化过程时，需要对连续过程进行离散化。此时，采样步长也的选择很重要，在遵循香农采样定理的同时，还需要小心调试。采样步长太大，可能导致离散后的算法与原来的连续算法有很大的差别，甚至不收敛；采样步长太小，则迭代次数太多，计算时间长。可以证明：只要采样步长选取得合理，上述算法一定收敛。如果不加其他限制条件，收敛到的解不一定对应有效的访问路径，可能是不可行解。有人对此在理论上进行了分析，提出了一些改进方法。这些方法的缺点是：使权系数的表达式复杂化，降低了收敛速度。

鉴于神经网络动力学性质的复杂性，神经网络优化计算方面仍有许多问题需要进一步深入研究。目前存在的主要问题有：计算结果的不稳定性；网络系数的确定；能量函数存在大量局部极小值，求解结果不能保证为最优解。

第二节 前向神经网络在有源电力滤波器中的应用

电力电子技术以快速可控的电能变换为主要对象，以方便、节约、安全为特点，大大提高了人类在生产和生活中的效率和舒适性，从而得到了日益广泛的普及。但是随着作为电网的非线性和时变性负荷的电力电子装置（如逆变器、整流器等）的大规模的应用，其负面效应也日渐显露。电力电子装置的开关动作向电网注入了大量的谐波和次谐波分量，导致了交流电网中电压和电流波形的严重失真，从而替代了传统的变压器等铁磁材料的非线性引起的谐波，成为目前最主要的谐波源。而随着各种电能质量敏感设备、计算机等信息设备、电视及音响等家用视听设备以及空调机等家用电器的大量应用，对电能质量的要求也日益提高。利用各种无源和有源滤波技术，从根本上解决上述问题已经是一个不得不面对的现实。

为了抑制谐波，国内外学者最早研究的是无源滤波器。无源滤波器虽然具有结构简单、一次性投入低、运行成本低，既可以补偿谐波同时又能补偿无功功率的优点，但由于结构原因，在实际应用中存在以下难以克服的缺点：①只能抑制指定的有限次谐波；②滤波器的 LC 参数易受外界环境的影响而漂移，导致滤波

器偏离谐振状态，滤波效果变差；③谐振电流过大时可能造成滤波器过载，损害设备；④无源滤波器对电网阻抗和频率变化十分敏感；⑤可能与电力系统发生并联、串联谐振，对滤波装置造成严重损害，影响滤波效果。有源滤波器作为一种新型的谐波和无功补偿装置，能有效抑制谐波污染，因为其动、静态性能优良以及对电网负载参数变化具有自适应能力，在谐波补偿中最具有发展潜力。

一、有源电力滤波器基础

（一）有源电力滤波器的基本原理

I_L 为负载电流， I_c 为有源电力滤波器的输出电流， I_s 为电网电流。有源电力滤波器（APF）主要由三部分组成：谐波和无功电流检测电路、电流跟踪控制电路和逆变主电路。其中，检测电路主要对负载电流中的谐波和无功分量进行检测，产生运算电流指令 $I_c(t)$ ；电流跟踪控制电路则通过控制逆变器的开关动作使有源滤波器的输出 $I_c(t)$ 与 $I_c^*(t)$ 基本相同。补偿装置 APF 所产生的 $I_c(t)$ 的电流波形正好与负载电流 $I_L(t)$ 中的谐波和无功电流成分的频率、幅值完全相同，而相位正好相差 180° ，从而达到补偿、抵消谐波和无功电流的效果。补偿电流的检测与控制是至关重要的两个环节，二者相互影响，直接决定了有源滤波器的补偿性能。

具体来说，将负荷电 I_L 按照傅里叶级数展开，有

$$\begin{aligned} I_L &= \sum_{n=1}^{+\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \\ &= I_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t) + I_1 \sin \theta_1 \cos(\omega t) + \sum_{n=2}^{+\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \\ &= I_{1p} + I_{1q} + I_n \end{aligned}$$

式中， I_{1p} 为基波有功分量， $I_{1p} = I_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t)$ ； I_{1q} 为基波无功分量，

$I_{1q} = I_1 \sin \theta_1 \cos(\omega t)$ 为高次谐波电流， $I_n = \sum_{n=2}^{+\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n)$ 。

$I_L = I_s + I_c$ ，即负荷电流 I_L 由电源电流 I_s 和有源滤波器的输出电流 I_c 共同提供。若控制有源滤波器的输出电流，使 $I_c = I_n$ ，则电源中就只有基波功率（有功和无功），即 $I_s = I_{1p} + I_{1q}$ ，从而达到抑制谐波的目的。简而言之，让有源滤波器产生一个与电源谐波幅值相同、相位相反的谐波注入谐波源，即可以将谐波抵消掉，使之不会流入系统。由上述分析可见，有源滤波器可以同时补偿无功功率，这需使 $I_c = I_{1q} + I_n$ ，则 $I_s = I_{1p}$ ，那么，电流源中就只含基波有功电流了。

通过检测补偿对象的电流和电压，再经指令运算电路，就可以得出补偿电流的指令信号。该信号经控制器由补偿电流发生电路获得，补偿电流与负载中的谐波及无功等电流相抵消，最终获得期望的电源电流。因此，该系统可以被看作一个典型的跟踪控制系统。由于获得的电流指令信号是一个时变而且具有多次谐波的复杂信号，因此，电流跟踪控制策略是决定稳态和动态性能的一个关键因素。在传统的控制基础上应用一些新兴的现代控制理论（如智能控制、变结构控制、自适应控制等），能够综合解决信号跟踪、干扰抑制和参数摄动这三个主要问题。

（二）有源滤波器主电路的形式

最早的有源电力滤波器是单独使用的并联型有源电力滤波器。经过多年的发展，为了尽量发挥有源电力滤波器的特长，提高其性能，并尽量降低其容量，结合无源电力滤波器的特点发展了串联混合型有源电力滤波器、并联混合型有源电力滤波器等。为了适应不同的补偿对象，发展了各种各样的有源滤波器形式。

有源滤波器的主体是有源逆变器。对于有源滤波器来说，有源逆变器及其控制是至关重要的部分。有源逆变器可以分为两种基本的类型，即电流型有源逆变器和电压型有源逆变器。电流型逆变器直流侧采用电感作为储能元件，在正常工作时流过电感的电流基本上保持不变，因此可以看作电流源，其优点是不会因为主电路开关器件的直通而发生短路故障。但是，电流型逆变器直流侧的大电感上始终有电流流过，该电流将在大电感上产生较大的损耗。另外，对直流侧电感上的电流控制也比较复杂，因此目前应用较少。电压型逆变器直流侧采用电容作为储能元件，在正常工作时电容器两端的电压基本保持不变，因此可以看作电压源。在具体选择有源滤波器时，电路结构的选择是一个很重要的环节，因为不同的滤波器结构适合不同的应用目的和不同的功率范围。

（三）传统的谐波补偿电流跟踪控制电路

因为有源电力滤波器具有高度可控性和快速响应性，因此它不但能够补偿各次谐波，还能够补偿无功功率。APF 的滤波特性不会被系统的阻抗所影响，与此同时，还具有自适应的功能，可以自动跟踪补偿变化的谐波。有源滤波器作为一种新型的电力电子装置，其工作性能主要取决于主电路构成元件及其控制系统。一旦滤波器的主电路确定，那么控制方法就成为决定其输出性能好坏和效率高低的关键因素。有源电力滤波器较为常见的控制方法有三角波比较控制、滞环控制、空间矢量 PWM 控制、单周控制、无差拍控制等。

1. 三角波比较控制

三角波比较的控制方式与传统的用三角波作为载波的 PWM 控制方式并不相同。三角波比较不是直接把指令信号与三角波进行比较,而是将指令电流信号与补偿电流信号相减,把它们的差值作为误差信号,误差信号经过放大器放大之后再与三角波进行比较。比较得到的差值作为变流器的输入信号,最后得出控制 APF 开关器件通断的 PWM 信号。放大器通常采用比例放大器或比例积分放大器,属于直接电流控制。

该法具有调整方便、动态适应性好及电流跟随能力强的优点。但三角波频率过高将导致逆变器开关损耗增大,开关频率过低又会致使补偿电流高次谐波分量复制效果差。

2. 滞环控制

滞环电流控制方法(Hysteresis Current Control)是目前应用比较广泛的一种非线性闭环电流控制方法。该方法是利用滞环比较器形成一个以 0 为中心、 H 和 $-H$ 为上下限的滞环或者死区,把指令电流信号与逆变器实际输出电流信号的差值控制到规定的滞环宽度(误差限)范围之内,以此来控制逆变器的开关动作。把指令电流信号与实际的补偿量电流信号比较后相减,然后得出两者的差值。把这个差值作为滞环比较器的输入信号,通过滞环比较器动作产生控制 APF 开关器件通断的 PWM 信号。这个信号再经驱动隔离电路便可以驱动 APF 的开关,使 APF 产生补偿量电流实时跟踪指令电流信号的变化。

在这种控制方式中,滞环的宽度反将会在较大程度上影响补偿量的跟踪性能。当环宽值比较大的时候,开关通断的频率会降低,因此,对开关器件的要求不高,但是跟踪误差会比较大;相反,当环宽值比较小的时候,尽管跟踪误差减小了,但开关通断的频率却提高了,因此,对开关器件的要求也相对较高。这种控制方法的特点是:硬件电路较为简单;属于实时控制方式,电流响应很快;不使用载波,输出电流中不存在特定频率的谐波分量;属于跟踪型 PWM 的闭环控制方式;滞环宽度 H 值固定,那么电流跟踪误差范围也是固定的,但是电力电子器件的开关频率则是变化的。

该法的缺点是:当开关频率变化较大或者要求快速暂态控制时,效果较差。

3. 空间矢量 PWM 控制

电压空间矢量控制技术是在交流异步电机磁场理论基础上建立的一种控制策

略。最初其使用的范围只限于电机应用场合。其后在逆变器开关不断适时切换的情况下便形成了新型的 PWM 调制技术。由于磁链的轨迹是由综合的三相电压(空间电压矢量)来控制的,因此这种 PWM 形成方式就称为空间电压矢量 PWM。再后来的发展使这种 PWM 控制脱离了交流电机磁链轨迹控制的本意,形成了电力电子技术中新型的 PWM 控制方式。在众多的 PWM 技术中, SVPWM 和 SPWM 是最具有代表性的。传统的 SPWM 是将三角载波与正弦调制波通过比较来生成 PWM 波形,这实际上是一种相电压控制方式,其直流侧电压的

利用率并不高。而 SVPWM 是一种优化的 PWM 技术,与传统的 SPWM 技术相比,其直流侧电压的利用率比 SPWM 明显提高了。当采用不连续开关方式调制时,开关器件的开关损耗降低了。在电机驱动等应用中,用作磁链跟踪控制或电流控制更为方便。其调制方法便于数字实现,有逐步取代传统 SPWM 的趋势。

(四) APF 补偿电流检测的传统方法

1. 用模拟带通(或带阻)滤波器检测高次谐波电流

该检测法电路结构简单、成本低且品质因数易于控制,但滤波器中心频率固定,对元件参数十分敏感,易受电网频率波动影响,难以获得理想的幅频和相频特性,并且该方法不能同时分离出谐波和无功电流。

2. 基于 Fryze 时域分析的有功电流分离法

该方法的基本原理是把负荷电流作正交分解,一个与电压波形完全一致,即有功分量;另一个分量作为广义无功电流。该法至少要经过几个周期的延时才能求得瞬时有功电流。

3. 基于频域分析的 FFT 分解法

该方法通过傅里叶级数分析,把检测到的畸变电流(电压)进行快速傅里叶变换,分解为基波和高次谐波代数之和的形式,再将高次谐波合并为总的补偿电流。该法存在较大的时间延迟和非同步采样误差,尤其是对高次谐波的检测精度影响较大。

4. 基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测

三相电路瞬时无功功率理论,又称 p_g 理论,后又演变为 p_g 法。该法是以瞬时功率 p 和瞬时功率 g 为基础的,适用于三相电压对称且无畸变。

二、基于人工神经网络实现 LCC 畸变电流检测 APF 的研究

在电力电子领域,人工神经网络在逆变器电流控制、智能化伺服电机驱动等

领域中得到了应用,具有很好的应用前景。但由于 APF 检测和控制实时性要求高,人工神经网络应用于 APF 实时检测和控制在研究难度较大。一般是利用人工神经网络具有的学习和自适应能力,通过引入补偿后实际的电网电流和电压作为控制器的附加输入来减小补偿时的相位误差,以改善 APF 的稳态补偿特性。

(一) ANN 网络节点数的确定

在用二层人工神经网络进行 LCC 调节时,同时输入的数据点数越少,则输入层节点数越小。中间层的节点数越少,神经元的连接就越少。这样,不仅网络的结构简单,更重要的是学习迭代速度加快。但若节点数太少,则可能精度下降。所以,以下仿真研究中,在满足精度的前提下,尽量减少神经网络的输入节点数目和隐层节点数目。目前还没有比较精确地确定网络节点数目的方法,只能通过仿真实验确定。

设输入的负载电流为 50Hz 的方波电流。通过仿真实验,在每一个周期等距离采样 20 个点,即二层前馈网络的输入节点数 n 可取 20,中间层节点数 m 取 3,能保证有较好的跟踪特性,如再减小 n 或 m ,都将导致精度下降。

(二) 学习率和的选取

在 BP 算法中,学习率和,一般选取 0 ~ 1 之间的数,但究竟应取多大并无一个明确的标准。一般地说,如果学习率取得大一些,那么可以使收敛速度加快,但取得太大将会引起振荡,特别是在自学习过程的后期;而学习率取得过小,尽管不会引起振荡,但学习收敛速度却很慢,影响学习效果和精度。所以应综合考虑,这里选取 $\eta=0.3$, $\alpha=0.25$ 能达到要求。

(三) 仿真研究

由于仿真的目标主要是检验畸变电流检测方法的正确性,因此为了简化分析,对有源电力滤波器的电路结构进行了以下两点简化:①忽略控制和功率主电路的时延,将其视为一个放大倍数为 K 的功率放大器;②用频率分别为 50Hz, 150Hz, 250Hz 和 350Hz 的几个不同频率的电流源并联产生非正弦周期负载电流。调节各次谐波电流的相对大小,可改变非线性负载电流的波形形状。

三、有源电力滤波器的统一神经网络结构

不可抗拒的计算机网络失效、电机过早地烧毁、电信线中的嗡嗡叫声以及变压器过热仅是一些导致家用和工业装置发生质量问题的破坏因素。随着非线性负

荷的增加,如何实现小的质量问题在将来将是至关重要的情况。

实际上,非线性负荷电流和电压都是非正弦的,对于其产生的谐波,必须加以补偿以改善负荷的功率因数。多年以来,有源电力滤波器(APF)一直被认为是用于谐波补偿的高级技术。APF的目标是通过注入补偿电流以恢复平衡的正弦电源电流。相对于其他补偿设备来说,APF特别适用于抑制电流谐波和校正功率因数,尤其对于快速变化的负荷。除了具有良好的性能,APF还能够方便地与现有的电力系统相结合,进而在实际电力系统中得到广泛应用。最近许多的研究工作都试图通过电力电子技术来建立新的APF拓扑结构或者新的控制方法来提高APF的能力。在电力系统中,针对非正弦和非周期的电流和电压,数学建模也被用来阐述和刻画系统的有功和无功电流/功率。同时,也会涉及数值分析、谐波检测算法、控制理论以及如人工神经网络(ANN)等这类人工智能技术。

多年来,ANN技术已经成功地应用于APF的控制当中,并且在该领域大有发展前景。的确,ANN的学习能力能够对电网的每一个变化参数(如非线性和时变的负荷)实现在线自适应调节。大多数这类控制约束对于传统的控制方法来说仍极具挑战性,而神经网络方法能够克服这类约束并能够成功应用于实际系统中。

介绍一种统一的神经网络方法来实现自适应谐波补偿。统一性主要体现在仅采用单一类型的ANN,即自适应在线(Adaline)神经网络。这里介绍的统一方法主要是源于电力系统中基于ANN控制策略的简单性和灵活性,以及优化神经网络实现所需要的硬件资源。

基于功能分解,APF的每一个计算任务都能通过ANN来实现。这些功能包括基于Adaline的干扰电压调节、基于Adaline的谐波估计以及逆变器的神经控制策略。对于前两个功能,建立了一种新型的电压分解方法,并通过固定相应的结构和输入转化成了Adaline网络形式。针对逆变器控制功能,采用了多层感知器(MLP)网络,该网络可看成几个简单神经元(如Adaline)的组合。

通过后面大量的仿真和实验结果可以看到,这里介绍的基于神经网络的APF较传统的APF在谐波畸变的检测和补偿上更具有优势。此外,基于神经APF在动态特性、补偿性能、鲁棒性以及应用性等方面较传统的方法都具有显著优势。神经APF最主要的优点是具有实时适应时变非线性负荷的能力。这种补偿结构采用模块化设计,由同类的ANN组成的不同模块构成,进而为更一般化的APF结构奠定了基础,特别是能利用硬件实现。

(一) 电力系统中用于谐波补偿的 APF

1. 有源电力滤波器拓扑结构

大多数的 APF 技术采用的是电压型变流器,通过适当的门控电力半导体器件将直流电压转化成交流电压。脉宽调制(PWM)技术是当今最普遍使用的技术,基于 PWM 原理又建立了几类新型的 APF 拓扑,如串联型、并联型、串并联型及混合型。

近几年的研究工作实际上是试图改进这些 APF 的拓扑结构。例如,某种串联型 APF 能够消除谐波、校正不平衡负荷、产生或吸收无功功率。基于晶闸管双重补偿器和 PWM 绝缘栅双极型晶闸管 IGBT 的串联连接的这种组合方法,能够对大多数的暂态扰动进行补偿。具有预测功能的 APF 能够从没有损害到相位变化的畸变波形中提取出正弦有功电流,即使在频率和幅值同时变化的情况下也能提取出正弦有功电流。这种 APF 综合了低通前置滤波器和自适应预测滤波器的结构,在频率快速变化的情况下也能够使用。此外,串-并联混合结构的 APF 也得到了长足的发展,具有良好的滤波特性。

现今,在所有的 APF 拓扑结构中,并联型 APF 在工业场所中是应用得最广泛的滤波器。并联型 APF 被认为是最基础的 APF 结构,并包含了与 APF 控制相关的主要关键问题。基于此,下面介绍利用不同的 ANN 策略来研究并联型 APF,以期达到具有统一神经网络结构的 APF 的目的。这种方法很容易拓展到一般拓扑结构的 APF,如串联型 APF 以及并、串组合的 APF。

2. 并联有源滤波器的原理

在电力系统中,电压或电流波形通常包括一个基波分量、一些谐波分量以及随机噪声。在这些分量中,基波分量通常占有主要的比例。

APF 的任务包括辨识所有的谐波分量,并将基波分量从其他的谐波分量中分离出来,这里,其他的谐波分量可转化成相应的参考补偿电流。APF 的控制策略就是利用这些参考补偿电流实时地将它们按照相反的相位通过电力电路(如逆变器和输出滤波器)重新注入到电源中。

APF 的结构可分解为以下几部分:第一部分是通过某些谐波检测算法恢复平衡对称的电压系统;第二部分是对谐波进行辨识和滤波,以期满足控制算法所需要的指定补偿参考电流;第三部分是通过由逆变器和输出滤波器组成的 APF 功率电重新将期望补偿电流注入到电源中。

传统上, APF 的第一部分可通过锁相环来实现, 谐波辨识和滤波基于诸如递推最小误差平方、最小均方误差 (LMS) 和卡尔曼滤波器等谐波检测算法来实现。上述算法除了简单方便以外, 其缺点也是不容忽视的: 未能考虑噪声和误差; 基于最优模型, 需要知道参数的精确值; 需要一定的时间时滞才能收敛。其他可供选择的算法通常基于傅里叶 (Fourier) 理论。在应用基于傅里叶理论的滤波算法之前, 一个基本假设必须先满足: 信号是静态不变的, 或者具有恒定的幅值。然而, 实际上, 静态假设通常只在一定范围内是有效的。另一种强有力的且广泛使用的技术就是瞬时功率理论 (IPT)。IPT 技术通过在正弦平衡条件下测得的电流来计算瞬时有功和无功功率。瞬时有功功率能够分解成与基波频率相关的直流 (DC) 分量, 瞬时无功功率能够分解成与谐波畸变相关的交流 (AC) 分量。然后, 应用滤波环节将由谐波畸变产生的分量从与基频相关的 DC 分量中分离出来。IPT 技术仅瞬时辨识平衡对称系统的功率特性, 并为控制策略指定需要补偿的参考电流。

APF 的控制策略是多种多样的, 其中, 滞环比较控制、PID 闭环控制以及 RST 控制等都是广泛使用的方法。基于 PID 闭环的控制方法将线电流 i_s 调整为正弦波, 并与对应的主电压同相位。通过调节 i_s 的幅值, PID 控制器将保持 APF 的电容器电压为参考值 v_{ref} 。由于 RST 控制器在其性能和复杂性两方面能够实现很好的折中, 进而得到了广泛适用。这些方法通常能够提供令人满意的动态性能。

近些年, 人工智能技术越来越多地被应用到 APF 控制中, 例如, 具有自学习能力的 ANN 更能适应环境的改变, 因此控制效果更为有效。

3. APF 的人工智能技术

与传统的 APF 控制方法相关的最关键的问题是: 找到一种能够获得精确谐波参考信号的谐波检测算法以达到控制目的, 特别是在电力系统的谐波和系统频率都是时时变化的实

际情况下。这正是自适应滤波技术和基于神经网络的 APF 得到发展的原因。基于 ANN 的方法在 APF 中的应用越来越有效。确切地说, ANN 能够实现 APF 中的不同环节。例如, Adaline 网络用来辨识电力系统电压的离散信号模型中的参数; MLP 用于谐波辨识和滤波; 前向网络和递归网络被用来从畸变的波形中检测谐波, 取代了傅里叶变换和低通滤波器。基于 ANN 的 APF 在提高处理速度和简化谐波检测算法方面具有显著优势。利用 Adaline 网络进行谐波分量在线跟

踪得到了研究,针对的是半静态(或平稳)信号(一般指信号一直是缓慢变化的,不能时刻保持常值状态,但变化不似动态信号那样剧烈),该方法比传统的自适应算法具有更好的效果。同时,所使用的目标函数考虑了一个遗忘函数,这样,平均误差能量能够迫使系统更好地适应非稳态信号。另一种补偿所有电压干扰的新型技术,即利用串联型有源滤波器和并联型无源滤波器的组合来实现高阶谐波隔离的技术也得到了研究。利用遗传算法来确定 PLL 闭环控制中的 RST 调节器的参数,由此来辨识网络电压的正序。这一步将在有源滤波器的谐波辨识中被用到。此外,利用 Adaline 网络来确定电力系统的频率也得到了研究,该方法能够对大范围的频率变化表现出高度的鲁棒性和估计精度。所有上述成果都表明:ANN 能够对有源电力滤波器的不同环节提供有效的解决办法。

(二) 一种新型的神经网络 APF

这种新型的神经网络 APF 可以分解成三个模块。在第一个模块中,Adaline 网络用于从混合电压中在线提取正向和反向电压分量,以此来确定相应的参考信号,即正弦和平衡的电压。三种不同的神经网络方法(每一种方法都基于一个具体的电流或功率分解方法)在第二个模块中被构造出来,以此来辨识谐波电流。在这三种方法中,分解过程是通过 Adaline 网络实现的。这样,学习算法从辨识的畸变谐波中来确定需要补偿的电流。第三个模块是使用 ANN 来控制 APF 的逆变器,使其提供适当的补偿电流。这里将介绍基于 MLP 的不同学习策略来自动适应非线性负载的变化,以及没有任何先验知识情况下产生的谐波。

1. 基于 Adaline 的干扰电压调节

基本上,APF 的电压测量单元是通过 PLL 来驱动的,以便在严重的运行条件下恢复电网的平衡电压。基于 IPT 理论,该电压测量单元通过 PLL 将三相电压作为输入。实际上,IPT 理论仅在正弦、平衡的电压条件下才成立,此时,PLL 通常用来提取电压的直流分量。此外,关于提高 PLL 性能的研究也表明,与改进的 RST 调节器联合使用,PLL 将会取得更好的效果。

电压分解的目标在于分别估计幅值 V_d, V_i, V_o , 相位 $\varphi_d, \varphi_i, \varphi_o, v_d, v_i, v_o$ 分别是基频为 ω 的三相系统 $\mathbf{v}_L(t)$ 的正向、反向和零序电压分量:

$$\begin{aligned}
\mathbf{v}_d &= \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{d2} \\ v_{d3} \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_d \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \varphi_d) \\ \cos\left(\omega t - \varphi_d - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega t - \varphi_d + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \\
\mathbf{v}_i &= \begin{bmatrix} v_{i1} \\ v_{i2} \\ v_{i3} \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_i \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \varphi_i) \\ \cos\left(\omega t - \varphi_i + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega t - \varphi_i - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \\
\mathbf{v}_o &= \begin{bmatrix} v_{o1} \\ v_{o2} \\ v_{o3} \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_o \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \varphi_o) \\ \cos(\omega t - \varphi_o) \\ \cos(\omega t - \varphi_o) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

三相系统 $\mathbf{v}_L(t)$ 的不平衡电压可写成

$$\mathbf{v}_L(t) = \begin{bmatrix} v_{L1} \\ v_{L2} \\ v_{L3} \end{bmatrix} = V_d C_{32} P(\omega t - \varphi_d) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + V_i C_{32} P(-\omega t + \varphi_i) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + V_o C_{31}(\omega t - \varphi_o)$$

式中：Clarke-Park 变换参数为

$$\begin{aligned}
C_{32} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \quad C_{31} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\
P(\omega t) &= \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

正向、反向、零序电压分量必须进行分离，并提取为线性关系，以便于 Adaline 网络来学习。为此，正向电压和正交电压分量 v_d^d, v_q^d 将通过 Park 表示来

确定。

对式

$$\mathbf{v}_L(t) = \begin{bmatrix} v_{L1} \\ v_{L2} \\ v_{L3} \end{bmatrix} = V_d C_{32} P(\omega t - \varphi_d) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + V_i C_{32} P(-\omega t + \varphi_i) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + V_o C_{31}(\omega t - \varphi_o)$$

连续应用 $\alpha - \beta$ 变换和旋度为 $-\omega t$ 的 $d - q$ Park 变换, 可得到如下式子:

$$\begin{bmatrix} v_d^d \\ v_q^d \end{bmatrix} = P(-\omega t) C_{32}^T \mathbf{v}_L(t) = \frac{3}{2} \left[V_d P(-\varphi_d) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + V_i P(-2\omega t + \varphi_i) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right]$$

进而得到

$$\left. \begin{aligned} v_d^d &= \frac{3}{2} V_d \cos \varphi_d + \frac{3}{2} V_i \cos(2\omega t - \varphi_i) = \bar{v}_d^d + \tilde{v}_d^d \\ v_q^d &= -\frac{3}{2} V_d \sin \varphi_d - \frac{3}{2} V_i \sin(2\omega t - \varphi_i) = \bar{v}_q^d + \tilde{v}_q^d \end{aligned} \right\}$$

考虑到 $(\bar{v}_d^d)^2 + (\bar{v}_q^d)^2 = (3/2)^2 V_d^2 (\cos^2 \varphi_d + \sin^2 \varphi_d)$, 则电流电压分量为

$$V_d = \frac{2}{3} \sqrt{(\bar{v}_d^d)^2 + (\bar{v}_q^d)^2}$$

由于 $\bar{v}_q^d / \bar{v}_d^d = -\sin \varphi_d / \cos \varphi_d$, 则

$$\varphi_d = \begin{cases} \arctan \frac{-\bar{v}_q^d}{\bar{v}_d^d}, & \text{如果 } \bar{v}_d^d > 0 \\ \arctan \frac{-\bar{v}_q^d}{\bar{v}_d^d} + \pi, & \text{如果 } \bar{v}_d^d < 0 \end{cases}$$

2. 基于 Adaline 网络的谐波估计

谐波补偿的性能极度依赖于谐波检测方法。实际上, 如果谐波电流辨识的效果很差或者是时变非线性负荷, 那么即使是再好的控制装置, 也不能够实现足够的谐波校正。考虑到这些原因, 采用神经网络的方法来辨识电力系统的电压谐波的幅值。Adaline 网络的简单结构使得其在物理意义上能够很好地解释网络的权值, 进而使其在自适应滤波领域展现强大的优势。在谐波补偿策略中, Adaline

网络用来辨识和估计电源网络中的电流谐波分量。电流的每一个谐波分量能够通过一个 Adaline 的权值来估计。基于这个原理,下面提出了三种不同的辨识技术。

第一种方法是对每一相测得的电流进行傅里叶分解。这种分解结果可直接作为 Adaline 网络的输入。第二种方法代表的是一种原始的辨识方法,适用于三相和单相情况。第二种方法对每一相采用两个 Adaline 网络,用来从基频中分离出谐波。然后,对信号进行傅里叶级数分解,以此来确定神经网络的输入,并用 LMS 算法对权值进行训练。神经网络使用简便以及并行计算模式的特点,使得基于神经网络的方法快捷、有效。第三种方法采用有源滤波系统中广为使用的瞬时实、虚功率技术,将低通滤波器用两个 Adaline 网络来代替,在仿真研究和实际应用中都表现了很好的效果,但这种方法仅适用于三相系统。

3. 神经控制策略

在辨识出畸变谐波以后,得到的补偿参考电流必须反向地被注入到电力系统中。这一功能通常由模拟电路实现的逆变器和电源滤波器来完成。可以应用不同的算法策略来控制逆变器,并根据前面估计到的参考信号来注入适当的电流信号。滞环控制器、PID 控制器和 RST 控制器已经得到广泛应用。

下面介绍一种基于 ANN 的控制方案,其中,多层网络和递归神经网络将以一种新颖的组合结构互连,并形成一個统一的控制模式。通过这种方式形成的神经网络控制器是非常规的自适应控制器,通过在线学习过程来不断提高网络性能。它的主要目标是学习和辨识传统的控制器。这样,对如下三种不同的控制方案进行评价和比较:一个是直接神经控制方案,一个是逆神经控制方案,最后一个是直接逆神经控制方案。

(1) 直接神经控制方案

这种神经控制方案是基于一个 ANN 基础之上的,利用该 ANN 来学习传统的 RST 控制器直至得到满意的性能为止。然后,这个 ANN 简单地与控制对象相串联。在这种结构中,ANN 直接作为控制器使用。ANN 最初是学习 RST,然后替代 RST。学习阶段结束之后,ANN 实际上就是 RST 控制器的复制品。这种学习方案提供了有效的控制器,并克服了传统的 RST 的局限。在直接控制方案中,优化目标是直接最小化系统的输出误差,即对象的期望输出与对象的当前输出之间的差值: $e(k) = i_{\text{ref}}(k) - i_{\text{inj}}(k)$ 。

这里的神经控制器是由多层感知器网络 (MLP) 来实现的,MLP 可看作几

个 Adaline 网络之间的相互连接。这类神经控制器的输入是 k 和 $k-1$ 时刻的 RST 控制器的输出, 以及过去的估计误差, 即 RST 控制器输出和神经网络输出之间的差值 $e(k), e(k-1), e(k-2)$ 。这类网络由标准的反向传播学习算法来训练, 得到的估计输出则是逆变器和无源滤波器的控制信号。

(2) 逆神经控制方案

直接控制方案是基于离线学习模式的, 而为了补偿 RST 控制器的失效, 逆神经控制方案允许使用在线学习模式, 并再现 RST 控制器的特性。逆控制方案也能够考虑非线性负荷的任何变化。ANN 用来学习 RST 控制器, 而神经控制器 MLP 基于在线学习来计算控制信号。MLP 网络有四个输入和一个输出, 该网络输出作为逆变器的控制信号。为了最小化均方误差函数, 网络的训练通常采用迭代更新权值的方法。网络权值的学习使用期望输出和 MLP 的实际输出值之间的差值信号 $e(k) = i_{\text{ref}}(k) - i_{\text{inj}}(k)$ 来进行的。

(3) 直接逆神经控制方案

直接逆控制利用了对象的模型及其动态特性。对象的动态特性首先通过辨识器神经网络 (INN) 来获得, 控制器神经网络 (CNN) 直接传递控制作用, 其中, CNN 与 INN 的网络完全一样。在逆变器的控制中, INN 用来估计系统的参数以及对对象的雅可比矩阵 $\partial i_{\text{inj}}(k) / \partial u(k)$, CNN 利用过程动态系统的雅可比矩阵来驱动逆变器。基于控制信号及其若干次延迟信号 $u(k), u(k-1), u(k-2), u(k-3)$, INN 用来估计和提供注入到电力系统中的电流。因为神经元是对输入量进行加权求和计算, 而具有隐含层连接的神经网络可看作一个坐标变换。

对输入空间的每一个点, 神经网络从变换坐标的角度来计算输出值:

$\hat{i}_{\text{inj}}(k) = f(u(k), u(k-1), u(k-2), u(k-3))$ 。此估计电流 $\hat{i}_{\text{inj}}(k)$ 通过逆变器和无源滤波器注入到电力系统, 并通过误差 $e_1(k) = i_{\text{inj}}(k) - \hat{i}_{\text{inj}}(k)$ 进行学习。CNN 估计逆变器的控制信号 $u(k)$ 。CNN 的输入为相继的不同时刻的误差 $e_2(k), e_2(k-1), e_2(k-2), e_2(k-3)$, 该误差是通过比较参考电流 $i_{\text{ref}}(k)$ 和注入到电力系统中的电流 $i_{\text{inj}}(k)$ 而计算出来的, 即 $e_2(k) = i_{\text{ref}}(k) - i_{\text{inj}}(k)$ 。

INN 和 CNN 两个网络都是基于标准的反向递推算法进行学习的, 基本上展示了良好的效果。如果对象的逆模型不存在, 那么直接逆控制方案不能够使用。直接逆控制方案的优点是: 不需要对 INN 和 CNN 两个网络分别进行训练。该方案可在线运行, 但通过离线学习也可以确定一个初始的 CNN, 然后在线学习可

作为精细调解。

4. 仿真结果

神经 APF 的有效性首先通过计算机仿真来验证。神经 APF 的性能是通过准确性、鲁棒性、收敛速度以及计算的复杂度来说明的。这样,根据实际的工业情况进行一些适当的操作,如通过改变负荷电阻 R_L 的阻值来表示非线性负荷的变化、改变电网的参数(电压幅值、电源)等。

交流主线、负荷以及神经谐波补偿器都是通过 Matlab-Simulink 实现的,仿真过程中可实时进行所有参数的可视化、调整及控制。用于表示非线性负荷的基本电路是一个 Graetz 桥,该桥由六个阈值函数和一个 RC 电路组成,其中,电阻 $R_L = 1.6\Omega$, 电容 $C_L = 103\mu\text{F}$ 。

下面针对干扰电压调节和谐波估计问题,比较一下基于 Adaline 网络的神经控制方法的性能。在神经控制方案中,出于低计算成本方面的考虑,仅考虑逆神经控制方案。

在第一个仿真中,针对电力系统的不同参数值情况,评价一下神经谐波补偿器的性能。在第二个仿真中,考虑谐波补偿器的暂态行为,特别是在线改变负荷情况下的暂态行为。

(1) 稳态性能

为了在稳态模式中估计神经 APF 的性能,在不同的操作条件下进行几次仿真,如不同的电源参数和非线性负荷。此外,对神经 APF 和前面介绍的三种不同的辨识方法进行了比较,同时,这些仿真结果最终都与传统的谐波补偿方法进行了比较。这里应用基于逆神经控制方案的三种辨识方法,并与具有低通滤波器和 RST 控制器的传统补偿方法进行了比较。在仿真中,针对谐波检测技术环节,三相-单相方法、有功和无功方法、直接方法的学习率始终保持不变,即分别是 $\mu = 0.005, 0.01, 0.001$ 。逆神经控制方案的学习率是 $\mu = 0.002$ 。

对于干扰电压调节过程,神经控制的收敛时间近似为 50ms 和 25ms;而对于谐波检测算法而言,三相-单相方法、有功和无功方法及直接方法的收敛时间分别近似为 4ms、11ms 和 45ms。整个神经 APF 的收敛时间不超过 60ms 在许多实际应用中是可以接受的。

(2) 在线改变负荷对补偿性能的影响

在仿真中,通过在线改变负荷状态(如非线性负荷的突然变化)来检验神经

补偿算法的动态响应。在 $t = 0.288$ 时, 将电阻值 R_L 从 1.6Ω 改变到 1Ω , 以此来调制谐波分量的幅值。

需要注意的是, 有功和无功方法针对平衡、对称的电压系统才有效。同时, 利用神经网络方法在线提取了正向、反向和零序电压分量, 并考虑了与传统的 PLL 进行仿真比较。所有这些结果均表明: 神经方法是非常快速、有效的。所有的仿真也清楚地表明: 神经方法与传统的 PLL 方法相比, 收敛速度更快, 精度更高。实际上, 对正向电压分量也进行了在线估计, 神经方案用时 $0.025s$, 而传统的 PLL 方法用时 $0.045s$ 。这些估计时间取决于负荷变化的幅度, 但这里考虑的负荷变化幅度比实际工业电力系统中的负荷变化幅度要大。

静态和动态测试表明: 神经方案总是比基于低通滤波器和 RST 调节器的传统方法要好。的确, 所有的仿真结果都清楚地展示了在 APF 中使用 ANN 的优点。神经网络利用在线学习能力能够不断提高自身的性能, 进而能够考虑诸如非线性负荷不断变动等变化情况。

直接法和三相 - 单相方法是简单、有效的, 但有功和无功功率方法则具有更好的性能。与其他两种方法相比较, 仅使用两个 Adaline 网络的有功和无功方法需要一个电压分量提取器。这样, 为了在线提取电压分量, 与神经方法相关的有功和无功功率方法共需要四个 Adaline 网络。另一方面, 直接方法和三相 - 单相方法方法分别基于三个和六个 Adalines 网络。考虑到计算的成本和每种神经网络方法的性能, 有功和无功方法则是最好的一种方法。

其他的计算机仿真结果也表明神经网络方法能够处理任何其他的基波频率。对于电力系统的任何基波频率, 适用于神经网络方法以及电压分量提取器的分解方法能够进行更新校正。此外, 这些分解方法能够单独补偿或抑制谐波分量, 这是通过适当选取用于辨识和滤波谐波分量的 Adaline 网络的输入来实现的。

神经网络方法除了能够自身适应时变参数的变化, 用于在线提取电压分量的神经网络方法还能够直接提取所有的电压分量, 如正向、反向和零序电压分量, 而这些电压分量是传统的 PLL 方法不可能提取的。

第三节 Hopfield 神经网络在谐波检测系统的应用

未知幅值和相角的谐波电流可以表达为

$$x(t) = \sum_{l=1}^n X_l \sin(l\omega t + \varphi_l)$$

式中, X_l 和 φ_l 分别为第 l 次谐波的幅值和相角; ω 为基波角的频率; $l=1,3,\dots,N$ 。将其展开成三角级数的形式为

$$x(t) = \sum_{l=1}^n [A_l \sin(l\omega t) + B_l \cos(l\omega t)]$$

式中, $A_l = X_l \cos \varphi_l, B_l = X_l \sin \varphi_l$, 每次谐波的幅值和相角可由下式得出:

$$X_l = \sqrt{A_l^2 + B_l^2}, \quad \varphi_l = \arctan \frac{B_l}{A_l}$$

谐波检测装置对负载电流进行采样, 采样时间均匀分布。设采样时间 T_k 时刻的采样值为 D_k , 则相应的谐波 $x(t_k)$ 为

$$x(t_k) = \sum_{l=1}^n [A_l \sin(l\omega t_k) + B_l \cos(l\omega t_k)]$$

一、Hopfield 神经网络谐波检测的串行结构

可以利用 Hopfield 神经网络优化方法, 通过建立目标函数, 利用 Hopfield 能量函数对目标函数进行优化计算, 使得 $x(t)$ 与 d 的差值最小, 而 Hopfield 网络的并行处理能力能够保证迅速处理采样数据从而得到结果。主要步骤为: ①建立目标函数; ②利用 Hopfield 能量函数对目标函数进行处理; ③利用 Hopfield 神经网络实现对目标函数的优化运算。

首先建立目标函数:

$$\xi_k = 0.5 [x(t_k) - d_k]^2 = 0.5 \left\{ \sum_{l=1}^n [A_l \sin(l\omega t_k) + B_l \cos(l\omega t_k)] - d_k \right\}^2$$

然后利用 Hopfield 能量函数对目标函数进行处理, 使以上目标函数最小。因此, 定义能量函数为

$$E = \xi_k$$

由 Hopfield 能量函数的概念可知: 当且仅当 $\frac{dE}{dt} = 0$ 成立时, 能量函数 E 最小, 且此时系统达到稳定点。假设 ω 已知, 则在确定的时刻 t_k 下谐波参数 $A_l, B_l (l=1,3,5,\dots,N)$ 为未知量, 且其系数分别为 $\sin(l\omega t)$ 和 $\cos(l\omega t)$ 。定义矢量

$$X_k = [A_1, B_1, A_3, B_3, \dots, A_N, B_N]^T$$

$$Y_k = [\sin(wt_k), \cos(wt_k), \sin(3wt_k), \cos(3wt_k), \dots, \sin(Nwt_k), \cos(Nwt_k)]^T$$

由能量函数理论得

$$\frac{dX_k}{dt} = -k \frac{\partial E}{\partial X_k} = -k \frac{\partial \xi_k}{\partial X_k}$$

式中, k 为常数积分。

所以, 由式 $X_k = [A_1, B_1, A_3, B_3, \dots, A_N, B_N]^T$ 得

$$\frac{\partial \xi_k}{\partial X_k} = \left[\frac{\partial \xi_k}{\partial A_1}, \frac{\partial \xi_k}{\partial B_1}, \frac{\partial \xi_k}{\partial A_3}, \frac{\partial \xi_k}{\partial B_3}, \dots, \frac{\partial \xi_k}{\partial A_N}, \frac{\partial \xi_k}{\partial B_N} \right]^T$$

将式

$$\xi_k = 0.5 [x(t_k) - d_k]^2 = 0.5 \left\{ \sum_{l=1}^n [A_l \sin(lwt) + B_l \cos(lwt)] - d_k \right\}^2$$

代入式

$$\frac{\partial \xi_k}{\partial X_k} = \left[\frac{\partial \xi_k}{\partial A_1}, \frac{\partial \xi_k}{\partial B_1}, \frac{\partial \xi_k}{\partial A_3}, \frac{\partial \xi_k}{\partial B_3}, \dots, \frac{\partial \xi_k}{\partial A_N}, \frac{\partial \xi_k}{\partial B_N} \right]^T$$

得

$$\frac{\partial \xi_k}{\partial A_l} = \left\{ \sum_{j=1}^N [A_j \sin(jwt_k) + B_j \cos(jwt_k)] - d_k \right\} \sin(lwt_k)$$

最后将式

$$X_k = [A_1, B_1, A_3, B_3, \dots, A_N, B_N]^T$$

$$\frac{\partial \xi_k}{\partial X_k} = \left[\frac{\partial \xi_k}{\partial A_1}, \frac{\partial \xi_k}{\partial B_1}, \frac{\partial \xi_k}{\partial A_3}, \frac{\partial \xi_k}{\partial B_3}, \dots, \frac{\partial \xi_k}{\partial A_N}, \frac{\partial \xi_k}{\partial B_N} \right]^T$$

$$\frac{\partial \xi_k}{\partial A_l} = \left\{ \sum_{j=1}^N [A_j \sin(jwt_k) + B_j \cos(jwt_k)] - d_k \right\} \sin(lwt_k)$$

同时代入式

$$\frac{dX_k}{dt} = -k \frac{\partial E}{\partial X_k} = -k \frac{\partial \xi_k}{\partial X_k}$$

$$\frac{\partial A_l}{\partial t} = -k \left\{ \sum_{j=1}^N [A_j \sin(jwt_k) + B_j \cos(jwt_k)] - d_k \right\} \sin(lwt_k)$$

则谐波参数即未知量 A_l 为

$$A_l = -k \int \left\{ \sum_{j=1}^N [A_j \sin(j\omega t_k) + B_j \cos(j\omega t_k)] - d_k \right\} \sin(l\omega t_k) dt$$

同理, 可得参数 B_l 为

$$B_l = -k \int \left\{ \sum_{j=1}^N [A_j \sin(j\omega t_k) + B_j \cos(j\omega t_k)] - d_k \right\} \cos(l\omega t_k) dt$$

二、Hopfield 网络谐波检测结构的稳定点唯一性分析

对于以上两种谐波检测结构, 可以通过前面的 Hopfield 能量函数优化理论得出其稳定性, 也就是能量函数最小点, 即 $\frac{dE}{dt} = 0$ 。然而检测结构是否存在不同的稳定点, 则需要一定的证明和分析。

首先, 对于任意的函数, 有汉森矩阵 $G(x) = \nabla^2 f(x)$, 所以, 目标函数 $\xi_k = 0.5 [x(t_k) - d_k]^2 = 0.5 \left\{ \sum_{l=1}^n [A_l \sin(l\omega t) + B_l \cos(l\omega t)] - d_k \right\}^2$ 的汉森矩阵为

$$\nabla^2 \xi_k = \left[\frac{\partial^2 \xi_k}{\partial x_i \partial x_j} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}$$

简化为

$$\nabla^2 \xi_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_1^2} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_1 \partial B_1} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_1 \partial A_3} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_1 \partial B_3} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_1 \partial A_5} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_1 \partial B_5} \\ \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_1 \partial A_1} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_1^2} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_1 \partial A_3} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_1 \partial B_3} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_1 \partial A_5} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_1 \partial B_5} \\ \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_3 \partial A_1} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_3 \partial B_1} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_3^2} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_3 \partial B_3} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_3 \partial A_5} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_3 \partial B_5} \\ \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_3 \partial A_1} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_3 \partial B_1} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_3 \partial A_3} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_3^2} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_3 \partial A_5} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_3 \partial B_5} \\ \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_5 \partial A_1} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_5 \partial B_1} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_5 \partial A_3} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_5 \partial B_3} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_5^2} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial A_5 \partial B_5} \\ \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_5 \partial A_1} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_5 \partial B_1} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_5 \partial A_3} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_5 \partial B_3} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_5 \partial A_5} & \frac{\partial^2 \xi_k}{\partial B_5^2} \end{bmatrix}$$

将式 $\xi_k = 0.5[x(t_k) - d_k]^2 = 0.5\left\{\sum_{l=1}^n [A_l \sin(l\omega t) + B_l \cos(l\omega t)] - d_k\right\}^2$ 代入上式, 可得

$$\nabla^2 \xi_k =$$

$$\begin{bmatrix} \sin^2(ut_k) & \sin(ut_k)\cos(ut_k) & \sin(ut_k)\sin(3ut_k) & \sin(ut_k)\cos(3ut_k) & \sin(ut_k)\sin(5ut_k) & \sin(ut_k)\cos(5ut_k) \\ \cos(ut_k)\sin(ut_k) & \cos^2(ut_k) & \cos(ut_k)\sin(3ut_k) & \cos(ut_k)\cos(3ut_k) & \cos(ut_k)\sin(5ut_k) & \cos(ut_k)\cos(5ut_k) \\ \sin(3ut_k)\sin(ut_k) & \sin(3ut_k)\cos(ut_k) & \sin^2(3ut_k) & \sin(3ut_k)\cos(3ut_k) & \sin(3ut_k)\sin(5ut_k) & \sin(3ut_k)\cos(5ut_k) \\ \cos(3ut_k)\sin(ut_k) & \cos(3ut_k)\cos(ut_k) & \cos(3ut_k)\sin(3ut_k) & \cos^2(3ut_k) & \cos(3ut_k)\sin(5ut_k) & \cos(3ut_k)\cos(5ut_k) \\ \sin(5ut_k)\sin(ut_k) & \sin(5ut_k)\cos(ut_k) & \sin(5ut_k)\sin(3ut_k) & \sin(5ut_k)\cos(3ut_k) & \sin^2(5ut_k) & \sin(5ut_k)\cos(5ut_k) \\ \cos(5ut_k)\sin(ut_k) & \cos(5ut_k)\cos(ut_k) & \cos(5ut_k)\sin(3ut_k) & \cos(5ut_k)\cos(3ut_k) & \cos(5ut_k)\sin(5ut_k) & \cos^2(5ut_k) \end{bmatrix}$$

为了简便, 可将式子记为矩阵 H 。其各个主子式有以下特征:

$$\det(H^1) = \det[\sin^2(\omega t_k)] \dots 0$$

$$\det(H^2) = \det \begin{bmatrix} \sin^2(\omega t_k) & \sin(\omega t_k)\cos(\omega t_k) \\ \sin(\omega t_k)\cos(\omega t_k) & \cos^2(\omega t_k) \end{bmatrix}$$

$$= \sin^2(\omega t_k)\cos^2(\omega t_k) \cdot \det \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = 0$$

同理, 可推导出矩阵 H 的顺序主子式也为 0, 即

$$\det(H^6) = \det(H) = [\sin(\omega t_k)\cos(\omega t_k)\sin(3\omega t_k)\cos(3\omega t_k)\sin(5\omega t_k)\cos(5\omega t_k)]^2$$

$$\det \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} = 0$$

可知矩阵 H 为半正定的, 所以知原目标函数为凸函数, 进而知系统的稳定点是唯一存在的系统能量最小点, 所以系统会收敛于这唯一的稳定点上。后面的仿真也验证了这一结论。

当然, 完全可以将这种证明模式推而广之, 应用到检测更多次谐波的结构当中。简要说明如下:

$$\nabla^2 \xi_k = \begin{bmatrix} \sin^2(\omega t_k) & \sin(\omega t_k)\cos(\omega t_k) & \dots & \sin(\omega t_k)\sin(N\omega t_k) & \sin(\omega t_k)\cos(N\omega t_k) \\ \cos(\omega t_k)\sin(\omega t_k) & \cos^2(\omega t_k) & \dots & \cos(\omega t_k)\sin(N\omega t_k) & \cos(\omega t_k)\cos(N\omega t_k) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \sin(N\omega t_k)\sin(\omega t_k) & \sin(N\omega t_k)\cos(\omega t_k) & \dots & \sin^2(N\omega t_k) & \sin(N\omega t_k)\cos(N\omega t_k) \\ \cos(N\omega t_k)\sin(\omega t_k) & \cos(N\omega t_k)\cos(\omega t_k) & \dots & \cos(N\omega t_k)\sin(N\omega t_k) & \cos^2(N\omega t_k) \end{bmatrix}$$

仍记它为 H , 它的各个主子式有如下特征:

当 j 为奇数时

$$\det(H^j) = \det(H) = \prod_{i=1}^{j+\frac{1}{2}} \left\{ \sin^2(iwt_k) \cos^2[(i-1)wt_k] \right\} \cdot \det \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = 0$$

当 j 为偶数时

$$\det(H^j) = \det(H) = \prod_{i=1}^{\frac{1}{2}} \left[\sin^2(iwt_k) \cos^2(iwt_k) \right] \cdot \det \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = 0$$

所以知 H 为半正定的。根据前面的定理可知其收敛于唯一的稳定点。

同样的方法也可以应用在并行结构收敛性的证明上，结果一样。

Hopfield 神经网络谐波检测方法的收敛稳定点是唯一存在的。

三、Hopfield 神经网络基波频率检测结构

因为电网频率存在波动，所以谐波检测的另一个主要研究课题就是频率的检测。在前面介绍的优化方法的基础上仍可得到以下结论。

首先对于串行结构，依然沿用

式

$$\xi_k = 0.5 [x(t_k) - d_k]^2 = 0.5 \left\{ \sum_{l=1}^n [A_l \sin(lwt) + B_l \cos(lwt)] - d_k \right\}^2$$

可知

$$\frac{\partial \xi_k}{\partial w} = \left\{ \sum_{j=1}^n [A_j \sin(jwt_k) + B_j \cos(jwt_k)] - d_k \right\} \left\{ \sum_{j=1}^n [jt_k A_j \sin(jwt_k) + jt_k B_j \cos(jwt_k)] \right\}$$

所以

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= -k_w \left\{ \sum_{j=1}^N [A_j \sin(jwt_k) + B_j \cos(jwt_k)] - d_k \right\} \left\{ \sum_{j=1}^N [jt_k A_j \sin(jwt_k) + jt_k B_j \cos(jwt_k)] \right\} \\ w &= -k_w \int \left\{ \sum_{j=1}^N [A_j \sin(jwt_k) + B_j \cos(jwt_k)] - d_k \right\} \\ &\quad \left\{ \sum_{j=1}^N [jt_k A_j \sin(jwt_k) + jt_k B_j \cos(jwt_k)] \right\} dt \end{aligned}$$

第四节 Hopfield 网络在经济负荷分配中的应用

一、经济负荷分配问题

经济负荷分配问题是在满足电网总需求的情况下, 根据各机组输出上、下限, 寻求最小燃料消耗的优化问题。对于机组燃料与负荷间的关系, 即目标函数, 可以用如下二次多项式拟合:

$$f(P) = \sum_i (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2)$$

式中, $f(P)$ 为所有机组的总燃料消耗; P_i 为第 i 台机组的负荷; a_i, b_i, c_i 为第 i 台机组的燃料消耗特性曲线多项式的系数。

在机组燃料消耗最小的计算中, 应该满足如下约束条件:

电力平衡或者有功功率平衡:

$$P_D + P_L = \sum_i P_i$$

单机约束:

$$P_i \leq P_i \leq \bar{P}_i$$

式中, P_D 为总负载; $P_L = \sum_i \sum_j a_{ij} P_i P_j$ 为传输网损, 其中, a_{ij} 为传输网损系数; P_i 为第 i 台机组的下限出力, $\bar{P}_i$ 为第 i 台机组的上限出力。

二、基于 Hopfield 网络的 ELD 问题

(一) Hopfield 网络及 ELD 的映射

经典的 Hopfield 网络的能量函数定义为

$$E = -\frac{1}{2} \sum_i \sum_j T_{ij} V_i V_j - \sum_i I_i V_i + \sum_i \theta_i V_i$$

式中, T_{ij} 为神经元 i 和神经元 j 之间的连接权值, V_i 为神经元 i 的输出, I_i 为神经元 i 的网络外输入, θ_i 为阈值偏差。

基于 Hopfield 网络的计算方程为

$$\frac{dU_i}{dt} = \sum_j T_{ij} V_j + I_i$$

式中, U_i 为神经元 i 的输入。

取神经元的输入输出非线性激励函数为 Sigmoid (S) 函数, 即

$$V_i = g_i(\lambda U_i) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{U_i + \theta_i}{V_0}}}$$

Hopfield 网络的稳定性分析基于的是网络的能量函数:

$$\frac{dE}{dt} = -\sum_i g'_i(U_i) \left(\frac{dU_i}{dt} \right)^2$$

由于 $g_i(U_i)$ 为单调递增函数, 因此 $\frac{dE}{dt} \leq 0$ 。这表明, 随着时间的演化, 网络的状态总是朝着能量减小的方向运动。网络的平衡点就是 E 的极小点。

(二) ELD 的 Hopfield 网络模型

根据目标函数 $f(P) = \sum_i (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2)$ 和约束条件 $P_D + P_L = \sum_i P_i$, 可将能量函数定义如下:

$$E = \frac{A}{2} \left(P_D + P_L - \sum_i P_i \right)^2 + \frac{B}{2} \sum_i (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2)$$

式中, $A, B, 0$ 为非负的权重系数; a_i, b_i 和 c_i 分别为第 i 台机组的燃料消耗特性曲线多项式的系数。

比较式

$$E = \frac{A}{2} \left(P_D + P_L - \sum_i P_i \right)^2 + \frac{B}{2} \sum_i (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2)$$

和式

$$E = -\frac{1}{2} \sum_i \sum_j T_{ij} V_i V_j - \sum_i I_i V_i + \sum_i \theta_i V_i$$

可得其 Hopfield 神经网络的连接权值和神经元外输入为:

$$T_{ii} = -A - Bc_i, T_{ij} = -A, I_i = A(P_D + P_L) - \frac{Bb_i}{2}$$

将微分方程 $\frac{dU_i}{dt} = \sum_j T_{ij} V_j + I_i$ 转化为如下差分方程:

$$\frac{U_i(t+1) - U_i(t)}{\Delta t} = \sum_j T_{ij} V_j + I_i$$

或者

$$U_i(t+1) = U_i(t) + \Delta t \left(\sum_j T_{ij} V_j + I_i \right)$$

式中： Δt 为迭代步长，在模拟仿真过程中将给出其危值范围。

假设传输网损 P_L 为常数，用差分方法进行循环迭代，则可以得出输出值 P_i 。不过，在一般的 Hopfield 神经网络模型中，神经元的输出都在 $(0, 1)$ 之间，而机组的输出功率 P_i 的值都较大，因此可用以下修正 S 型函数：

$$V_i = g_i(\lambda U_i) = (\bar{P}_i - P_i) \frac{1}{1 + e^{\frac{U_i + \theta_i}{U_0 + P_i}}}$$

式子所构造的 S 型函数有突出的优点，扩大了输出的搜索范围，已包含了单机约束不等式条件，可将每台机组的输出限定在其上下限之间。

第五节 基于 RBF 神经网络的电网安全态势预测建模

一、电网安全态势指标

将电网安全态势指标 W 分为节点安全态势 W_n 和线路安全态势 W_l 两部分组成，节点安全态势反映了发电节点、变压器节点或负荷节点当前安全状态，线路安全态势则反映了母线电路当前的安全状态。安全态势指标所表征了电网当前的安全状态。

在评估节点安全态势 W_n 时，结合第三章可知，电压裕度和节点电压偏移都表现出与节点的脆弱性的关联，因此选取两个指标来评估节点安全态势：分别是电压裕度和节点电压偏移量。

综合这两个指标，可得节点安全态势 W_n 表达式：

$$W_n = \sum_{j=1}^2 R_{ij} \alpha_j$$

其中 R_{ij} 是样本 j 对应的节点安全态势指标的值， α_i 是用熵权法得到的指标的权重。

线路安全态势 W_l 用以下三个指标来计算：

第一：线路潮流分布指标。指关键电路的允许极限传输能力与关键电路有功功率流的差值除以统计线路总数。该指标反映了系统的稳定性。对于大型电网的安全情况，性能水平为正，即指标值越大，系统允许传输能力的极限距离越远。

系统越稳定，大电网就越安全。

线路潮流分布指标 F_c 定义为：

$$F_c = \frac{\sum_{j=1}^n |F_{j,\max} - F_j|}{n}$$

式中 $F_{i,\max}$ 为系统线路的极限传输容量； n 为系统线路的总数； F_i 为系统线路 j 的有功潮流。

第二：系统线路负载率。指系统中线路传输功率的和与线路允许的极限传输容量和的比值，该指标能够反映系统大停电事故发生的概率，对大电网安全态势的表现水平为反向，即该指标越大，系统发生大停电事故的概率就越大，进而可以说明该指标越大，大电网的运行状态越危险。

系统负载率指标 L_s 定义为：

$$L_s = \frac{\sum_{j=1}^n |F_j|}{\sum_{j=1}^n |F_{j,\max}|}$$

式中各变量的含义和线路潮流分布指标中的一样。

第三：系统线路过载度。当系统出现故障或时，超载线路数与剩余线路总数的比值。该指标反映了系统部件受到干扰或故障导致线路过载的程度。指标数目越高，系统偏离正常状态的线路越多，系统的过载程度越大，系统的状态越危险。

系统过载程度指标 L_g 定义为：

$$L_g = \frac{m}{n}$$

式中 m 为系统过载线路的条数，文中线路过载是指线路的负载率超过线路正常负载率的 1.2 倍。

综合以上指标，可得线路安全态势 W_l 表达式：

$$W_l = \sum_{j=1}^3 R_{ij} \alpha_j$$

同样， R_{ij} 是样本 i 对应的线路安全态势指标的值， α_i 是熵权法求得的对应指标的权重。

综合以上，电网安全态势综合指标 W 可以表示为：

$$W = W_n + W_l$$

然后按照下图的步骤对电网安全态势进行预测研究工作。

每一步的具体工作为：①选取电网安全态势因素，采集各项因素指标值，将节点安全态势和线路安全态势与节点脆弱性和线路脆弱性做对比分析，验证安全态势因素选取的合理性。②按照公式计算电网安全态势值。③将采集的各安全态势因素指标值作为输入训练 RBF、Elman 和 BP 神经网络，对比三种模型的预测效果后，选取 RBF 神经网络预测电网安全态势。

二、RBF 神经网络模型的构建

人工神经网络（ANN）是在现代神经科学理论上提出的一种信息处理系统。神经网络构建了神经元（也可称为神经节点）运算模型，模拟大脑神经系统处理、记忆信息的方式，每个神经元可以代表一种特定的输出函数，称为激励函数，神经元之间的连接可以有不同的加权值和方法结构，神经网络的输出和神经元的拓扑结构、激励函数和权重有关。人工神经网络有非线性、非局限性、非常定性和非凸性四个特征，表现出自适应、自组织和实时学习的特点，已经广泛应用于模式识别、智能机器人、预测估计和自动控制等领域。

RBF 神经网络是一种前向型神经网络，隐含层节点激活函数采用的是径向基函数（RBF）。在结构形式上，RBF 神经网络与 BP 神经网络类似，都是输入层、隐含层和输出层三层网络结构形式，但是 RBF 神经网络隐含层结构和激活函数更加简便的特点，使其具有收敛速度快，非线性逼近能力强等优点，更符合预测实时快速的要求。

径向基函数神经网络是一种结构简单、性能优良的前馈神经网络，RBF 网络能以任意精度逼近任何非线性函数，具备较强的全局收敛性，较好地克服了 BP 神经网络易陷入局部最优的问题；此外，该模型拓扑结构紧密，各层可实现分离学习，具有较快的收敛速度，能够高度逼近真实值，具有唯一性。

RBF 网络隐含层激活函数选用高斯基函数；与 BP 最大的不同在于，其输入层与输出层之间呈现非线性映射关系，但其隐藏层与输出层呈线性映射，并采用直接求和的方式计算输出，无需反复迭代求解最优参数。

RBF 神经网络的核心是隐含层的径向基激活函数，基于此函数的神经元模型的原理如下：

该运算过程可用如下表达式表示：

$$Y = \text{radbad}(\|W - X - b)$$

该表达式中， X 是 RBF 神经网络的输入向量； W 是输入向量中各值对应的权值； $\|W - X$ 为权值和输入向量的欧氏距离，作为激活函数的输入； b 为阈值，调整激活函数输入； radbad 表示激活函数（即径向基函数），一般使用的是高斯函数。

其中， $\|W - X$ 的具体求解公式为：

$$\|W - X = \sqrt{\sum_{i=1}^n (w_i - x_i)^2} = \sqrt{[(W - X)(W - X)^T]}$$

高斯公式的一般形式为：

$$\alpha(x) = e^{-x^2}$$

第六节 进化神经网络的电力信息网安全态势量化方法

随着智能电网时代的到来，国家电力网络已经逐步建立了一套上至国家电网数据中心、下至各省、市的计算机网络体系架构。与此同时，电力信息网络安全形势也变得愈加严峻，已然成为电力信息网络安全的严重隐患之一。各种网络威胁越来越严重，目的性越来越强，并呈现一定规模性。全面实现电力信息网络安全态势感知，能够辅助电力信息网络管理员了解网络安全态势状态，以便更好地维护网络安全^[34]。因此，针对电力通信网络的发展趋势及特点，研究切实有效的安全态势量化方法具有重要的现实意义。

国内对电力信息系统网络安全的研究局限于传统的互联网安全感知技术或基于平面体系的风险评估方法，安全态势量化指标体系缺乏与电力信息网应用业务的结合，导致量化结果无法全方位监控电力信息网络。

一、基于 PIN-NSSQ 的安全态势量化体系架构设计

电力信息网包括电网数据中心，骨干网，科研网、办公网、省市等网络多层网络结构，因此，安全态势状况必定是各个网络的安全态势状况按照一定的方式综合而来；同时，由于不同部门及子网络都部署了不同的防火墙、入侵检测系统、安全审计设备及安全等级制度，若不能从子网络中收集到网络安全数据信息，并对信息进行集中交互处理，则会出现网络数据信息相互孤立的情况，并导致安全

网络安全孤岛。将电力通信网络安全状况精准直观地量化,是网络安全态势感知中不可或缺的组成部分。

网络安全态势感知体系架构是面向电力专用通信网态势感知研究的基础,其设计是否合理直接影响网络态势感知整体的可行性。文中通过深入分析电力信息网的网络层级结构、数据汇集与分析,态势评估可视化 3 个层面,设计了面向电力信息网的安全态势量化体系架构。

二、电力信息网络安全态势量化方法

为具体反映网络安全态势状况,将各自网络中汇集的要素指标信息进行集中交互处理,结合 PIN-NSSQ 体系架构,根据基本层级思路,整合不同网络层次反映信息网的网络应用系统复杂、网络安全设备配置缺陷等属性特点 [1],分别从网络可靠性、威胁性、脆弱性 3 个维度构建电力信息网立体式安全态势感知要素指标体系,并进行要素指标数学化表征。

(一) 构建网络安全态势要素空间指标体系

通过构建网络安全态势要素空间指标体系,使得各要素指标与电力信息网应用业务在属性维度交叉下得以耦合互联,进而可以实现准确、系统、全面的电力信息网安全态势状况表示,主要指标如下:①网络脆弱性指标;在网络脆弱性要素指标信息获取时,漏洞的统计针对所有在线设备,同时增加了设备配置的完整性以及网络拓扑的冗余性。主要包含实际网络拓扑冗余性、漏洞数量和严重程度,网络对外开放的端口数量等二级指标。②网络可靠性指标:针对电力信息网中实际获取的数据信息情况,进行冗余性和稳定性综合分析。主要包含服务器支持的并发线程数,设备类型及版本,网络协议可靠性等二级指标。③网络威胁性指标;网络受到外部入侵时,将会对网络中的设备运行产生影响,利用威胁性要素属性全面展现网络受到威胁的严重程度。主要包含设备版本 Bug 和网络协议缺陷,告警数目及严重程度,受攻击下的网络带宽、设备 CPU、存储利用率等二级指标。

(二) 电力信息网络安全态势要素指标数学化表征

为实现电力信息网安全态势量化,基于构建的立体式安全态势感知要素指标体系,围绕电力信息网脆弱性指数、可靠性指数、威胁性指数进行要素指标数学化表征,进而实现要素指标值计算和部分参数结合实际网络性能加权优化,为电力网态势量化奠定基础。

1. 电力信息网脆弱性指数

电力信息网脆弱性指数 TR_{hk} 用于表征某一系统上的不同服务在某个时间遭受网络攻击时系统所反映的网络安全脆弱性态势状况。某时刻 t 系统 H_k 的脆弱性指数值为：

$$TR_{kk}(t) = \sum_{j=1}^m (v_j * Rs_j(t))$$

其中， m 代表该主机对外开通的服务数； $Rs_j(t)(j=1, 2, 3, \dots, m)$ 表示 t 时刻系统 H_k 的对应的服务态势值； v_j 代表 S_j 的权重，反映了该服务承载用户的多少和使用频次，再通过标准化处理服务重要程度 SI_j 得 $v_j = SI_j / \sum_{i=1}^m SI_i$ 。

2. 电力信息网可靠性指数

电力信息网可靠性指数 Rs_j 用于表征该项服务受到一定数量的攻击时，在一定时间内该服务所反映的网络安全可靠性态势状况。在规定时间段内，定义时刻 t 为该服务 S_j 遭受到攻击时的指数 Rs_j 为：

$$Rs_j(t) = \sum_{i=1}^n (C_{ji} * 100^{D_i-1})$$

其中， D_i 代表 t 时刻发生攻击的严峻性， C_{ji} 代表该时刻遭受攻击的频次。用 n 代表 $t + \Delta t$ 时间段内发生攻击的类型数，而 Δt 是由网络管理人员依据一段时间内的攻击告警日志数据确定的攻击时间窗口， Rs_j 的可靠性指数越大，表明服务 S_j 遭受到的攻击情况越严重，所需的可靠性防护越多且越紧迫，管理员需迅速找出相应的解决方案。

3. 电力信息网威胁性指数

电力信息网威胁性指数 R_L 用于表征网络内中的设备或系统服务受到攻击时，信息网所反映出的威胁性态势状况，信息网的安全威胁性值 R_{L_0} 在 t 时刻的计算式为：

$$R_{L_0}(t) = \sum_{k=1}^n (w_k * R_{Hk}(t))$$

其中， u 为网络内活动的网络设备、服务器、主机数， $R_{Hk}(t)$ 为改进后的网络脆弱性指数值，由 $R_{Hk}(t) = \eta K * TR_{Hk}(t)$ 计算获得， η 为根据 t 时刻的性能参数确定的修正系数； w_k 表示网络内活动设备重要性权重，表示为 $w_k = HI_k / \sum_{i=1}^u HI_i$ ； R_L 越大，代表安全威胁越大。

第七章 智能电力网络系统

第一节 智能电网概述

能源作为人类生存和社会发展的基础性资源，是经济社会发展的基本物质保障，它既是经济资源，也是战略资源和政治资源。进入二十一世纪以来，传统能源发展方式受到能源枯竭和温室气体排放的双重挑战，世界能源发展格局因此发生了重大而深刻的变化，新一轮能源革命的序幕已经拉开。随着经济的发展、社会的进步、科技和信息化水平的提高以及全球资源与环境问题的日益突出，能源的合理开发利用、电网的协调发展面临着新的课题与新的挑战。依靠现代信息、通信和控制技术，提高电网智能化水平，以适应经济未来可持续发展的要求，是世界各国电力工业积极应对未来挑战的共同选择。

智能电网的发展对我国经济社会发展全局、对建设和谐社会具有重要的战略意义。我国经济社会发展正面临能源资源短缺、气候变化、环境污染等严峻挑战，迫切需要改变经济增长方式，进行经济结构转型，通过产业结构调整和能源结构的调整来实现我国经济的可持续发展。通过智能电网的建设，可以加快清洁能源的开发和利用，提高能源利用效率，应对全球气候变化，推动绿色低碳经济和低碳经济发展。同时，给予智能电网发展带动和辐射作用，促进智能电网发展，是我国抓住新一轮能源和信息技术创新的历史机遇，是培育战略新兴产业的重要举措。智能电网也给电力工业发展方式的转变提供了很好的契机。

智能电网是电力工业的又一次革命，是应对全球、全人类能源、环境、气候、经济、可持续发展的综合解决方案，代表着未来电网研究和发展的方向。配电网是电能应用、面向用户的窗口，是智能电网的重要组成部分，也是电网智能化的重要突破口。

一、智能电网建设和发展的时代背景

随着社会、经济的发展和技术的进步，人类对电力能源的信赖及依赖程度不

断提高。二十一世纪以来，电力工业的发展迫切需要解决以下问题：

①环境：全球气候变化、自然灾害频发；环境污染严重、城市沙漠化面临挑战；“高碳”经济、温室效应、冰川融化等环境状况急需改善。②经济：当前，金融危机蔓延，为拉动内需，各国政府纷纷出台相关的智能电网政策。③能源：传统能源的日益短缺、全球能源需求不断增加，新能源和可再生能源成为能源安全和可持续发展的出路。④技术：为确保电力可靠供应，需要智能电网帮助电力行业推动技术创新、实现技术转型。⑤电网：电网资产逐渐老化，影响电能安全输送。⑥市场：国家和政府的部分政策影响能源结构与电力系统的发展。

智能电网就是在这样的背景下诞生的。欧盟试图通过电网基础设施改造、新技术应用和业务模式创新，大力开展智能电网工作，来应对面临的环境污染、经济萎缩、能源短缺、技术转型、电网老化、电力市场等带来的压力和挑战。其驱动因素可以归结为政策方面、市场方面、电网安全和电能质量方面、环境方面、技术方面。

建设坚强智能电网不仅仅是对已有电网进行升级换代，它目前已经成为电网和电力工业发展的必然趋势，是人类应对来自环境、能源、经济、气候、社会发展等方面挑战的必然选择。

二、智能电网的特点

①自愈。具有实时、在线连续的安全评估和分析能力，强大的预警控制系统和预防控制能力，自动故障诊断、故障隔离和系统自我恢复的能力，减少停电时间和经济损失。②可靠。强化可靠性、稳定性指标，增加可靠性和稳定性校验的指标；具有抵御自然、人为等外部破坏的能力。③预测。将安全防线前移到规划层面，建立预想事故集，并进行情景模拟和仿真，为规划工作提供依据。④安全。包括电网物理架构安全和信息网络安全，重视基于数字化、信息化水平的防火墙建设，根据电网的发展建设不断地升级。⑤兼容。支持可再生和分布式能源的正确、合理的接入，适应分布式发电和微电网的接入，能使需求侧管理的功能更加完善和提高，实现与用户的交互和高效互动。能够开放性地兼容各种一次和二次设备，具有可扩展性。⑥互动。重视电力用户需求，与用户进行沟通和双向信息交流，增加用户的选择性，满足用户的用电需求，为用户提供优化用电建议，对用户的供电进行远程监视和控制。⑦协调。通过信息平台使各种数据和信息公开

透明,便于系统中各装置、设备、控制中心、用户利用和协调,实现电网和电力市场的无缝对接。⑧高效。支持电力市场和电力交易的有效开展,实现资源的合理配置,降低电损耗,提高能源利用效率、降低运营成本的能力;考虑大量分布式和可再生能源接入的影响,开展节能调度,在大范围内进行资源的优化配置。⑨优质。开展需求侧管理,运行分时电价等经济手段进行峰谷电价平衡,为用户提供清洁、稳定的电能。⑩集成。将各级电力网络系统及相关数据库进行集成,将电力系统的发电、输电、变电、配电、用电、调度等各个环节进行集成,提高系统智能化水平、可靠性水平和整体各种性能。⑪标准。智能电网的建设和智能化设备要符合统一的国际和国家规范、标准,提高系统的可互换性和可操作性。

针对智能电网的认识,下面给出几个具有代表性的描述:

第一,智能电网是当今电力系统发展的重要抓手和机遇,但是国内对智能电网的认识依然停留在“仁者见仁,智者见智”的阶段,人力、物力投入不少,尚处示范、探索阶段,只有具有明显技术、经济比较优势的项目才能真正可持续。

“智能电网”不是名词游戏,也不是概念炒作。智能电网是在3技术高度发展的今天电力系统技术发展的必然趋势。我国电力发展的基本矛盾并不因“智能电网”的提出而改变,电力系统主网的问题依然是主要问题。智能电网只是新的手段,它的发展应该紧密围绕解决电力系统发展内在的根本矛盾,效益是最客观的考核标准。智能电网可以引发系列新概念、新思路、新平台、新前景,为电力系统技术带来新的大变革。基于新的技术可能性,有望解决一大批长期制约电力系统发展的难题,使电力系统的安全、高效、绿色发展到前所未有的高度。

国内电网电能质量问题已经十分突出,在继续治理谐波、不对称、闪变等电能质量问题的同时,对暂态电压跌落问题要引起重视,要抓紧治理。另外,安装动态无功补偿和电能质量控制装置必须考虑节能,不能因为改善电能质量而引入能耗大户。改进控制器可以实现电能质量综合治理。另外,要克服体制障碍,开展合作治理。

第二,智能电网是以智能化电力设备为基础的。智能化电力设备就是将数字信息处理功能融合到传统的电力设备之中,以数字化信息的利用为基础,提高电力设备的性能指标以及自身的可靠性和安全性,同时也为智能电网提供更加完全和丰富的数字化信息,进而提高系统的整体性能。

构建智能电网的智能化电力设备是强、弱电技术的深度融合,具有传统电力

设备强电控制的功能并具有参量获取（传感）和处理数字化、自我监测与诊断能力、智能化控制与自适应控制能力、信息交互通信能力。

构建智能电网是以智能化电力设备为基础的，并由智能化电力设备构成电力网络和信息网络的节点。它既控制能量流，同时也控制信息流。它也是智能电网中信息互联网络的信息终端，是智能电网强、弱电相互融合的结合部。而发展智能化电力设备的关键技术问题包括传感技术与传感器件、网络通信技术、智能控制技术、智能诊断技术、专用芯片的研究与开发、电磁兼容问题。

第三，用户端能源管理主要关注的范畴包括：分布式可再生能源的安全、高效的接入和利用；灵活价格机制下的设备使用策略；用户端的多种能源的综合管理与系统节能；电动汽车安全充电；用户端能源利用的智能化、个性化、便捷化；能源供方与需方的双向互动。

欧美等国家主要从基于水、电、热、气等多种形式能源的综合利用的角度提出能源管理，非常重视相关能源管理技术的研究，重点关注多种能源的经济、综合、安全利用以及用户端多能源智能、互动管理等技术。我国能源管理的现状则是电力、燃气、水务、热力各子网独立运行与管理，还未真正建立用户端能源管理系统。

我国能源管理的发展目标是建设智能能源网络，包括智能电网、智能油气网、智能水务网、智能热力网等子网络，用户端是智能能源网的重要组成部分。用户端对能源管理的总体要求是绿色低碳、经济节能、安全高效和互动友好，其总体目标是实现能源供给安全可靠、降低化石能源消耗、用户费用支出最小化、能源利用最大化。

可以采取多种方式实现用户端能源管理，如能源网用户端能源管理、微网能源管理和智能电网用户端电能管理。目前，在能源管理技术方面的研究进展主要体现在共性技术体系研究、标准规范体系研究、智能应用体系研究和智能化产品研发四大方面。

第二节 统一坚强智能电网

我国的各区域输电网之间的联系较弱，配电网经过几年的城乡改造后，自动化水平大有改善，电网基础设施总体上相对较好，国网公司、南网公司以及各高校、企业和科研院所等都进行了大量智能电网相关的研究和实践，这为我国统一坚强智能电网的建设奠定了良好的基础。电科院在广域测量技术、Facts 技术、数字化变电站、数字化电网、调度自动化、分布式发电、新能源、储能、通信等方面为建设统一坚强智能电网作出了积极的贡献，提供了技术支撑。

国家电网公司组织开展的大电网安全关键技术研究、数字化电网关键技术研究、电力电子关键技术研究、特高压同步电网安全稳定运行关键技术研究等相关研究实践、电力通信建设、用户用电信息采集系统等，都为建设我国智能电网奠定了坚实的基础。

我国在电网自动化控制领域走在世界的前列，电力通信基本实现主干通道光纤化、数据传输网络化，电网的信息化水平已初步达到建设智能电网的要求。同时，我国用户侧管理、负荷管理控制系统等一系列的应用已取得一定的成果，在江苏、上海等部分地区具有相当成熟的应用系统。无论从技术层面还是从管理层面都积累了相当多的经验，但目前还未达到智能电网对用户大量参与电网互动的要求和水准。

一、统一坚强智能电网的提出和发展

我国统一坚强智能电网建设的目标是以特高压电网为骨架，以各级电网协调发展的坚强电网为基础，利用先进的通信、信息和控制技术，构建以信息化、自动化、数字化、互动化为特征的国际领先、自主创新、中国特色的坚强智能电网。

我国的统一坚强智能电网以充分满足用户对电力的需求和优化资源配置，确保电力供应的安全性、可靠性和经济性，保证电能质量，适应电力市场化发展等为目的，实现对用户提供可靠、经济、清洁、互动的电力供应和增值服务。它是将现代先进的传感测量技术、通信技术、信息技术、计算机技术和控制技术与物理电网高度集成而形成的新型电网。

电网基础体系是统一坚强智能电网的物质载体，是实现“坚强”的重要基础；技术支撑体系是先进的通信、信息、控制等应用技术，是实现“智能”的技术保

障；智能应用体系是保障电网安全、经济、高效运行，提供用户增值服务的具体体现；标准规范体系是指技术、管理方面的标准和规范，以及实验、认证、评估体系，是建设统一坚强智能电网的制度保障和依据。

二、统一坚强智能电网的功能和含义

我国统一坚强智能电网的功能包括：提供更加安全、高效、经济、清洁的电力供应，切实履行电力企业的社会责任；以效率和效益为中心，优化资源配置，构建柔性构架，实现最优经济运营；发电方与电网方合作共赢，形成电力产业可持续发展和良性循环；提高可靠性和服务质量，为用户提供高效增值服务；坚持自主科技创新，推动电力行业及其他产业技术提升。

根据经济社会发展对未来电网的发展要求，我国的统一坚强智能电网应该具备坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的基本内涵。

（一）坚强可靠

坚强可靠的实体电网架构是我国统一坚强智能电网发展的物理基础，是实施国家宏观能源战略、实现大范围资源优化配置、保证国家能源安全的基石。同时，也是抵御多重故障、外力破坏、信息攻击、防灾抗灾的基础。

（二）经济高效

经济高效是对我国统一坚强智能电网发展的基本要求。它是指：①通过信息整合及共享，支撑精益化管理，提高管理效益；②实现对系统运行的控制优化，提高运行和输送效率，降低运营成本；③实现全网资源优化和全寿命优化，提高资产及投资利用率；④推动发电侧均衡发展，提升能源投资效益；⑤引导电力用户科学用电、节约用电。

（三）清洁环保

清洁环保是经济社会对我国统一坚强智能电网的基本诉求。它是指：①坚强智能电网在业务重组、信息重构、技术提升、架构优化的基础上，能够极大地提高资源综合使用效率，直接或间接地服务于清洁环保；②积极鼓励清洁能源的发展，促进传统能源的节能减排，减少化石能源的消耗；③通过推动友好互动的用户服务、推广低耗节能设备、电动汽车和智能家电等智能设备的大规模应用，改变终端用户的用能方式，提高清洁能源在终端能源消费中的比重，降低能耗并节能减排；④提高社会综合环保能力，建立与自然和谐共融的社会公共基础产业。

（四）透明开放

透明开放是我国统一坚强智能电网的发展理念。它是指：①能够为电力市场化建设提供透明、开放的实施平台，实现各类电源和用户的无歧视接入；②以公开、透明的市场规则对电源与用户进行管理、提供服务，并满足源端及用户的多元化、差异化需求，为其提供高品质的服务；③以开放的形态，充分利用电网资源向社会提供附加增值服务，充分利用社会公共资源提高综合资源利用率，提升电力行业和其他产业的核心竞争力，适应技术进步和需求变化。

（四）友好互动

友好互动是我国统一坚强智能电网的主要运行特征。它是指：①坚强智能电网能够依据实时运行状态和多维约束条件，灵活调整电网运行方式，友好兼容各类电源和用户接入与退出；②在保证电网安全的条件下，最大限度地满足电源侧和用户侧的多元需求；③通过双向互动，激励电源侧、用户侧主动参与电网安全运行，实现发电及用电资源优化配置。

总体来说，我国的统一坚强智能电网是有别于国外的、概念和功能更加完整、框架和体系更加科学的智能、新型现代电网，是具有中国特色、自主创新、国际领先特征的智能电网。

三、统一坚强智能电网的技术研发重点

我国的统一坚强智能电网的技术研发重点包括建立坚强的实体电网、建立电网支撑站点、实现电网智能装备、实现智能发电及并网、实现智能运行与控制、实现智能用电与交易。

（一）建立坚强的实体电网

①坚强智能电网规划方法研究及支撑系统研发。围绕 2030 年电网规划和特高压电网滚动规划，加强规划数据整合，建立电网规划所需的模型、基本信息和设计数据平台。研究适合于大规模可再生能源接入的配电网规划技术原则、评价方法，开发相应的数据系统和软件系统，满足未来统一坚强智能电网对配电可靠、灵活、经济和高效的要求。②坚强智能电网设计方法研究及设计工具开发。结合典型地区的风灾、冰灾等严重自然灾害的概率分布，通过技术经济综合评价，提出适合坚强智能电网要求的大电网设计和技术标准，提出电网规划的可靠性分析方法 and 原则。开发计算分析平台，为特高压及各级电网的科学设计提供技术支撑。

③间歇性可再生能源消纳能力分析评估。通过对间歇性能源并网调峰调频特性和并网无功电压特性的分析,提出适合我国特点的大规模间隙性能源消纳能力的评估源和评估方法,为我国大规模可再生能源的开发提供参考。

(二) 建立电网支撑站点

①坚强智能电网支撑站点广域同步实时全景信息采集技术。②坚强智能电网实时综合监测技术。③自适应、自优化继电保护技术。④自协调区域继电保护技术。⑤对能量采集及电力市场交易平台的支撑技术。⑥坚强智能电网支撑站点自感知、自诊断、自决策、自管理技术。⑦坚强智能电网支撑站点柔性集群技术。⑧区域输配电网自动优化、调整、重组支撑技术。⑨区域电网自适应平衡支撑技术。⑩源端智能化匹配技术。⑪ 坚强智能电网支撑站点广域关联、配合、交互技术。⑫ 坚强智能电网支撑站点运维实验技术。⑬ 坚强智能电网支撑站点全景规划设计及仿真培训技术。

(三) 实现电网智能装备

①灵活交流输电关键技术。包括灵活交流输电设备关键技术、完善装备制造技术、灵活交流输电设备的调节控制策略等。②直流输电控制技术。包括直流输电系统对电力系统安全稳定性的影响、交直流并联输电系统功率调节控制策略、直流输电系统紧急功率控制技术、交直流系统协调控制技术等。③智能配电、用电设备研制与应用。包括智能测量、智能开关、高级储能装置等智能配电和用电设备的研制,优化智能设备的使用,推广采用智能配电、用电设备以满足用户多样化的电力需求。④新型智能装备研制。包括研制性能更好、使用更加灵活的新型智能装备,推动相关产业发展,引导相关技术的研究方向,如建立通信支撑平台、特种光缆及其监测技术、智能光传输技术、数据通信技术、电力通信接入技术、多媒体通信技术、通信管理信息化技术、广域时间同步技术、应急通信及管理应用技术、安全防护技术。

(四) 实现智能发电及并网

①发电侧技术。包括提高机组可靠性、可用性和可控性技术以及火电机组节能减排技术。②机网协调技术。包括机网信息双向交换技术,发电调度策略优化技术,可再生能源及其他分布式能源系统有序并网,智能自适应控制技术,提高可再生能源消纳能力技术,提高可再生能源出力预测准确性技术。

（五）实现智能运行与控制

1. 大电网安全稳定控制关键技术

包括坚强智能电网安全稳定控制理论、电力系统跨大区安全稳定模式方法和防御体系、大电网广域监测分析保护技术、电网事故的智能故障诊断及扰动在线识别技术、电力系统灾害预防和紧急运行关键技术、大型互联电网自愈恢复理论与分析方法；交直流混合电网协调运行策略、多级控制中心之间的协调配合策略、多直流在线运行分析与集中协调策略；人工智能、数据挖掘等技术在电网状态评估、安全分析、故障诊断、故障恢复、经济运行等方面的应用。在海量历史数据的基础上选择合适的挖掘算法进行负荷特性和区域频率特性等方面的挖掘、输电网降损的数据挖掘技术、优化网络结构和运行方式。电网建立在静态安全预警、保护智能预警、暂态稳定安全预警、电压稳定安全预警等分层面上的综合预警技术，研究构建全纬度智能化高级电网调度系统平台、在线安全稳定动态评估及智能分析决策支持系统、新一代大型电网电压无功智能决策系统。

2. 大电网经济高效运行关键技术

包括满足电网安全约束的前提下，基于电力市场竞价规则的、水火电机组发电计划优化和水火电联合优化的实时经济调度技术，满足电网安全和可靠供电的节能发电调度技术。

3. 智能配电网运行控制关键技术

包括智能化配电网风险评估及供电安全预警模型、智能化配电网降低风险策略的自动配置与计算等供电安全预警技术、配电网快速仿真和模拟、故障快速定位及处理等配电网自愈自优化技术；在配电网分散无功动态补偿基础上，通过通信进行全局无功优化补偿的技术，研究智能配电网节能降耗技术、动态电压恢复技术、无功补偿技术、固态转换开关技术、有源滤波技术等电能质量控制技术，研究集地理信息集成、分析与可视化功能于一体，能够将坚强智能电网在虚拟地球系统中进行动态多维度虚拟化的综合性地理信息平台技术，实现坚强智能电网在地理信息范畴的智能化。

（六）实现智能用电与交易

1. 智能用户用电信息采集与交互系统

包括智能双向表计及智能用户交互终端的功能和实现技术，研究智能用户用电信息采集与交互系统的功能和实现技术、基于供求信息双向互动的用户需求侧

分析技术、用户门户技术。

2. 用户用电智能调度决策支持系统

包括系统的功能、电力用户用电节能经济的智能算法及关键技术等，通过系统给用户提供节能建议，并可根据用户需要实现对用户的自动调整。

3. 新型双向互动营销模式

包括增强客户体验与服务的新型双向互动营销机制、更具有竞争力的市场营销策略，基于用户主动性的激励性环保节能互动策略、机制和支撑技术，基于双向互动的双赢增值服务业务策略、机制和支撑技术。

4. 分布式能源接入及双向供电技术

用户侧分布式能源的“即插即用”和用户向电网反向供能技术。

5. 电力市场运营技术支持系统

开放有序的坚强智能电网电力市场体系方案及措施，为清洁能源、分布式发电参与市场交易进行需求侧竞价提供技术支持手段；研究电力市场指标体系、效益与效率及市场力分析。研究涉及电网安全与经济约束的电力系统优化算法及阻塞管理，研究大规模电力系统竞价交易优化算法，研究促进资源优化的信息发布机制，研究适合我国国情的交易和结算机制。

四、统一坚强智能电网发展布局

我国统一坚强智能电网的发展布局包括智能电网规划、智能电网运行、智能电网保护与控制、智能电网信息技术、智能终端与智能用户、智能输配电技术、智能电网资产管理、智能电网评估体系、智能电网中的储能技术、智能电网中的电力市场等。

（一）智能电网规划

1. 适应特高压直流大功率注入的受端电网规划

①对智能电网的安全性、经济性和可靠性进行统一评价的规划理论、规划模型和设计数据平台。②大规模直流注入的落点位置、注入功率大小等因素对受端电网安全的影响。③为特高压、超高压电网规划和各级电网协调发展提供指导性技术标准和评价方法的大电网规划技术原则。

2. 考虑可再生能源的电力系统规划

①有助于可再生能源接入的配电系统结构设计方法。②含可再生能源配电系

统的综合性能指标评价体系。③新型配电系统优化规划理论和方法。④具有空间负荷预测、分布式电源容量与位置优化、配电网优化、分布式能源结构优化等功能,适用于微网发展的电网规划决策支持系统。⑤分布式电源及分布式储能装置以及微网的优化配置。⑥适合于大规模可再生能源接入的配电网规划原则、评价方法。⑦风电等间歇性可再生能源消纳能力分析评估。

3. 考虑不确定因素的电网灵活规划

①考虑典型地区的风灾、冰灾等严重自然灾害概率分布数据的坚强智能电网设计方法和技术标准。②规划成本最小化条件下未来电力需求增长、元件故障等不确定因素对电网运行造成的负面影响分析。③提高转移能力的配电网架构。④考虑资产全生命周期的电网运行与规划。

(二) 智能电网运行

1. 智能电网调度

①智能变电站的高级应用基础理论和方法,互联电网分层分区实时建模理论和方法。②智能大电网的调度机制,智能化决策技术,调度运行模拟系统,考虑安全裕度的输电网与配电网协同调度,考虑孤岛电气特性的发电优化调度,提高配电网供储能力的统一调度。③大电网运行知识的智能发现,配电网智能能量管理系统,智能电网综合负荷整体等值模型及其在线辨识理论与方法。④考虑大容量储能的电网安全裕度的计算,在线电压稳定裕度监测方法。⑤可实现提供系统连续优化的最优化技术,智能电网超实时仿真技术,大风电基地接入电网后的在线调度的时空协调机理与优化模型。⑥基于概率风险,整合政策、市场、气象、环境、灾害因素的动态、暂态、静态安全评估技术。

2. 配电网自动化技术

①基于测量不确定理论的配电网状态估计理论和方法。②配电网母线负荷预测。③含分布式电源的配电网潮流模型和算法。④不同事件尺度下的智能配电网设备模型。⑤兼容不同分布式电源的智能配电网数学模型。⑥适应性好、收敛快的智能配电网动态仿真算法。⑦智能配电网的快速网络重构方法。⑧含分布式电源和微网的馈线自动化。

3. 面向智能电网的状态估计技术

①分层协调的实时状态估计与建模技术。②测点未知情况下状态估计结果合理性的评价标准。③可使状态估计结果合理性达到最高的状态估计理论和方法。

④计及 PMU 量测数据的混合状态估计方法和全 PMU 的状态估计方法。⑤以测点合格率最大为目标的状态估计求解算法。⑥供安全监视、评估与优化使用的实时配电网状态估计技术。⑦智能电网关键节点在线识别及其群类划分。⑧智能电网在线整体建模和在线降阶等值模型参数在线快速辨识的系统理论和方法体系。⑨智能电网模型性能的在线评价与选择的系统方法。⑩智能电网节点群类广义综合负荷模型和降阶等值模型。⑪智能电网模型适应性评价的定量指标,在线整体建模平台。

4. 智能预警技术

①基于风险识别、评估和管理新理论的数据挖掘、事故预想、安全评估、预警指示的智能预警理论与方法。②基于数据挖掘技术电网隐患和风险辨识,智能化的事故预想集生成方法。③全面评价气象灾害、可再生能源发电的不确定性、负荷预测的偏差、系统故障等对电网安全稳定的影响安全评估方法。④智能电网新型预警指标。

5. 新能源接入问题

①运用随机数学的理论模拟新能源的随机特性。②新能源发电接入对电能质量的影响。③新能源接入对系统的发电计划、调频、备用、安全校核一体优化以及考虑新能源随机波动和负荷需求弹性的模型和相应的计算方法。④新能源接入对电网电压、稳定性的影响。⑤考虑新能源的电网稳定的计算模型。⑥考虑风电、太阳能并网发电模型的电网暂态模拟仿真平台。⑦从系统安全方面全面测试和评估新的分布式发电技术的软件平台。

6. 智能电网决策支持系统

①包括各种决策方法(个体决策方法和群决策方法)。②影响决策结果稳定性的参数灵敏度分析。③决策结果的可靠性分析。④决策的一致性分析。

(三) 智能电网保护与控制

1. 智能电网保护技术

①广域继电保护。②自适应保护。③基于本地信息的系统保护。④继电保护的智能再整定技术。⑤故障定位。⑥间歇式能源接入的并网控制和保护系统。

2. 智能电网控制技术

①基于 WAMS 的电网稳定紧急控制,基于复杂随机电力网络的能量系统延迟智能控制,电网实时动态监控系统新架构。②极端条件下地区电网的特性和控

制方法,考虑分散性参数的地区电网状态特征识别与控制方法。③大规模间歇电源接入系统有功和频率协同控制理论,大型电网电压无功智能控制系统,微网内的自动切断负荷和恢复方案,基于智能化方法的分层控制与协调的理论与方法。

④实现电力系统运行在线快速协调控制的智能电网的协调控制理论,发电机励磁调节器、发电机调速器、FACTS 装置、直流系统等传统元件分散协调控制,分布式电源如太阳能光伏发电、风电、先进的储能系统、混合动力汽车、智能电能表、智能家电新兴元件分散协调控制。⑤替代传统的发电机旋转备用的负荷控制技术,替代低频减载和低压减载功能的控制技术,解决新能源的并网问题的负荷控制技术。

3. 智能电网自愈技术

① SCADA、PMU、TGIS、DGIS、智能电能表的信息整合在线监测技术。②基于预想事故、预想专家系统的快速分析诊断技术。③网络最优重构,电压与无功控制策略调整,隔离与恢复供电技术。④电网故障在线智能诊断的电网故障快速辨识理论和算法。⑤不同时间尺度下的智能配电网自愈技术。⑥快速自愈对负荷影响的灵敏度分析,快速自愈条件下系统恢复的机理、系统稳定性分析、系统电能质量分析,故障预测、快速故障定位算法、快速故障隔离和系统恢复算法。⑦故障中断停电损失分析、故障限流技术、故障快速遮断技术、短时电力支撑技术、故障和缺陷快速实时检测技术、快速通信体系、故障自愈的评价体系。

4. 特高压大规模电网的运行和控制

①超高压投运后多控制中心间的协调控制模型。②考虑空间耦合的运行风险评估与预防控制。③基于 AGC 的广域潮流控制。④考虑特高压联网后的多级协调自动电压控制。⑤多时间尺度的高精度快速仿真技术。

5. 智能导线的相关基础理论和方法

①智能输电线路状态监测原理与技术。②智能输电线路状态评估与智能诊断理论和方法。③智能输电线路风险控制与安全预警理论和方法。④提高输电线路输送容量基础理论与技术。⑤输电线路故障检测技术。

(四) 智能电网信息技术

1. 分布式、异构的多控制中心协调计算和决策的信息支持平台技术

①多控制中心协调计算和决策的信息模型、支持平台的软件构架、支持平台的通信机制、支持平台的标准化。②基于 IEC 61968 和 SOA 架构的电网信息集

成服务。③基于网格的电力系统海量计算引擎服务。④考虑电网、用户、能源服务商等多主体的高级计量体系 AMI 架构下的通信。

2. 智能电网可视化技术

①基于背景和焦点技术的知识可视化技术。②电力系统运行状态可视化技术。③从单纯状态可视化过渡到机器智能与人工智能相结合的监控可视化技术。④信息自动分类的电网信息可视化展现技术。⑤智能电网在虚拟地球系统中进行动态多维虚拟化的综合性地理信息平台。

（五）智能终端与智能用户

1. 订制电力技术

①配电系统静止无功补偿器技术（DSTATCOM）。②有源电力滤波器（APF）技术。③动态电压恢复器（DVR）技术。④固态切换开关技术（SSTS）。

2. 电能质量

①基于电力电子技术的动态电压补偿、有源滤波技术等电能质量控制技术。②分布式发电孤立运行时的电能质量问题。③间歇式电网并网后对系统电能质量的影响及对策。④系统发生极端情况后紧急输电网络中的供电质量问题。⑤配电系统和终端用户电气系统的智能化改进和电能质量的提高措施。

3. 自动抄表和自动测量技术

①基于 AMI 架构下的配电网与用户的电能双向互动及其交易。②系统、终端和电能表的统一功能规范和标准数据模型。③可满足需求侧管理要求的数据支撑平台。④用电信息实时查询和用电实时管理平台。

（六）智能输配电技术

1. 特高压交流和直流输电技术

①特高压输变电电压标准。②电磁环境。③过电压及绝缘配合。④施工技术。⑤特高压实验研究体系。⑥特高压直流平波电抗器、直流换流阀和高压换流变压器等关键技术。⑦电压源换向直流输电技术基础理论和相关关键技术。

2. 灵活交流输电技术（FACTS）

①智能电网的固定串补（FSC）、可控串补。②静止无功补偿（SVC）、可控并联电抗。③故障电流限制技术（FCI）。④统一潮流控制技术（UPFC）。

3. 数字化变电站与数字化电网技术

①基于 IEC 61850 的数字化变电站及相关应用技术。②数字式互感器。

- ③智能高压电器。④基于 IEC 61850 规范的标准化信息模型和网络化的信息处理。
⑤广域全景分布式一体化电网调度技术支持系统。

4. 输配电设备的状态检修技术

- ①状态评估方法、设备可靠性预测技术。②设备故障模式及风险评估模型（FMECA）。③设备寿命周期成本管理，设备可靠性数值预报和报警系统。
④输变电设备自诊断与自愈技术。⑤电介质材料老化检测和故障机理。⑥红、紫外线成像技术。⑦传感器、微电子、信号处理技术以及神经网络、专家系统、模糊集理论等技术。⑧状态检修方面的综合应用。

（七）智能输电网的创新管理

1. 面向智能电网的高级管理

- ①智能电网环境下的标准化规划技术与体系。②状态检修（CBM）和可靠性检修（RCB）。③以全寿命周期（LCC）为核心的资产管理建模、分析与评价体系。

2. 业务优化与市场运营

- ①业务流程的整合与优化。②电力衍生产品与增值服务的开发。③新环境下市场的设计与运营问题，以及以全寿命周期（LCC）为核心的资产管理。

3. 风险评估与管理体系

- ①符合智能电网实际的标准化资产与运行风险评估与管理体系。②资产经营风险规避体系。③电网安全与可靠供电的风险应对体系。④电力市场的风险防范体系以及突发事件的应急管理体系。

（八）智能电网评估体系

1. 智能电网评估模型和体系

建立从策略与监管、组织结构、技术、社会与环境、电网运行、人员及资产管理、产业链的整合、用户体验和管理八个方面来衡量我国统一坚强智能电网的发展，适合我国国情的智能电网成熟度模型。

2. 大容量间歇性电源接入电网的评价关键技术

- ①评价标准和方法。②手段、结构的适应性。③接入规模。④基于新技术的注入成本和减少网络扩建的成本之间的平衡的成本效益分析。⑤可再生能源发电的额外成本与增加系统稳定性与安全性的经济效益。⑥较少和暂缓的网络扩建投入成本之间的成本效益分析。⑦最大化配电网可靠性的分布式电源的最优选址。

⑧降低网络损耗，减少相关的温室气体排放的分布式电源的最优配置。⑨健全清晰的分布式发电评估模型。⑩智能电网的社会影响问题。

五、统一坚强智能电网各个环节的实现

（一）智能发电

以国家能源发展为导向，在系统中接入较大比重的诸如太阳能、风能、大容量储能装置等分布式和可再生能源，重点解决分布式和可再生能源的并网规划、预测、监测、分析、运行、控制等问题，通过积极采用先进、高效的多元发电技术，使得系统运行的灵活性和发电效率大大提高，实现电源发展方式集约化、结构布局科学化、并网接入标准化、运行控制智能化；实现机网信息的双向交换，提高电网对发电侧的控制水平，提高发电装备综合使用和能源利用效率，促进节能降耗；强化电池支撑能力，优化机组运行方式，提升机网协调水平，实现可再生能源的有序接入，保障电力系统安全稳定运行，减少对环境和气候的影响，实现能源的可持续发展。

（二）智能输电

通过特高压交流 1000kV、特高压直流 $\pm 800\text{kV}$ 与各级电网相协调，构建坚强的物理网架基础；利用先进的 FACTS 技术、EMS 可视化技术、输电 SCADA/WAMS/GIS 技术输电快速仿真与模拟技术、变电站自动化技术、高级保护与控制技术，使得输电网的输送能力大大提高，并能有效抑制区域间电网的功率振荡和次同步谐振，增强输电系统的稳态和动态运行性能，且实现输电线路状态检修和全寿命周期管理。

制定智能变电站及设备标准和规范，建设智能电网变电站或对已有枢纽及中心变电站改造智能化变电站；设备信息和运行维护策略与电力调度实现全面共享互动，实现基于状态的全寿命周期综合优化管理、全网运行数据的统一采集、实时信息共享以及电网实时控制和智能调节，支撑各级电网的安全稳定运行和各类高级应用。

（三）智能配电

重点解决我国配电网网架薄弱、配电自动化普及率和实用化低、配电网技术标准和规范不完善、配电网基础数据管理缺乏和分布式能源接入的问题，采用更加先进的高级配电自动化技术、高级保护与控制技术、配电快速仿真与模拟技术、

微网技术、配电 SCADA 和 GIS 技术、电力电子技术和控制终端技术，构建高效、灵活、合理的配电网架构，实现对配电网运行状态、资产设备状态和供电可靠状况的实时和全面监视，实现配电网的可观测性和自愈控制、电能质量控制和电能的灵活分配、分布式和可再生能源的兼容接入与统一控制，降低损耗，提高供电可靠性和电能质量。

（四）智能调度

重点解决大电网安全稳定运行、节能减排和资源大范围优化配置、新能源和可再生能源接入控制、国家互联大电网一体化控制问题，重点开展智能调度技术支持系统建设、备用调度和应急指挥控制中心建设、长江流域大型水电站群联合优化调度系统建设、调度通信数据网建设，在国调、网调、省调建成智能调度技术支持系统，并在地县推广应用；在分布式一体化平台支撑的基础上，建设实时监控与预警、安全校核、调度计划和调度管理四大类应用，实现同质化调度管理，全面提升大电网调度驾驭能力、资源优化配置能力、科学决策管理能力和灵活高效调度能力，保障电网安全、稳定、经济、优质运行。

（五）智能用电

重点解决用户用电效率低、用户管理与交互服务标准规范体系不健全的问题，以及与用户交互信息量少和增值服务少的问题，通过采用高级量测系统（AMI）、计量数据管理系统（MDMS）、家域网（HAN）、双向通信和远程控制技术，重点开展智能表计建设和需求侧智能化管理系统、智能用电示范园区、用户管理服务互动系统、用户用电信息采集系统建设。构建智能营销组织模式和标准化业务体系，实现营销管理的现代化运行和营销业务的智能化应用；全面开展智能用户管理与服务，在全国范围内推广智能表计，构建智能化双向互动体系，实现电网与用户的双向互动，提升用户服务质量，满足用户多元化需求，进一步提高供电可靠性；通过智能电网建设推动智能楼宇、智能家电、智能交通等领域的技术创新，改变终端用户用电模式，提高用户用电效率。

（六）系统集成

通过把高级量测系统（AMI）、高级配电运行（ADO）和高级输电运行（ATO）与高级资产管理（AMM）进行集成，将会大大改进电网的综合运行性能和效率。智能电网的实现需要集成发电、输电、变电、配电、用电、调度等各功能环节，需要建立满足不同控制、运行和管理需求的各级通信网络，且整个系统的规划和

建设符合相关的国际和国家标准或规范，以实现电网运行控制、电力企业管理、电力用户需求协调和统一。

第三节 智能电网工程探索

“智能电网”这一概念尚在讨论完善时，全球各国的智能电网工程随之展开，在智能电网的各个领域进行大胆的尝试，不断总结经验，根据实际运行效果充实“智能电网”的内涵。在这一过程中，全球各国开展了大量的探索性应用工程，对其中影响较大的应用进行了整理。

一、多样化能源与多元化资源

可再生能源的充分利用是智能电网的首要任务，欧盟、日本、澳大利亚和中国等都制定了雄心勃勃的可再生能源发展计划。风能、太阳能、海洋能等可再生能源发电丰富了传统的电力来源，促使电源结构朝着日益多样化的方向发展。可再生能源发电的间歇性仍是

制约其并网的主要原因，目前间歇式能源并网容量与总装机容量之比一般在10%以下。微型电网提供了一种新的分布式能源组织方式，可以整合分布式发电的优势，并削弱其对电网的负面影响。分布式电源和微型电网的发展将改变传统配电网的单向潮流性质，使得传统配电网从简单的辐射网变成有源的复杂网络。可再生能源开发需要与传统电源扩建相配合，依靠准确的出力预测、负荷管理、储能支持和市场激励等，发挥智能电网的调剂能力。为适应可再生能源的分散性和出力随机性的特点，未来能源供给体系将向分布式方向发展。多样化能源不同的出力特性，分布式电源的接入，要求控制中心具有强大的协调能力。

实现可再生能源对化石能源的替代利用，需要多元化资源的支援与配合，包括需求侧管理、储能系统和电动汽车等。作为智能电网互动的核心内容，需求响应（DR）是需求侧管理（DSM）在竞争性电力市场的新发展。在市场激励机制和实时价格信号的引导下，用户可以成为电网的重要调控资源。电网通过高级计量体系（AMI）监控用户的用电行为，实时发布电价信号引导用户需求，在市场合约下智能地管理用电设备。在智能电网互动机制下，电动汽车作为需求响应的

重要组成部分,通过协调有序充电或换电池集中充电模式形成“电能缓冲池”,为可再生能源兼容利用提供支援。压缩空气储能、飞轮储能和化学储能等储能技术的不断进步,为平滑负荷、提高能效和促进可再生能源利用提供了新的手段。可再生能源、分布式电源、微型电网、需求响应、储能系统和电动汽车等给智能电网带来了多样化、多元化的能源和资源,要求智能电网控制中心具有更加开放的架构、灵活的体系和强大的资源优化配置能力。

二、更灵活的市场与精细化调控管理

灵活的市场条件是智能电网社会效益得以发挥的必要条件。智能电网多样化、多元化能源和资源的有效配合和良性发展,需要更加开放、实时的市场环境支持。在高速双向通信和先进市场工具的支持下,通过实时电价快速反映电力供应与需求的关系,以刺激各种资源积极参与电网调控,是提高能源利用效率的重要途径。用户互动使得市场交易主体更加多元化,不仅包括传统的发电商、电网运营商和单纯以获利为目的的中间商、投资商与期货商,也包括各个分布式电源、微型电网和大量的普通用户。普通用户从单一的能源消费者变成能源消费和供给的复合体,用户具有更大的自主性来选择消费时段、消费电量,并可向电网回馈电能。市场主体的空前庞大给市场交易带来更大的灵活性,也使市场交易行为更加复杂,对市场分析工具、交易平台和实时调度系统的灵活性提出了更高的要求。

充分竞争的市场环境驱动电力公司提高能效、降低成本,实施精细化的调控和管理。充分利用物联网技术可实现对全网设备的运行参数和状态的实时监测,通过数据挖掘和友好图形界面展示,帮助运行控制人员和管理者直观地把握电力系统的整体情况。各种高级应用软件对负荷变化、可再生能源的不确定性、系统动态行为、安全隐患等进行跟踪分析,帮助发现系统的内在规律,预测发展趋势,并通过信息通信网络和现场智能设备,实施对各种可用资源的实时精确控制,将安全隐患消灭在萌芽状态。高级资产管理(AAM)通过对设备的实时健康状况监测和从规划、设计、建设、运维到退役的生命周期备案,有针对性地安排检修计划,降低企业运行维护成本。智能电网的精细化调控和管理对控制中心的数据存储和处理能力提出了更高的要求,生产自动化系统与管理信息化系统的深度互动要求智能电网控制中心具有更高的集成性。

三、智能电网的控制形态面临转变

二十世纪六十年代以来,信息通信技术的进步始终是驱动电力系统控制水平提升的重要因素。智能电网为电力设备植入芯片智能,通过网络互联形成灵活互动的智能系统。信息网与电力网的集成使得信息流的分配和管理日益重要。在智能电网条件下,用户既是电能消费者也是电能生产者,传统单向的电力流和资金流转变为双向和多向,电力流的协调控制和资金流的计费结算集中表现为信息流的处理、分配和作用过程。通过物联网和云计算对智能电网进行资源整合,整个智能电网演变为互联“超级计算机”的结构,形成庞大的电力和信息资源池。智能电网的控制形态更多地体现为人与信息的交互,智能电网面向用户类似于PC操作平台,各种功能和业务类似于窗口应用程序,用户只需通过键盘和鼠标进行订制、操作和管理,而自然用户界面的发展将促使人机交互更加简便、直观和人性化。谷歌基于网络的操作系统Chrome是互联网领域的雏形,在电力系统整合信息通信资源,打造智能电网广域操作系统是一个有望在不久的将来实现的解决方案。随着物联网和云计算的快速发展与成功应用,基于物联网/云服务(IoT/CS)的新型控制中心可能成为未来电网的控制形态。

四、物联网和云计算是新型控制中心的技术支撑

智能电网是电力技术与信息通信技术集成的革命性成果,各种先进的通信技术为智能电网开辟了信息通道,标准化的推进为电力系统的互操作性和信息安全提供了保障。物联网和云计算的最新发展正在重塑未来智能电网的控制形态。

物联网解决了智能电网的信息来源问题,依靠物联网获得发、输、变、配、用各环节的全景信息,可为智能电网各项功能奠定数据基础。物联网透过传感设备和通信网络将任意物品纳入互联网,物品在互联网中表现为唯一标识和信息属性。根据欧盟第7框架射频识别(RFID)和物联网研究项目组的定义,物联网遵守标准的、可互操作的通信协议,构成具有自配置能力的、动态的全球网络基础架构。在发电领域,物联网技术可用于机组运行监控、大坝监测与水情预报、风电厂预测等;在输电环节,可用于输电线路监测、巡检、现场作业管理、状态检修、安全预警和输电走廊保护等;在变电环节,可用于油色谱、局部放电在线监测、状态检修等;在配电环节,可用于停电管理、智能故障预警和抢修、配网

线路监测等；在用电环节，可用于智能用电设备管理、用电信息采集、电能质量监测、电动汽车充放电管理等。作为智能电网的神经末梢，物联网将在电力建设、生产管理、运行维护、安全监控、资产管理、智能家居、用户交互和服务拓展等各方面发挥巨大作用。

现有的 SCADA 系统、新兴的广域量测系统（WAMS）、高级量测体系 AMI 和设备状态在线监测系统都将成为智能电网物联网的组成部分。未来广域、实时、精细的电网运行数据以及相量测量单元（PMU）高频量测数据、用户用电数据和状态检测数据等，会给智能电网运行信息的存储和处理带来重大挑战。为弥补现有电力系统计算和信息处理平台的不足，电力系统云计算平台应运而生。云计算代表一种大规模、分布式的计算模式，通过 Internet 整合广域异构的 IT 资源，形成虚拟、可动态扩展的计算资源池，可为各种分析计算任务提供强大的存储和计算能力。

按照普遍的定义，云计算可通过网络以按需订制、易扩展的方式获得所需资源，包括 IT 基础设施（IaaS）、平台支持（PaaS）和软件服务（SaaS）。提供资源的网络称为“云”，“云”中的资源对于使用者是无限扩展的，并可以随时获取、按需分配、随时扩展、按用付费。云计算通过虚拟化技术对计算能力、存储和交互能力等进行统一组织和分配，从而提高 IT 基础设施的利用率、降低单位使用成本；通过建立专业化的安全中心，保障用户的数据安全；通过服务标准化达成广泛的信息互通、共享和互操作性；通过宽带网实现随时随地的可获得性。云计算推动了信息通信服务向规模化、集约化和专业化方向发展，必能以其廉价、优质、便捷的优势变革传统的电力系统信息通信体系。未来智能电网控制中心需要解决海量数据的存储和处理、庞大的计算量、业务的灵活部署和调度、资源的统一管理和弹性扩容、系统的升级和平滑迁移、数据共享和信息安全等问题。云计算的开放、集成、高效、按需订制、易扩展等特性为智能电网各项功能的实现提供了可能。

第四节 智能配电网

一、智能配电网的概念

智能电网就是以配电网高级自动化技术为基础,通过应用和融合先进的测量和传感技术、控制技术、计算机和网络技术、信息与通信等技术,利用智能化的开关设备、配电终端设备,在坚强电网架构和双向通信网络的物理支持以及各种集成高级应用功能的可视化软件支持下,允许可再生能源和分布式发电单元的大量接入和微网运行,鼓励各类不同的电力用户积极参与电网互动,以实现配电网在正常运行状态下完善的监测、保护、控制、优化和非正常运行状态下的自愈控制,最终为电力用户提供安全、可靠、优质、经济、环保的电力供应和其他附加服务。

智能配电网主要由主站系统、子站系统、通信系统、配电远方终端组成。通过应用配电网运行自动化技术、管理自动化技术、用户自动化技术、分布式电源并网控制技术、订制电力技术等,对配电网各个环节、模块和设备进行智能化,同时结合地理信息系统的应用,实现正常情况下配电网与电力系统各个环节的协调和优化运行,以及故障情况下的快速定位、隔离、恢复、负荷转移等功能,从而为用户提供优质可靠的电能,为电力企业提供便捷、高效的管理平台和途径,提高配电网的综合自动化水平、管理水平和电力市场化水平,进而实现电力企业管理者、电力用户、系统运行操作的协调和统一。

智能配电网的发展目标是实现电网自愈,以下问题需要集中研究、迫切解决:①分布式再生能源的无缝接入与微网运行;②提高供电可靠性和电能质量;③降低扰动对电网的影响和停电对用户的影响;④增强用户的互动作用,鼓励用户参与电网调峰,进行需求侧管理;⑤降低运行和维护费用;⑥为用户提供更多的用电选择和附加服务。所涉及的技术领域有:①标准化的智能电子设备(IEDS)的设计;②研究低成本、多功能的静态开关设备;③研究基于智能传感器的监视系统;④研究隐患和事件实时预测技术;⑤研究快速仿真和模拟技术;⑥研究智能微网技术;⑦研究需求侧管理技术。

二、智能配电网的功能特征

与传统的配电网相比较,智能配电网具有如下特征。

（一）更高的供电可靠性

具有抵御自然灾害和外部破坏的能力，能够进行电网安全隐患的实时预测和故障的智能处理，最大限度地减少配电网故障对用户的影响；在主网停电时，应用分布式发电、可再生能源组成的微网系统保障重要用户的供电，实现真正意义上的自愈。

（二）更优质的电能质量

利用先进的电力电子技术、电能质量在线监测和补偿技术，实现电压、无功的优化控制，保证电压合格；实现对电能质量敏感设备的不间断、高质量、连续性供电。

（三）更好的兼容性

支持在配电网接入大量的分布式发电单元、储能装置、可再生能源，与配电网实现无缝连接，实现“即插即用”，支持微网运行，有效地增加配电网运行的灵活性和对负荷供电的可靠性。

（四）更强的互动能力

通过智能表计和用户通信网络，支持用户需求响应，积极创造条件让拥有分布式发电单元的用户在用电高峰时向电网送电，为用户提供更多的附加服务，实现从以电力企业为中心向以用户为中心的转变。

（五）更高的电网资产利用率

有选择地实时、在线监测主要设备状态，实施状态检修，延长设备使用寿命；支持配电网快速仿真和模拟，合理控制潮流，降低损耗，充分利用系统容量；减少投资，减少设备折旧，使用户获得更廉价的电力。

（六）集成的可视化管理平台

实时采集配电网及其设备运行数据，实时运行数据与离线管理数据高度融合、深度集成，实现设备管理、检修管理、停电管理以及用电管理的信息化，为运行人员提供高级分析和辅助决策的图形界面。

三、智能配电网的作用及其意义

配电网直接面向用户，是保证供电质量、提高电网运行效率、创新用户服务的关键环节。配电网特别是城市电网，集中了大量的重要负荷，涉及国家的经济发展、政治稳定、社会和谐。但是，电网本身故障、自然灾害或外部破坏，对城

市电网的影响较为重大。此外,我国各配电地区设备水平参差不齐,几乎没有电力市场支持,无法利用负荷需求响应,分布式发电单元渗透率较低,经济因素分析较少。这些因素将造成以下问题:配电网架相对薄弱,制约供电能力提升;配电自动化应用范围小,实用化水平低;配电网相关技术标准、规范不完善;配电网基础数据管理欠缺,信息化手段有待提高。

我国配电网的发展明显地滞后于发电、输电,在供电质量方面与国际先进水平还有一定的差距。目前,用户遭受的停电时间,绝大部分是由于配电系统原因造成的。配电网落后是造成电能质量恶化的主要因素,电力系统的损耗有近一半产生在配电网,我国配电网的自动化、智能化程度以及自愈和优化运行能力远低于输电网。因而,配电网急需解决以下问题:①配电网运行优化和自愈控制问题;②大量分布式发电的并网运行对配电网的影响问题;③支持可再生能源发电的政策和市场运行问题;④新型混合动力电动汽车(PHEV)充放电对配电网的影响问题;⑤配电阻塞问题;⑥用户参与电网互动,进行需求侧管理问题;⑦负荷参与电网调峰问题。

要建设智能电网,必须给予配电网足够的关注。配电网的智能化是统一坚强智能电网的重要内容,而自愈控制技术、智能微网技术、用户服务和需求响应技术、集成通信技术、设备技术等是配电网智能化的核心支持技术。结合我国配电网建设的实际,掌握智能配电网核心支持技术,赋予配电网自预测、自预防、自优化、自恢复、自适应的能力,对于提高我国配电网的自动化和可靠性水平,改变传统电网的控制方式,建设具有较优越综合性能、较高运营效率、较好社会效益、较低投资成本的统一坚强智能电网,推动我国配电网技术革命,解决人类所面临的能源、环境、气候等问题都具有重要意义。

第五节 分布式发电与智能电网

一、燃料电池的现状与未来

在过去的十几年中，燃料电池（FC）技术发展非常快，在大型发电项目中安装燃料电池的数目迅速增加。政策的扶持、民众的支持和技术的进步共同推进了燃料电池的应用。预计燃料电池技术在二十一世纪会取得更大的进步，其应用会更加广泛。但要使燃料电池成为一种可靠的能源，还需要解决很多问题。

超兆瓦电力调节系统（PCSs）能够将中心电站中燃料电池产生的低电压转换为向电网输送电力所需的高电压。根据美国技术标准局和能源部达成的协议，要进行先进 PCSs 系统结构、电路拓扑、器件的研究，以达到将燃料电池电厂 PCSs 系统成本控制目标。在器件技术上的突破（如碳化硅半导体器件和先进高频磁材料技术）是未来降低超兆瓦 PCSs 成本的关键。

二、分布式发电的电网安全管理

在欧洲的部分国家，分布式发电的装机容量占全部装机量的比重已经很高，这引发了许多系统管理上的问题，对系统的安全运行造成了威胁。风能和太阳能作为分布式能源的重要组成部分，都具有波动性和间歇性的特点，对可靠供电造成了冲击。通过改进天气预报的准确性，可以更加准确地预测分布式发电的变化情况，通过合理调度可以减小其波动对电网的影响。通过引入多种可再生能源相结合的虚拟电厂（VPP），综合考虑风电厂、光伏电厂、生物燃气热电厂、抽水蓄能电站等新能源，与先进的预报技术相结合，可以较好地调控 VPP 发电量，以满足可靠供电的要求。

为了避免在最坏情况下可能发生的问题，法国进行了考虑分布式发电情况下优化网络操作的研究，包括电压控制、发电负荷管理、网络安全分析、配电网评估等。将目前在输电网中应用的安全监控手段（如继电保护安全评估和电网动态安全评估）引入配置有分布式电源的配电网，可以提高全网的运行可靠性。通过市场的手段动态平衡电力供需要求，可以充分利用分布式发电的灵活性，有助于保持电力供需平衡。大比重的分布式发电增加了输电线上潮流的随机性，通过在广域控制系统中相应增加对负荷的控制，可以减小停电事故发生的概率，增强

系统稳定性。随着发电量比重的逐渐增加,为了保证电力供应的安全性和经济性,分布式发电对电网灵活性和电力市场国际化提出了更高的要求。电网运营单位需要在电力的市场交易、生产、输送和需求等多个方面共同采取措施,以满足分布式发电的要求。

三、分布式能源领域的最新进展

分布式能源包括分布式发电和分布式储能,在许多国家都得到了迅速发展。在国家资源部能源技术中心的支持下,加拿大进行了热光伏发电、热电联合电厂、小型燃气发电、锂电池、燃料电池等多种分布式能源的研究。通过应用各种能源转换技术,家用热电联合系统的研究取得了很大进展,研制了热循环活塞发动机系统、斯特林发动机,质子交换膜燃料电池和固态氧化物燃料电池等多种类型的家用热电联合系统。

通过实施基于实效的激励机制,鼓励电力公司安装小型光伏发电系统、钠硫电池等储能装置,可以有效降低系统高峰负载,提高系统利用效率。

四、分布式发电对智能电网的影响

人们对环境影响和供电质量的关注推动了电网管理者资助进行能源效率、可再生能源发电、发电可靠性等方面的研究,同时也吸引了投资者、政府和大收购集团对新能源发电装置、电力输送网络及支撑技术的研究进行投资。这些都促进了智能电网技术的发展。

总的来说,智能电网是指利用先进的技术提高电力系统在能源转换效率、电力利用率、供电质量和可靠性等方面的性能。智能电网的基础是分布式数据传输、计算和控制技术,以及多个供电单元之间数据和控制命令的有效传输技术。

输电网是智能电网的重要组成部分。当前,在输电网中安装的本地自动控制装置都用于保护本系统免受系统故障的冲击,无法从全网的角度考虑。广域防护系统的概念是指综合利用全网的信息进行分析,有选择地将部分本地信息传送到远端,以共同阻止重大故障的传播。现代的 EMS 系统、SCADA 系统及 PMU 都将是广域防护系统的重要组成部分,开发能够接受系统广域信息、与本地信息结合进行计算分析、有选择地向控制中心上传本地信息的智能单元是广域防护系统的基础。

电力系统的故障或停电是无法完全避免的，如何在发生故障的情况下，通过正确的电网调度，尽量减小故障损失、尽快恢复供电，是智能电网的重要研究内容。目前可以从电网中采集到的运行数据很多，但可以帮助在电网紧急状态下进行正确决策的信息比较少。即使存在将数据转换为所需的决策信息的快速模型，如果电网调度人员不能完全理解信息的内容，也不会完全采信其决策建议。对于智能电网，在紧急状态下做出正确响应的一些关键因素包括：受影响区域及相邻区域电网之间的良好协调措施；帮助调度员正确决策和执行动态控制措施的可靠且有效的软件工具；减少恢复过程中过负荷和失稳的控制措施。

通过在大量配电线路、变压器、电容器等元件上加装小容量、低成本的电力电子控制设备，可以改变元件的阻抗特性和潮流，从而以较低的成本实现分布式、可控的智能电网。

为了支撑未来的智能电网运行，许多电力公司都设立了建设信息和通信基础设施的发展计划。美国电科院的智能电网纲要提出了一种定义电力系统高级应用需求和技术的结构化方法。首先开发部分关键应用的用例，以便确定支撑高级应用的关键技术和系统需求。通过综合关键应用的需求，可以总结出基础设施的总体需求。开发的主要过程是从现有的基础设施逐步升级改造为满足支撑智能电网需求的新系统。

第八章 电力系统通信技术

第一节 电力线载波通信技术

一、电力线载波通信工作原理

（一）基本构成

电力线载波通信系统主要由电力线载波机、电力线路和耦合设备构成。其中耦合装置包括线路阻波器 T 、耦合电容器 C 、结合滤波器 F （又称结合设备）和高压电缆 HFC，与电力线路一起组成电力线高频通道。

电力线载波通信系统的主要组成部分是电力载波机，其主要功能是调制和解调，即在发送端将音频搬移到高频段电力线载波通信频率，以完成频率搬移。电力线载波通信系统的质量将直接由载波机性能好坏所决定。

耦合电容 C 和结合滤波器 F 组成一个带通滤波器，其作用是使得高频载波信号能够通过，并且可以阻止电力线上的工频高压和工频电流进入载波设备，从而确保人身及设备安全。

线路阻波器 T 被串接在电力线路和母线之间，功能是对系统一次设备进行“加工”，故称之为“加工设备”。其主要作用是通过电力电流、阻止高频载波信号漏到变压器和电力线分支线路等电力设备上，以减小变电站和分支线路对高频信号的介入损耗。

结合设备连接载波机与输电线，它包括高压电缆，作用是提供高频信号通路。输电线既传输电能又传输高频信号。

（二）基本原理

电力线载波在原理上和通信线路载波相同，只是电力线不同于通信线路，它专为传输 50Hz 工频电流而架设，利用它实现载波通信具有不少独特优势。

电力线最基本的功能是传输和分配 50Hz 的交流电，其具有很高的传输电压和很大的传输电流。为了利用电力线来实现电话通信，可将一路 0.3 ~ 3.4kHz 的语音信号直接输送至电力线上进行传输，但这样会受到强大的 50Hz 的谐波干

扰,在接收端难以筛选出语音信号,无法实现通信。所以,直接在电力线上进行音频通信难以被实现。

实践证明,将一路 $0.3 \sim 3.4\text{kHz}$ 的语音信号,通过变频将语音信号频谱搬到高频频段,如 40kHz 以上的高频信号在电力线上传输,在接收端用滤波器就比较容易选出。如将多路语音信号分别采用不同频率的载波进行变频,在电力线上就可以进行多路载波电话通信。

发电厂产生的 50Hz 电流经升压后,通过电力线送到变电所,再经降压后供给用户。利用电力线实现载波通信,最重要的问题是如何把高频信号安全地耦合到电力线上。常用的耦合采用图中所示的相地耦合方式,由耦合电容 C 和结合滤波器 F 组成。耦合电容器和结合滤波器构成一只高通滤波器,它使高频信号顺利通过,达到了将高频信号耦合到电力线的目的;同时对 50Hz 电流具有极大的衰减作用,防止 50Hz 电流进入载波设备,达到了保护人身和载波设备安全的目的。图中电力线上 50Hz 的高压由于频率低,几乎都降落到耐压很高的高压耦合电容器两端,结合滤波器的变量器线圈上所降电压无几,这样的耦合是非常安全的。阻波器 T 是一个调谐电路,其电感线圈是一个能通过 50Hz 大电流的强流线圈,保证 50Hz 电流的传送,而整个调谐电路谐振在高频信号的频率附近,阻止高频信号通过,起到防止发电厂或者变电所母线对高频信号的旁路作用。总之,通过这些线路设备的应用,能够有效解决耦合问题。

电力线载波设备和通信线载波设备在原理上没有区别。但电力线载波设备同电力线连接时,必须经由线路设备。实际上,线路设备中的阻波器、耦合电容器和结合电容器的作用,同通信线载波设备中的线路滤波器完全相同。

电力线载波通信系统由电力线载波设备和高频通道组成,它所使用的频带主要由高频通道的特性决定。使用过高频率的线路,衰减会很大,通信距离也会被限制而使用较低频率的线路,将受到 50Hz 的工频谐波干扰,同时要求耦合电容器的电容量和阻波器的强流线圈电感量增大,而使线路设备制造困难且不经济。国际电工委员会(IEC)建议使用频带一般为 $30 \sim 500\text{kHz}$ 。在实际选择频带时,无线电广播和无线电通信的影响需要被考虑。国内统一的使用频带为 $40 \sim 500\text{kHz}$ 。

电力线载波通信充分利用 460kHz 频带,同通信线载波通信充分利用线路频带有着明显的不同。通信线是专门为开设载波通信而架设的,为了充分利用这条

线路,根据其传输特性的限制,在其可使用的频带内开设多路通信,达到全频带都能合理的利用。而电力线在发电厂和变电所内均按照相同电压等级连接在同一母线上,同一电厂、变电所中不同电压等级的电力线均处于同一高压区,并由电力变压器将其互相耦合。因此,在电力线上开设电力线载波通信时,虽然其信号被耦合设备所阻塞,但仍会不同程度地串扰到同一母线的其他相线路上去。由于同一母线不同相线路间的跨越衰耗较小,致使每条电力线开设载波的频谱不能重复,而只能合理地安排在 $40 \sim 500\text{kHz}$ 频带内。此外,在同一电力系统中,电力线是相互连接的,若想重复使用频谱,至少需相隔两段电力线路。基于这些原因,同母线上各条线路所能够共同利用的频谱,实际上窄于 $40 \sim 500\text{kHz}$ 。

二、电力线载波通信基本设备

电力线载波通信的基本设备有电力载波机、结合滤波器、阻波器、耦合电容器等部件。下面将详细介绍各基本设备的构成原理及其作用。

(一) 电力载波机

电力线载波通信系统的主要组成部分是电力载波机,其作用是调制和解调,即在发送端将音频搬移到高频段电力线载波通信频率,完成频率搬移。电力线载波通信系统的质量直接由载波机性能的好坏来决定。

1. 差 / 接网络

差分是指把一个传输通路分成两个及以上的传输通路,汇接(或汇集)则是指把两个及以上的传输通路合并为一个传输通路。在各种类型的载波机中,差分或汇接网络广泛应用在多个通道(或多个信号)需要分开或汇接的地方。能同时实现差分 and 汇接作用的网络被称为差分 / 汇接网络,简称为差 / 接网络。在载波机中,差 / 接网络除完成直接的信道(信号)差分 / 汇接功能外,声频用户端的 2/4 线转换也是差 / 接网络要承担的一项重要任务。

(1) 变量器差 / 接设备

变量器差分 / 汇接设备分为等臂和不等臂两种类型,其工作原理都是基于电桥平衡原理。等臂型变量器差 / 接设备用于载波机声频端 2/4 线转换的架构,其中虚线框内即为差 / 接设备,实质上就是一个差 / 接变量器。

在实际应用中,一般取 $Z_N = Z_L = Z_R = 600\Omega$, $Z_S = Z_L / 2 = 300\Omega$, 变量器匝比 $n = 0.707$ 。实际上,由于变量器制作上的原因,其对端衰减不可能无限大,邻端衰减也会因

变量器本身的损耗而稍有增加, 约为 3.5dB。

(2) 有源差 / 接设备

在电力载波机中, 发信支路要把话音信号、远动信号、呼叫信号等多路信号汇集到一起, 在收集支路中又要将它们分开。这些功用通常采用有源差 / 接电路来实现。从电路形式上看, 此电路与求和电路相似, 但要求放大器 A 的输入阻抗 $Z_{in} \ll R_i$, 并且 Z_{in} 越小, 各支路相互之间的隔离越好。当然, Z_{in} 越小, 也将使传输信号在 Z_{in} 上的电压降低, 即信号的传输衰减加大, 因此 Z_{in} 也不能过小。为了获得 $Z_{in} \ll R_i$ 的条件, 该放大器的输入级常采用共基极放大电路或并联负反馈放大电路。

2. 呼叫设备

完成用户间接续联络的信号系统被称为呼叫设备, 其主要目的是向被叫用户话机输送低频铃流来实现振铃呼叫, 因此呼叫设备也叫振铃设备。

(1) 呼叫设备的作用和要求

载波机的每一通路都有一套呼叫设备, 每个用户都具有独立呼叫对方用户的能力, 即任何一方用户既可作为主叫呼叫对方, 又可成为被叫接受对方呼叫。

呼出过程是指: 当载波机采用自动选呼方式时, 主叫要发出直流来选择脉冲, 通过呼叫发送转换装置转换成声频脉冲呼叫信号, 并借助载波机发信电路, 来将信号送往对方。呼入过程则是指: 在接收前, 由呼叫接收电路把声频呼叫信号转换成直流脉冲并选择用户, 然后再向被叫用户话机输送低频铃流。为了实现可靠的振铃呼叫, 对呼叫设施有如下一些基本要求: ①呼叫信号发信电平稳定并且频率准确: 为保证呼叫工作的可靠性, 电力载波机要求呼叫发信电平偏差不超过 $\pm 0.3\text{dB}$, 频率误差不超过 $\pm 5\text{Hz}$ 。②呼叫接收动作范围: 为保证可靠呼入, 在一定频率及电平范围内应确保呼叫信号能被接收并可靠动作, 还应考虑因噪声干扰而引起误动问题。呼叫信号频率偏离正常值 $\pm 25\text{Hz}$ 时应可靠动作, 而频率偏移大于 $\pm 100\text{Hz}$ 时应拒动。电力载波机规定接收呼叫电平在标称值 $\pm 8.7\text{dB}$ 内, 呼叫接收电路均应可靠动作 (振铃边际)。③对通路正常信息的影响: 呼叫的发送和接收电路均跨接在信号通路上, 因此对通路中正常传输的信息, 其跨接影响应尽可能小。

(2) 呼叫设备的制式与选用

呼叫设施的声频呼叫信号频率设置在话声频带之内的, 称为带内制; 设

在话声频带之外的,称为带外制。由于在带外制呼叫设施中,接收端可用窄带滤波器选收呼叫信号,并利用窄带滤波器的阻带来防止话音信号等待对呼叫设施的干扰,使呼叫接收电路大为简化,故电力载波机广为采用。在话声频带为 $300\text{kHz} \sim 2000\text{Hz}$ 的窄带通信中,呼叫信号频率选为 $(2220 \pm 30)\text{Hz}$; $300\text{kHz} \sim 3400\text{Hz}$ 的宽带通信则选为 $(3660 \pm 30)\text{Hz}$ 。

电力载波机对呼叫脉冲信号的调制方式,采用频移键控(Frequency-shift Keying, FSK)式,也就是信号幅度不变,只是信号频率由键控电路控制变化。

(3) 电力载波机呼叫设备的架构

电力载波机呼叫设施由呼叫发送和呼叫接收两部分组成。呼叫发送电路由频移键控、频移振荡器和呼叫发送带通滤波器组成,接收电路包括有呼叫接收带通滤波器、限幅放大器、鉴频器、直流差动放大器和收铃继电器等。自动交换设施是另外一个设施,呼叫设施为双方自动交换设施传递直流脉冲呼叫信号,从而实现双方的自动选呼。以窄带通信为例,呼叫设施的工作过程如下:

呼出:静止时双方用户挂机,自动交换设施送出“地”信号,由FSK电路控制,使频移振荡器产生振荡频率为 2250Hz 。用户摘机时,交换设施停送“地”信号,键控使振荡频率变为 2190Hz 。拨号时,用户拨号盘的脉冲触点断续,使用户话机直流回路断续接通,交换设施则断续送出“地”信号,致使移频振荡频率在 2250Hz 和 2190Hz 两个频率点上变化。这样便将用户话机的直流脉冲信号转换成频移键控的声频呼叫信号,经发信支路送出,完成呼出过程。

呼入:双方挂机时,对方连续送来的 2250Hz 信号经“呼叫带”选出、限幅放大和鉴频后,使输出直流电压经过差动放大,从而收铃继电器 $K\&$ 不动作。对方摘机后输送的 2190Hz 信号则使心动作,其触点闭合,将“地”信号送给自动交换设施。此后,对方拨号时发出的 2250Hz 和 2190Hz 的FSK信号则使 Kk 断续动作,使其触点实现给自动交换设施传送拨号直流脉冲信号的目的,完成呼入过程。

3. 调制设施

调制设施是实现载波通信的重要环节,也是载波机中非常重要的组成部分。在单边带载波通信机中,常使用环形调制设施。

4. 载频供给设备

载频供给设备是提供各种视频信号的设备,简称载供设备。对于通信线载波

设施而言,由于路数多,采用多级调制,需要提供大量不同频率的载频信号,以及相应设置的导频信号,载供设施比较复杂。传统的方式是采用谐波源式载供设施,其各组成部分集中安装在载供架内,故称集中式载供设施。后来大量采用锁相环式载供设施,各组成部分分散设置到需用载频或导频信号的通路架和群路架中,故称分散式载供设施。

对于电力载波设备,一般都是单路机,而且一般都采用两级或三级调制,所需的载频信号和导频信号数量少,故载供设施相对简单。通常都是采用单独的晶体振荡器分散供给。近年来为了获得更好的频率稳定性和较好的生产性,也已采用锁相环法,组成相对集中的载供设施。它不仅提供载频和导频信号,还可提供其他的信号源,如测试信号等。载供设施主要的技术性能有频率稳定性、电平稳定性和频率纯洁度。频率稳定性是指在一定时间(如1个月)内,由于环境温度、电源电压、元件参数变化等因素而引起的频率变化的程度。

锁相环式载供设施的主要环节是锁相环和晶体振荡器。实质上,锁相环是一个相位自动控制环节。通过利用鉴相器来比较得到输入/输出信号的相位差,并以此来控制输出信号的频率,保证相位差稳定(为零),最终实现输出电压与输出电压频率相同、频率稳定性相同的效果。选取适当的石英晶体振荡器来组成锁相环式的载供设施,应用其产生基准频率信号,并通过锁相环来获取各种(基准频率的 n 倍)视频信号。

5. 压缩扩张设施

在电力载波通信中,由于线路噪声大而严重影响通信质量。如果依靠提高发信功率来提高信噪比,又将受到多种因素的限制。因此,应用压缩器/扩张器来抑制噪声,继而提高通路信噪比,是保证通信质量的有效办法,这在电力载波设备中得到了广泛的应用。压缩器和扩张器统称为压扩器,主要用在话音信号通路中。因为载波通路中各点都有规定的标称电平,但实际传输的话音信号,其音量会有一定的变化范围(即动态范围)。考虑到用户线长度不同等因素,实际到达通路入口的信号动态范围可达60dB。发信支路设备的功率容量无法得到充分利用的原因是,为了保证话音信号不失真,而使得信号的最高电平受到通路最大发信功率的限制,并且信号的低电平部分还要遭受线路噪声的严重干扰。

压缩器应用在发信支路入口,作用是压缩话音信号的动态范围,即标称信号电平不变,低于零增益电平的小信号给以增益,提高其电平;而高于零增益电平

的大信号给以衰减，压低其电平。压缩的结果使信号幅度变化按比例相对减小，而不会使信号失真。显然，压缩后的信号平均功率提高，能使发信支路设备的功率容量得到较充分的利用；而其最低信号电平提高了，因而大大提高了抗干扰能力。

同压缩器作用相反，扩张器用于收信支路的出口，按一定比例对信号的动态范围进行扩张，从而恢复原始信号。高于零增益电平的信号电平被提高，而低于零增益电平的信号电平被压低。电平越低的信号，扩张后压缩得越低。随同有用信号进入收信支路的线路噪声，也将得到同样的扩张处理。显然，扩张器输入端的信噪比，不会因扩张而变化。但在信号间歇期间，由于噪声电平一般总是很小的电平，在扩张器中得到很大的压低，即噪声将得到很大的抑制。在发信端，压缩器提升了小信号的电平，这在客观上提高了信噪比，从而改善了通信质量；而处于收信端的扩张器在恢复信号动态范围的同时，通过抑制信号间隙时的背景噪声，在主观感觉上也能改善通信质量。

6. 组成部件与调试方法

上面论述了电力载波机的主要设施，下面介绍电力载波机典型产品的组成部件及其应用。电力载波机按调制方式可分为双边带电力载波机和单边带电力载波机。实际中基本上使用单边带电力载波机。现以四川灵通电气股份有限公司的单边带电力线载波机 ZBD-3B 系列为例来说明载波机的主要组成部分。

（1）发信支路组件

发信支路组件主要有低通滤波盘、高通滤波盘、发铃盘、调制盘。低通滤波盘可选用低通频率 2.0kHz、2.4kHz、3.4kHz，它将话音信号限制在标称的频率范围内通过。高通滤波盘用于控制 50Hz 工频电流及其谐波成分。发铃盘发送启机信号及拨号。调制盘包含中频调制、通路滤波、高频调制及辅助放大，它的作用是将声频信号调制到传输频带。如果需要复接远动信号，则需要将频带划分为：0.3 ~ 2.4kHz 传话音、2.4kHz 以上传远动信号；或 0.3 ~ 2.6kHz 传话音，2.6kHz 以上传远动信号。在本机空闲时，将收信支路闭塞，防止杂音干扰，用户摘机后打开收信支路的闭塞。

（2）收信支路组件

收信支路组件主要有解调盘、导频接收盘、导频放大盘、低通滤波盘、高通滤波盘等。导频系统是其主要组成部分，解调盘的高频解调器将高频信号解调成

48kHz 的导频信号，由导频接收盘将杂波剔除，然后将信号放大；再将信号辅助滤波并送至解调盘调解出声频（或远动）信号。

（3）声频接口组件

声频接口组件主要有话音及远动声频信号接口、四线声频接口、高频继电保护复用接口等。这些信号送入发送汇接盘平衡输入端。

（4）电源系统组件

电力载波机外供电电源为交流 220V 或直流 -48V，两种电源可自动切换。机内电源系统由电源盘、-40V 稳压盘、-24V 稳压盘组成。

（5）呼叫 / 交换组件

电力系统中的电话通信主要为调度服务，一般用户数量不多，每端 1 个或 2 个用户。为使主叫同被叫用户之间快速接通，现在的载波机一般都有自动交换系统。

（6）勤务系统组件

勤务通话系统由勤务盘、用户汇集盘、音终盘、低频放大滤波盘等组成。勤务用户摘机即可振铃通话，一摘机即占用二线端，呼叫与通话方向由面板上的拨动开关人工控制。

载波机的基本工作条件是：环境温度在 $0 \sim +45^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不大于 80%（ $+25^{\circ}\text{C}$ 时），电源线采用 5A 的电力专用线，架设地线（信号地与保护地）并需用较粗的良好导体与大地可靠连接，采用 75Ω 高频同轴电缆。此外，声频转接线及用户线使用普通通信电缆即可。设备固定通过机脚底部膨胀螺丝与地固定，还可在顶部与机房横向连接，以加强其固定。

通电测试前应仔细检查各盘位置准确插入是否良好；电源盘内的直流低通滤波器应该设置为“投入”，目的是降低开机瞬间直流冲击及杂音；导频调节面板上的开关置于“人工”，防止导频自动增益系统过调。首先做单机加电测试，测试电源、调试各点电平；然后做两机对通加电试验并调试各点电平。对载波机调试各点电平一般采用的方法是发送标准 800Hz/0dB 的正弦测试信号，以此为标准来调节各点电平使之符合要求。单机调试时本端首先使用频率振荡器发出 800Hz 正弦信号送给载波机；然后用选频电平表进行测试。双机对调时由对方发送 800Hz 正弦信号，经电力线路后在本方载波机上用选频电平表进行测试。

其实，载波机的测试还有对频率、失真、杂音、通路衰减等的测试，这里不再赘述，而主要测试与调节内容为此表所列内容。此外，随着电力网载波通信的

发展,必将逐步采用数字式电力载波机,最终全面取代模拟式电力载波机。

基于目前发展状况,数字式电力载波机又分为全面数字化和部分数字化两种技术方案。全面数字化是全面应用话音压缩编码、数字复接等高性能的数字调制技术,成为完全的数字式载波通信机。部分数字化则是指只将声频部分及调制电路数字化,但最终仍采用SSB调制方式;或将话音进行压缩编码,利用高速话带调制解调器再接入常规模拟式电力载波机。

国际电工委员会建议电力载波机的使用频率的频带一般为 $30 \sim 500\text{kHz}$,有时可达 1MHz 。实际选择频率时,必须考虑无线电广播和无线通信的影响,国内统一使用频带为 $40 \sim 500\text{kHz}$ 。实际上,在这个频带内的频率,要完全利用也非常困难。在低频段,存在着阻波器制作上的困难;在高频段,易受广播信号的干扰,而且还要考虑线路对信号衰减的不均匀性等因素。基本载波频带为 4kHz ;用户需要时,可以是 2.5kHz 。在分配载波机频率时,要根据同网载波机不同频而合理安排。另外,利用电力线路实现载波通信,还可以在架空避雷线上进行,即地线载波通信。由于地线载波通信的线路设备比电力线载波通信简单,在低频段仅受工频的谐波限制,因此频率可以更低一点。实际上,电力载波通信如果在低频段 $40 \sim 60\text{kHz}$,线路设备的性能会变差。所以,国内地线载波通信一般使用频带为 $8 \sim 80\text{kHz}$:这样两种通信方式的频带互相覆盖,使电力线路传输高频信号的频带得到充分的利用。

(二) 结合滤波器

结合滤波器为高频保护提供专用接口,即在输出变量器输出端串入电容。为了防止工频电流进入变量器,而引起变量器饱和所造成的通道阻塞,继电保护高频通道要求做到:结合滤波器和收、发信机之间应当串有电容器。该电容串入后,各项技术指标均应符合国际电工委员会标准IEC481和国家标准GB/T7329—1998关于电力载波结合设备的规定。

结合滤波器具有相地耦合和相相耦合方式,一般采用前者。

(三) 阻波器与耦合电容器

电力线载波通信的基本设备还有阻波器和耦合电容器。阻波器(实质上就是电感器)接在变压器前,其作用是阻止高频信号流入变压器。耦合电容器接于相线与结合滤波器之间,其作用是阻止工频 50Hz 电流通过。

阻波器通常为圆柱形,其悬挂于电力线上,安装过程需要在电力线路不带电

的情况下才能进行,其上端、下端分别连接着输电线路和变压器进线,即将它串联在电力线上。耦合电容器通常安装在绝缘水泥杆上端;而结合滤波器则通常固定于该水泥杆上。另外,还要有充足的 75Ω 高频电缆,一端接在结合滤波器上,分别将芯线与屏蔽层接好,另一端接载波机。

源端的话音信号 ($0.3 \sim 3.4\text{kHz}$) 经差/接设施,与频率为 f_1 的载波进行调幅,调幅波为 $f_1, f_1 \pm (0.3 \sim 3.4)\text{kHz}$ 的高频信号,通过放大和带通滤波器滤除谐波成分,经结合滤波器 F 、耦合电容器 C 送到电力线路上。由于阻波器 T 的存在,高频信号沿电力线传输到目的端,再由目的端的耦合电容器 C 、结合滤波器 F 送入目的端载波设备。中心频率为 f_1 的收信带通滤波器滤出 f_1 和 $f_1 \pm (0.3 \sim 3.4)\text{kHz}$ 的高频信号,并且放大、反调制(解调)后得到了源端的话音信号。这样的通信传输是双向的。

电力系统的通信网不仅包含电话通信,还包含有大量的遥测、遥信、遥控等远动信号和一些地方保护信号需要传输。对于电力载波通信而言,为了充分利用 $0 \sim 4\text{kHz}$ 的声频频带,大多数采用话音信号和其他信号复用的方式。电力系统的电话仅为调度和管理使用,可以选用较窄的频带,如 $0.3 \sim 2.4\text{kHz}$ 频带或 $0.3 \sim 2.0\text{kHz}$ 的窄频带。这样就将 $0 \sim 4\text{kHz}$ 的上声频段 $2.65 \sim 3.4\text{kHz}$ 或 $2.4 \sim 3.72\text{kHz}$ 用来传输远动信号和远方保护信号。具有同时传输话音、远动和保护信号的电力载波设备称为复合(或多功能)载波设备。

第二节 电力微波通信技术和卫星通信技术

一、电力无线通信技术概述与分类

通信有多种类型和方式。按传输媒质划分,可分为有线通信和无线通信两大类。无线通信是利用电磁波信号可以在自由空间中传播的特性进行信息交换的一种通信方式。无线通信技术是近年来信息通信领域发展最快、应用最广的通信技术,在移动中实现的无线通信通称为移动通信,二者合称为无线移动通信。

进行无线通信时,发信端需将待传信息转换成无线电信号,依靠无线电波在空间传播;收信端需将无线电信号还原成发信端所传信息。

在无线电技术中,通常用频率(或波长)作为无线电波最有表征意义的参量。

频率（或波长）相差很远的无线电波，往往具有很不相同的性质，如在传播方式方面，中长波沿地面传播，绕射能力较强；而微波却只能在大气对流层中沿直线传播，绕射能力很弱。一般说来，各个频段的无线电波都可用作无线通信。所谓微波，一般是指频率为 $300\text{MHz} \sim 300\text{GHz}$ （或波长为范围内的无线电波。“微”，就是该无线电波的波长相对于周围物体的几何尺寸很小的意思。

无线通信有以下特点：①利用无线电磁波进行信息传输；②占用无线频道资源；③电磁波信号强度随着传输距离增加而不断衰减；④无线移动通信会引起多普勒效应；⑤在复杂的干扰环境中运行，如环境的干扰、无线信号间的干扰等。

无线通信技术的工作方式有三种：单工系统（只提供单向通信）、半双工系统（通信双方可交替进行收信和发信，但两者不能同时进行）以及全双工系统（允许通信双方同时进行发信和收信）。

目前常见的无线通信系统有：①微波中继通信系统：用微波波段（ $2 \sim 13\text{GHz}$ ）进行通信，带宽和系统容量都较大。由于微波的视距传播特性，必须相隔几十千米设一个中继站，故称“中继”通信。②卫星通信系统：以空间卫星作为中继站的微波通信系统。由于利用三颗同步卫星就可以覆盖全球，故将是越洋通信及未来个人通信的主要手段之一。③移动通信系统：本来是为车载电台、舰载电台等移动体内的通信终端服务的系统，近年来随着社会和技术的进步，已主要用于大量移动电话（手机）的通信，并可在世界范围内漫游。④无线寻呼通信系统：一种单向的无线通信系统，只限于由局端向寻呼机（俗称 Call 机）发送消息。

另外，无线电广播、电视系统理论上是一种单向无线通信系统，他们各自占用不同的频段，向覆盖区域内的所有接收终端（收音机、电视机）发送信号。

除以上的分类以外，随着计算机网络的兴起，已使传统的通信系统从概念到应用，都发生了巨大的变革，比如网络中的电子邮件、IP 电话等。显然，计算机网络已经成为新的通信媒体。若从计算机的角度看，这是一种计算机网络；而从通信的角度看，这就是一种数据通信网。计算机技术和通信技术的紧密结合更加促进了网络通信技术的快速发展。

二、电力微波通信技术

（一）微波及其传播特性

微波是分米波和厘米波的总称，其频率在 $300\text{MHz} \sim 300\text{GHz}$ 范围内，是一

种平面电磁波。

不同波长电磁波的传播特性不同。微波在空间传播时沿直线进行,称为微波的视距传播特性。微波的视距传播和地球表面的弯曲特性,将使微波信号在传输一定距离后,被地面阻挡;同样,山峰和高大的建筑物等也会阻挡微波的向前传播。正因为如此,微波的发射和接收均由架设在高空的天线完成,以获得较远的传播距离。

根据地球的半径大小(6378km),容易推算得出:当两个微波站的天线高度分别为 h_1 、 h_2 (单位:m)时,其间的最大传播距离为:

$$d = 3.57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})(\text{km})$$

例如,若 $h_1 = h_2 = 50\text{m}$,即使用高度约50m的天线,则其传输距离为50km左右。微波的传播过程很复杂,由于受多种因素的影响,将使微波在传播过程中产生损耗。

对于无方向的天线,从天线发射的信号将以发射点为球心,朝各个方向辐射出去。设微波的发射功率为 P_t ,则在距离发射天线 d 的球面上,单位面积能接收到的信号功率,即距离发射点 d 处的信号功率密度 P_r 为:

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi d^2}$$

显然,随着距离的增大,信号功率将急剧衰减。

在实际的通信系统中,为提高接收点的信号功率密度,一般使用有向天线,并用“天线增益”表示其方向特性。

考虑球状辐射形成的损耗、发射天线增益 G_t 及接收天线增益 G_r ,则传播距离为 d 时总的传播损耗(dB值)为

$$A = 32.44 + G_t + G_r + 20\lg d + 20\lg f$$

式中, f 为微波频率,单位为MHz; G_t 、 G_r 的单位为dB; d 的单位为km。

上述传播损耗没有考虑大气和地面的影响,故称为自由空间传播损耗。事实上,大气将对电磁波的传播产生吸收损耗、雨衰及折射,从而引起附加损耗;平滑的地面(湖泊水面、沙漠、草原等)将产生镜面反射,形成多径传播,这种反射信号和直射信号在接收天线处合成时,若相位正好相反,则相互抵消,成为所谓的多径衰落。雨衰和多径衰落是微波通信中需要重点考虑并克服的问题。

（二）微波通信技术特点

微波通信是指利用微波作为载波来携带信息并通过空间电波进行传输的一种无线通信方式。常采用中继方式，故又称微波中继通信（微波接力通信）。根据所携带信息的形式，微波通信可分为模拟微波通信和数字微波通信。数字微波通信通常可分为地面微波中继通信、一点对多点微波通信、微波卫星通信和微波散射通信。

微波通信的特点：①微波频段受工业、天电和宇宙等外部干扰的影响很小，使微波通信的传输可靠性提高。12GHz 以下，受风雨冰雪等恶劣气象条件的影响较小，可使微波通信的稳定度大大提高。②微波频段占有频带很宽，可以容纳更多的无线电设备工作。全部长、中、短波频段的总频带占有不到 30MHz，而微波仅厘米波的频带就占有 $27 \times 10^3 \text{MHz}$ ，几乎是前者的 10^3 倍。占有频带越宽，可容纳的同时工作的无线电设备就越多，信息容量也就越大。③微波射束在视距范围内直线、定向传播，天线的两站间的通信，距离不会太远，一般为 50km。

（三）抗衰落技术

在微波通信中，收信机的接收电平会发生变化，有时会降低到接收门限电平以下而导致通信中断。这是由于电波在传播中，发生了各种各样的衰落的缘故。衰落是影响微波通信传输质量的一个重要因素。

衰落的大小与气候条件、站距的长短有关。衰落的持续时间长短不一，有的衰落持续的时间很短，只有几秒钟，这种衰落称为快衰落；有的衰落持续的时间较长，可达几分钟甚至几小时，这就是慢衰落。因多径传播而造成的衰落被称为频率选择性衰落。衰落的出现将使收信机的接收电平起伏变化。

微波传播中的衰落现象给中继传输带来了不利影响，所以人们在研究电波传播统计规律的基础上提出了各种对付电波衰落的技术措施，即抗衰落技术。

1. 空间分集技术

空间分集分为空间分集发信和空间分集接收两种方式。通常使用空间分集接收方式，即在接收端安装几副高度不同的天线，利用电磁波到达各接收天线的不同行程来减少或消除衰落的影响。这种方法通常应用在微波干线上。

2. 频率分集技术

利用两个或两个以上具有一定频率间隔的微波频率同时发送和接收同一信息，然后进行合成或选择，以减轻衰落影响，这种工作方式称为频率分集。备用

波道工作就属于频率分集方式。

3. 自适应均衡技术

高性能的数字微波信道往往把空间分集和自适应均衡技术配合使用,以最大限度地减少通信中断时间。自适应均衡技术有频域自适应和时域自适应之分。

(1) 频域自适应均衡器

这种均衡器是一个谐振频率和回路 Q 值可变的中频谐振电路。用该中频谐振电路产生的与多径衰落造成的幅频特性相反的特性,去抵消带内振幅偏差,使带内失真减至最小。

当电波衰落的结果使干涉波与直射波的时延差非常大时,可能造成接收机的输入频谱中有两个凹陷点,这时再用这种只有一个谐振电路的频域自适应均衡器就无法补偿其幅频特性了,而必须采用能适应时间变化的时域自适应均衡器。

(2) 时域自适应均衡器

时域自适应均衡器的方案很多,常使用加在基带电路中的横向滤波器式均衡器。它能够均衡空间分集和频域自适应均衡器没有完全均衡的剩余波形失真。在实际使用中,往往将横向滤波器式均衡器与频域自适应均衡器配合使用。在理论上讲,这样可以均衡基带领域中的任何波形失真。

三、数字微波通信系统

(一) 数字微波通信技术的性能指标

在数字微波通信中,数字信道包括基带信道和微波信道两部分。从性能上,对数字信道可提出传输容量和传输质量这两方面的技术要求。其中传输质量是由误码率体现的,而误码的原因又取决于噪声干扰、码间干扰及定时抖动,其中噪声干扰是主要因素。

1. 传输容量

传输容量是用传输速率来表示的。有两种表示传输速率的单位,即码元传输速率 R_a 和比特传输速率 R_b 。

2. 传输质量

传输质量用差错率来表示。有两种表示差错率的单位,即比特误码率和码元误码率。比特误码率定义为确定时间内接收错误的比特数与发送的总比特数之比,记为 BER。当对某系统的 BER 进行测量时,须按有关标准进行。

3. 信道利用率

数字通信在传输信号时,传输速率越高,所占用的信道频带也越宽。为了能体现出信息的传输效率,说明传输数字信号时频带的利用情况,使用了信道利用率这一指标,它表示单位频带的信息传输速率。单位为 $\text{b}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ 。

例如,比特速率为 8Mb/s 的基带信号,通过 4MHz 的信道传输,其信道利用率为 $2\text{b}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ 。

(二) 微波收发信设备

1. 发信设备

数字微波通信设备分为直接调制式发信机(使用微波调相器)和变频式发信机。中小容量的数字微波设备(480路以下)可用前一种方案,而中大容量的数字微波设备大多采用变频式发信机,这是因为这种发信机的数字基带信号调制是在中频上实现的,可得到较好的调制特性和较好的设备兼容性。

由调制机或收信机送来的中频已调信号经发信机的中频放大器放大后,送到发信混频器。经发信混频,将中频已调信号变为微波已调信号,由单向器和滤波器取出混频后的一个边带。由功率放大器把微波已调信号放大到额定电平,经分路滤波器送往天线。微波功放及输出功放多采用场效应晶体管功率放大器。为了保证末级功放的线性工作范围,避免过大的非线性失真,常用自动电平控制电路使输出维持在一个合适的电平。

公务信号是采用复合调制方式传送的,公务信号通过变容管实现对发信本振浅调频。这种调制方式设备简单,在没有复用设备的中继站也可以上、下公务信号。

微波发信设备最重要的性能指标有以下三项:①工作频段。工作频率越高,越能获得较宽的通频带和较大的通信容量,也可得到更尖锐的天线方向性和天线增益。但当频率较高时,雨、雾及水蒸气对电波的散射或吸收衰耗也会增加,造成电波衰落。这些影响对 12GHz 以上的频段尤为明显。②输出功率。输出功率是指发信机输出端口处的功率大小,一般为几十毫瓦到几瓦之间。③频率稳定度。工作频率的稳定度取决于发信本振源的频率稳定度。设实际工作频率与标称工作频率 f_0 的最大偏差值为 Δf ,则频率稳定度的定义为: $k = \Delta f / f$ 。

发信本振源的频率稳定度与本振源的类型有关。微波介质稳频振荡源可以直接产生微波频率,频率稳定度可达 $1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-5}$ 。当用公务信号对介质稳频振荡源进行浅调频时,其频率稳定度会略有下降。对频率稳定度要求较高时,可采

用脉冲抽样锁相振荡源，其频率稳定度可达 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ 。

2. 收信设备

数字微波的收信设备和解调设备组成了收信系统，这里所讲的收信设备只包括射频和中频两部分。

空间分集接收的收信系统：分别来自上天线和下天线的直射波和经各种途径（多径传播）到达接收点的电波，经过两个相同的信道：带通滤波器、低噪声放大器、镜像抑制滤波器、收信混频器、前置中放，然后进行合成，再经主中频放大器输出中频检出电路的控制电压对移相器进行相位控制，以便抵消上、下天线收到多径传播的干涉波（反射波和折射波），改善带内失真，获得较好的抗多径衰落效果。

为了更好地改善因多径衰落造成的带内失真，在性能较好的数字微波收信机中还要加入中频自适应均衡器，使它与空间分集技术配合使用，最大限度地减少通信中断时间。

由于FET放大器是宽频带工作的，其输出信号的频率范围很宽，因此在FET放大器的前面要加带通滤波器，其输出要加装抑制镜像干扰的镜像抑制滤波器。

收信机的主要性能指标除工作频段、频率稳定度外，主要还有：

（1）噪声系数

噪声系数是衡量收信机热噪声性能的一项指标，它的定义为：在环境温度为标准室温（17℃）、网络输入与输出匹配的条件下，噪声系数 N_F 等于输入端的信噪比与输出端信噪比的比值，记作

$$N_F = \frac{P_{si} / P_{ni}}{P_{so} / P_{no}}$$

数字微波收信机的噪声系数一般为 3.5 ~ 7dB。

（2）接收门限及收信机的最大增益

接收门限是在保证通信误码率指标的前提条件下，所能接收的最低信号功率，也就是收信机的接收灵敏度。

为维持解调器正常工作，收信机的主中放输出应达到所要求的电平，例如要求主中放在 75Ω 负载上输出 250mV（相当于 0.8dBm）。但是收信机的输入端信号是很微弱的，假设其门限电平为 80dBm，则此时收信机输出与输入的电平

差就是收信机的最大增益。对于上面给出的数据，其最大增益为 79.2dB。这个增益值由 FET 低噪声放大器、前置中放和主中放等各级放大器的增益之和来达到。

（3）动态范围

以自由空间传播条件下的收信电平为基准，当收信电平高于基准电平时，称为上衰落；低于基准电平时，称为下衰落。当收信电平变化时，若仍要求收信机的额定输出电平不变，就应在收信机的中频放大器内设有自动增益控制（AGC）电路，使得当收信电平下降时，中放增益随之增大；收信电平增大时，中放增益随之减小。在 AGC 电路的作用下，能使收信机额定输出电平保持不变的收信电平变化范围即称为收信机的动态范围。

（4）选择性

对某个波道的收信机而言，要求它只接收本波道的信号，而对邻近波道的信号干扰、镜像频率干扰及本波道的收、发相互干扰等都要有足够大的抑制能力，这就是收信机的选择性。

（5）通频带

收信机接收的已调波是一个频带信号，即已调波频谱的主要成分占有一定的带宽。收信机要使这个频带信号无失真地通过，而且避免邻近频道信号的干扰，就要具有适当的工作频带宽度，这就是通频带。通频带的宽度是由中频放大器的集中滤波器予以保证的。

3. 天线与馈线

（1）微波天线

天线是微波通信设备的重要组成部分。在实际的通信系统中，常使用有向天线。常用天线的基本形式有：喇叭天线、抛物面天线、喇叭抛物面天线、潜望镜天线等。

天线的方向特性用“天线增益”表示。对于发射天线，天线增益是指该有向天线在其发射方向上每单位立体角的发射功率与无向天线在单位立体角发射功率之比（倍数或分贝数）；类似地，对于接收天线则是指从接收方向接收到的功率与无向天线从同一接收点接收到的功率之比。一般而言，天线的口面面积越大，其增益就越高。

“天线防卫度”是天线的另一项重要指标。所谓天线防卫度，是指天线在最大辐射方向上，对来自其他方向的干扰电波的衰耗能力。对于反向信号的衰耗能

力称反向防卫度，通常要求在偏离主辐射方向 $180^\circ \pm 45^\circ$ 之间，反向防卫度大于 65dB。

对微波天线总的要求是：方向性好、增益高、与馈线匹配良好、波道间寄生耦合小。此外，由于微波天线都采用面式天线，并往往架设在野外，所以还必须使天线具有很好的机械强度，防锈蚀，并采取有效的抗风、防冰雪措施。

（2）馈线

因微波信号频率很高，在设备内各高频部件之间，以及信道机和天线之间，均不能用一般的导线进行连接，而必须使用特殊的馈线。微波通信系统中的馈线有同轴电缆和波导两种型式。一般在分米波波段（2GHz），采用同轴电缆馈线；在厘米波波段（4GHz 以上频段），因同轴电缆损耗较大，故采用波导馈线。波导是一种空心的金属腔体，根据外形的不同分为圆形波导和矩形波导两种。圆形波导可以传输相互正交的两种极化波，故与相适应的双极化天线连接时，只要一根圆波导即可。

（三）数字微波通信的中继方式

在微波中继线路中，有大量的中继站。中继转接的方式有多种，通常采用的是基带转接、中频转接和微波转接三种。

1. 基带转接

由于解调后经取样判决恢复信码再进行转接，所以又称再生转接。再生中继能有效地消除中继段的噪声积累，因此，基带的再生中继是目前常用的一种中继方式。只有基带转接才能实现上、下话路。基带转接可以是基带群路信号转接，也可以是经数字分接设备后的音频转接。

2. 中频转接

中频转接只将接收的微波信号混频（下变频）变换至中频（中、小容量系统中频为 70MHz，大容量为 140MHz）由中放提供足够的增益，再送至发送设备的上变频器，变换为微波频率，经功率放大后发射出去。

3. 微波转接

中继转接接口是微波，由微波放大器提供足够的增益。由于微波转接设备简单，电源功耗低，也是一种实用的转接方式。

由于实际系统中天线发射的信号功率不是全在发射方向主瓣内，背向旁瓣的信号功率不为零，引起所谓“背背干扰”。考虑到发射信号功率与接收信号功率

的悬殊差别, 仅仅依靠对天线背向耦合衰减指标提出的要求, 是难以达到系统抗干扰指标的。所以, 需要中继站发射的载频在接收载频基础上偏离 Δf 中继站接收 f_1 的频率, 发射 f_2 的频率, 使背背干扰从同频干扰变成异频干扰, 便于机内滤波器对这种干扰的抑制。

(四) 数字微波通信的射频频率配置

一条微波线路有许多微波站, 每个站上又有多个波道的微波收发信设备。为了减小波道间或其他路由间的相互干扰, 同时又提高微波射频频带的利用率, 对射频频率的选择和分配就显得十分重要。

频率配置的基本原则: ①在一个中间站, 同一个波道的收信和发信必须使用不同频率, 而且有足够大的间隔, 以避免发送信号被本站的收信机收到, 使正常的接收信号受到干扰。②多波道同时工作时, 相邻波道频率之间必须有足够的间隔, 以免产生邻道干扰。③整个频谱安排必须紧凑, 使给定的频段能得到经济的利用。④频率配置方案应有利于天线共用, 以降低天线建设费用。⑤对于外差式收信机, 不应产生镜像干扰, 即不允许某一波道的发信频率等于其他波道收信机的镜像频率。

在数字微波通信中, 由于调制方式不同, 射频已调波的带宽也不同。所以数字微波系统的频率配置还取决于 t 波道的传输容量、调制方式、码元传输速率、波道间隔及收发频率间隔、带外泄漏功率等。对于后三项的考虑是:

相邻波道间隔 $\Delta f_{\text{道}} = x \cdot f_s$, 取 $1.5 < x < 2$ 。 f_s 码元速率。 x 的下限取决于滤波器的选择性和允许的码间干扰量, 上限取决于射频频带的利用率。

相邻收发间隔 $\Delta f_{\text{发}} = y \cdot f_s$, 取 $2 < y < 4$ 。 y 的下限取决于滤波器的选择性和天线方向性, 上限取决于射频频带利用率。

频段边缘的保护间隔 $\Delta f_{\text{保}} = \xi \cdot f_s$, 取 $\xi = 1$ 。 ξ 的选择要考虑和邻近频段的相互干扰因素 (即考虑带外泄漏)。

四、电力卫星通信技术

多年来的卫星通信发展, 通信业务从电话、电视扩展到数据、会议电视和 ISDN 业务, 从固定业务发展到移动业务; 通信容量从只有 2 个转发器共 240 个双向话路发展到有 48 个转发器, 等效总容量达到 35000 个双向话路; 寿命从 3 年增加到 10 年。在技术上, 采用了先进的数字技术、星上交换时分多址技术和

数字电路倍增技术等。目前,卫星通信网承担着 80% 国际通信业务和全部国际电视转播。随着个人通信概念的提出,低轨道移动卫星通信系统又为人类实现全球个人通信展示了美好的前景。

卫星通信是指利用人造地球卫星作为中继站的微波通信系统,即利用人造地球卫星作为中继站转发或反射无线电波,在两个或多个地球站之间进行通信。由于作为中继站的卫星处于外层空间,这就使卫星通信不同于其他地面无线电通信方式,而属于宇宙无线电通信的范畴。对固定通信业务的系统来说,大多采用“静止卫星”。所谓静止卫星就是发射到赤道上空 35 786.62km 高度处的圆形轨道上的卫星,它的运行方向与地球自转方向相同,绕地球一周的时间恰好是 24 小时,因和地球的自转周期相等,故从地球上看去,如同静止一般。静止卫星也称为同步卫星,静止轨道称为同步轨道。

当卫星天线的波束宽度为 17.4° 时,波束边缘与地球表面相切。这种波束最大限度地覆盖了地球表面,称为覆球波束。它所覆盖的面积约占地球总表面积的 42%。若以 120° 的相等间隔在静止轨道上配置三颗卫星,则地球表面除了两极地区外,都在卫星波束覆盖范围之内,而且其中部分区域为两颗静止卫星波束的重叠地区。因此,借助于重叠区内地球站的中继,可以实现不同卫星覆盖区内地球站之间的通信。由此可见,只需三颗均匀分布于静止轨道的同步卫星,就可以实现全球通信。这一特点是其他任何通信方式所不具备的。目前国际卫星通信和绝大多数国家的国内卫星通信大多采用静止卫星通信系统,如国际卫星通信组织负责建立的世界卫星通信系统(Intersat,简称 IS),就是利用静止卫星来实现全球通信的,静止卫星所处的位置分别在太平洋、印度洋和大西洋上空。

与其他通信手段相比,采用静止卫星进行通信的主要优点是:①通信距离远,且费用与通信距离无关;②覆盖面积大,可进行多址通信;③通信频带宽,传输容量大,适用于多种业务传输;④通信线路稳定可靠,通信质量高;⑤通信电路灵活,机动性好;⑥可以自发自收,进行监测。

五、电力卫星通信系统

(一) 卫星通信系统组成

卫星通信系统由空间分系统、地球卫星站、跟踪遥测及指令分系统和监控管理分系统四大部分组成。

1. 空间分系统

空间分系统即通信卫星。通信卫星内的主体是通信装置，另外还有星体的遥测指令、控制子系统和能源装置等，主要起无线电中继站的作用。卫星中的通信装置为卫星转发器，一个通信卫星往往有多个转发器，每个转发器被分配在某一工作频段中工作。

2. 地球卫星站

地球卫星站具有收、发信功能，用户通过它们接入卫星线路，一般包括中心卫星站和若干个普通地球卫星站。中心卫星站除具有普通地球卫星站的通信功能外，还负责通信系统中的业务调度与管理，对普通地球卫星站进行监测控制以及业务转接等。

3. 跟踪遥测及指令分系统

其任务是对卫星进行跟踪测量、控制其准确进入静止轨道上的指定位置。卫星正常运行后，还要定期对卫星进行轨道修正和位置保持。

4. 监控管理分系统

在卫星业务开通前、后进行通信性能的监测和控制，以保证正常通信。

（二）卫星通信线路

卫星通信线路就是卫星通信电波所经过的整个线路，它由发端地球站、上行线传播路径、卫星转发器、下行线传播路径和收端地球站组成。

来自地面通信线路的各种信号（如电话、电视、数据等），经过地球卫星站A的终端设备（模拟或数字），输出一个多路复用信号，即基带信号。基带信号通过调制器被调制到一个中频载频（如70MHz）上，调制方法常采用FM（模拟信号）或PSK（数字信号）。调制器输出的已调中频信号在发射机的上变频器中变成频率更高的发射频率 f_1 （如6GHz），最后经过发射机的功率放大器放大到足够高的电平（可达30dBW），通过双工器由天线向卫星发射出去。这里双工器的作用是把发射信号与接收信号分开，使收发信号共用一副天线。

从地球卫星站发射的射频信号，穿过大气层以及自由空间，经过一段相当远的传输距离到达卫星转发器。射频信号在这段上行线路中衰减很大，且混进了大量噪声。卫星转发器首先将接收到的射频信号变换成中频信号，并进行适当放大（也可对射频信号直接放大），然后再将中频信号变换成频率为 f_2 （如4GHz）的射频信号，放大后由天线发回地面。转发器发射频率 f_2 与接收载频 f_1 间应有足

够的频差,以免较强的转发信号通过转发器干扰接收信号。

卫星转发器转发下来的射频信号,经过下行线路后同样受到很大衰减,并混入大量噪声,故到达地球卫星站的接收信号很弱。地球卫星站 B 经天线收到微弱信号后,先由低噪声放大器加以放大,在下变频器中变换为中频信号,并进一步放大,然后经解调器解调出基带信号,最后通过终端设备将基带信号分路,送到地面通信线路。

第三节 NB-IoT 通信技术与应用

一、感知层总体设计

感知层由磁调制电流传感器、低功耗 STM32L476 单片机、中国移动的 NB-IoT 模组 M5310、低功耗 GPS 定位模块等组成,物联网模块采用中国移动物联网专用卡。STM32L476 单片机负责实时监控电流数据,通过 NB-IoT 将电流数据和定位数据由 LWM2M+CoAP 协议发送到云端。

我们通过向单片机中移植 SDK 实现了数据传输协议。该协议架构包括了三部分,上层是基于 LWM2M 协议的 IPSO 资源模型,用于对磁调制传感器终端进行资源属性初始化,协议的中间层是 LWM2M 协议,下层是 UDP 协议。利用 LWM2M+CoAP 完成数据从感知层到云平台服务器的传输。物联网终端数量巨大,NB-IoT 网络通信能力与 MCU 计算能力有限,节约网络资源很重要。LWM2M 协议为物联网设备间专用的远程管理通信的轻量型协议。

二、NB-IoT 模块

(一) NB-IoT 模块的介绍

基于窄带物联网技术的分布式光伏电站运行状态监测技术研究,利用窄带物联网通信方式,解决了有线通信方式布线复杂成本较高的问题;解决了 Wi-Fi、ZigBee、蓝牙、GPRS 等无线通信方式网络部署方式复杂,传输距离短,功耗较大,成本较高,且覆盖面相对较小的问题;解决了智能硬件随时随地将数据上传云端困难的问题。利用云端开发应用,解决了原始监测系统端只能部署固定地点的问题。利用云端提供的 API 接口,解决了上位机通过 RS-485 等总线从主控单片机获取

数据的问题。利用上位机将实时数据存储到自己的数据库，解决了用户租用服务器的成本问题。同时可以解决人工监测效率较低、成本较高、不确定性较大、安全度较低等问题。

NB-IoT 与 LoRa、Zigbee、蓝牙等 Wi-Fi 相比，有着低成本、广覆盖、低功耗、高接入量等优点，可广泛适用于智慧电力、智慧农业等行业应用场景，提供数据传输服务。

随着物联网技术的迅速发展，出现了一种新的通信方式，窄带物联网技术，一般人们称它为 NB-IoT。窄带物联网 NB-IoT 提供了一种万物互联通过云端的服务器，把设备数据接入到互联网的无线通信解决方案，开起了物联网技术的新篇章。NB-IoT 以低成本、低功耗、低速率的优点非常适合于智慧城市、智能电网等应用场景。由中国电信首个 NB-IoT 网络部署完成，其次是中国移动完成大部分基站的部署。由于 NB-IoT 最大的优势是低功耗，采用三种电源模式来控制模组功耗，不同的模式功耗不同，而采用 NB-IoT 模组做成的产品注重低功耗，本方案采用的是中国移动的 M5310 窄带物联网通信模块。

M5310 是一款工作在频段 band8 的工业级单模 NB-IoT 模组，在设计上兼容中国移动的其他通信模组，方便进行产品升级。M5310 现已通过多中国移动终端公司的测试认证，是首款进入中国移动集团终端库的 NB-IoT 模组。M5310 物联网模块可广泛适用于智能抄表、智慧电力、智慧农业等行业应用场景，提供数据传输服务。M5310 完美适配 OneNET 云平台协议，真正实现无缝对接，快速开发。

（二）NB-IoT 模块的调试

首先我们把中国移动的 NB-IoT 卡由整体的 SIM 大卡拆为 micro SIM 小卡装入 NB-IoT 模块，插上 IPEX 天线，再把四根杜邦线一端接在 CH340 USB 转串口的调试器上，另一端接在 M5310 的 NB-IoT 模块上，两根通信线的 RX、TX 需要交叉连接。由于 NB-IoT 模块板子上 PWR_EN 电源使能引脚默认通过 10k 电阻接到了 VCC，需要四根线就可以和电脑进行通信和调试啊。

模块通过串口连接电脑，打开串口调试助手，配置波特率为 9600。我们要做的调试工作的目的是查看 NB-IoT 是否可以正常工作，以及工作状态信息，这调试工作是模块以后正常工作的必要步骤。

NB-IoT 模块的调试流程图如下，首先检查频段和模组固件版本，发送指令“AT+NBAND？”返回“+NBAND: 8”说明这个物联卡工作正常，是移动频段，

如果是电信 850M 频段,则会返回 5. 发送指令“AT+CGMR”返回“SECURITY, V100R100C10B657SP3”,说明模组固件版本是 B657SP3 版的,若返回值为 B656. 那么该固件为旧版本,可以把模组固件更新为 B657 版本。

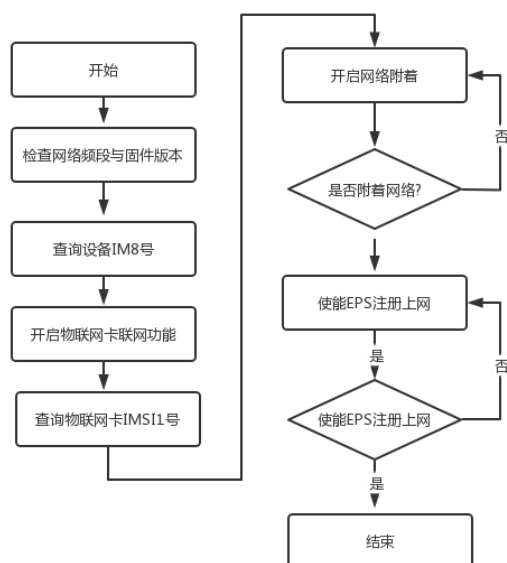


图 8-1 NB-IoT 模块的调试流程图

然后查询设备 IMEI 号,设备 IMEI 号是设备唯一识别号,发送“AT+CGSN=1”则会返回一串数字,就是设备 IMEI 号。如果设备 IMEI 丢失,则设备会无法入网。开启物联网卡全部功能,发送“AT+CFUN=1”返回“OK”。接着查询物联网卡的 IMSI 号,IMSI 为国际移动用户识别码,是 SIM 卡的通用识别码。发送“AT+CIMI”则会返回一串数字,就是设备 IMSI 号,说明模组已经识别到 SIM 卡,如果查询不到,那就是 SIM 卡没有正确插入。

接下来查询信号值,模块开机后需要 30 秒左右才能入网,查询到信号。发送“AT+CSQ”返回“+CSQ: 17, 99 OK”,说明接收到 17 个基站信号,如果返回两个 99,则表示没有信号。手动附着网络,发送“AT+CGATT”,返回“OK”,说明附着网络成功。查询模组是否成功附着网络,发送“AT+CGATT?”,返回“+CGATT: 1OK”,如果返回“1”说明连接网络成功,如果返回“0”,说明连接网络失败,当前没有附着网络。

最后使能 EPS 注册网络上网, 发送“AT+CEREG=1”, 返回“OK”, 说明该模组注册上网成功。00 发送“AT+CEREG?”, 返回“+CEREG: 1, 1 OK”, 第一个“1”表示模块使能开启成功, 第二个“1”表示注册网络成功。查询设备状态, 发送“AT+NUESTATS”, 返回各种设备状态信息。其中 Total power 和 Signal power 为电源供电, 该值不能小于 -1200, SNR 为信噪比, 该值不能小于 -10。PCI 为网络附着基站号, 实际测试 PCI 的值一般大于 4 即可, 其大小影响数据传输速率。SNR 信噪比和 power 电量值会影响信号质量, 信号太差会导致通信失败。

(三) NB-IoT 模块与 OneNET 云平台对接流程

调试后让 NB-IoT 模块接入中国移动物联网平台 OneNET 服务器上。M5310 模组连接 OneNET 物联网平台用的是 LWM2M 协议, 模组和平台对接包括两方面的准备工作, 一是 OneNET 平台上需要创建产品和注册设备, 二是 M5310 模组这一端, 需要初始化驻网和模组设备创建登录。

产品创建成功之后, 在产品中添加设备, 填写设备名称, 填写设备对的 IMEI 设备唯一识别号, 串口调试中发送“AT+CGSN=1”即可获得, 填写 IMSI 国际移动用户识别码, 是 SIM 卡的识别码, 发送“AT+CIMI”即可获得。添加设备成功就可以完成平台侧的初始化流程。

设备添加成功后, 点击进入设备管理界面, 即可看到注册成功的设备信息, 设备状态是由设备名称前的圆圈来表示, 灰色表明设备处于离线状态, 绿色表明设备处于在线状态。

接下来我们开始模组侧的对接流程, 首先需要生成模组侧设备注册码, 在命令提示符中转到注册码生成工具路径, 输入配置数据得到设备注册码。然后使用 AT+MIPLCONF 加上刚刚生成的注册码的指令来注册设备。

三、STM32 软件的设计与开发

(一) STM32 工程目录与设置

本设计方案采用 STM32L4 单片机作为主控芯片, 单片机负责电流传感器的数据记录, GPS 定位信息的记录, 以及发送指令给 NB-IoT 模块向云平台服务器发送数据。

首先 USER 目录下的 main.c 中实现了将电流传感器的值上传至 OneNET 平

台的应用程序。HAL 目录下实现了串口 1, 串口 2, 串口 3 和其他设备驱动, 其中串口 1 用于和 M5310 进行通信, 串口 2 用于和 GPS 定位模块进行通信, 串口 3 用于打印调试信息。其次, NETWORK 目录用于实现 NB-IoT 模组的网络通信驱动和通信组件的参数配置。COAP 目录中实现了 M5310 模组的物联网通信程序, 该通信程序封装了 M5310 的驱动细节处理, 直接给出了操作接口函数。最后, Platform 目录将系统接口抽象化为函数, 降低了通信程序移植难度, GPS 目录下实现了获取当前 GPS 定位信息的示例程序, 提供了一个得到当前时间和位置信息的函数接口。

将头文件添加为 NB-IoT 通信程序所在的路径, 然后工程所在目录的相对路径处添加条件编译选项, “NBIOT_DEBUG” 为输出调试日志的功能开关。用户如果希望使用 ACK 和重传模式, 可以打开 “NOTIFY_ACK” 宏。

(二) STM32 软件中的函数设计

在 environment.c 文件中, void nbiot_init_environment (void) 为初始化函数, 初始化一切软硬件资源, 包括内部时钟、模组上电、串口、模组状态、外设等初始化。void nbiot_clear_environment (void) 为环境状态清理函数, 可对当前程序的内存回收、状态参数回归默认值, 退出网络登录状态等。

数据发送函数为 int nbiot_udp_send (const void*buff, size_t size), 采用非阻塞方式将数据发送出去, 直接调用模组的发送驱动接口 ip_SendData 函数, 将数据从服务器发送至模组。数据接收函数, int nbiot_udp_recv (void*buff, size_t size, size_t*read), 采用非阻塞的方式接受数据, 在这里调用了 netif_rx 函数, 该函数负责检查接收缓存区, 如果缓存区有数据则把数据传给处理函数, 否则返回。

Time.c 文件中配置定时器 nbiot_time 函数, time_t 类型为 long 型, nbiot_time 函数返回的是系统当前时间, STM32 系统提供的 RTC 定时器作为系统定时器, nbiot_time 函数读取定时器里面的值并返回。void nbiot_sleep (int milliseconds) 使用了 RTC 定时器实现了毫秒级别的延时。

(三) NB-IoT 模组驱动的实现

在驱动程序中经将模组封装成 api 接口用来调用, 不需要直接调用模组驱动中的函数。void netdev_init (void) 该函数中要实现模组的上电, MCU 和模组之间的串口链路的建立, 模组工作状态的初始化包括无线网络的附着, ONENET

服务器的连接等。

`uint32_t ip_SendData ( int8_t*buf, uint32_t len )`，该函数中要根据模组提供的接口实现报文封装，并通过串口链路发送到模组中。输入参数 `buf` 为待发送报文的内存指针，`len` 为发送报文的长度。函数的返回值为最终发送报文的长度。

`void netif_rx ( uint8_t*buf, uint16_t*read )`，该函数从下行数据接收缓存区中获取模组上传的原始报文，并解封装为用户报文，上传给主程序进行处理。输入参数 `buf` 为接收到的报文的内存指针，输出参数 `len` 为接收到的报文的长度，没有返回值。

（四）NB-IoT 网络与资源配置

在主函数中，需要配置云平台服务器的 IP 地址和端口号，`endpoint_name` 结构体中需要配置设备模组的 IMEI 号和物联网卡的 IMSI 号，以及自己账号的 `api-key`。NB-IoT 网络配置要保证模组设备和云平台之间能够正确的连接通信，以 OneNET 云平台为例，IP 地址为“183, 230, 40, 40”，端口号为“5683”。配置正确的参数才能保证登录云平台。

在 NB-IoT 通信程序中，模组上所有与 OneNET 服务器进行相互传输的数据变量都要表示为资源，比如电流传感器的电流值可以表示为值类型为 `float` 的资源，创建资源首先声明一个 `string` 类型资源变量，并初始化这个资源的属性，最后调用 `nbiot_resource_add` 接口将该资源注册进 SDK 中。配置好资源属性后，模组在向服务器注册的过程中会上传对应的资源列表，服务器端会主动向设备订阅资源列表中所有资源。

四、STM32 软件整体设计流程

STM32 单片机整个软件程序是由磁调制电流传感器采集电流数据经过信号调理电路后经过单片机的外部中断定时器采集到电流数据，在传感器信号调理电路输出高电平时，由单片机的外部中断开启定时器，当输出低电平时关闭定时器，记录高电平持续时间，通过用定时器给出的高电平时间来计算被测直流漏电流的大小，同时单片机通过 `uart` 串口获取当前的 GPS 信息，最后通过 M5310 NB-IoT 模块将数据上传到 OneNET 物联网云平台服务器。

第四节 Lora 物联网通信技术

一、低功耗广域物联网技术概述

物联网无线数据传输技术按照通信传输距离分类,主要可以分成近距离传输通信和远距离传输通信两种方式。通信技术不一样可以应用到传输距离不同的场景中。当前近距离的主流无线数据传输技术有多种,如:4G、5G、蓝牙和 Wi-Fi 等。随着物联网的爆发式增长,近距离传输技术已经不能满足物联网设备的部署和应用,因此面向远距离传输的 LPWAN 应运而生。LPWAN 主要满足大连接、低速率的物联网业务,具有覆盖范围广、连接成本少和功耗低等特点,支持超大规模数量的设备接入网络,主要应用在功耗低、带宽低、距离远或大量设备连接的物联网环境中。LPWAN 技术按照频道授权情况可分为两类:一类是工作于未授权频段的 LoRa、SIGFOX 等技术;另一类是工作于授权频段下电信行业支持的蜂窝通信技术,比如 LTECat-m、EC-GSM 和 NB-IoT 等。

LoRa、SIGFOX 和 NB-IoT 是 LPWAN 运用较为广泛的技术。LoRa 是开放性较强的技术,自由度高基于非授权频段,在城市和郊区的传输距离分别可以达到八千米和二十五千米,传输速率可达到 0.3kbps—50kbps,电池使用寿命较长为十年左右,网络时延根据传输数据包的长度和传输距离而改变,运营成本较低。

SIGFOX 技术商用化速度较快,采用了超窄带技术进行通信。该技术具有主要传输特点是数据通信距离比较远,在农村无遮挡物的地方距离可以达到 50 千米左右,而有障碍物的城市通信距离就减少到了 10 千米左右。数据传输速率非常低,每秒钟大约只能传输 10 到 1000 比特的数据信息。数据传输功率消耗水平低,其硬件设备仅消耗 50 微瓦至 100 微瓦的功率。从接入网络上,SIGFOX 在 1GHz 以下的未授权频段进行通信,每个载波占用 100Hz 频段。目前主要在欧洲一些国家建立了相应的 SIGFOX 通信网络,中国部署范围少。相对于 LoRa 来说成本较高,电池使用寿命最长可达十年,网络时延与 LoRa 性质相同,受传输数据包的长度和传输距离影响。

NB-IoT 是物联网领域的一个新兴技术。在 LPWAN 无线通信技术中,采用授权频段进行通信具有通信距离选、消耗成本低、传输功耗小和通信标准化的优势。NB-IoT 也是一种窄带蜂窝物联网通信技术,可以直接在已有蜂窝电信网

络中进行数据通信,从而降低了设备的成本,实现了技术直接升级。尽管作为 LPWAN 无线远距离非授权通信技术, NB-IoT 具有广阔发展前景,但是仍然具有一些不足的地方,比如说它依托电信运营商组建自己的广域物联网很难实现应用场景的经常性变换。NB-IoT 在一些需要自己搭建企业个体网络的企业应用范围有局限性灵活性差。只能通过电信业或第三方代理商取得授权技术和频段才能获得相关服务,但是也因为只能依托于第三方所以不受其他信号的干扰安全性高。NB-IoT 传输距离在十千米以下,数据传输速率较高达到 0.3kbps—50kbps,电池使用寿命为十年以下,网络时延在 6 秒到 10 秒之间。

通过上述技术对比,在现有 LPWAN 代表技术中, LoRa 具有运营成本低,传输距离远,基于非授权频段可自主设计自由度高硬件参数配置简便等优势。再加上数据传输速率较高,因此在测试性能分析中 LoRa 有较优操作可行性和前景。

二、LoRa 通信技术原理

相比其他 LPWAN 技术, LoRa 在性能分析方面具有更强的实用性和更远的应用前景。

(一) 技术方面

LoRa 通过扩频技术,具有通信距离远和消耗功耗少的特点,实现了比传统近距离物联网通信技术更优越的地方。LoRa 减少了数据传输的跳数,从多跳变成了单跳,减少了传输时延,增加数据传输的可靠性,减少数据传输功耗和复杂度。LoRa 采用星型网络架构,终端只能和网关传输数据并且终端节点之间不存在链路,即单个网关控制多个终端采用单跳方式传输数据。在网状架构中,终端节点都可与拓扑中所有节点进行通信而形成一个局域网路。与网状架构相比,星型架构是最低延迟、最简单的网络结构。

LoRa 的星型网络架构基于 LoRa 扩频芯片,从而实现了终端和网关直接组网连接形成星型网络。而对于网关和终端通信距离远的情况,可以利用网关转发数据从而进行中继组网。LoRa 采用星型网络架构进行通信具有很多优势:①时延低:数据传输都是单跳,网关和终端之间只有一次通信,减少了数据传输延时。②功耗小:LoRa 在通信过程中直接和网关进行数据传输,终端和网关可以不用一直处于工作状态模式,在不传输数据时系统会进入到休眠状态,从而很大程度上降低了传输功耗。③可靠性强:LoRa 具有扩频模块,该模块抗外界环境

干扰能力强。即使在通信过程中受到其他链路的影响，星型网络架构会增加数据传输的稳定性。④系统简单：星形网络拓扑结构单一，可以很大程度上减少模块开销和维护的成本，通信过程中出现问题时也能快速找到问题所在的地方并且进行解决。

（二）电池寿命

LoRa 网络中的终端与网关之间工作状态可以不一样。在蜂窝网络等同步网络中，终端在不需要传输数据的情况下还需要和网关进行同步，从而被唤醒。同步工作方式需要许多能量来维持设备的正常运行，这也是降低电池使用寿命的重要因素。网关和终端之间的工作状态不同步，有效增加了数据传输过程中所要使用的电池寿命。

（三）成本和市场推广方面

LoRa 通信模块成本设计经费低。目前 LoRa 在全球多个国家试点或运营部署。在我国，LoRa 正在多范围地进行推广，具有代表性的就是京杭大运河，LoRa 基站覆盖了大部分流域。从长时间发展来看，部分企业会考虑到企业数据信息安全和运营成本等因素，会在运营商网络之外独立部署私有物联网进行通信，因此 LoRa 在未来会有广阔应用前景。

三、LoRa 性能分析相关参数

（一）扩频通信技术

无线通信技术用模拟信号传输信息。在无线通信技术中，电磁波是连续模拟信号传输数据的载体，发送和传输模拟信号才能对调制信号数据进行通信。数字数据调制成模拟信号使用最广泛的方法包括频移键控、幅移键控和相移键控等。LoRa 是采用扩频技术进行通信和上述通信方式中的调制技术是不同的。遮挡物的存在会让数据在无线传输过程中出现反射、散射和衍射等问题，对于无线数据传输技术的一个难题就是处理不同传输路径导致的多径衰退。

扩频通信技术也被称为扩展频谱通信方式，LoRa 采用这种通信方式进行数据传输。扩频技术最早应用在军事和太空通信领域中，后来才大规模应用在民用领域中。它的特点是传输数据本身所需要的带宽要多于传输数据本身所需要的最小带宽。即使解调环境中存在的噪声很多，扩频通信技术对数据传输的隐蔽性明显强于其他无线数据传输方式，对噪声的抗干扰能力更强。

扩频简单来说就是将数据传输频谱分散到更宽的带宽中,使数据占满整个带宽。香农在研究的信息论领域中,根据最大信息传输速率与带宽、信噪比的关系总结出的信道容量公式如式所示,即香农公式:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

式中, B —频带的带宽 (Hz);

S —有用信号功率 (dbm);

N —噪声功率 (dbm);

C —最大信息传送速率 (bps);

S/N —信噪比 (dB)。

通过上述公式可知,带宽与信噪比的比值是决定最大信息传输速率的主要因素。当最大信息传送速率保持固定不变时,频带的带宽和信噪比之间成反比,也就是说随着频带的增大信噪比会减小。因此在扩频技术通信中,为提升接收数据的信噪比可以增大传输信号的频带带宽。在特定情况下,噪声功率在接近数据有用信号功率或者大于有用功率时,信号也不会被淹没,接收设备同样能准确发现信道中的有用信号,从而明显增加了接收信号的准确性和灵敏性,进而提升了通信的性能。

LoRa 正是对初始信号通过扩频调制技术,设定扩频编码从而拓宽信号传输带宽实现扩频通信。扩频技术的优势具体体现在:

1. 抗干扰强

这是扩频通信技术所具有的重要优势之一。扩频编码不同数据通信之间互不影响,按照相应的扩频编码技术对通信设备接收到数据信号进行解调,因此在不清楚其他信号扩频编码的前提下,干扰通信是产生不了作用的。

2. 隐蔽性好

因为将数据拓宽到很广的频带中进行传输,从而降低数据传输的频谱密度,白噪声会淹没信号,外界截取信号难度大。

3. 抗多径干扰

在室内或者移动等有障碍物阻挡环境下,多径干扰问题时常存在着。扩频通信技术就是利用技术特性来解决多径干扰问题,甚至系统的信号强度和稳定性可以利用多径产生的能量来提高。

4. 增加灵敏

随着频带的扩宽,信噪比会更高,也就具有更高的灵敏度。

(二) 扩频因子

在 LoRa 扩频调制技术中,利用多个信息码片(chip)来代表负载信息的每一个比特位。调制技术扩宽了发送信息的比特数,把原有数据中的比特信息转变成信息码片进行表示。

采用 LPWAN 技术构建 LoRa 通信方案主要包括两部分,一部分是基于 chirp 扩频调制方案,另一部分是 LoRa 网络协议 chirp 扩频调制利用线性调频脉冲进行调制。该脉冲信号是服从正弦变化,其频率根据时间线性增大或线性降低[46]。对于 LoRa 通信技术来说,chirp 调制应用在每一个信号中,即每个信号都符合正弦变化的规律,频率根据时间会发生周期性变化。在 LoRa 信号持续周期内,LoRa 信号的频率从某一个初始频率开始上升直到上升到最高点,然后再下降到最低,再接着上升,从而产生周期性变化。

LoRa 扩频因子代表着每个比特位发送的符号数量。在数据传输带宽固定不变的前提下,增大扩频因子会导致数据传输时间增长,即降低了数据传输速率。扩频因子不同的数据之间不会进行干扰,同一频率的信道中,配置不同的扩频因子能够同时发送多组扩频信号,并且通信性能不会降低。扩频因子的增加会增强数据接收的灵敏性延长数据通信距离。所以,LoRa 通信支持可变或自适应速率进行数据传输,在带宽保持不变的同时,能够均衡覆盖范围、稳定性和功耗之间的关系。随着扩频因子值的越大,扩频技术将数据扩展的码片位数也会越多,数据发送速率就会降低,因此需要选取合适的扩频因子对硬件进行配置。

(三) 发射功率

发射功率(Power)表示网关发送数据所需要的功率大小,是指在给定频段范围内的能量大小。发射功率有两种衡量标准,分别为功率(P)和增益(dbm),两者转换公式为下式。LoRa 发射功率可以在硬件配置自主设定,在这里发射功率以增益为衡量标准,设定为 0dbm、5dbm、10dbm、15dbm 和 20dbm 五种值。

$$dbm = 30 + 10 \lg P$$

式中, P —功率(W);

dbm 增益(dbm)。

（四）数据包格式

LoRa 数据包格式中可以看出主要包含三个组成部分：前导码、可选报头、有效数据负载。采用调制解调器进行数据传输时，可以设定为显性或隐性数据包格式。

保持接收到的数据包和输入数据流同步是前导码的主要作用。前导码长度是可扩展的，可以通过编程来进行设置，其默认长度为 12 位。报头依据具体情况来选择设定模式，默认情况下在显式报头模式下对数据进行操作。在显示模式下，有效负载的长度保持不变，其实际数据长度和编码率都是根据报头来设定的。在隐式方式中，根据寄存器的设置指定缩短前导码长度。通常数据传输环境中，前导码设定为六位就可以满足通信需要。在传输数据时，接收设备需要检测前导码是否一致，所以发送设备和接收设备的前导码长度应该保持相同。

报头的主要内容包括有效数据负载的相关信息，包括是否采用循环冗余校验（CRC）校验、前向纠错码率和有效负载长度。如果有效负载长度、编码率及 CRC 在设定过程中保持固定不变，可以将数据包设定成隐性报头模式进行数据发送从而减少传输时间。

有效负载就是传输数据的实际长度，可以根据具体需要进行设置因此不固定。显性模式下，根据报头来设置有效负载和纠错编码率。隐性模式下，通过寄存器来设置。针对有效负载来设置 CRC 校验码，从而来判定是否需要进行校验。

（五）编码率

编码率（CR）是整体数据中有效数据信息在整体中占的比值。在 LoRa 通信技术中，前向纠错可以在传输的信息中增加循环纠错编码来实现，从而增加通信系统的鲁棒性。但是利用这种编码技术会加大数据传输占用消耗，降低数据传输速率。LoRa 硬件可以配置四种不同的编码率，从而选取合适参数使得通信效率达到最高。

（六）信噪比

信噪比（SNR）是描述信号中有效信息与噪声的比例关系参数，是评估数据传输质量的重要指标之一。LoRa 性能分析中，SNR 作为接收数据信号质量性能指标，可以通过分析评估出接收数据中噪声多少。其中 SNR 的计算方式为如下式所示：

$$SNR = \frac{S}{N}$$

式中, S —信道输出端的信号平均功率 (dbm);

N —信道输出端的信号噪声平均功率 (dbm);

SNR —信噪比 (dB)。

通过信噪比的计算公式, 可以看出 SNR 越大表示信道中传输的信号越多, 噪声越少; SNR 越小表示信道中传输的信号越少, 噪声越多。噪声增多会降低数据传输质量。因此为达到较高的 LoRa 通信性能, 在通信中接收到的数据要具有较高的 SNR 值, 减少噪声对数据传输质量的影响。在本文中接收到的每条数据都具有信噪比这一项的具体数值, 不需要再通过公式进行计算, 从而方便了数据处理的速度和准确性。

四、LoRa 物联网测试系统总体架构

根据物联网设计总体架构, LoRa 的性能测试系统划分为感知层、网络层、应用层三部分。感知层主要布置的是终端, 用来发送测试数据。通过在测试环境对硬件进行布置, LoRa 终端按照不同种类的硬件配置组合, 周期性地对网关发送固定数量的数据, 然后将数据通过网络上传到服务器中。服务器收到数据后会将数据存储在数据库中。应用层可以通过浏览器界面调用服务器端口把当前接收到数据进行可视化展示, 并实现对硬件进行具体参数配置等操作。

感知层位于整个总体架构的底层, 为达到测试 LoRa 性能和建立硬件配参数之间准确的关系的目的, 本测试系统只是由单个 LoRa 终端和单个 LoRa 网关组成。其中, LoRa 终端和网关均设计采用 SX1278 无线通信模块, 它具有通信距离远、低功耗、抗干扰性强等特点, 适用于自主设定的低功耗广域网。LoRa 终端周期性发送测试数据, 网关通过无线网络接收到相应数据, 从而实现对测试数据的采集。

网络层负责接收感知层发来的数据。网络层的主要设备是网关, 也是连接终端与服务器的的重要组成部分, 实现 LoRa 网络协议和不同类型通信协议之间的转换。网关不仅需要接收不同硬件配置参数下终端发来的数据, 实现数据的收集, 而且还要接收服务器发送的指令, 向终端发送改变配置参数、测试开始和结束等一系列控制命令。

应用层包括网络服务器和连接服务器的电脑。应用层实现了数据管理、数据存储和控制硬件等功能。连接服务器的电脑设备通过调用服务器端口可以实现对

硬件的参数配置和实时动态显示网关当前接收到数据的具体参数，为 LoRa 测试提供了有价值的信息，遇到突发情况时可及时发现和处理，为 LoRa 测试提供了一个实时性好，交互性强的管理界面。

通过上述三部分的协同运行，为 LoRa 测试提供了可行性和便利，从而为后续 LoRa 性能分析奠定了基础。

第九章 电力通信网络技术

第一节 电力通信网络技术概述

一、电力线载波通信

电力线载波通信 (PLCC) 是利用高压输电线作为传输通路的载波通信方式, 用于电力系统的调度通信、远动、保护、生产指挥、行政业务通信及各种信号传输。电力线路是为输送 50Hz 强电设计的, 线路衰减小, 机械强度高, 传输可靠, 电力线载波通信复用电力线路进行通信不需要通信线路建设的基建投资和日常维护费用, 是电力系统特有的通信方式。

二、光纤通信

光纤通信是以光波为载波, 以光纤为传输媒介的一种通信方式。在我国电力通信领域普遍使用电力特种光缆, 主要包括全介质自承式光缆 (ADSS)、架空地线复合光缆 (PGW)、缠绕式光缆 (GWWOP)。电力特种光缆是适应电力系统特殊的应用环境而发展起来的一种架空光缆体系, 它将光缆技术和输电线技术相结合, 架设在 10 ~ 500kV 不同电压等级的电力杆塔和输电线路, 具有高可靠、长寿命等突出优点。

三、微波通信

微波通信是指利用微波 (射频) 作载波携带信息, 通过无线电波进行空间中继 (接力) 的通信方式。常用微波通信的频率范围为 1 ~ 40GHz。微波按直线传播, 若要进行远程通信, 则需在高山、铁塔或高层建筑物顶上安装微波转发设备进行中继通信。

四、卫星通信

卫星通信是在微波中继通信的基础上发展起来的, 它是利用人造地球卫星作

为中继站来转发无线电波，从而进行两个或多个地面站之间的通信。卫星通信主要用于解决国家电网公司至边远地区的通信。

五、移动通信

移动通信是指通信的双方中至少有一方是在移动中进行信息交换的通信方式。作为电力通信网的补充和延伸，移动通信在电力线维护、事故抢修、行政管理等方面发挥着积极的作用。

六、现代交换方式

现代交换方式包括电路交换、分组交换、ATM 异步传送模式、帧中继和多协议标记交换（MPLS）技术。电路交换和分组交换是两种不同的交换方式，是代表两大范畴的传送模式，帧中继和 ATM 异步传送模式则属于快速分组交换的范畴。

电路交换是固定分配带宽的，连接建立后，即使无信息传送也需占用电路，电路利用率低；要预先建立连接，有一定的连接建立时延，通路建立后可实时传送信息，传输时延一般可以不计；无差错控制措施。因此，电路交换适合于电话交换、文件传送及高速传真，不适合突发业务和对差错敏感的数据业务。

分组交换是一种存储转发的交换方式，它将需要传送的信息划分为一定长度的包，也称为分组，以分组为单位进行存储转发。而每个分组信息都包含源地址和目的地址的标识，在传送数据分组之前，必须首先建立虚电路，然后依序传送。在分组交换网中，在一条实际的电路上能够传输许多对用户终端间的数据，其基本原理是把一条电路分成若干条逻辑信道，对每一条逻辑信道有一个编号，称为逻辑信道号，将两个用户终端之间的若干段逻辑信道经交换机链接起来构成虚电路。分组交换最基本的思想就是实现通信资源的共享。分组交换最适合数据通信。数据通信网几乎全部采用分组交换。

快速分组交换为简化协议，只具有核心的网络功能，以提供高速、高吞吐量和低时延服务。

帧中继（FR）技术是在 OSI 第二层上用简化的方法传送和交换数据单元的一种技术。

异步传送模式（ATM）是电信网络发展的一个重要技术，是为解决远程通信

时兼容电路交换和分组交换而设计的技术体系。

MPLS 技术是一种新兴的路由交换技术。MPLS 技术是结合二层交换和三层路由的 L2/L3 集成数据传输技术, 不仅支持网络层的多种协议, 还可以兼容第二层上的多种链路层技术。采用 MPLS 技术的 IP 路由器以及 ATM、FR 交换机统称为标记交换路由器 (LSR), 使用 LSR 的网络相对简化了网络层复杂度, 兼容现有的主流网络技术, 降低了网络升级的成本。此外, 业界还普遍看好用 MPLS 提供 VPN 服务, 实现负载均衡的网络流量工程。

七、现代通信网

现代通信网按功能可以划分为传输网、支撑网。

支撑网是使业务网正常运行, 增强网络功能, 提供全网服务质量, 以满足用户要求的网络。在各个支撑网中传送相应的控制、检测信号。支撑网包括信令网、同步网和电信管理网。

信令网是指在采用公共信道信令系统之后, 除原有的用户业务之外, 还有一个起支撑作用的、专门传送信令的网络—信令网的功能是实现网络节点 (包括交换局、网络管理中心等) 间信令的传输和转接。

同步网是指实现数字传输后, 在数字交换局之间、数字交换局和传输设备之间均需要实现信号时钟的同步。同步网的功能就是实现这些设备之间的信号时钟同步。

电信管理网是为提高全网质量和充分利用网络设备而设置的。网络管理实时或近实时地监视电信网络的运行, 必要时采取控制措施, 以便在任何情况下最大限度地使用网络中一切可以利用的设备, 使尽可能多的通信业务得以实现。

八、接入网

接入网是由业务节点接口和用户网络接口之间的一系列传送实体 (如线路设施和传输设施) 组成的、为传送电信业务提供所需传送承载能力的实施系统, 可经由 Q3 接口进行配置与管理。接入的传输媒体可以是多种多样的, 可灵活支持混合的、不同的接入类型和业务。G.963 规定, 接入网作为本地交换机与用户端设备之间的实施系统, 可以部分或全部代替传统的用户本地线路网, 可含复用、交叉连接和传输功能。

通信技术与计算机技术、控制^{^^}术、数字信号处理技术等相结合是现代通信技术的典型标志。随着电力系统信息化的兴起,电力系统通信技术的发展趋势可概括为数字化、综合化、宽带化、智能化和个人化。电力系统通信技术大发展时代已经开始。

第二节 电力通信同步网

国家电力通信网已逐渐由模拟通信转为数字通信。为了适应当前电力系统通信发展的需要,利于在网上开通各种新的业务,如 SDH、智能业务、ISDN 业务、多媒体业务等必须解决网同步问题。这就促使我们尽快建立一个全国性的、准确度高、性能良好、稳定可靠的数字同步网。由于它对保证通信网正常运行起着重要作用,因此,人们常把它与电信管理网、七号信令网并称为通信系统的三大支撑网。其实同步网与后两者相比是最基础的部分,如果没有网同步的环境,网络管理信息、七号信令数据都无法正常传送。

一、基本概念

在数字通信网络中,传输链路和交换节点上流通及处理的均为数字的信号比特流,为实现它们之间的相互连接,并能协调地工作,就必须要求其所处理的数字信号都具有相同的时钟频率。所以,数字同步就是使网中的数字设施的时钟源同步。作为电力通信网的一个重要组成部分,数字同步网能够生成高精度的同步信号并准确地将同步信号从基准时钟源向同步网各同步节点传递,从而调节同步网中的时钟以建立并保持同步,满足电力通信网传递业务信息所需的传输和交换性能要求,这是保证网络定时性能的关键。

二、数字通信网实现同步的必要性

我国运行中的通信网基本已经数字化,即传输和交换都是数字设备。通信网使用的时分多路复用传输系统主要有准同步数字系列(PDH)和同步数字系列(SDH)。PDH 复用逐级进行,因为被复接的支路信号可能来自不同方向,各支路信号的码率和到达时间不可能完全相同。因此,在复接前各支路的码率应相等,且划分比特流段落的帧同步码应对齐,即频率和帧同步均码要同步。为此,

PDH 采用码速调整技术。

SDH 可进行整套同步数字传输。复用和交叉连接为标准化数字传送结构等级,其同步传送模块(STM-1)是基本信息结构,由信息净负荷、段开销及管理单元指针组成。在 SDH 系统内,各网元(如复用器)间的频率差是靠调节指针值来修正的,即使用指针调整技术,解决节点之间时钟差异带来的问题。指针调节是把净负荷起始点向前或向后移动与帧相关的字节。因为 SDH 以字节为单位进行复接,所以,指针进行调节也是以字节为单位。一次指针调节引起的抖动可能不超过网络接口所规定的指标,一旦指针调节的速率不能控制,而使抖动频繁出现和积累,并超过网络接口抖动的规定指标时,将引起净负荷出现错误。因此,在 SDH 系统的网元内,时钟也应保持同步,并纳入数字同步网。

SDH 设备在正常工作时,有几种同步时钟源作为跟踪的参考基准:内部时钟源、接口板时钟源、由线路板信号和支路板信号提供的同步时钟基准。外部时钟源由外部同步源设备(如 BITS)提供同步时钟基准,由外部时钟接口引入。类型是 2 Mb/s 或 2 MHz 的外部时钟定时信号,同时还能向外部时钟输出口输出两路 2 Mb/s 或 2 MHz 的定时信号。在 SDH 传输过程中,子网元设备由于 2 Mb/s 信号传输距离长,有同步状态信息功能,因此,应优选 2 Mb/s 信号。在干线 SDH 传输系统中,为了保证传输系统的高稳定性,采用两路时钟信号作为时钟源,其中一路采用高级别的原子钟,另一路采用主站内部震荡模式,传输系统子站从线路侧取子站两路时钟互为备份。其保护原理为当两路时钟基准源于不同时钟源时,时钟的质量可能有些差异,因此使用同步状态消息(SSM)作为定时质量标记方法,以便选取最高质量的时钟源作为网络同步的时钟源。

数字交换设备通过数字信号中的时隙交换来完成时隙的重新安排。在信号进入交换网络之前,需具备以下时隙交换条件:①参加交换的数字信号帧要在时间上对齐,即与各路信号帧同步;②各路信号的码率要以交换设备的时钟速率为准,转换成相同的码率,使时隙具有相同的速率,才能准确无误地进行时隙交换。

参与交换的信号可能来自不同的交换节点和传输设备,到达时间不可能完全相同,信号码率与本地时钟可能不同步,需进行帧同步和比特同步。如外来信号与设备内时钟频率有差异,在比特同步时将产生滑动。滑动会使信号受到损伤,影响通信质量。若频差过大,则可能使信号产生严重错误,甚至会使通信中断。

三、同步网同步方式

数字同步网的同步方式主要有：主从同步方式、互同步方式、准同步方式、混合同步方式。

（一）主从同步方式

主从同步方式是指在同步网内设置一系列的等级时钟，最高级的时钟称为基准主时钟，上一级时钟和下一级时钟形成主从关系，即主时钟向其从时钟提供定时信号，从时钟从主时钟提取信号频率。在主从同步网中，基准主时钟的定时信号由上级主时钟向下级从时钟逐级传送，各从时钟直接从其上级时钟获取唯一的同步信号。通过使用锁相环技术，使从时钟的相位与定时基准信号的相位保持在一定的范围内，从而使节点从时钟与基准主时钟同步。主从同步的优点是从时钟频率精度性能要求较低，控制简单，适合于树型结构和星型结构，组网灵活，稳定性好等。缺点是对基准时钟的依赖较大，因此需要采用基准时钟备份等措施；同步信号多级传递后，由于链路引起的抖动、漂移不可避免，因此同步范围受到限制（一般规定基准时钟的频率信号逐级传送的节点数应小于 20 跳）；在规划同步传输链路时要避免定时环路。

（二）互同步方式

互同步方式是指同步网内各个节点接收与其相连的其他节点时钟送来的定时信号，并对所有接收到的定时信号频率进行加权平均，以此来调整自身频率，从而将所有的时钟都调整到一个稳定、统一的系统频率上。但由于网络系统复杂，因此网络稳态频率不确定且易受外界因素的影响。

（三）准同步方式

准同步方式是指在网内各个节点上都设立高精度的独立时钟，这些时钟具有统一的标称频率和频率容差，各时钟独立运行，互不控制。虽然各个时钟的频率不可能绝对相等，但由于频率精度足够高，频差较小，产生的滑动可以满足指标要求。准同步方式的优点是简单、灵活；缺点是对时钟性能要求高，成本高，同时存在周期性的滑动。

（四）混合同步方式

混合同步方式是指将全网划分为若干个同步区，各同步区内采用主从同步方式，即在每个区域内设置一个主基准时钟，本区域内其他节点时钟与区域主基准

时钟同步，各同步区域主基准时钟之间则采用准同步方式。这种混合同步方式可以减少时钟级数，使传输链路定时信号传送距离缩短，改善同步网性能。当同步区内采用精度高的主基准时钟时，可减少同步链路的周期性滑动，满足定时指标要求，网络可靠性更高。

四、同步网建网原则与时钟选择

（一）建网基本原则

组建时钟同步网的基本原则可归纳为以下 5 条：①网内应避免定时环路的出现，若出现定时环路，则所有的时钟都将与基准时钟隔离，网络有可能短时失去同步，使通信中断，造成损失。另外，出现定时环路后，即便不出现短时失步问题，也会由于定时参考信号的反馈作用，使时钟频率出现不稳定，从而导致定时信号恶化。②各级从站的从钟，应从不同的路由获取自己的主、备用基准信号，这样做的目的也是为了防止定时环路的出现。③各级从站的从钟，其主、备用基准信号，可以从其高一级的时钟设备中获取，也可以从其同级时钟设备中获取。④应尽量减少定时链路内介入时钟的数量，否则会影响同步性能。⑤为了提高传达同步基准时钟信号的可靠性，应选择可用性最高的传输系统，并尽量缩短定时链路长度。

（二）基准时钟选择

实际中使用的时钟类型一般有以下 3 种：

1. 铯原子钟

其长期频率稳定度和准确度都很高，一般不低于 1×10^{-12} s。因此，可把它作为全网同步最高等级的基准时钟。但它的缺点是短期稳定度不够理想，可靠性也较差，而且其无故障时间不会超过 3 年。为了克服这一缺点，基准中心应配备多重备用，并应具有自动倒换的功能。

2. 恒温下的石英晶振

其短期频率稳定度可达 10-10s/d，可靠性也较高，并且其价格相对低廉，频率稳定范围也宽；缺点是长期稳定度不够好。由此可见，石英晶振与铯原子钟的特性正好相反，两者可互补。高稳定度的石英晶振通常被用作下级局级的从时钟标准。

3. 铷原子钟

其频率稳定度及价格等方面，均介于上述两种时钟之间，并且其频率可调范

围还优于铯原子钟。因此，可将其用作同步区内的基准时钟。

除了上述 3 种可供选用的时钟外，全球定位系统（GPS）也可作为基准时钟使用。GPS 导航卫星在离地面约 20000km 的近圆轨道上运行，其安装有频率稳定度高达 1×10^{-13} s 的原子钟，并以两种频道向地面发射，可供使用。然而 GPS 非国内设施，由他人控制。故在考虑地面时钟设施时，可采用铷原子钟或者晶振和 GPS 接收机联合作为基准时钟使用。正常情况下，铷原子钟以主从同步的方式锁定在所接收到的 GPS 提供的高精度频率信号上，一旦接收失败，则高稳定度的铷原子钟或者晶振仍可在短时间内维持同步网正常工作。对基准时钟的特性通常可用两个指标进行检测：其一，最大时间间隔误差，它用来表征时钟的漂移特性，这一指标可以对时钟长期频率稳准度进行考察；其二，时间偏差，它用来表征时钟抖动等特性，该指标可以用来考察时钟短期频率稳准度。

五、省级电力通信网

全网的频率同步是保证网络性能和服务质量的关键，尤其是基于电路交换的网络。此前，在组建电力系统通信网的过程中，曾忽略对时钟的要求，目前，在下一代网络中，仍需高质量的频率同步。为了保证各级通信设备在时间上的高稳定度，在建设通信网的初期应该考虑以下问题：该时钟能跟踪 GPS 及地面参考源和北斗卫星，互为备份；能够组建时间同步网，可以跟踪上级时间同步节点的时间源，也可以向下级时间同步节点分发时间；支持时间时延的自动补偿功能；能够纳入网管中心统一管理和维护；具有丰富的时间同步接口和较高的端口密度；内置光收发模块，通信机房和保护室之间通过光纤组网，且时延可自动补偿。

省级电力通信网的飞速发展，作为其重要支撑的同步网也相继建立，包括频率同步网及时间同步网。省级电力通信网的频率同步网和时间同步网目前均已处在运行状态，但在组网建设上仍存在着许多不足，在资源利用率以及网络优化上的问题都亟待解决。省级电力通信网的频率同步网在中调上设置 GPS 接收机以及基准时钟，在各地调上则建有大楼综合定时系统（BITS）以及地面时钟，而时间同步网则建设在中调、地调和变电站，利用 GPS 设备以及时间分配器。频率同步网采用的是 SDH 网络进行同步信号传输，拥有安全稳定的地面链路。因此在 GPS 无法工作的情况下，整个网络也可以凭借中调的基准时钟通过地面传输定时信号稳定运行。而时间同步网则采用孤立的 GPS 准同步方式，若 GPS 发

生故障，时间同步便遭到严重破坏。

省级调度数据网采用路由器及 MPLS 技术分三层建设，以信通公司为中心的五个节点组成核心层，其余地市局节点构成网络的汇聚层，500kV 站和直调电厂组成接入层。分布在各地区的设备采集信息后，依次通过接入层、汇聚层和核心层将数据信息传输到信通中心。

但随着数据网的发展，新站点与新业务不断加入其中，调度数据网需要在网络链路结构上进行改进，并在重要链路带宽上进行升级。调度数据网新增一些汇聚层设备，满足汇聚比要求，在核心层采用基于波分的光传送网（OTN）技术，汇聚接入层面采用分组传送网（PTN）技术。OTN 具有大容量交换和路由能力，可以处理大颗粒业务，以便更好地满足新业务对带宽的需求。

调度数据网将是一个复杂分层大网络，随着新节点的不断加入，设备分布分散化程度增加，若采用 GPS 进行时间同步，会带来很大的建设负担。且在 GPS 失效情况下，各时钟独立工作，但由于时钟数量巨多，时钟同步质量存在差异，会导致产生明显的时间偏差，影响同步精度。因此，根据未来通信网的规划，时间同步网的建设需要摆脱单纯对 GPS 的依赖，建设地面同步网络来达到对更大规模通信网的同步需求。

以电力 SDH 传输网为例，在电力通信的干线传输网和市区 SDH 传输网上，采用冗余的主从同步方式，即在地区调度中心放置 1 台带冗余时间同步设备（带 GPS 校正的铷原子时钟），其功能为跟踪 GPS 或者北斗卫星的时钟，中心站通过协议将 DCLS 时间码承载到传输网作为主时钟，电厂和变电站的传输从中心站主时钟上取线路侧时钟；调度中心的中心站 SDH 网元内部振荡的时间作为中心站主用时钟备份；时间在传输网上的时延按照原理可以在接收端自动补偿。当卫星不可用时，将主用时间源 GPS 或者北斗卫星切换到备用时间源上，避免进入守时状态，站点安装有精度相对较 GPS 校正原子钟低一级别的二级 GPS 时钟作为其中心站主时钟，传输中心站 SDH 设备选用内部振荡模式作为备用时钟。

第三节 电力通信接入网

一、电力通信接入网概述

接入网是整个电信网的一部分。其中,传输网目前已实现了数字化和光纤化,交换网也已实现了数字化和程控化,而以铜线结构为主,被称为“最后一公里”的用户接入网发展缓慢,直接影响了电信网的容量、速度和质量,成为制约全网发展的瓶颈。因此,接入网的数字化和宽带化受到通信业的极大关注。

(一) 电力通信接入网的产生

早期,用户终端设备到局端交换机由用户环路(又称用户线)连接,主要由不同规格的铜线电缆组成。随着社会的发展,用户对业务的需求由单一的模拟话音业务逐步转向包括数据、图像和视频在内的多媒体综合数字业务。由于受传输损耗、带宽和噪声等的影响,这种由传统铜线组成的简单用户环路已不能适应当前网络发展和用户业务发展的需要,在这种新形势下,各种以接入综合业务为目标的新技术、新思路不断涌现,这些技术的引入增强了传统用户环路的功能,也使之变得更加复杂。用户环路逐渐失去了原来点到点的线路特征,开始表现出交叉连接、复用、传输和管理网的特征。基于电信网的这种发展演变趋势,ITU正式提出了用户接入网(AN)的概念,其结构、功能、接入类型和管理功能等。用户驻地网(CPN)指用户终端到用户网络接口(UNI)之间所包含的机线设备,是属于用户自己的网络,在规模、终端数量和业务需求方面差异很大,CPN可以大到公司、企业、大学校园,由局域网络的所有设备组成,也可以小到普通民宅,仅由一对普通电话机和一对双绞线组成。核心网包含了交换网和传输网的功能,或者说包含了传输网和中继网的功能。接入网则包含了核心网和用户驻地网之间的所有设施与线路,主要完成交叉连接、复用和传输功能,一般不包括交换功能。

综上所述,接入网已经从功能和概念上代替了传统的用户环路,成为电信网的重要组成部分,其技术发展必将给整个网络的发展带来巨大影响。接入网的投资比重占整个电信网的50%左右,具有广阔的市场应用前景。

(二) 电力通信接入网的定义与边界

二十世纪九十年代中期,将对接入网定义为:接入网是由业务节点接口(SNI)和用户网络接口之间的一系列传送实体(如线路设施和传输设施)组成的,为传

送电信业务提供所需传送承载能力的实施系统，可由管理接口进行配置与管理。

（三）电力通信接入网的接口

接入网作为一种公共设施，其最大功能和最大特点是能够支持多种不同的业务类型，以满足不同用户的多样化要求。根据电信网的发展趋势，接入网承载的接入业务类型主要有本地交换业务、租用线业务、广播模拟或数字视音频业务、按需分配的数字视频和音频业务等几种。而从另一个角度来说，接入网的业务又可分为话音、数据、图像通信和多媒体类型。不管采用哪一种分类方法，接入网所能提供的业务类型都与用户需求、传输技术和网络结构有着密切的关系，需要经历一个由单一的窄带普通电话业务到数据、视频等宽带综合性业务的发展过程，其传输媒质也由单一的一对铜线发展为同轴、光纤和无线等多种传输媒质。

将上述多种类型的业务接入核心网需要相应类型接口的支持。接入网主要有三类接口，即用户网络接口、业务节点接口和维护管理接口。

（四）电力通信接入网的功能结构

接入网有 5 个基本功能，分别是用户口功能（UPF）、业务口功能（SPF）、核心功能（CF）、传送功能（TF）和 AN 系统管理功能（SMF）。

UPF 是将特定的 UNI 要求与核心功能和管理功能相匹配。SPF 是将特定 SNI 规约的要求与公用承载通路相适配，以便核心功能处理，同时负责选择收集有关信息，以便系统管理功能处理。CF 处于 UPF 和 SPF 之间，其主要作用是将个别用户口通路承载要求或业务口承载通路要求与公共承载通路适配，还负责对协议承载通路的处理。TF 的主要作用是为接入网中不同地点之间公用承载通路的传送提供通道，同时也为所用传输媒质提供适配功能。接入网系统管理功能对其他 4 个功能进行管理，如配置、运行、维护等，同时也负责协调用户终端（通过 UNI）和业务点（通过 SNI）的操作功能。

（五）电力通信接入网的特点

由于电信网中的位置和功能不同，接入网与核心网有着非常明显的差别。接入网主要有以下特点：①具备复用、交叉连接和传输功能，一般不含交换功能。接入网主要完成复用、交叉连接和传输功能，一般不具备交换功能，提供开放的 V5 标准接口，可实现与任何种类的交换设备的连接。②接入业务种类多，业务量密度低。接入网的业务需求种类繁多，除了接入交换业务外，还可接入数据业务、视频业务以及租用业务等，但是与核心网相比，其业务量密度很低，经济效

益差。③网径大小不一，成本与用户有关。接入网只是负责在本地交换机和用户驻地网之间建立连接，但是由于覆盖的各用户所在位置不同，造成接入网的网径大小不一，例如市区的住宅用户可能只需 $1 \sim 2\text{km}$ 长的接入线，而偏远地区的用户可能需要十几千米的接入线，成本相差很大。而对核心网来说，每个用户需要分担的成本十分接近。④线路施工难度大，设备运行环境恶劣。接入网的网络结构与用户所处的实际地形有关，一般线路沿街道铺设，铺设时经常需要在街道上挖掘管道，施工难度较大，另外接入网的设备通常放置于室外，要经受自然环境和人为的破坏，这对设备提出了更高的要求。⑤网络拓扑结构多样，组网能力强大。接入网的网络拓扑结构具有总线型、环型、星型、链型、树型等多种形式，可以根据实际情况进行灵活多样的组网配置。其中，环型结构可带分支，并具有自愈功能，优点较为突出。在具体应用时，应根据实际情况有针对性地选择网络拓扑结构。

（六）电力通信接入网的技术分类

接入网研究的重点是围绕用户对话音、数据和视频等多媒体业务需求的不断增长，提供具有经济优势和技术优势的接入技术，满足用户需求。就目前的技术研究现状而言，接入网主要分为有线接入网和无线接入网。有线接入网包括铜线接入网、光纤接入网和混合光纤同轴电缆接入网；无线接入网包括固定无线接入网和移动接入网。此外，接入网还有以太网接入、卫星 Internet 接入及新兴的电力线接入。各种方式的具体实现技术多种多样，特色各异。有线接入主要采取如下措施：一是在原有铜质导线的基础上通过采用先进的数字信号处理技术来提高双绞铜线对的传输容量，提供多种业务的接入；二是以光纤为主，实现光纤到路边、光纤到大楼和光纤到家庭等多种形式的接入；三是在原有 CATV 的基础上，以光纤为主干传输，经同轴电缆分配给用户的光纤 / 同轴混合接入。无线接入技术主要采取固定接入和移动接入两种形式。另外，有线和无线结合的综合接入技术也在研究之列。由于光纤具有容量大、速率高、损耗小等优势，因此从长远来看光纤到户应该是接入网的最理想选择。但是，考虑到价格、技术等多方面的因素，接入网在未来很长时间内还将维持多种技术共存的局面。另外，随着因特网业务的迅速增长，传送以太网技术逐渐渗透到接入网领域，形成了以太网接入技术，它具有简单、低廉等特点，在近期内将会得到迅速发展。而利用 220V 低压电力线传输高速数据又被认为是提供“最后一公里”解决方案最具竞争力的技术之一。

二、铜线接入技术

（一）铜线接入技术概述

普通用户线由双绞铜线对构成,是为传送 300 ~ 3400Hz 的话音模拟信号设计的,采用 V.90 标准的话带调制器,它的上行速率是 33.6Kb/s,下行速率是 56Kb/s,这几乎接近了香浓定理所规定的电话线信道(话带)的理论容量,而这种速率远远不能满足宽带多媒体信息的传输需求。

由于 V 系列调制解调器占用的频带十分有限,只有 3400Hz,因此传输速率进一步提高的潜力不大。为适应对因特网接入的需求,要进一步提高传输速率,必须充分利用双绞铜线的频带,于是各种数字用户线(DSL)技术应运而生。最先出现的是窄带综合业务数字网(N-ISDN),它使用 2B1Q 的线路码,在一对双绞线上双工传送 160Kb/s 的码流,占用 80kHz 的频带,传输距离达 6km,如果使用更新、功能更强大的数字信号处理(DSP)技术,传输距离还可进一步增加。

为了适应新的形势和需要,出现了多种其他铜线宽带接入技术,即充分利用原有的铜线(电话用户线)这部分宝贵资源,采用各种高速调制和编码技术,实现宽带接入。这类铜线接入主要是 xDSL 技术,是数字用户线 DSL 技术基于普通电话线的宽带接入技术,它在同一铜线上分别传送数据和语音信号,数据信号并不通过电话交换机设备,减轻了电话交换机的负载;并且不需要拨号,一直在线,属于专线上网方式,这意味着使用 DSL 上网不需缴付另外的电话费。xDSL 中的“x”代表了各种数字用户线技术,包括 HDSL、ADSL、VDSL 等。DSL 技术主要用于 ISDN 的基本速率业务,在一对双绞线上获得全双工传输,因而它是最现实、最经济的宽带技术。

（二）速率数字用户线技术

速率数字用户线(HDSL)技术是一种上下行速率相同的 DSL,它在两对铜双绞线上的两个方面上均匀传送 1.544Mb/s 带宽的数据,若是使用三条双绞线时速度还可以提升到 E1(2.048Mb/s)的传输速率。HDSL 采用了高效的自适应线路均衡器和全双工回波抵消器,传输距离可达 3 ~ 5km。HDSL 的性能远好于传统的 T1、E1 载波设备,不需要中继,安装简单,维护方便。

HDSL 采用的编码类型为 2B1Q 码或 CAP 码,可以利用现有用户电话线缆中的两对来提供全双工的 T1/E1 信号传输,对于普通 0.4 ~ 0.6mm 线径的用户线

路来讲,传输距离可达 3 ~ 6km,如果线径更粗些,则传输距离可接近 10km。

由于采用回波抑制自适应均衡技术,增强了抗干扰能力,克服了码间干扰,可实现较长距离的无中继传输。HDSL 系统分别置于交换局端和用户端,系统由收发器、复用与映射部分以及 E1 接口电路组成。收发器包括发送与接收两部分,是 HDSL 系统的核心。发送部分将输入的 HDSL 单路码流通过线路编码转换,再经过 D/A 交换以及波形形成与处理,由发送放大器放大后送到外线。接收部分采用回波抵消器,将泄漏的部分发送信号与阻抗失配的反射信号进行回波抵消,再经均衡处理后恢复原始数据信号,通过线路解码变换为 HDSL 码流,然后送到复用与映射部分处理。其中,回波抵消器和均衡器作为系统自适应调整并跟踪外线特性变化,动态调整系统参数,以便优化系统传输性能。

HDSL/SDSL 技术广泛应用于 TDM 电信网络的接入上,也用于企业宽带上网应用中。其优点是双向对称,速率比较高。

(三) 非对称数字用户线技术

非对称数字用户线(ADSL)是一种非对称的宽带接入技术,即用户线的上行速率和下行速率不同,根据用户使用多种多媒体业务的特点,上行速率较低,下行速率则比较高,特别适合检索型网络业务。ADSL 典型的上行速率为 16 ~ 640Kb/s,下行速率为 1.544 ~ 8.192Mbit/s,传输距离为 3 ~ 6km。ADSL 带宽接入可以和普通电话业务共享同一条用户线。在实际应用中,ADSL 有选线率的问题,一般的选择率在 10% 左右。另外,ADSL 的速率随着线路长度的增加而减少。由于存在各种限制因素,因此,ADSL 的实际业务速率在下行 512Kb/s ~ 1Mb/s,上行约 64Kb/s。

ADSL 的核心技术实际上就是编码技术,目前我国使用的是基于离散多音(DMT)的复用编码技术。此外,常用的还有抑制载波幅度/相位(CAP)编码方式。相比较而言,DMT 技术具有很强的抗干扰能力,而且对线路依赖性小。DMT 将整个传输频带以 4kHz 为单位分为 25 个上行子通道和 249 个下行子通道。ADSL 中使用了调制技术,即采用频分多路复用(FDM)技术或回波抵消技术实现有效带宽的分隔,从而产生多路信道,而回波抵消技术还可以使上行频带与下行频带叠加,使频带得到复用,因此使带宽得以增加。此外,DMT 还可根据探测到的信噪比自动调整各个子通道的速率,使总体传输速度接近给定条件下的最高速度。

传统的电话系统使用的是铜线的低频（4kHz 以下频段）部分。而 ADSL 采用 DMT 技术，将原先电话线路 0Hz 到 1.1MHz 频段划分成 256 个频宽为 4.3kHz 的子频带。其中，4kHz 以下频段仍用于传送模拟电话业务（POTS），20kHz 到 138kHz 的频段用来传送上行信号，138kHz 到 1.1MHz 的频段用来传送下行信号。DMT 技术可根据线路的情况调整在每个信道上所调制的比特数，以便更充分地利用线路。一般来说，子信道的信噪比越大，在该信道上调制的比特数越多。如果某个子信道的信噪比很差，则弃之不用。因此，对于原先的电话信号而言，仍使用原先的频带，而基于 ADSL 的业务，使用的是话音以外的频带。所以，原先的电话业务不受任何影响。

（四）甚高速数字用户环路技术

高速数字用户环路（VDSL）是 ADSL 的快速版本。使用 VDSL，短距离内的最大下载速率可达 55Mb/s，上传速率可达 19.2Mb/s，甚至更高。VDSL 速率大小通常取决于传输线的长度，最大下行速率目前考虑为 51 ~ 55Mb/s，长度不超过 300m，13Mb/s 以下的速率可传输距离为 1.5 公里以上。VDSL 技术是 DSL 技术中速率最快的一种，在一对铜质双绞电话线上，下行数据的速率为 13 ~ 52Mb/s，上行数据的速率为 1.6 ~ 2.3Mb/s，但是 VDSL 的传输距离只在几百米以内，VDSL 可以成为光纤到家庭的具有高性价比的替代方案，虽然线路速率较 ADSL 高许多，但是线路长度较短，且应用环境较单纯，不像 ADSL 那样面对复杂的应用环境，因此实现起来较 ADSL 要简单一些，成本也相应会低一些。由于 VDSL 覆盖的范围比较广，能够覆盖足够的初始用户，初始投资少，便于设备集中管理，也便于系统扩展，因此，使用 VDSL 技术的解决方案是适合中国实际情况的宽带接入解决方案。高速铜线 / 缆接入是研究的一个热点，它以其优良的性能 / 价格比获得广泛的应用。

三、光纤接入网

（一）光纤接入网概述

尽管人们采取了多种改进措施来提高双绞铜线对的传输能力，最大限度保护现有投资，但是由于铜线本身存在频带窄、损耗大、维护费用高等固有缺陷，因此从长远角度看，各种铜线接入技术只是接入网发展过程中的过渡措施。而光纤具有频带宽、容量大、损耗小、不易受电磁干扰等突出优点，成为骨干网的主要

传输手段。随着技术的发展和光缆、光器件成本的下降,光纤技术将逐步得到更加广泛的应用。

光传送网(OTN)、光纤接入网(OAN)是以光纤作为主要传输媒质,实现接入网功能的技术。光纤容量大、速率高、损耗小,因此OAN具有带宽宽、传输质量好、不需要中继器、市场看好等优点。OAN包括光线路终端、光配线网、光网络单元和适配模块等。

接入网光纤化有很多方案,有光纤到路边、光纤到小区、光纤到办公楼、光纤到楼面、光纤到家庭等。采用光纤接入网是光纤通信发展的必然趋势,尽管目前各国发展光纤接入网的步伐各不相同,但光纤到家庭是公认的接入网发展目标。现阶段大规模实现FTTH还不经济,主要是实现FTTB/FTTC,目前可采用的传送技术手段以有源光纤接入(如PDH、ATM、SDH、GE/FE等)为主。但当无源光纤接入开始得到应用时,其必将成为FTTH的一种最经济有效的技术手段。

(二) 有源与无源光网络接入技术

光纤接入网可以粗分为有源光网络(AON)和无源光网络(PON)两类,前者采用电复用器分路,后者采用光分路器分路。

1. 有源光网络(AON)

有源光网络(AON)使用有源电复用设备代替无源光分路器,可延长传输距离,扩大光网络单元的数量。在AON中SDH技术应用较为普遍,在接入网中应用SDH技术,可以将SDH技术在核心网中的巨大带宽优势带入接入网领域,充分利用SDH在灵活性、可靠性以及网络运行、管理和维护方面的独特优势。但干线使用的机架式大容量SDH设备不是为接入网设计的,接入网中需要的SDH设备应是小型、低成本、易于安装和维护的,因此应采取一些简化措施,降低系统成本,提高传输效率。而且,光接入网的发展需要SDH的功能和接口尽可能靠近低带宽用户,使得低带宽用户能够以低于STM-1的Sub-STM.1或STM-0子速率接入,这就需要开发新的低速率接口。有源接入依然是目前光纤接入的主要手段。然而,这种技术作为有源设备仍然无法完全摆脱电磁干扰和雷电影响,以及有源设备固有的维护问题。尽管它在中近期会有所发展,但不是接入网的长远解决方案。

2. 无源光网络(PON)

无源光网络(PON)是一种很有吸引力的纯介质网络,其主要特点是避免了

有源设备的电磁干扰和雷电影响,减少了线路和外部设备的故障率,提高了系统可靠性,同时节省了维护成本。PON 由于简洁、廉价、可靠的网络拓扑结构,被普遍认为是宽带接入网的最终解决方案。

PON 技术是最新发展的点到多点的光纤接入技术。无源光网络由光线路终端、光网络单元和光分配网络组成。一般其下行采用时分复用(TTDM)广播方式,上行采用时分多址接入(TDMA)方式,而且可以灵活地组成树型、星型、总线型等拓扑结构(典型结构为树型)。PON 的本质特征就是光分配网络,全部由无源光器件组成,不包含任何有源电子器件,这样避免了外部设备的电磁干扰和雷电影响,减少了线路和外部设备的故障率,简化了供电配置和网管复杂度,提高了系统可靠性,同时节省了维护成本。与有源光接入技术相比,PON 由于消除了局端与用户端之间的有源设备,从而使维护简单、可靠性高、成本低,而且能节约光纤资源。目前 PON 技术主要有 APON(基于 ATM 的 PON)、EPON(基于以太网的 PON)和 GPON(Giga-bit PON)等几种,其主要差异在于采用了不同的二层技术。

APON 是基于 ATM 的无源光网络,即在 PON 上实现基于 ATM 信元的传输,可用于宽带综合业务接入。EPON 是无源光网络实现的以太网接入,它是在吉比特以太网大量涌现。

APON 兼有 ATM 和 PON 的特点,与传统窄带 PON 相比,具有很好的性价比;它以光纤为共享媒质,无有源器件,组网方式为树型,是点到多点的无源光分配网;作为纯介质网络,具有波长透明性;由于基于 ATM 的集中和统计复用技术,可服务于更多的用户;APON 还具有 ATM 的高速分组技术和 QoS 管理,有成熟的技术保证,能很好地与 ATM 主干段互通;APON 的标准化程度很高,使大规模生产和降低成本成为可能。但 APON 对视频传输带宽有限,标准不适合本地环。APON 作为分布式 ATM 接入复用器,可用于商用写字楼;作为综合业务接入网系统,可用于信息化小区;作为传输平台,可用于基站与中心站/基站集中器互联;作为数字回传平台,可实现 HFC 渗透。

EPON 上行为用户共享 10Gb/s 信道,下行可广播到各个数字网络单元。通道层用以太网来承载。EPON 兼有以太网和 PON 的特点,容量较大,可提供各种宽带网络接口;传输距离可达 20km;成本低、带宽高;与现有的以太网完全兼容。但由于以太网的时延较大,EPON 还需解决语音时延的问题。目前 EPON

技术还不够成熟，重要的是实现 QoS 时，价格优势将丧失。

四、无线接入网

（一）无线接入网概念

无线接入是指从交换节点到用户终端部分或全部采用无线手段接入技术。无线接入系统具有建网费用低、扩容可以按照需要确定、运行成本低等优点，可以作为发达地区有线网的补充，能迅速及时替代有故障的有线系统或提供短期临时业务，广泛用来替换有线用户环路，节省时间和投资。因此，无线接入技术已在通信界备受关注。

（二）无线接入网分类

根据终端入网方式，无线接入技术可以分为移动接入和固定接入两大类。

1. 移动无线接入

移动无线接入网包括蜂窝区移动电话、无线寻呼网、无绳电话网、集群电话网、卫星全球移动通信网，直至个人通信网等，是当今通信行业最活跃的领域之一。其中移动无线接入又可分为高速和低速两种。高速移动接入一般包括蜂窝系统、卫星移动通信系统、集群系统等。低速移动通信系统一般为 PCN（个人通信）的微小区和毫微小区，如 CDMA 的本地环 WLL、PACS、PHS 等。

2. 固定无线接入

固定无线接入是指从交换节点到固定用户终端采用无线接入，实际上是 PSTN/ISDN 网的无线延伸，其目标是为用户提供透明的 PSTN/ISDN 业务。固定无线接入系统的终端不含或仅含有限的移动性，固定无线接入系统以提供窄带业务为主，基本上是电话业务，接入方式有微波一点多址、蜂窝区移动接入的固定应用、无线用户环路及卫星 VSAT 网等。无线用户环路目前正逐渐从模拟系统向数字系统发展。

主要的固定无线接入技术有三类，即已经投入使用的多路多点分配业务（MMDS）、直播卫星系统（DBS）以及正在做现场试验的本地多点分配业务（LMDS）。总的来看，宽带固定无线接入技术代表了宽带接入技术的一种新的发展趋势，不仅开通快、维护简单、用户较密时成本低，而且改变了本地电信业务的传统观念，最适于新的本地网竞争者与传统电信公司及有线电视公司展开有效竞争，也可以作为电信公司有线接入的重要补充而得到发展。

无线接入技术按照接入网的数据传输速率的大小又可以分为窄带、准宽带和宽带三类。

窄带无线接入主要用来提供语音业务，解决部分地区不能通过有线手段提供语音通信的问题，同时满足部分用户的移动语音需求，是有线接入的有效补充。宽带无线接入主要用来提供综合的语音和数据业务，以满足用户对宽带数据业务日益增长的需求。窄带和宽带是个相对概念，一般 2Mb/s 以上属于宽带。

信息通信从窄带向宽带、从有线向无线转变乃大势所趋。话音业务与数据业务的融合，注定会使未来的移动网与固定网相融合。因此，我们有理由相信，固定宽带无线接入与移动宽带无线接入未来在技术上、业务上也会不断融合、统一，成为一个广阔的无线通信网。

（三）宽带无线接入技术

近年来，随着电信市场的开放和通信与信息产业技术的快速发展，各种高速率的宽带接入不断涌现，而宽带无线接入系统凭借其建设速度快、运营成本低、投资成本回收快等特点，受到了电信运营商的青睐。

目前宽带无线接入技术的发展极为迅速：各种微波、无线通信领域的先进手段和方法不断引入，各种宽带固定无线接入技术迅速涌现，包括本地多点分配业务（LMDS）宽带无线接入系统、无线局域网（WLAN）、全球微波互联接入（WIMAX）等。

1. 本地多点分配业务（LMDS）

LMDS 是一种宽带固定无线接入系统，其中文名称为本地多点分配业务系统或区域多点传输服务。第一代 LMDS 设备为模拟系统，没有统一的标准。目前通常所说的 LMDS 为第二代数字系统，主要使用异步传输模式（ATM）传送协议，具有标准化的网络侧接口和网管协议。LMDS 具有很宽的带宽和双向数据传输的特点，可提供多种宽带交互式数据及多媒体业务，能满足用户对高速数据和图像通信日益增长的需求，因此 LMDS 是解决通信网无线接入问题的锐利武器。

LMDS 是一种微波宽带系统，它工作在微波频率的高端（频段为 20 ~ 40GHz），组网灵活方便，使用成本低，是一种非常有前途的宽带固定无线接入新技术。从理论上讲，LMDS 在上行和下行链路上的传输容量是一样的，因此能方便地提供各种交互式应用，如会议电视、VOD、住宅用户互联网高速接入等。LMDS 也可以支持所有主要的语音和数据传输标准，如 ATM、MPEG-2

等标准。LMDS 由一系列蜂窝状的无线发射枢纽组成,每个蜂窝由点对多点的基站和用户站构成。

但 LMDS 也有不足之处。如毫米波只能工作于视距范围,传输距离一般在 5km 之内;毫米波通信质量受降水和树叶衰减影响较大,这主要通过增大发射功率、提高天线高度来补偿。

2. 无线局域网 (WLAN) 与无线高保真 (Wi-Fi)

在有线接入系统中,局域网占据了非常重要的地位,它提供了计算机接入因特网的方式,并获得了广泛的应用。WLAN 是针对无线环境开发的接入技术,目前得到了广泛的运用。WLAN 是一种利用射频技术进行数据传输的系统,该技术的出现可有效弥补有线局域网络之不足,使用户利用简单的架构,实现无网线、无距离限制的通畅网络访问。

3. 全球微波互联接入 (WIMAX) 技术是一种新兴的宽带无线接入技术

WIMAX 是基于 IEEE802.16 标准的宽带无线接入技术,它是一项无线城域网技术,能提供面向互联网的高速连接,数据传输距离最远可达 50km。

WIMAX 网络参考架构可以分成终端、接入网和核心网 3 个部分。WIMAX 终端包括固定、漫游和移动 3 种类型终端;WIMAX 接入网主要为无线基站,支持无线资源管理等功能;WIMAX 核心网主要是解决用户认证、漫游等功能及 WIMAX 与其他网络之间的接口关系。

WIMAX 是针对微波和毫米波频段提出的一种新的空中接口标准。它可作为线缆和 DSL 的无线扩展技术,从而实现无线宽带接入。WIMAX 采用波束赋形、多入多出 (MIMO)、OFDM/OFDMA 等超 3G 的先进技术来改善非视距性能,更高的系统增益也提供了更强的远距离穿透阻挡物的能力。WIMAX 技术的优势在于集成了 Wi-Fi 无线接入技术的移动性与灵活性,以及 DSL 和电缆调制解调器等基于线缆的传统宽带接入的高带宽特性和相对理想的服务质量。WIMAX 作为“最后一公里”宽带无线接入技术,由于它包含了接入技术的移动性与灵活性、业务网络组建的便捷性等特点,因而具有极强的市场吸引力。

4. 近距离无线接入技术

(1) 蓝牙 (BT) 技术

蓝牙是一种支持设备短距离 (一般是 10m 之内) 通信的无线连接技术,能在包括移动电话、PDA、无线耳机、笔记本电脑、相关外设等众多设备之间进行

无线信息交换,用于提供一个低成本的短距离无线连接解决方案。家庭信息网络由于距离短,蓝牙技术完全可以胜任。蓝牙采用 2.4GHz 的 ISM 频段,可免受各国频率分配不统一的影响;采用 FM 调制方式,降低了设备成本;采用快速跳频、前向纠错(FEC)和短分组技术,可减少同频干扰和随机噪声,使无线通信质量有所提高。蓝牙的传输速率为 1Mb/s,正常情况下最大传输距离约为 10m,加大功率后可达 100m,蓝牙的标准是 IEEE802.15。

蓝牙系统由无线射频单元、连接控制单元、链路管理器和软件组成,每个功能描述如下。

①无线射频单元

蓝牙微波收发信机是一个微波扩频通信系统,无线发射功率衰减系数按 0dB/m 设计,符合前向纠错 ISM 波段,扩频技术使发射功率增加到 100mW,最大跳频速率为 1600 跳/秒,在 2.480GHz 之间采用 79 个 1MHz 带宽的频点,通信距离为 10cm ~ 10m,增加发射功率则可达 100m。

②连接控制单元

含基带数字信号处理硬件并完成基带协议和其他底层链路规程,包括建立物理链路,在主从设备间建立两种物理连接,即面向连接的同步链路(用于同步话间传输)和无连接的异步链路(用于分组数据传输);确认分组类型;产生时钟信号和随机跳频序列,完成跳频同步和定时;信道控制和模式设置,建立连接;执行分组的发送和接收;差错校验和验证、加密。

③链路管理器

链路管理软件实现链路的建立、验证、链路配置及其协议,链路管理层通过链路控制器提供的服务实现上述功能。服务包括:发送和接收数据、设备号请求、链路地址查询、建立连接、验证、协商并建立连接方式、确定分组类型、设置监听方式、保持方式和休眠方式等。

④软件

蓝牙系统的软件完成的功能包括配置及诊断、蓝牙设备的发现、电缆仿真、与外围设备的通信、音频通信及呼叫控制、交换名片电话号码等。

协议栈是蓝牙技术的核心组成部分,它能使设备之间互相定位并建立连接,通过这个连接,设备间能通过各种各样的程序进行交互和数据交换。

蓝牙技术的应用范围相当广泛,可以广泛应用于局域网络中各类数据及语音

设备,如 PC、拨号网络、笔记本电脑、打印机、传真机、数码相机、移动电话和高品质耳机等。应用蓝牙技术的典型环境有无线办公环境、汽车工业、信息家电、医疗设备以及学校教育和工厂自动控制等。蓝牙技术作为一个开放的无线应用标准,能通过无线连接方式将一定范围内的固定或移动设备连接起来,使人们能够更方便更快速地进行语音和数据的交换,这无疑将会成为未来无线通信领域一个重要的研究方向。

(2) ZigBee 技术

ZigBee 是一种新兴的短距离、低复杂度、低功耗、低数据速率、低成本的无线网络技术,主要用于近距离无线连接。它基于 IEEE802.15.4 标准,在数千个微小的传感器之间相互协调实现通信。IEEE 802.15.4 强调的就是省电、简单、成本低的规格。IEEE 802.15.4 的物理层(Physical Layer)采用直接序列展频(DSSS)技术,再经由编码方式传送信号,避免干扰。在媒体存取控制(MAC)层方面,主要是沿用 IEEE 802.11 系列标准的 CSMA/CA 方式,以提高系统兼容性。所谓的 CSMA/CA 是在传输之前,会先检查信道是否有数据传输,若信道无数据传输,则开始进行数据传输动作,若产生碰撞,则稍后重新再传。

ZigBee 的特点包括:数据传输速率低:10 ~ 250Kb/s,专注于低传输应用;功耗低:在低功耗待机模式下,两节普通 5 号电池可使用 6 ~ 24 个月;成本低:ZigBee 数据传输速率低,协议简单,所以大大降低了成本;网络容量大:网络可容纳 65 000 个设备;时延短:典型搜索设备时延为 30ms,休眠激活时延为 15ms,活动设备信道接入时延为 15ms;安全:ZigBee 提供了数据完整性检查和鉴定功能,采用 AES-128 加密算法,各个应用可灵活确定其安全属性;有效范围小:有效覆盖范围 10 ~ 75m,具体依据实际发射功率大小和各种不同的应用模式而定;工作频段灵活:使用频段为 2.4GHz、868MHz(欧洲)和 915MHz(美国),均为免执照(免费)的频段。

ZigBee 用于工业控制、消费性电子设备、智能用电、楼宇自动化、医用设备控制等,其适合传输的数据包括:周期性数据:如家庭中水、电、气三表数据的传输,烟雾传感器;间断性数据:如电灯、家用电器的控制等数据的传输;反复性的低反应时间的数据:如鼠标、操作杆传输的数据。ZigBee 不适合图像和视频等流媒体业务。

中国在物联网领域的发展已经进入高速时代,ZigBee 成为物联网领域的核

心技术之一,已经被广泛应用。ZigBee 可以作为物联网网络层的一环,是一种近距离无线组网技术,将现有的 ZigBee 模块应用于传感器,可以实现传感器件间的协调通信。ZigBee 联盟制定的 ZigBee 标准是世界公认的物联网无线传感器网络技术中的权威标准,在此标准上形成了一整套的物联网关键性技术。

(3) 射频识别 (RFID) 技术

现代物流业的发展,对识别技术提出了更高的要求。传统的磁卡、IC 识别技术已不能满足人们的需求。RFID 技术是非接触式自动识别技术,它利用射频方式进行非接触式双向通信交换数据以达到识别目的。它通过射频信号自动识别目标对象并获取相关数据,识别工作无需人工干预,可工作于各种恶劣环境。RFID 技术可识别高速运动物体并可同时识别多个标签,操作快捷方便。RFID 是一种利用无线电射频信号进行物体识别的新兴技术,可应用于防盗、门禁、仓储管理等方面,尤其在物流系统中,RFID 可以加快供应链的运转,提高物流的效率。

RFID 技术应用系统由四部分组成:① RFID 电子标签。RFID 电子标签能够储存有关物体的数据信息。在自动识别管理系统中,每个 RFID 标签中保存着一个物体的属性、状态、编号等信息。标签通常安装在物体表面。②读写器。用于识读及写入标签数据,其主要功能是:查阅 RFID 电子标签中当前储存的数据信息;向空白 RFID 电子标签中写入欲存储的数据信息;修改 RFID 电子标签中的数据信息;与后台管理计算机进行信息交互。③发送接收信号的天线。天线是标签与阅读器之间传输数据的发射、接收装置。④通信网络系统。包括数据库服务器和其他信息系统。数据库服务器负责处理读写器传送过来的信息,并进行信息处理。其他信息系统根据需要向读写器发送指令、对标签进行相应操作。

射频识别系统能支持多种不同的频率,但应用最广泛的主要有四种:低频频段(大约在 125kHz)、高频频段(大约在 13.56MHz)、超高频频段(860 ~ 960MHz)、微波频段(2.4GHz 或 5.8GHz)。在不同的国家各个频段具体的使用频率有所不同。

国际上与 RFID 相关的通信标准主要有:ISO/IEC 标准、ISO11785 标准、EPC 标准、DSRC 标准等。

RFID 作为物联网中最为重要的核心技术,对物联网的发展起着至为重要的作用,也会随着物联网产业发展有更大的发展空间。RFID 技术也存在一些问题,如隐私权、如何由条形码向电子标签过渡、安全性、标签成本过高、国际标准的制定等,这些问题都在一定程度上阻碍了 RFID 的发展。只有解决了这些问题,

RFID 技术才能更好地推广和发展。

五、电力通信接入网技术对比

被称为“最后一公里”的用户接入网发展缓慢，直接影响了电力通信网的容量、速度和质量，成为制约全网发展的瓶颈。网络数字化、业务综合化和 IP 化是未来接入网的发展趋势。

就通信接入网而言，接入网主要有铜线接入网、光纤接入网、无线接入网等几种主流技术。下面从承载业务及建设成本对其进行分析。

（一）铜线接入技术，即 xDSL 技术

它是目前最成熟的接入网技术，组网灵活，充分利用原有铜线，成本低廉，技术难度低，应用广泛。但是，由于铜线本身存在频带窄、损耗大、维护费用高等固有缺陷，铜线接入技术只是接入网技术发展过程中的临时性过渡技术。

（二）光纤接入技术

光纤具有频带宽、容量大、损耗小、不易受电磁干扰等优点，随着光器件成本的下降，光纤技术得到了广泛的应用。有源光网络接入技术没有完全摆脱电磁干扰和雷电的影响以及有源设备固有的维护问题，不是接入网的长远解决方案。无源光网络接入技术避免了有源设备的电磁干扰和雷电的影响，减少了线路和外部设备的故障率，提高了系统的可靠性，同时节省了维护成本，被普遍认为是宽带接入技术的最终解决方案。APON 具有 ATM 和 PON 的特点，传输速率高，传输距离远，技术成熟，性价比高，但是对非 ATM 业务支持不好。其市场前景由于 ATM 在全球范围的受挫而不理想。EPON 综合了 PON 技术和以太网技术的优点，容量大，成本低，频带宽，可扩展性强，与现有以太网兼容，管理方便等。但是目前 EPON 技术还不够成熟，技术难度较大，实现 QoS 时，其价格优势将会丧失。

（三）无线接入技术

无线接入技术具有建网费用低、扩容可以按照需要确定、运行成本低等优点，可以作为发达地区有线网的补充，能够在紧急情况下迅速提供短期临时业务，在发展中地区和边远地区可广泛用来替换有线环路，节省时间和投资。LMDS 具有频带宽、容量大、传输速率快等优点，缺点是通信质量受天气及地理环境等影响较大。Wi-Fi 弥补了有限局域网的不足，使用户实现无网线的网络访问，传输速

度快。WIMAX 有很好的移动性和灵活性、业务网络组建的便捷性等特点, 具有极强的市场吸引力。蓝牙主要用于设备之间的无线信息交换, 能够提供低成本的短距离无线解决方案。ZigBee 具有功耗低、成本低、网络容量大、时延短、安全、工作频段灵活等优点, 主要用于工业控制、消费电子设备、智能用电等, 不适合图像和视频等流媒体业务。RFID 技术可以非接触自动识别, 无需人工控制, 可工作于恶劣环境, 主要用于门禁、仓储管理等方面。

第四节 电力通信骨干网

现代电力系统是电力、自动化、电子、信息通信四大技术的综合, 是统一、高效、灵活和高生存性的通信平台, 对电力系统传输是必要的支撑。当前通信网的主体正在由传统的 TDM 业务逐渐转向 IP 业务, 业务颗粒度也由原来的 2M、155M 向 GE、2.5GPOS、10GE 等大颗粒业务增长, 这对传输带宽提出了很高的要求。传统的传输网只使用多业务传输平台 (MSTP)、波分复用 (WDM) 传输技术, 已经无法解决传输效率及调度问题, 以 OTN、PTN 和 ASON 为代表的下一代光网络技术取代了传统技术, 逐渐成为光传送的主流产品。光传送网在高效、安全等方面取得了长足的进展。

一、多业务传输平台 (MSTP) 技术

基于 SDH 的多业务传送平台 (MSTP) 是指基于 SDH 平台同时实现 TDM、ATM、以太网等业务的接入、处理和传送, 提供统一网管的多业务节点。基于 SDH 的 MSTP 是对传统的 SDH 设备进行改进, 在 SDH 帧格式中提供不同颗粒的多种业务、多种协议的接入、汇聚和传输能力。MSTP 是目前城域传输网最主要的实现方式之一。MSTP 可以将传统的 SDH 复用器、数字交叉连接设备、网络交换机和 IP 边缘路由器等多个独立的设备集成一个网络设备, 即通过基于 SDH 技术的 MSTP, 进行统一控制和管理。MSTP 不但能够完成传统 TDM 业务的传输, 而且能够接入 ATM、以太网等分组业务, 实现链路层的桥接和交换功能, 完成数据业务的接入和传输。

(一) 广义多业务传输平台 (MSTP) 技术定义

在骨干网建设中, 能够满足狭义 MSTP 技术定义, 能够满足多业务 (主要指

数据业务和电路交换业务)传输要求的所有技术或解决方案均称为骨干网多业务传输平台实现技术,简称广义 MSTP 技术。

关于这一定义可以从以下两个方面来理解:

1. 功能性角度

利用 MSTP 技术构建的骨干网多业务传输平台能够为骨干网中的多种类型的业务(TDM 业务、数据业务、IP 化语音、视频、各种虚拟专线业务等)提供技术支持,保证不同业务类型的 QoS 要求。

2. 技术性角度

利用 MSTP 技术构建的骨干网多业务传输平台需要利用 MSTP 设备和其他辅助设备按照一定的骨干网网络结构和某种网络拓扑结构来构建。功能性定义与技术性定义的差别十分明显,其中功能性定义强调的是外界行为和服务;技术性定义强调的则是构成 MSTP 所需要的物质基础和集成方法。

(二) 狭义多业务传输平台(MSTP)技术定义

在骨干网建设中,能够满足多业务(主要是指数据业务和电路交换业务)传输要求的、基于 SDH 技术的多业务传输技术成为基于 SDH 的多业务传输平台实现技术,简称狭义 MSTP 技术。

SDH 技术是二十世纪八十年代末出现的一种新的传输体制。用以取代当时已经不适合传输网络发展的 PDH 体制,经过多年的技术研究和工程应用,SDH 已经有了相对完整的技术标准,在中国得到了广泛的应用,已经成为中国基础骨干网的核心技术。在 SDH 的基础上提供对多种业务的支持,可以集成 SDH 技术的诸多优点,实现网络的平滑过渡,有着突出的技术优势和市场优势。因此,基于 SDH 的多业务传输平台实现技术的研究和基于 SDH 的多业务传输节点设备的设计与开发有着广阔的发展前景。

在通常情况下,除非特殊声明,MSTP 技术均指狭义 MSTP 技术,即基于 SDH 的多业务传输平台实现技术。

MSTP 设备按照设备容量和其在网络中的定位可以分为高端 MSTP 设备、终端 MSTP 设备和低端 MSTP 设备,它们分别应用在城域网的核心层、汇聚层和接入层。

(三) 多业务传输平台(MSTP)的技术特点

MSTP 的技术特点如下:①继承了 SDH 技术的诸多优点,例如良好的网络

保护倒换性能、对 TDM 业务较好的支持能力等。②支持多种协议。MSTP 对多业务的支持要求其必须具有对多种协议的支持能力,通过对多种协议的支持来增强网络边缘的智能性;通过对不同业务的聚合、交换或路由,来提供对不同类型传输流的分离。③支持 WDM 扩展。MSTP 根据在网络中位置的不同有着多种不同的信号类型。当 MSTP 位于核心骨干网时,信号类型最低为 OG48,并可以扩展到 OC.192 和密集波分复用(DWDM);当 MSTP 位于边缘接入和汇聚层时,信号类型从 OC-3/OC-12 开始并可以在将来扩展至支持 DWDM 的 OC.48。④提供集成的数字交叉连接交换。MSTP 可以在网络边缘完成大部分交叉连接功能,从而节省传输带宽,可以省去核心层中最昂贵的数字交叉连接系统端口。⑤支持动态带宽分配。MSTP 支持 G.7070 中定义的级联和虚级联功能,可以对带宽进行灵活的分配,带宽可分配粒度为 2Mb/s,甚至通过一些厂家的自定义协议可以把带宽分配粒度调整为 576Kb/s。⑥链路的高效建立能力。面对骨干网用户不断提高的即时带宽要求和 IP 业务流量的增加,要求 MSTP 能够提供高效的链路配置、维护和管理能力。⑦提供综合网络管理功能。MSTP 提供对不同协议层的综合管理能力,便于网络的维护和管理。MSTP 管理是面向整个网络的,其业务配置、性能告警监控直接基于向用户提供的网络业务。MSTP 还能支持用户等级定义、带宽租用和计费等功能。越来越强的智能化特性成为 MSTP 的显著特征。⑧支持多种以太网业务类型。目前 MSTP 支持的以太网业务类型主要包括点到点、点到多点和多点到多点。点到点是指利用 MSTP 实现两个节点间以太网端口的连接。点到多点是指利用 MSTP 实现多个节点到中心节点间以太网端口的互联。多点到多点是指利用 MSTP 实现多个节点间以太网端口的互联。⑨ MSTP 技术是一种骨干网建设技术,同时 MSTP 技术可以应用到网络的核心层、汇聚层和接入层。

(四) 多业务传输平台(MSTP)的关键技术

1. 虚级联技术

利用虚级联(VC)技术可以实现以太网带宽与 SDH 虚通道的速率适配,目前 MSTP 的设备可以实现 VC-12 的虚级联去适配 10、100Mb/s 的以太网业务。

(1) 虚级联的概念

虚级联技术可以被看成是把多个小的容器级联起来并组装成为一个比较大的容器来传输数据业务。这种技术可以级联从 VC-12 到 VC-4 等不同速率的容器,用小的容器级联可以做到非常小颗粒的带宽调节,相应的级联后的最大带宽也

只能在很小的范围内。例如,利用 VC-12 的级联所能提供的最大带宽只能达到 139Mb/s。IP 数据包由三个虚级联的 VC-3 所承载,然后这三个 VC-3 被网络分别独立地传输到目的地。

(2) 虚级联技术特点

虚级联最大的优势在于它可以使 SDH 给数据业务提供合适的通道,避免了带宽的浪费。虚级联技术可以通过很小的颗粒度来调整传输带宽,以适应用户对带宽的不同需求。G.707 中定义的最小可分配粒度为 2Mb/s。由于每个虚级联在网络中的传输路径是各自独立的,这样,当物理链路有一个路径出现中断时,不会影响从其他路径传输的 VC。当虚级联和 LCAS 协议相结合时,可以从虚级联中去除故障路径所对应的 VC,利用无故障路径继续传输数据,从而提高了整个传输网络的可靠性和稳定性。

2. 多协议标记交换技术 (MPLS)

多协议标记交换技术 (MPLS) 是二十世纪九十年代末期由提出的,并由 IETF 制定的一种多协议标记交换标准协议,MPLS 是一种可以在多种数据链路层媒介上进行标记交换的网络技术。MPLS 吸取了 ATM 高速交换的优点,把面向连接引入控制,是介于 2、3 层之间的 2.5 层协议。它结合了第二层交换和第三层路由的特点,将第二层的基础设施和第三层的路由有机地结合起来。第三层的路由在网络的边缘实施,而在 MPLS 的网络核心采用第二层交换。

(1) 标记分发协议 (LDP)

根据数据流的要求,负责在标记交换路由器 (LSR) 之间分发标记的协议。

(2) 转发等价类 (FEC)

将若干属性等同的数据流合并起来,称为转发等价类。

(3) 标记交换路径 (LSP)

通过标记分发协议在数据流通过的路径上,将每一个 LSR 的标记和特定的 FEC 绑定完成后,就建成了标记交换路径。

(4) 标记交换路由器 (LSR)

支持标记分发协议 (LDP) 的路由器、交换机称为标记交换路由器。

(5) 标记边缘路由器 (LER)

在 MPLS 域与其他网络边缘的标记交换路由器称为边缘标记交换路由器。实际上这只是为了区别于 LSR 的一种简单的称谓,分为入口标记路由器 (Ingress

LSR)和出口标记交换路由器(Egress LSR)。

3.MPLS 的网络结构

MPLS 网络结构分为两层:边缘层和核心层。

边缘层完成 IP 数据包的分类、过滤、安全和转发功能,同时将 IP 数据包转换为采用标记标示的流连接,提供服务质量、流量控制、虚拟专网、多播等功能。针对不同的流连接,MPLS 边缘节点采用 LDP 进行标记分配/绑定,LDP 具有标记指定、分配和撤销的功能,它在 MPLS 网内分布和传递。而在 MPLS 的核心层同样需要 LDP,但它只提供高速的标记交换,面向连接的服务质量、流量工程、多播控制等功能。

这里尤其值得注意的是,MPLS 网络采用了许多 ATM 的思想,例如 ATM 的服务质量分类和控制机制等。如果采用 ATM 作为 MPLS 的连接基础,那么 MPLS 实际上可以继承 ATM 技术诸多优势。

4.MPLS 工作原理

MPLS 技术改变了数据包转发的方式,它通过在每一个节点(LSR)处的标记交换来实现包的转发。它为进入通信网络中的 IP 数据包分配标记,并通过对标记的交换来实现 IP 数据包的转发。标记作为 IP 包头在网络中的替代品而存在,在网络内部,MPLS 在数据包所经过的路径沿途通过交换标记来实现转发;当数据包要退出 MPLS 网络时,数据包被解开封装,继续按照 IP 数据包的路由方式到达目的地。

二、光传送网(OTN)技术

光传送网络(OTN)是以波分复用技术为基础、在光层组织网络的传送网,是下一代的骨干传送网络。随着智能电网建设的推进,信息化应用的需求日益增长,电力通信系统带宽扩容的建设步伐将进一步加快。电力市场的各类信息应用系统已进入建设或实用阶段,这些系统的应用范围广、实时性与可靠性要求高,对带宽的要求也越来越高。仅依靠现有的以同步数字体系(SDH)技术为基础的主干传输网,显然已无法满足我国电力通信系统的发展要求。

如何提高通信系统的性能,增加系统带宽,以满足不断增长的业务需求,成为电力光传输网的焦点。目前最有效的解决方法就是建成利用波分复用(WDM)技术的全光网络。WDM 技术是利用已经敷设好的光纤,将复用方式从电信号转

移到光信号，在光域上用波分复用的方式提高传输速率，光信号实现了直接复用和放大，并且各个波长彼此独立，对传输的数据格式透明，使单根光纤的传输容量在高速率时分复用（TDM）的基础上成倍增加。它是一种在光域上的复用技术，形成一个光层的网络即“全光网”，这将是光通信的最高阶段。用一个纯粹的“全光网”消除光、电转换的瓶颈将是未来的趋势，它可有效解决通信网络传输能力不足的问题，具有广阔的发展前景。同时，它还可融合 SDH 丰富的管理特性以及电交叉矩阵，支持复杂组网，网络扩展能力强。

WDM 系统虽然凭借光纤天然的带宽优势和多波长通道技术提供了海量带宽，但是目前点对点的 WDM 系统无法满足组网的需求，也缺乏有效的全网业务监控和维护管理手段，不同厂商 WDM 系统由于在业务适配、线路处理等方面的不一致，只能采用业务口进行互通，既增加成本，又不利于“端到端”管理。

（一）OTN 组网的关键技术

OTN 技术融合了 SDH 与 WDM 的技术优势，既具有超大容量的数据业务承载能力，又能实现更大粒度上的灵活业务调度，同时还具备完善的管理维护能力，能够满足电力通信网络对于 IP 数据业务大颗粒接入、大容量交叉、透明传输以及灵活业务调度的要求，是下一代骨干传输网的发展方向。

1. OTN 的功能划分和分层结构

OTN 根据功能纵向分为光通路层（OCh）、光复用段层（OMS）和光传输段层（OTS），而光通路层又分为光通路传送单元（OTUk）、光通路数据单元（ODUk）和光通路净荷单元（OPUk）等几个子层。

（1）光通路层（OCh）

光通路层是整个 OTN 技术的核心，在 3R 再生点之间提供透明的网络连接，主要对客户信号进行路由的选择和波长的分配，为网络路由安排光通道连接，处理光通道开销，并提供光通道层的管理和检测的功能。当故障发生的时候，重新进行路由选择或直接把业务从工作路由切换到保护路由来实现保护倒换和网络恢复。光通道层由三个数字结构单元组成：光通路净荷单元（OPUk）、光通路传送单元（OTUk）和光通路数据单元（ODUk），OTUk 和 ODUk 两个子层采用数字封装技术来实现。

OTUk 将客户信号 ODUk 在 OTN 网络 3R 再生点之间的 OTUk 路径上传送，在 3R 再生点之间提供了信号监测的功能。OTUk 由传送 ODUk 客户信号的

OTUk 净荷和 OTUk 两部分组成。ODUk 在 ODUk 路径上实现数字客户信号（如 SDH/SONET、以太网、ATM 等）在 OTN 网络上端到端地传送，ODUk 包括传送客户信号的 OPUk 和 ODUk。

（2）光复用段层（OMS）

光复用段层的作用是，在相邻的传输设备之间有多个波长复用成光信号时，要保证光信号的完整性，并为多波长信号提供网络功能。主要功能包含：为多波长信号选择路由并重新安排光复用段的功能；处理光复用段开销以保证多波长光复用段适配信息的完整；提供光复用段的管理和检测功能，从而保证网络的稳定运行并提供维护。

（3）光传输段层（OTS）

光传输段层为光信号在不同类型的光缆传输媒介上提供传输功能，并且对光放大器（OA）或中继器进行检测和控制，光传送网的性能通常受到功率均衡、掺铒光纤放大器（EDFA）增益控制、色散的积累和补偿等问题的影响。

OTN 体系结构定义了两类网络接口：域间接口 IaDI 和域内接口 IaDI。不同管理域之间的接口 IaDI 具有 3R 再生能力；同一管理域之间的接口为 IaDI。在 ITU 标准中 IaDI 接口是一个完全标准化的接口，而 IaDI 不是一个具备互通性的标准接口。如果把分层和分域综合到一起，那么每个域内或者域间都存在相应的纵向分层。

2. OTN 的复用结构

OTN 技术将光网络分为三层，即 OCh、OMS 和 OTS。OCh 为整个 OTN 网络的核心，是 OTN 的主要功能载体，它由 3 个数字结构单元组成：OCh 传送单元（OTUk）、OCh 数据单元（ODUk）和 OCh 净负荷单元（OPUk）。

3. OTN 技术的优点

OTN 主要集中了 SDH 与 WDM 两者的技术优势，不仅具有 WDM 传输容量巨大的优点，而且还具有 SDH 可操作、可管理、可交叉的能力。其优点如下：

（1）大容量调度能力

相对于 SDH 只能通过对 VC 调度，调度的颗粒仅为 155Mb/s，调度颗粒太小，而 OTN 技术的调度颗粒是 ODUk 级别，可以进行大颗粒的调度处理（最小颗粒为 2.5Gb/s），除此之外还可以提供光层的调度。

（2）强大的运行、维护、管理和指配能力

OTN 定义了一整套用于运行、维护、管理和指配的开销，利用这些开销可以对光传送网进行全面精细的监测与管理，为用户提供一个可操作、可管理的光网络。

（3）完善的保护机制

OTN 具有与 SDH 类似的一整套保护倒换机制，可为业务提供可靠的保护，大大增强网络的安全性，使网络具有很强的生存能力。

（4）利用数字包封技术承载各种类型业务

OTN 利用数字包封（DW）技术承载各种类型的用户业务信号。对于同步信号，OTN 可以不进行改变而直接适配到光通路净负荷单元中。对于其他用户信号，OTN 大多采用通用成帧规程（GFP）进行封装，然后再适配到光通路净负荷单元中。由于 GFP 帧信号的长度没有限制，所以它可以跨越光通路净负荷单元的帧边界，实现了在固定速率光通路中传送不同速率的用户信号。

（5）多级串联连接监控能力

相对于 SDH 只能提供 1 级串联监控，OTN 可以提供多达 6 级的串联连接监控，并支持虚级联与嵌套的连接监控，因此可以适应多运营商、多设备商、多子网的工作环境。

（6）FEC 功能

OTN 帧结构中专门有一个带外前向纠错（FEC）区域，通过 FEC 可获得 5 ~ 6dB 的增益，从而降低了对光信噪比要求，增加了系统的传输距离。

三、分组传送网（PTN）技术

随着电力通信业务的发展趋势，电力通信网络需要承载各种各样的业务，而且业务特性越来越复杂，速率也在增加。为了适应这种根本性的变化，传送网的分组化已经成为最为重要的发展趋势。由于以太网具备简单易用、低成本的特点，使其成为宽带接入的重要手段，并开始渗透到更高层次的网络，带来的后果就是要求在以太网上引入电信级的特征，满足大范围、大规模的组网要求成为了业界关心的问题。同时，承载网络 IP 化的另一个前进方向是将 MPLS 思路推向网络边缘，在这种情况下，分组传送网（PTN）应运而生，它不仅继承了面向 MSTP 网络的优势，比如可以实现多业务承载、具有高可靠性等，而且又具备低成本和

统计复用的特点。这一点和以太网有很高的相似性，所以 PTN 会成为下一代网络的核心部件。

PTN 是一种基于面向连接的技术，它的核心是面向分组的交叉技术，支持网络向下一代网络平滑演进，主要用于承载多业务，具备多业务传送、汇聚和传送能力以及支持时钟同步、端到端的性能监控和管理维护功能。

（一）分组传送网（PTN）技术的分类

分组传送网（PTN）的技术在业界有多种不同的分类。目前有两种技术在运营级特性上具有优势，是在综合了可扩展、可管理和面向连接等特性的基础上得出的结论。它们分别是基于以太网的面向连接的包传输技术 PBT 与基于面向连接的包传输技术 T-MPLS/MPLS-TP。

1.PBT（Provider Backbone Transport）技术

PBT 是在 IEEE802.1ahPBB（Provider Backbone Bridge）的基础上进行的扩展，基于 PBB 的分层架构（MAC in MAC），它是一种面向连接的传输技术，能够为业务提供流量工程和保护倒换的功能。PBT 的主要特征是关闭了传统以太网的功能，包括 MAC 地址的学习、信息的广播功能、生成树协议等。在转发信息时不再靠泛洪与学习的功能，以太网的转发完全由管理平面来控制，可以快速实现运营级传送网络的多种功能，比如快速保护倒换、OAM、QoS 以及流量工程等。

PBT 在逻辑上分为三层：电路层、隧道层和段层（物理层是 SDH 时有该层，是以太网时则无该层）。电路层采用伪线（PW）技术，具备支持多种以太网客户业务的能力，能够实现多业务的承载。

PWE3 是一种模拟点对点业务的机制，它应用在分组交换网络上。被模拟的业务可以通过 TDM 专线或者以太网来进行传输。PWE3 模拟一种业务的必要性，它利用了分组交换网络上的隧道机制。这里的隧道被称为伪线。

2.T-MPLS/MPLS-TP（Transport Multi-Protocol Label Switching/MPLS Transport Profile）技术

MPLS 技术采用标记交换的方法实现分组业务报文的分类转发。该技术可扩展性良好，服务质量完善，可以提供 VPN 业务等。MPLS 技术广泛应用于骨干网络中，并逐步由核心向边缘发展。MPLS 网络可以支持 ATM 业务、TDM 业务、FC 和以太网业务的统一传送。一般来说传送网仅有上述功能还是远远不够的，还必须具备多种运营级网络特性，比如：丰富的操作管理能力、端到端的快速保

护和服务质量保证等。T-MPLS 就是在这种认知下产生出来的一种具有传送属性的 MPLS 技术。

T-MPLS/MPLS-TP 是面向连接的分组传送体系,其核心思想就是建立端到端的 LSP,数据流在这条 LSP 上根据标签进行转发传送。

(二) PBT 技术与 T-MPLS 技术发展分析

通过将 PBT 和 T-MPLS 技术对比可知,T-MPLS 和 PBT 都可以达到分组传送网的基本要求并且存在自身优势,但综合考虑,分组传送网未来的方向最终会选择基于 MPLS 的分组传送网即 T-MPLS 技术,其原因在于基于以太网的分组传送技术 PBT 存在以下短期内难以克服的问题:① PBT 需要将以太网流量工程引入才可以实现面向连接的改造,而这并没有得到广泛认可,同时需要改变以太网地址转发的特性,改变了以太网的基本形态,不能充分利用现有的以太网资源。②引入面向连接的特性:以太网的特点是简单、低成本,在以太网中引入了面向连接的 OAM 管理、保护倒换技术等,大大增加了以太网的成本。③ PBT 的控制平面不能参考以太网的控制协议,需要重新定义,是一个复杂的工程。④ PBT 无法对多业务如 TDM、ATM 等进行承载。

(三) PTN 关键技术分析

1. PTN 的 QoS 技术

与传统电信网相比,基于目前 IP 技术组成的承载网,在 QoS 保证、可运维和可管理以及安全性方面还都存在很多有待提高之处。在 QoS 保证方面,IP 网络无法实现对每个业务流进行呼叫接纳控制,无法针对每个业务实现 QoS 保证。而 MPLS 技术在数据网络中的引入在很大程度上解决了数据网的一些 QoS 问题,同时由于 T-MPLS 数据转发平面是基于 MPLS 的标记模式,因此其继承了 MPLS 的 QoS 保证的能力。TETF 制定的数据面 QoS 技术包括:区分服务(Diff*serv)、E-LSP、L-LSP、MPLS 流量工程、MPLS Diffserv-AwareTE 和集成服务。T-MPLS 使用区分服务的 QoS 机制。区分服务就是对不同优先级的业务区别对待。

2. PTN 的运营管理与维护技术

传统的分组网络在 OAM 上比 SDH/SONET 和 ATM 要弱得多,难以提供端到端的业务管理、故障检测和性能监控。PTN 具备了类似于 SDH 的操作维护管理(OAM)功能,这也是 PTN 技术区别于传统分组传输的关键技术之一。

T-MPLS 的 OAM 功能体现在差错管理、性能检测和保护倒换,按照需要

发展了3种OAM功能：主动OAM：周期性地报告链路状态、性能、差错等；按需OAM：根据需要报告链路状态、性能、差错等。保护倒换OAM：主要是APS协议。

3.PTN 的生存性技术

PTN网络接口以GE、2.5GE、10GE为主，大颗粒的数据传输对业务的连续性和完整性有严格要求，因此其生存性问题也就成为PTN所关心的关键问题之一。生存性是指为了避免在传输过程中由于人为原因造成光纤路由阻断或设备机械故障等事故，导致传输过程中的业务被迫停止，而采取的通过重置路由、倒换单板等手段还原业务连接的能力。

线性保护倒换以及共享环境保护机制共同组成了T-MPLS网络中的保护机制。作为一种光传送网架构，分组传送网同样需要满足50ms以内的电信级保护倒换，也即是由故障检测时间、保持时间、故障通告时间以及保护操作时间这四部分组成的保护倒换时间要小于50ms。而分组传送网的保护技术很好地满足了这项要求。

4.PTN 的PWE3技术

PWE3是一种端到端的二层业务承载技术，属于点到点方式的二层VPNO在PTN网络的两台PE中，它以LDP/RSVP作为信令，通过隧道模拟CE端的各种二层业务，如各种二层数据报文、比特流等，使CE端的二层数据在PTN中透明传递。

PWE3提供了一种点到点的二层私网技术，使用户可以不用改变原有的接入方式，由已有的网络平滑接入1P网中，而且可以将不同的接入方式轻松互联。PWE3提供的多种信令和组网拓扑方式，可以为用户和运营商提供多种服务级别和组网方式的选择。

5.PTN 的时间同步技术

分组网络在一般情况下不需要进行全网同步，在处理输入业务时，由各自设备基于内部定时提供输入业务的定时适配，不同传输链路间无需相互同步。但当分组网络中传递的是基于TDM的业务或进行同步分配时，就需要分组网络提供相应的同步功能。

PTN对时间同步的需求主要有两个方面。其一，传输承载TDM业务以及与PSTN网络进行互通时，需要PTN在TDM业务的入口及出口提供时间同步功能，

保证实现业务时钟恢复；其二，提供对时间信号和频率信号的同步传送，比如在利用 PTN 承载 3G 基站业务时，由于 3G 基站业务对频率同步有较高的要求，所有的 3G 基站业务都需要有优于 50ppb（ 5×10^{-8} ）的频率同步，还有一些对时间同步需要精度要求更高的如 TD-SCDMA、CDMA2000、WIMAX 等 3G 基站业务，所以对分组传送网提出能够提供时间和频率信号进行高精度稳定的传送要求。

IEEE1588v2 是精确时间同步协议，它采用主从时钟方式，对时间进行信息编码。

IEEE1588v2 通过对发出和接收的时间加上时间戳来记录时间，同步设备根据时间戳对设备的同步时钟进行校正，保证了与主时钟的同步。IEEE1588v2 有效解决了传统基站利用 GPS 同步成本高、安装困难等问题，是新一代 3G 技术承载 TD-SCDMA/LTE 网络的关键技术之一。IEEE1588v2 在全网中实现还存在局限性，它需要整网部署新设备以支持该协议和处理机制。但是作为新建的 PTN 网络而言，IEEE1588v2 时间同步技术的引入，将同步以太网技术与 IEEE1588v2 技术相结合，既可以实现全网的频率同步，也可以将高精度的时间同步添加到以太网应用中，解决了高精度高质量的 3G 传送问题。

四、自动交换光网络（ASON）技术

自动交换光网络（ASON）技术，是由用户发出请求，通过 ASON 信令网的控制，智能化地自动完成光传送网内的光网络连接、交换功能的新一代传送网络。这里的自动交换连接是指：在网络资源和拓扑结构自动发现的基础上，调用动态智能选路算法，通过分布式信令处理和交互，建立端到端的按需连接，同时提供可靠的保护恢复机制，在发现故障时实现连接的自动重构。其核心思想是在光传送网络中引入控制平面以实现网络资源的实时按需分配，从而实现光网络的智能化。

ASON 技术被广泛关注。该技术可全面优化网络结构，提高网络可靠性和灵活性，提供对业务的端到端的管理能力，降低网络建设和运营成本，是光传送技术的又一巨大创新。

随着 ASON 技术的框架体系结构和相应协议的成熟，该技术已经在全球范围内的多个运营商的网络中正式商用，其作为传送网的主流发展方向已经获得业界的普遍认同。

（一）ASON 技术的体系架构

ASON 与传统的光传送网相比，突破性地引入了更加智能化的控制平面，从而使光网络能够在指令的控制下完成网络连接的自动建立、资源的自动发现等过程。其体系结构特性主要表现在具有 3 个平面、3 个接口和所支持的 3 种连接类型上。

1. ASON 的 3 个平面

ASON 包括 3 个平面：控制平面、管理平面和传送平面。通过数据通信网联系三大平面，数据通信网址负责实现控制信令消息和管理信息传送的信令网络。

与现有的光网络相比，ASON 中增加了一个控制平面。控制平面可以说是整个 ASON 的核心部分，它由分布于各个 ASON 节点设备中的控制网元组成。控制网元主要由路由选择、信令转发以及资源管理等功能模块组成，而各个控制网元相互联系，共同构成信令网络，用来传送指令信息。控制网元的各个功能模块之间通过 ASON 信令系统协同工作，形成一个统一的整体，实现了连接的自动化，并且能在连接出现故障时快速而有效地恢复。

传送平面由作为交换实体的传送网网元组成，主要完成连接/拆线、交换（选路）和传送等功能，为用户提供端到端的双向或单向信息传送，同时，还要传送一些控制和网络管理信息。ASON 的传送平面具备了高度的智能，这些智能主要通过智能化的网元光节点来体现。现在的研究认为，这些网元是一些具有 OXC 结构的波长路由器，并具备 MPLS 信令功能。这种结合了第三层 IP 路由与第一层光交换功能的网元，可对路由功能和转发功能进行分离。

管理平面对控制平面和传送平面进行管理，在提供对光传送网及网元设备进行管理的同时，实现网络操作系统与网元之间更加高效的通信功能。管理平面的主要功能是建立、确认和监视光通道，并在需要时对其进行保护和恢复。

2. ASON 的 3 个接口

ASON 的接口是网络中不同的功能实体之间的连接渠道，它规划了两者之间的通信规则。在 ASON 体系结构中，控制平面和传送平面之间通过 CCI 相连，其可以传送连接控制信息，建立光交换机端口之间的连接。而管理平面则通过 NMLA 和 NMI-T 分别与控制平面及传送平面相连，实现管理平面对控制平面和传送平面的管理。3 个平面通过 3 个接口实现信息的交互。

3.ASON 的 3 种连接

ASON 网络结构中, 根据连接需求的不同以及连接请求对象的不同, 提供了 3 种类型的连接: 永久连接 (PC)、软永久连接 (SPC) 和交换连接 (SC)。

PC 沿袭了传统光网络中的连接建立方式。这种方式是由用户网络通过用户网络接口向管理平面提出请求, 通过网管系统或人工手段根据连接请求以及网络资源利用情况预先计算, 然后管理平面沿着计算好的连接路径通过 NMI-T 向网元发送交叉连接命令进行统一指配, 最终通过传送平面各个网元设备的动作完成通路的建立过程。

SC 是一种由于控制平面的引入而出现的全新动态连接方式。SC 请求由终端用户向控制平面发起, 在控制平面内通过信令和路由消息的动态交互, 在连接终端点 A 和 B 之间计算出一条可用的通路, 最终通过控制平面与传送网元的交互完成连接的建立过程。在 SC 中, 网络中的节点像电话网中的交换机一样, 根据信令信息实时地响应连接请求。SC 实现了在光网络中连接的自动化, 满足快速、动态的要求并符合流量工程的标准。这种类型的连接集中体现了自动交换光网络 ASON 的本质特点, 是 ASON 连接实现的最终目标。

SPC 的建立是由管理平面和控制平面共同完成的, 这种连接的建立方式介于 PC 和 SC 两种连接方式之间, 是一种分段的混合连接方式。在 SPC 中, 用户到网络的部分由管理平面直接配置 (就像建立 PC 一样), 而网络部分的连接通过管理平面向控制平面发起请求, 然后由控制平面完成 (就像建立 SC 一样)。在 SPC 的建立过程中, 管理平面相当于控制平面的一个特殊客户。SPC 具有租用线路连接的属性, 但同时却是通过信令协议完成建立过程的, 所以可以说它是一种从通过网络管理系统配置到通过控制平面信令协议实现的过渡类型的连接方式。

(二) 自动交换光网络 (ASON) 组网技术的优势

鉴于 ASON 所特有的技术特点, 在网络中引入 ASON 有很多好处。

1. 快速提供业务

智能光网络通过控制平面信令和路由信息的操作, 对所需电路能提供自动化的快速点对点的配置能力, 增强了运营商快速提供优质服务的能力, 降低了网络的操作费用, 使之成为有效运行、能赢利的网络, 在电信市场的竞争中取得先机。

2. 可提供不同级别的服务

灵活提供不同 SLA 级别的电路, 可以满足目前迅速发展的差异化服务的

需要。

3. 资源动态分配，带宽利用率高

ASON 采用分布式智能，把网络智能分布到网元上。各智能网元之间通过邻居发现、链路状态更新、计算和维护整个网络的拓扑结构，随时掌握网络的载荷状况，优化利用网络资源，使得网络的带宽利用率明显提高。

4. 提高业务的生存性和可扩展性

在 SDH 环网保护中，只能抵抗单点故障，而 ASON 网络支持网状拓扑，可以有效抵抗网络中的多点故障，真正达到 99.999% 以上的电信级业务等级。网状拓扑结构能保证业务高速直达，链路扩展非常灵活。

5. 自动化程度高，维护成本低

ASON 通过引入控制平面，利用信令实现对业务的快速调配、监控和自动保护，使维护人员减少，运营效率提高，同时也减少了人工出错机会，充分降低了维护难度。

6. 提供新业务能力

ASON 网络通过采用新技术，可以引入新的业务类型，诸如按需带宽业务、波长批发、波长出租、分级的带宽业务、动态波长分配租用业务、带宽交易、光拨号业务、动态路由分配、光层虚拟专用网点等，为运营商提供新的业务增长点。

五、电力通信骨干网技术对比

目前 IP 化和智能化已成为传输网络技术发展的方向。为应对传输技术 IP 化发展，目前传送网在骨干层采用基于波分的 OTN 技术，在汇聚接入层面采用 PTN 技术，在用户接入层面采用 PON 技术。

就通信骨干网而言，应用于大容量传输网的主要有 MSTP、OTN、PTN、ASON 几种主流技术。下面从承载业务及建设成本对其分析：① MSTP 技术。它是目前最成熟的多业务传输技术，组网灵活，业务分插方便，设备稳定，成本低廉，应用广泛。② OTN 技术。OTN 可以面向多种业务（语音、数据等），提供对客户信号的透明传送和光通道的管理，具有大容量交换（交叉）或路由能力。从本质上讲 $OTN=SDH+WDM+GE$ 。其吸取了 SDH 和 WDM 两种技术的优点。③ PTN 技术。它是 NGN 的传输基础，是下一代的宽带传输网络，适合于电信（移动、固网）、电视和数据业务统一的传输网络。其采用成熟和廉价的数据技术，

解决了设备商应对未来业务突发和 IP 化的需求，同时也解决了运营商多种网络重复建设和运维的麻烦。④ ASON 技术。它是对 MSTP 技术的一种革新与改进，其增加了控制层面，使网络更趋智能化，采用该技术可实现网络拓扑自动发现、业务带宽动态分配、在线业务优化调整、端到端业务智能开通等功能，而且网络保护与恢复会更加灵活可靠，该技术已成为目前技术选择的趋势。

从技术成熟度讲，OTN 和 PTN 两种技术目前均处于试点建设阶段，其产品成熟度有待验证。对于这两种技术，三大运营商态度有别，中国移动已明确 3G 传输网的接入层将全部采用 PTN 技术，核心层则采用 OTN 技术；而中国电信和中国联通都只是抱观望态度，出于对投资的保护，现阶段传输网的建设依旧建议采用 MSTP 的技术体制。

参考文献

- [1] 陈歆技.电力系统智能变电站综合自动化实验教程[M].南京：东南大学出版社，2018.04.
- [2] 杨剑锋.电力系统自动化[M].浙江大学出版社，2018.06.
- [3] 谢若承.电力ERP系统运维管理[M].杭州：浙江大学出版社，2018.07.
- [4] 王慧主.电力系统综合实验教程[M].济南：山东大学出版社，2018.03.
- [5] 杨一平，穆亚辉，薛海峰.电力系统安装与调试[M].哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，2018.12.
- [6] 陈晓英.配电系统及其自动化[M].沈阳：东北大学出版社，2018.07.
- [7] 张秀霞.变电站智能辅助综合监控系统应用[M].福州：福建科学技术出版社，2018.12.
- [8] 潘鹏飞.调度自动化系统运维技术[M].沈阳：东北大学出版社，2018.08.
- [9] 杨鲲鹏.电力企业典型应用技术创新研究[M].武汉：华中科技大学出版社，2018.06.
- [10] 李立涅，郭剑波，饶宏.智能电网与能源网融合技术[M].北京：机械工业出版社，2018.05.
- [11] 张建宁，吕庆国，鲍学良.智能电网与电力安全[M].汕头：汕头大学出版社，2019.07.
- [12] 王石磊.智能化电器及应用[M].西安：西安电子科技大学出版社，2019.02.
- [13] 郑树泉，王倩，武智霞.工业智能技术与应用[M].上海：上海科学技术出版社，2019.01.
- [14] 裴明军.电力大数据技术及其应用研究[M].徐州：中国矿业大学出版社，2019.08.
- [15] 李颖，张雪莹，张跃.智能电网配电及用电技术解析[M].文化发展出版社，2019.12.
- [16] 洪露，郭伟，王美刚.机械制造与自动化应用研究[M].北京：航空工业出版社

社, 2019.01.

- [17] 曹敏编.输变电设备物联网关键技术[M].北京:机械工业出版社, 2019.10.
- [18] 郭壮志.配电网馈线故障区段定位的最优化模型与算法[M].郑州:黄河水利出版社, 2019.11.
- [19] 马永生.通信技术与信号传输[M].北京:北京工业大学出版社, 2019.10.
- [20] 徐建亮, 祝惠一.机电设备装配安装与维修[M].北京:北京理工大学出版社, 2019.06.
- [21] 王轶, 李广伟, 孙伟军.电力系统自动化与智能电网[M].长春:吉林科学技术出版社, 2020.09.
- [22] 李清娟.人工智能与产业变革[M].上海:上海财经大学出版社, 2020.01.
- [23] 邱欣杰.智能电网与电力大数据研究[M].合肥:中国科学技术大学出版社, 2020.06.
- [24] 刘天琪, 李华强.电力系统安全稳定分析与控制[M].成都:四川大学出版社, 2020.03.
- [25] 陈敏.人工智能通信理论与算法[M].武汉:华中科技大学出版社, 2020.01.
- [26] 白星振, 刘瑞国.现代供配点技术[M].北京:北京航空航天大学出版社, 2020.11.
- [27] 唐鹤.基于人工智能的电力调度数据应用[M].北京:中国电力出版社, 2020.08.
- [28] 赵振兵.电力视觉技术[M].北京:中国电力出版社, 2020.04.
- [29] 刘洋, 高晓芳, 郑永康, 王维博.智能变电站二次系统现场调试技术[M].南京:河海大学出版社, 2020.09.
- [30] 蒋渊.电网通信机房智能化建设与运维[M].北京:中国水利水电出版社, 2020.10.