

智能自动电压控制 (Smart AVC)技术

丁晓群 周玲 陈光宇 著

Smart AVC



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





丁晓群 男，河海大学能源与电气学院教授、博士生导师，长期从事电力系统无功电压优化运行与控制、电力系统降损节能方面的教学与研究工作，多次获得省、部级科技进步奖。其开发的无功电压自动控制（AVC）系统、降损节能系列产品已经在全国电力系统推广应用达180多家用户。



周玲 女，河海大学能源与电气学院副教授、硕士生导师，多年从事电力系统继电保护、电力系统降损节能方面的教学与研究工作，发表学术论文20多篇。



陈光宇 男，博士，南京河海电力软件有限公司工程师，具有丰富的省级电网无功电压自动控制（AVC）系统研发和工程经验，并擅长潮流和优化算法。

智能自动电压控制 (Smart AVC) 技术

丁晓群 周 玲 陈光宇 著



机械工业出版社

本书是当今介绍智能自动电压控制（AVC）技术的具有新颖性和前瞻性的专业技术书籍。尽管目前对于智能电网和智能 AVC 还没有明确的定义，但是经过近几年的研究，对于它们的基本功能及涉及领域已有所了解，所以本书中的许多概念都是第一次提出，希望达到“抛砖引玉”的效果。

本书主要介绍了智能电网与智能 AVC 的关系；智能 AVC 如何嵌入 EMS/SCADA 平台，做到图、模、库一体化；智能 AVC 怎样对应和处理电网“自愈”；多目标模型求解优化；电网事故时的电压在线预防；告警和评估；可再生能源的接入及配电网 AVC 等。

本书可以作为电力系统部门从事无功电压领域工作的专业技术人员和管理人员的参考书，也可以作为高等院校电力专业的研究生及相关技术人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

智能自动电压控制（Smart AVC）技术/丁晓群，周玲，陈光宇著.
—北京：机械工业出版社，2012.8

ISBN 978-7-111-39210-1

I. ①智… II. ①周…②丁…③陈… III. ①智能控制-电压控制
IV. ①TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 167769 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：刘星宁 责任编辑：任 鑫 版式设计：霍永明

责任校对：肖 琳 封面设计：陈 沛 责任印制：张 楠

北京四季青印刷厂印刷

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·14.75 印张·290 千字

0001—2500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-39210-1

定价：45.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部：(010) 68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部：(010) 88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

序

在过去的十几年间，电网自动电压控制（AVC）系统在提高电压合格率和功率因数合格率、降低网损和电力设备动作次数等方面发挥了重要作用。丁晓群教授领导的研究团队，于2001年在泰州电网研究开发了地区级电网AVC系统，2002年又在福建电网研究开发了省级电网AVC系统。十余年来，该团队先后在县级、地区级与省级电网中安装了180套AVC系统，涵盖了全国22个省级区域。基于上述成果和经验，于2010年由机械工业出版社出版了《电网自动电压控制（AVC）技术及案例分析》一书，书中对电网AVC技术进行了全面的阐述。

近年来，智能电网成为全世界范围内讨论的热点问题，许多国家正在酝酿建设更可靠、更高效、抵抗灾害能力更强、更环保和能与用户友好互动的电网。在这样的背景下，丁晓群教授领导的团队再次抓住机遇，适时提出了智能自动电压控制（Smart AVC）的研究命题，并于2009年5月在河海大学组织了国内首届面向电力系统用户的智能AVC研讨会，开启了智能AVC的学术研究。2011年，丁晓群教授及其团队与福建省泉州供电公司合作，开启了智能AVC的工程研究。该团队紧跟智能电网发展需要，针对当前电网AVC系统存在的问题，研究了智能电网AVC的概念、内容与方法，并在此基础上形成了这本专著。

本书以电网无功优化多目标建模与求解方法为切入点，研究了可再生能源发电接入AVC系统的若干问题、无功优化不同算法间协调控制问题，以及在线预防控制及告警评估等多种当前智能AVC研究的热点课题。此外，读者还可阅读到智能配电网AVC系统的研发思路和工程实施案例，特别是智能AVC与电网自愈一章，阐述了智能AVC在电网异常情况下如何采用软件和硬件的方法达到电网的自愈功能。这方面内容紧贴智能电网的技术特征，将会是今后很长时间内研究方向和热点。本书还从工程角度出发详细阐述了智能AVC嵌入EMS/SCADA系统的具体方案，使得智能AVC技术在工程应用时符合国际标准CIM61970，而且更加灵活。

我相信本书的出版，标志着电网智能AVC迈出了可喜的第一步，为今后智能AVC的研究和应用奠定了基础，也为从事这方面工作的研究开发人员和工程技术人员提供了重要的参考。

鞠平

2012年5月
于河海大学

前言

当前,智能电网在全球范围内受到高度的关注,欧美各国都将智能电网作为其国家战略的重要组成部分,我国国家电网公司也提出了我国的“坚强智能电网”的概念,并提出了2020年全面建成“坚强智能电网”的三步战略规划。

作为智能电网建设的内容之一——智能自动电压控制(Smart Automatic Voltage Control, Smart AVC)也面临着与智能电网同步建设的需要。从宏观上看,智能电网要解决的是现在电网甚至整个电力系统中存在的问题,智能AVC要解决的是在传统的AVC中没有涉及而在今后的自动电压控制系统中必须涉及的问题。国内外智能电网的建设还未具规模,智能AVC的课题研究还显得比较欠缺,河海大学自动电压控制(AVC)课题组早在几年前就首先提出了建设智能AVC的理念,以期达到发、输、配、用电各环节及其相关行业和社会均能获得利益的共赢状态。这种智能AVC能满足安全稳定连续供电,能使电压质量与输电效率同时达到最好,能提高发输变电设备的利用率,并且还能提高社会用电效益。

在2010年11月,河海大学AVC课题组丁晓群教授带领AVC科研团队成员编写了《电网自动电压控制(AVC)技术及案例分析》一书。该书对电网AVC技术领域的最新研究成果进行了分析和提炼,全面介绍了自动电压控制(AVC)的工作原理、建模算法、决策控制、实用操纵等方面的知识,该书是研究小组十几年来在AVC领域的精心研究和心血结晶。在智能电网建设开始,本课题组的团队就十分关注智能AVC的建设和发展。经过精心研究,我们又编写本书,书中就大家关心的智能AVC的框架设计模型,智能AVC与电网“自愈”的概念,智能AVC多目标建模、求解与协调控制算法,智能AVC在线预防控制、告警和评估的研究,智能配电网AVC,智能AVC接纳可再生能源的研究及智能AVC嵌入式方法的实现等问题提出了有参考价值的认识。希望本书能够对智能电网和智能AVC领域感兴趣的广大读者有所帮助。

本书由河海大学能源与电气学院AVC课题组丁晓群教授、周玲副教授组织编写,其中第1、3章由丁晓群教授编写,第6、7章由周玲副教授编写,第2、4、5章由陈光宇博士编写。硕士研究生罗珊珊、吴桂军、袁震也参加本书部分章节的编写工作。本书由丁晓群教授审阅定稿,由罗珊珊进行了全书校对。在此,还要感谢福建省电力公司及泉州供电公司的科技立项,为本书涉及的技术和实施提供的支持。

由于作者水平有限,书中的疏漏和不妥之处在所难免,恳请广大读者指正。

作者

2012年5月于南京河海大学校园

目 录

序

前言

第 1 章 智能电网与智能 AVC	1
1.1 智能电网的分析与定位	1
1.1.1 智能电网	1
1.1.2 智能电网的定位	4
1.2 AVC 的理论及其应用	15
1.2.1 AVC 的分析及其技术	15
1.2.2 智能 AVC 的分析及其技术	26
1.3 智能 AVC	27
1.3.1 实现智能 AVC 的基本条件	27
1.3.2 智能 AVC 的内涵研究	29
1.3.3 智能 AVC 对数据库的要求	35
1.3.4 智能 AVC 的框架设计和研究	39
第 2 章 智能 AVC 嵌入式方法的研究	44
2.1 智能 AVC 嵌入 EMS/SCADA 平台基础条件简要介绍	44
2.1.1 概述	44
2.1.2 系统平台软件	45
2.1.3 图、模、库一体化	46
2.2 智能 AVC 接入标准的研究	46
2.2.1 公共信息模型简介	46
2.2.2 IEC 61970 标准	47
2.2.3 公共信息模型	48
2.2.4 基于中间件技术的 CIS 接口方案	53
2.2.5 HSDA 服务器接口研究	55
2.3 智能 AVC 嵌入方式的研究	58
2.3.1 传统 AVC 嵌入 EMS 系统的方法	58
2.3.2 基于 IEC 61970 标准的嵌入方式研究	59
2.3.3 系统主备无缝切换的研究	60
2.3.4 智能 AVC 嵌入式框架图	60
第 3 章 智能 AVC 与电网“自愈”	62
3.1 电网自愈	62

3.1.1 电网自愈概念	62
3.1.2 电网自愈控制	62
3.1.3 电网安全控制两个研究的方向	65
3.1.4 智能 AVC 的自愈	66
3.2 “自愈”的硬件设备及软件决策系统的改进	68
3.2.1 “自愈”的硬件设备及改进	68
3.2.2 “自愈”的软件决策系统的改进	70
3.3 SVC 和灵敏度分析	73
3.3.1 SVC 在电力系统中的作用及特点	73
3.3.2 SVC 的分类	75
3.3.3 SVC 的数学模型	76
3.3.4 SVC 模型的潮流实现	80
3.3.5 灵敏度分析	82
3.3.6 网损灵敏度指标	83
3.3.7 算例仿真	85
第4章 基于智能 AVC 多目标建模、求解与协调控制算法	88
4.1 传统 AVC 建模和求解方法介绍	88
4.1.1 传统 AVC 的建模	88
4.1.2 传统 AVC 的求解方法	89
4.2 基于多目标智能 AVC 系统的建模研究	93
4.2.1 目标函数	93
4.2.2 等式约束方程	94
4.2.3 不等式约束	94
4.3 基于多目标智能 AVC 系统的求解研究	95
4.3.1 多目标优化简介	95
4.3.2 多目标算法 NSGA- II 的研究	98
4.3.3 改进 Deb 的 NSGA- II 算法的研究	103
4.3.4 模糊多属性决策方法的研究	106
4.4 不同算法间的协调控制应用于智能 AVC 协调控制算法	110
4.4.1 无功优化和变压器经济运行在线协调控制的研究	110
4.4.2 基于经济压差法的无功优化混合计算研究	123
第5章 智能 AVC 在线预防控制及评估的研究	136
5.1 基于电压稳定的智能 AVC 在线预防控制及校正方案的研究	136
5.1.1 静态电压稳定预防控制方法研究	136
5.1.2 基于电压稳定约束的智能 AVC 控制方法的研究	149
5.2 智能 AVC 在线告警及评估的研究	152
5.2.1 在线智能告警分析的研究	152
5.2.2 智能评估内容和交互方式的研究	167

第 6 章 智能配电网 AVC 的研究	169
6.1 配电网	169
6.1.1 配电网概述	169
6.1.2 配电网潮流计算	172
6.1.3 配电网无功优化	176
6.2 智能配电网 AVC	180
6.2.1 智能配电网与配电网 AVC	180
6.2.2 智能配电网 AVC 的关键技术	183
6.3 智能配电网 AVC 与低电压治理系统的开发和实施	186
6.3.1 低电压概述	187
6.3.2 低电压治理的典型方法	189
6.3.3 农网全网电压无功协调控制系统	192
第 7 章 智能 AVC 接纳可再生能源的研究	204
7.1 可再生能源发电的重要性及发电分类	204
7.2 可再生能源的接入对 AVC 系统的影响和要求	207
7.2.1 可再生能源接入对电网功率损耗的影响	208
7.2.2 可再生能源接入对电网功率平衡的影响	208
7.2.3 可再生能源接入对电网电能质量的影响	209
7.2.4 可再生能源接入对系统可靠性的影响	210
7.2.5 可再生能源接入对 AVC 系统的影响与要求	211
7.3 智能 AVC 接入可再生能源发电的研究	213
7.3.1 可再生能源接入系统等效模型研究	214
7.3.2 基于风电模型的无功优化的研究	219
7.4 智能 AVC 处理可再生能源发电中的低电压穿越问题	222
7.4.1 新型 FRT 控制策略的优点	222
7.4.2 双 PWM 变频器的暂态控制	223
7.4.3 两种控制策略优缺点对比	224
参考文献	225

第 1 章 智能电网与智能 AVC

当前，智能电网在全球范围内受到高度的关注。欧美各国都将智能电网作为其国家战略的重要组成部分。我国国家电网公司也提出了“坚强智能电网”的概念，并提出了 2020 年全面建成“坚强智能电网”的三步战略规划。智能电网是集成了现代电力工程技术、分布式发电和储能技术、高级传感和监测控制技术、信息处理与通信技术的新型输配电系统。它能够为用户提供一系列增值服务、实现电网与用户的互动，同时具备自愈和自适应能力、能实现对新能源的灵活接入控制、对海量监测信息的智能分析和智能决策等。作为智能电网建设的内容之一——智能自动电压控制（AVC）也面临着与智能电网同步建设的需要。从宏观上看，智能电网要解决的是现在电网甚至整个电力系统中存在的问题；智能 AVC 要解决的是在传统的自动电压控制系统中没有涉及而在今后的智能 AVC 中必须涉及的问题。众所周知，电压是电能质量的重要指标，电能质量直接影响电网稳定及电力设备安全和电网经济运行。传统的自动电压控制系统主要是解决电压合格率，降低网损率，有效减少电力变压器分接开关、电容器、电抗器设备的动作次数。传统的自动电压控制系统虽然能做到电压的自动调节，但是调节过程往往过于粗放，没有充分做到无功就地、分层平衡的根本要求，对于无功补偿地点往往不合适、容量不到位的现象无能为力；对于配电侧的无功补偿还没有统一控制起来；对于 AVC 系统与厂、站信息共享还要加强。因此，建立包含信息化、数字化、自动化、互动化特征的智能自动电压控制（Smart AVC）系统已经势在必行。

1.1 智能电网的分析与定位

1.1.1 智能电网

到目前为止，智能电网并没有一个确定的概念，各国结合其电力工业发展的具体情况，通过不同领域的研究和实践，形成了各种的发展方向和技术路线，也反映出各国对未来电网发展模式的不同理解。

天津大学余贻鑫院士给出如下定义：智能电网是指一个完全自动化的供电网络，其中的每一个用户和节点都得到了实时监控，并保证了从发电厂到用户端电器之间的每一点上的电流和信息的双向流动。通过广泛应用的分布式智能和宽带通信及自动控制系统的集成，它能保证市场交易的实时进行和电网上各成员之间的无缝

连接及实时互动。

IBM 中国公司高级电力专家 Martin Hauske 的解释, 智能电网有 3 个层面的含义: 首先是利用传感器对发电、输电、配电、供电等关键设备的运行状况进行实时监控; 然后把获得的数据通过网络系统进行收集、整合; 最后通过对数据的分析、挖掘, 达到对整个电力系统运行的优化管理。

从技术发展和应用的角度看, 世界各国、各领域的专家、学者普遍认同以下观点: 智能电网是将先进的传感量测技术、信息通信技术、分析决策技术、自动控制技术和能源电力技术相结合, 并与电网基础设施高度集成而形成的新型现代化电网。

尽管智能电网有待于规范概念和定义, 但是区别于常规电网, 智能电网在主要特征方面已形成如下初步共识, 如图 1-1 所示。

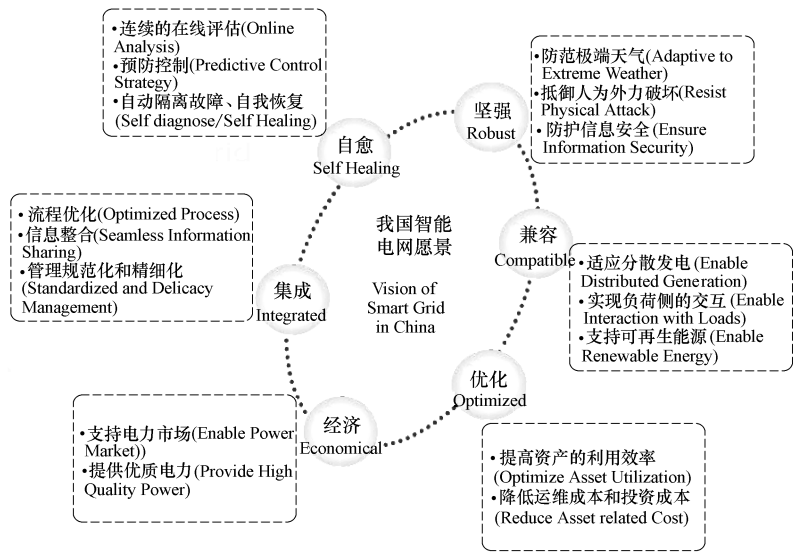


图 1-1 我国智能电网的特征

1. 坚强

在电网发生大扰动和故障时, 仍能保持对用户的供电能力, 而不发生大面积停电事故; 在自然灾害、极端气候条件下或外力破坏下仍能保证电网的安全运行; 具有确保电力信息安全和防计算机病毒破坏的能力。安全问题对智能电网来说是非常关键的, 智能电网的设计者们必须计划一个专注的、周密的能同时对攻击有反应的系统。

对电网的物理攻击和信息攻击近几年一直在不断增加, 不管发生哪种攻击, 智能电网必须抵御两种不同的攻击, 即

- 1) 对电力系统的攻击，基础设施本身就是主要的攻击对象；
- 2) 通过对电力系统的攻击，利用电力系统网络攻击其他基础设施系统，如电信、财政或者政府。

智能电网要能够抵御攻击，它必须能够：

- 1) 通过掩藏、分散、消除或者减少单点故障来减少攻击的威胁；
- 2) 通过保护关键资产免受物理和信息的攻击，以减少电网的弱点；
- 3) 通过恢复核心电力组件来尽量减小攻击的影响。

当然，政府应当选择地资助发展方向或者开发某种高级技术，以保证智能电网的安全。

2. 自愈

智能电网应具有实时、在线和连续的安全评估和分析能力，强大的预警和预防控能力，及时发现、快速诊断和消除故障隐患的能力；故障发生时，在没有或少量人工干预下，能够快速隔离故障、自我恢复，避免大面积停电的发生。在美国德克萨斯州休斯敦的一次模拟停电实验中，智能电网可在最短的时间内识别并恢复系统中最重要的部分，然后继续进行全面恢复。系统重新确定输电线路，从而保证在公用事业公司派出修理人员的同时，几乎不会中断为用户提供的服务。当出现极大规模的停电时，系统通过智能电网的自动恢复功能来实现自愈，快速恢复电力供应。具有自愈功能的智能电网能够实现三大目标：实时监测和快速反应、预测和隔离。

3. 兼容

智能电网应支持可再生能源的有序、合理接入，适应分布式电源和微电网的接入，能够实现与用户的交互和高效互动，满足用户多样化的电力需求并对用户提供增值服务。

智能电网在能源用户和电网之间将会出现可靠的广泛联系。建立这种联系将使用户了解能耗使用情况并做出选择，从而有利于自身和电力企业。基于市场的电力供给将对用户具有更大的吸引力。可以设想，实时电价的实施计划，可通过用户侧和电力企业之间的网关单元给用户提供更多的选择。这个网关提供负载控制功能，用户可以根据实时价格对用电行为进行预编程。为了经济刺激计划，用户会采用新型的智能设备，这样就能够进一步加强和扩展用户对电网的支持，用户和电力企业也将同时受益于电网高效运行而带来效益的自动化过程和项目。新的价格方案可方便用户选择和规划用电，在形成可接受的企业利润的同时，便于形成多样、成本合理的分布式能源。

4. 经济

智能电网应支持电力市场运营和电力交易的有效开展，实现资源的优化配置，降低电网损耗，提高能源利用效率。

5. 集成

智能电网应实现电网信息的高度集成和共享, 并采用统一的平台和模型, 实现标准化、规范化和精益化管理。

6. 优化

智能电网应能优化资产的利用, 降低投资成本和运行维护成本。

1.1.2 智能电网的定位

1. 智能电网的研究背景

近年来, 世界形势和能源发展格局发生了深刻变化, 以电力为中心的新一轮能源革命的序幕已经拉开。智能电网的研究工作起源于美国, 侧重于推广信息化、新能源、新材料和新元件, 并应用在需求侧管理、配电网重构、分布式发电管理等方面。随后部分其他国家认可了其观点, 目标是在 2020 年或更远的将来实现智能电网。欧洲于 2005 年成立了欧洲智能电网论坛, 侧重于推广分布式发电, 并发表了《欧洲未来电网的远景和策略》、《战略性研究议程》、《欧洲未来电网发展策略》3 份报告, 全面阐述了智能电网的发展理念和思路, 以指导欧洲智能电网的建设。

我国在这方面的研究起步相对较晚。近年来, 我国电力行业紧密跟踪欧美发达国家电网智能化的发展趋势, 着力于技术创新, 实行研究与实践并举, 在智能电网发展模式、理念和基础理论、技术体系以及智能设备等方面开展了大量卓有成效的研究和探索。2009 年 5 月, 在北京召开的“2009 特高压输电技术国际会议”上, 国家电网公司正式发布了“坚强智能电网”发展战略。2009 年 8 月, 国家电网公司启动了智能化规划编制、标准体系研究与制定、研究检测中心建设、重大专项研究和试点工程等一系列工作。在 2010 年 3 月召开的全国“两会”上, 温家宝总理在《政府工作报告》中强调: “大力开发低碳技术, 推广高效节能技术, 积极发展新能源和可再生能源, 加强智能电网建设”。这标志着智能电网建设已成为国家的基本发展战略。

2. 智能电网发展的驱动力

进入 21 世纪, 气候变化和资源耗竭问题严重, 在地球资源与环境的强约束下, 电网的发展也因此面临前所未有的机遇与挑战。欧美等经济发达国家在其经济发展的同时, 电力需求也在不断增长, 但是也面临着日益老化的电网框架、运行成本提高等局限。所以这些国家在大力倡导可再生能源、分布式电源, 尤其是鼓励发展风能、太阳能和生物质能等可再生能源。智能电网是当今世界电力系统发展变革的最新趋势。安全、可靠、价格合理的电力供应是国家繁荣、安全的重要保证。

(1) 环境和能源

目前, 能源的供应主要依赖于化石燃料。随着全球能源使用量的增加, 以及不科学使用, 化石燃料等不可再生能源将日益枯竭, 并对环境产生严重影响。世界经

济的发展、人口的增加以及城市化进程的加速，导致全球能源需求总量迅猛增加，引发了国际社会对能源安全和生态安全的普遍担忧。提高能源的使用率、发展清洁能源、优化调整能源消费结构、降低依赖程度，已经成为世界各国解决安全和环保问题、应对全球气候变化的共同选择，而将清洁能源转化为电能，是开发利用清洁能源的最主要途径。开发清洁能源，提高电网的安全可靠性、灵活适应性和资源优化配置能力，已成为当今电网面临的紧迫任务。

(2) 安全可靠与经济高效

随着能源结构的优化调整 and 清洁能源的快速发展，电能在终端能源消费中所占比例日益提高，社会发展对电能的依赖程度也日益增加。电网规模的扩大，一方面有益于资源的优化配置能力，有利于大规模可再生能源的接入和传输；另一方面，电网运行与控制的复杂程度也越来越高，发生大面积停电的风险也日益加大，对实现电能的安全传输和可靠供应提出重大挑战，电网的坚强可靠成为普遍关注的焦点。

促进电力清洁生产，降低电力输送损耗，全面优化电力生产、输送和消费全过程，成为电网发展的必然选择。经济高效的电网必将极大地推动低碳电力、低碳能源乃至低碳经济的发展。

(3) 电网开发与优质服务

市场化改革的深入和用户身份的重新定位，使电力流和信息流由传统的单向流动模式向双向互动模式转变。信息的透明共享、电网的无歧视开放既体现了对价值服务的认同，同时也成为电网无法回避的挑战。电网的透明开放为电网自身的运营发展提供了巨大的机遇，用户的积极、广泛参与对于电网优化资产效能、提高安全水平、降低运营成本具有重要意义，使电网构建新型商业模式、提供电力增值服务以及拓展战略发展空间成为可能，但同时也对电网友好兼容各类电源和用户接入，提供高效优质服务提出了更高的要求。

(4) 技术创新与高效管理

推动技术创新、实现高效管理，已经成为电网迎接发展与挑战的必然选择。在科技发展日新月异的今天，将先进技术与传统电力技术有机高效融合，实现技术转型，全面提高资源优化配置能力，保障安全、优质和可靠的电力供应，提供灵活、高效和便捷的优质服务，是新形势下电网面临的新课题。

3. 国内外智能电网研究与发展

(1) 美国智能电网研究与发展

2001 年，美国电力科学研究院（Electric Power Research Institute, EPRI）创立了智能电网联盟，积极推动智能电网研究，重点开展了智能电网（IntelliGrid）整体信息通信架构研究以及配电侧的业务创新和技术研发。IntelliGrid 项目有两个目标：一是分析出电力系统运行的商业需求，包括现状、未来的各种需求，如自愈电

网概念等；二是以基于这些分析得出的电力系统的需求作为基础，提出支撑未来电力系统的信息需求系统，使用战术性的方法来建立一个战略视图，以战略的高度建立一个不依赖于具体技术的视图框架。这两个目标明确了电力系统是一个融合了电力输送能源基础设施和信息基础设施的能源系统。

2003 年，美国能源部 (DOE) 发布了 “Grid 2030”，对美国未来电网远景进行了阐述。该报告可谓美国电力改革的里程碑式文件，它描绘了美国未来电力系统的设想，并确定了各项研发和试验工作的分阶段目标。同年，电网智能化联盟 (The Grid Wise Alliance) 由美国能源部牵头成立，成员包括跨国技术公司有 AREVA、GE、IBM；电力公司和电网运营商有 AEP (美国电力公司)、包纳维亚 (Bonneville) 电力管理局、PJM 及法国电力集团 (EDF) 等。

2004 年，美国 Battelle 研究所和 IBM 公司先后提出来 “智能化电网” (Intelligent Grid, Intelligent Utility Network-IUN)。Grid Wise 架构委员会成立，其目标是定义一个可互操作、互动通信的智能电网整体框架。

2005 ~ 2006 年，DOE 与美国国家能源技术实验室 (NETL) 合作，发起了 “现代电网” 倡议，任务是进一步细化电网现代化愿景和计划，并在全美范围内达成共识。“现代电网” 倡议创立一个全国范围内共享的关于现代电网主要特性及关键技术领域的一个蓝图。这个蓝图分析了电网的性能和技术缺口，提出了现代电网的国家级概念，鼓励工业界对现代电网的认可并协调区域技术的集成项目。

2007 年 12 月，美国国会颁布了《能源独立与安全法案》，以法律形式确立了智能电网的国家战略地位。

2009 年，美国能源部向国会递交了《智能电网系统报告》，制定了由 20 项指标组成的评价指标体系，对美国智能电网的发展现状进行了评价，并总结了发展中遇到的技术、商业以及财政等方面的挑战。

(2) 欧洲智能电网研究与发展

智能电网成为欧洲电网的发展趋势，尤其是其独特的发展背景。其一，经过逾百年的长期发展，欧洲各国的电力系统已走完了以外延扩张为主的发展阶段，早已具备了可以满足经济社会运转需求的较为充裕的输配电供应能力，对电力行业的要求转向了更加高效、灵活、环保且有利于市场化等方面。其二，欧洲各国的能源政策更加强调对环境的保护和可再生能源发展，尤其是风能、太阳能和生物质能等可再生能源发展是近年来欧盟委员会能源政策的基本着力点和中心目标。因此，基于可再生能源的分布式电源发展成为欧洲电力市场的必然。其三，欧洲天然气管网发达，应用广泛且已市场化，为基于天然气的分布式发电技术的广泛应用提供了良好的能源供应基础和市场基础。

2004 年成立了 “未来电网欧洲技术论坛”，欧洲委员会研究总局为该论坛制定了基本理念和指导原则。

2005 年,“智能电网(Smart Grids)欧洲技术论坛”正式成立,并提出了智能电网(Smart Grids)的概念。作为欧洲 2020 年及以后的电力发展目标,该计划指出未来欧洲电网应具有以下特征:

- 1) 灵活性。在适应未来电网变化与挑战的同时,满足用户多样化的电力需求。
- 2) 可接入性。保证用户能够灵活地接入电网。
- 3) 可靠性。提高电力供应的可靠性与安全性,满足数字化时代的电力需求。
- 4) 经济型。通过技术创新、能源有效管理以及有序的市场竞争等提高电网的经济效益。

将当前的电网转换成一个用户和运营者互动的服务网,以提高欧洲输配电系统的效率、安全性及可靠性,并为分布式和可再生能源发电的大规模整合扫除各种障碍。

2006 年 4 月,未来电力网络技术平台顾问委员会发布了“欧洲未来电力网络视图和战略(Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of Future)”。在这个视图中指出,未来的电力市场和网络必须能为用户提供一个可靠、灵活、可访问和低成本电力供应系统,并要充分利用大型集中的发电厂和小型分布式的电源。终端用户在电力市场和电网上均体现更重要的互动性。电力将由集中和分散的电源提供,电网系统在欧洲各层次上更加互连,促进安全和高效。这个新概念的电力网络成为智能电网视图。同年,欧盟理事会发布能源绿皮书《欧洲可持续的、竞争的和安全的电能策略(A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy)》,强调智能电网技术是保证欧盟电网电能质量的一个关键技术和发展方向。

2008 年,欧洲公用事业电信联合会(UTC)发布了一份名为“智能电网——构建战略性技术规划蓝图(Smart Grids: Building a Strategic Technology Roadmap)”的报告,以帮助公用事业公司做充分的规划准备工作,进而更好地制定智能电网的发展计划,实现智能电网的发展目标。

(3) 我国智能电网研究与发展

随着全球资源环境压力的不断增大,电力市场化进程的不断深入以及用户对计算机可靠性和质量要求的不断提升,电力行业正面临前所未有的挑战和机遇。我国电力行业也面临着类似的情况:在宏观政策层面,电力行业需要满足建设资源节约型和环境友好型社会的要求,以适应气候变化的需要;在市场化改革层面,交易手段与定价方式正在发展,市场供需双方的互动将会越来越频繁。这说明智能电网建设也将成为我国电网发展的一个新方向。我国智能电网方面的研究进展缓慢,甚至是刚刚起步。

2007 年 10 月,华东电网公司启动了智能电网可行性研究项目,密切联系国际先进机构,并结合华东电网的现状和今后发展的要求,提出了三个阶段的发展思路

和行动计划。2010 年初步建成电网高级调度中心, 2020 年全面建成具有初步智能特性的数字化电网, 2030 年针织建成具有自愈功能的智能电网, 争取在智能电网建设的方向上去的实质性的突破。

2008 年, 国家电网公司开始推行电力用户用电信息采集系统, 规划用 3 ~ 5 年的时间实现全网的电能信息采集, 实现“全覆盖、全采集、全预付费”的目标。这将为智能电网的集成通信系统提供一个强大的信息网络平台, 为智能电网的推行奠定了充分的基础。

2009 年 5 月, 在北京召开的“2009 特高压输电技术”国际会议上, 国家电网公司正式对外界公布了“坚强智能电网”计划。会议指出, “发展特高压电网是建设坚强智能电网的基础。为保障安全、清洁、高效、可持续的能源和电力供应, 积极发展智能电网已成为世界电力发展的新趋势”。国家电网同时发布了我国建设坚强智能电网的理念, 即立足自主创新, 建设以特高压电网为骨干网架, 各级电网协调发展, 具有信息化、自动化、互动化特征的坚强智能电网的发展目标。

国家电网公司将分三个阶段推进坚强智能电网建设。2009 ~ 2010 年是规划试点阶段, 重点开展坚强智能电网发展规划, 制定技术和管理标准, 开展关键技术研发和设备研制, 开展各环节的试点; 2011 ~ 2015 年是全面建设阶段, 将加快特高压电网和城乡配电网建设, 初步形成智能电网运行控制和互动服务体系, 关键技术和装备实现重大突破和广泛应用; 2016 ~ 2020 年是引领提升阶段, 将全面建成统一的坚强智能电网, 技术和装备达到国际先进水平。

在国外智能电网发展驱使下, 我国应该根据自己的国情, 抓住机遇, 寻求适合中国特色的智能电网战略规划, 并尽快实施。智能电网的建设必将进一步推动电力工业的变革与进步。

4. 我国智能电网发展障碍

智能电网贯穿发、输、配、用全过程, 通过智能电网的建设, 电力系统各领域都将产生质的飞跃。从总体上看, 我国已经从电力企业、设备制造商、政府机构以及部分风险投资参与的智能电网组织, 已经达成了共识, 协同开展智能电网技术研发与测试。但是我国的经济与电力能源的高速发展, 使得国家电网存在的弊端显露出来, 国内能源和负荷分布不均, 使得智能电网的发展存在一定的障碍。主要体现在以下两个方面:

(1) 电网企业动力

我国目前的电网运行模式比较落后, 电力企业的收益依赖于生产与输送的电量。而新投资的分布式发电、可再生能源以及环境友好型电网的由于基础投资较高, 使得产生的电价成本相对比较昂贵, 使很多企业缺乏足够的动力去投资。短期的经营压力与长期的收益之间产生了矛盾, 电力企业的短期成本的上升, 对其经营产生了很大压力。

(2) 新技术研发与应用

研发新的智能电网技术需要投入大量资金，在研发过程中又具有很高的风险，而且短时期内，高金额的投入，并不一定能够得到高额回报。这既不利于新技术研发测试的融资，也不利于电力企业对新技术进行应用。此外用户对于智能电网的接纳程度尚不明了，这也阻碍了智能电网的推广和应用。

在智能电网的建设过程中，不仅要与国际智能电网组织密切联系和交流，还需要研究机构、电力企业、设备制造商、咨询机构和专家学者共同努力。有关专家针对我国电网存在的问题提出了如下的方法：

1) 针对电力企业存在的收益问题，管理者应当通过打破电网企业销售与利润间的联系来消除障碍，通过调整电费，保证电网能够收回成本。对于通过提高效率而节省能源的方法，国家应该出台一些鼓励政策，适当提供积极的财政激励。

2) 目前我国智能电网的建设主要侧重在输电网侧，但是用电侧、配电侧的智能电网技术同样需要有关专家学者的高度重视。只有达到整个电网共同进步，才能真正推动智能电网的建设与发展。

3) 加强与国外的交流与合作，扬长避短，因地制宜，在目前国内智能电网研究落后于欧美国家时，大量吸收国外的研究与实施的经验，在一定程度上，正确指导我国智能电网的正确发展。

4) 加强研究手段的建设。鼓励专家学者从事智能电网研究工作，包括建设新能源与分布式电源接入技术的实验室。

5. 坚强智能电网

坚强智能电网是以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强网架为基础，以通信信息平台为支撑，具有信息化、自动化、互动化特征，包含电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度各个环节，覆盖所有电压等级，实现电力流、信息流、业务流的高度一体化融合的现代电网。它是坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的现代电网。“坚强”和“智能”是坚强智能电网的基本内涵。只有形成坚强网架结构，构建“坚强”的基础，实现信息化、数字化、自动化、互动化的“智能”技术特征，才能充分发挥坚强智能电网的功能和作用。

特高压就为发展智能电网提供了坚实的基础。我们提出的目标是加快建设以特高压电网为骨干网架，各级电网协调发展，具有信息化、数字化、自动化、互动化特征的坚强智能电网。我们将要建设的坚强智能电网，是一个坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的现代电网。在这个目标的指导下，国家电网将按照统筹规划、统一标准、试点先行、整体推进的原则，加快建设由交流 1000kV 和 $\pm 800\text{kV}$ 、直流 $\pm 1000\text{kV}$ 构成的特高压骨干网架，在实现各级电网协调发展的同时，围绕发电、输电、变电、配电、用电、调度等主要环节和信息化建设等方面，分阶段推进“坚强智能电网”发展。到 2020 年，将全面建成统一的“坚

强智能电网”，使电网的资源配置能力、安全稳定水平以及电网与电源和用户之间的互动性得到显著提高，使“坚强智能电网”在服务经济社会发展中发挥更加重要的作用。

信息化、数字化、自动化、互动化是坚强智能电网的基本技术特征。信息化是坚强智能电网的基本途径，体现为对实时和非实时信息的高度集成和挖掘利用能力；数字化就是将复杂的信息转变为可以度量的数字、数据，再将这些数字、数据建立适当的模型，输入计算机进行统一处理，这也有利于发展数字化电网、数字化电表与数字化用电设备；自动化是坚强智能电网发展水平的直观体现，依靠高效的信息采集传输和集成应用，实现电网自动运行控制与管理水平提升；互动化是坚强智能电网的内在要求，通过信息的实时沟通与分析，实现电力系统各个环节的良性互动和高效协调，提升用户体验，促进电能高效、安全、环保应用。

6. 智能电网核心技术

智能电网的建设需要大量的新型技术和设备，才能满足社会对电网的可靠性、安全性、高效性、低成本、绿色环保等方面的要求。这些技术可以分成以下五个方面。

(1) 通信系统

在建设智能电网需要运用的五类关键技术中，综合开放的通信技术是其中的基础。它是实现其他应用技术所必需的，也是智能电网中必不可少的环节。智能电网不能缺少高效综合的通信，因为数据的获取与传输、电网的保护与控制都需要在通信技术的配合下完成。建设智能电网的重要一步就是要重点建设高效现代化的通信系统。

综合通信系统是一个动态交互体系，实时地反映电网信息和功率的变化，允许用户通过不同速度要求的互连应用软件，在系统中与各种高级电子设备相互配合。各种电力系统应用软件都有着不同的需求，所以首先要精确地制定好系统的技术指标，如速度、冗余容量、可靠性等；其次，要鼓励敦促相关标准的制定，这些技术的进步有赖于世界公认的技术标准的规范化。综合通信系统可以把高级的电子设备 (IED)、智能电表、控制中心、电力操作员、保护系统、用户等连成一个网络。

综合通信系统支持智能电网的高效运行，主要体现在以下两个方面。

1) 开放的通信标准：使各种信息能够被发送者和接收者共同理解和接受。

2) 适当的媒介：为精确、安全、可靠、高速的传输信息提供了必要的基础。

高速、综合的双向通信技术可以满足实时信息和功率变化的通信需要，开放的体系将会创造一个“即插即用”的网络环境，并和整个电网相互配合，组成统一的整体。

(2) 先进的传感与计量技术

传感与计量技术是现代电力系统的重要组成部分。高级传感与计量技术的运用

使系统能够接收和传送数据信息，提高电力系统的管理水平。这项技术能够评估各个元器件以及整个电网的安全性，它支持系统频率的在线策略，可以避免人工投递账单，并能够有效地防止窃电；同时还能够消除阻塞，并通过激励客户对电力消费的选择、需求侧响应以及采取新的控制策略来达到节能减排的目的。

在未来，采用先进数字仪表与传感器的数字通信技术将使更多更复杂的电力系统测量成为可能，使电力服务供应商与客户之间的交流变得更加简单。输电线宽带（BLP）与无线数字通信技术就是完成这些功能的一个很好的例子。传感与计量技术将大力推广电力市场的发展，它允许用户自由选择自己想节省的电能，可以大幅度提高用户对电能的使用效率。整个社会能源使用效率的提高，必然会给环境保护带来益处，整个社会的经济以及公共安全也会因此而得到加强，同时困扰电力系统多年的稳定性问题也将得到彻底地解决。

随着传感与计量技术的未来发展（从用户的角度看），智能电网将不会再有机械计量表和人工抄表员，取而代之的是能够与用户和服务供应商进行双向通行的现代晶体管电表。这些高级电表中的微型处理器将发挥非常重要的作用，它们可以记录一天内不同时段电能使用情况，也可以根据从服务供应商那里接收到的峰价信号，调整用户的电力使用情况，还可以将峰价信号通知给用户，精密的仪器可以追踪用户预先设定好的使用计划。一旦电力价格出现波动，电表就会做出反应，自动控制用户的负荷从而与计划保持一致。最精密成熟的计量表甚至可以提供一些非公用服务，如火灾和防窃报警等。

从电力系统的角度看，先进的传感与计量技术将为电力调度员与计划制定者提供更加翔实的数据。新型的服务器软件系统可以收集、存储、分析、计算大量信息数据，这些计算后的信息数据将传送给公用电网。

传感与计量技术在智能电网系统监测、分析、控制中起着基础性作用，可实现大电网的同步相量测量，提高广域电力系统动态可观测性，为提高电网的安全性、避免大电网连锁反应提供了坚实的信息基础。

（3）电力电子技术

电力电子技术是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术，是电力技术、电子技术和控制技术的融合。在大功率电力电子技术应用以前，电网采用传统的机械式控制方法，具有响应速度慢、不能频繁动作、控制功能离散等局限性。大功率电力电子技术具有更快的响应速度、更好的可控性和更强的控制功能，为智能电网的快速、连续、灵活控制提供了有效的技术手段。

电力电子技术在智能电网中的应用主要体现在以下方面：

1) 具有提升电网资源优化配置能力。如柔性交流输电系统（FACTS）技术能在现有设备中不做重大改动的条件下充分发挥电网的输电潜力；传统的基于晶闸管的电力电子装置，如可控串联补偿（TCSC）能够显著提高特高压线路的有功传输

能力；可控高抗装置 (CSR) 则能有效协调特高压电网无功补偿和限制过电压之间的矛盾。新一代的基于可关断器件的电力电子装置，如静止同步补偿器 (STATCOM)、静止同步串联补偿器 (SSSC)、统一潮流控制器 (UPFC)、静止补偿器 (CSC) 等，结构紧凑且性能大幅提升，有望在智能电网中发挥更大作用。

2) 提高电网安全稳定运行水平。如 FACTS 和电压源换流器的高压直流输电 (VSC-HVDC) 相对于传统输电方案具有更快的响应速度、更好的可控性和更强的控制功能，为智能输电网的快速、连续、灵活控制提供了最有效的技术手段。如果电网中安装适当数量的 FACTS 装置，并采用基于全局优化控制目标的多 FACTS 装置协调控制技术，将大大提高电网安全稳定控制的智能化水平。

3) 提高清洁能源并网运行控制能力。风力发电厂采用 VSC-HVDC 并网具有非常突出的优越性，它不仅能够动态控制无功功率，抑制并网风电场的电压波动与闪变，改善并网系统电能质量，而且可以精确控制有功潮流，有效提高并网系统的暂态稳定性，大幅改善大规模风电场并网性能。

4) 提高电网服务能力。如电力电子变压器 (Power Electronic Transformer, PET) 不仅能实现传统变压器的电压隔离与变换功能，还可以提供动态无功支撑、潮流控制、电能质量控制、软并网和软解列等功能，为分布式电源接入电网提供了一种较先进的技术手段。

5) 代替本地发电装置，向偏远地区、岛屿等小容量负荷供电。如采用 VSC-HVDC 技术向无源网络供电则不受输电距离的限制，几兆瓦到数百兆瓦的输电功率也符合其经济输电范围。

6) 城市配电网增容改造。如采用 VSC-HVDC 向城市中心功能可能成为未来城市增容的最优方案，其可采用地埋式电缆，既不会影响城市市容，也不会有电磁干扰，而且适合长距离电力传输。

(4) 先进的控制方法

智能化的电网必须有能够提供可靠、安全、高效益、稳定、环保的供电服务。先进的控制方法 (ACM) 是分析、诊断、预测现代电网运行状况的工具，进而采取相应措施来判断、排除、减少、避免停电和电能质量扰动。这些方法将控制电能传输、分配和消费过程，同时调整有功功率和无功功率。

先进的控制方法能够实现收集数据和监控网络组件；能够为所有需要的数据点提供接近实时的数据，通过专家诊断，解决现有的、潜在的系统、子系统和组件水平上的问题；结合本地控制系统并集中在控制总体结构中，在适当的时候采取自主行动，以满足实际系统的实时状况；向操作员提供信息和操作，通过有效的人机界面使技术人员对系统状况一目了然。

实施智能电网的先进控制方法有以下好处：

1) 可靠的分配和传输系统将普遍得到改善，从而降低成本；

2) 智能电网将实现自愈功能, 限制具有连带关系的事故, 以防止大面积停电;

3) 具有分析复杂问题的能力, 从而降低重大事故产生的后果;

4) 与消费者紧密联系, 提供能源价格信号, 鼓励他们根据实际供求的影响参与电力市场;

5) 向应急组织提供主要、及时的信息和指导, 减少电网事故的恢复时间;

6) 传输阻塞将减少到最低限, 降低能源价格, 建立更高效的能源市场;

7) 监测供应方和需求方的状态, 以确保电能质量, 并在发生重大事故时及时采取适当措施;

8) 利用分布式能源 (DER) 和分布式电源 (DR) 增加系统效率, 减少对环境的影响;

9) 集成资产利用数据传输到规划模型中, 有助于规划增加系统容量的长期投资;

10) 向状态维修 (CBM) 提供资产物质条件数据项目, 改善资产的整体健康和可靠性, 减少退出服务时间, 降低维修成本, 改善修复或更新决策进程。

(5) 决策支持技术

电网运营商和管理人员要运行一个智能化电网, 需要有必要的工具和训练, 智能界面决策支持 (IIDS) 就是一种必不可少的技术。IIDS 能将复杂的电力系统数据转换成运行人员一目了然的简单信息。运用动画、颜色轮廓、虚拟现实以及其他数据显示技术防止“数据超载”, 并帮助运行人员在发生紧急情况时查明、分析事故原因并有针对性地采取行动。

当智能界面决策支持技术得到广泛应用后, 电网的操作将会更加安全可靠, 由自然灾害和人为错误引起的电网事故将会降到最低, 大量复杂的系统信息将会被系统操作员快速理解和掌握, 使他们可以快速完成以下工作:

1) 快速了解电网的总体状态, 启动电网的自我修复功能, 快速检测和消除潜在的威胁, 保护电网的安全和完整。

2) 检测和控制多样的分布式能源 (包括 DER、DR 和存储设备), 快速处理出现的电能质量问题, 把集中供电和分布式供电对环境影响与经济效益平衡考虑。

3) 检测设备的过负荷情况, 减轻负载或者更换设备来防止昂贵的停电成本, 识别系统资产、人力资源、便携设备的地点和物理地标, 可以极大地增强维修人员和公众的安全, 为完成修复工作提供一个安全的环境, 改善整个电力输电系统的整体操作和维护。

4) 提供友好的界面使用户可以积极参与能源市场和电网的操作, 让负荷成为电网操作的一个积极因素。同时将电网信息更好地传送给利益相关者, 实现系统运行和市场信息的高度透明。

7. 我国智能电网建设

(1) 大规模新能源发电

新能源发电主要是指利用风能、太阳能、生物质能、海洋能和地热能等各种新型可再生能源进行发电。国外的新能源以分散接入为主，我国由于资源状况与经济发展区域的逆向分布，决定了新能源发电具有大规模集中接入的特点。与常规电源相比，大多数新能源发电方式提供的电力具有显著的间歇性和随机波动性，当并网规模较大时，将对电网的安全稳定运行带来影响。作为新能源发电方式的有益补充，储能技术可以通过存储电能来平滑随机和间歇的功率输出，并在大规模新能源发电并网中起到重要作用。

(2) 智能输电网技术

输电网是电能输送的物理通道，是连接发电、配电和用电等环节的纽带。由于我国能源供应和消费呈逆向分布特征，一次能源集中在西部和北部地区，而负荷又集中在中东部和南部地区，因此，需要采用先进的输电技术，建设坚强的网架结构，进行远距离、大容量、低损耗、高效率的电能输送，促进水电、火电、核电和可再生能源基地的大规模集约化开发，实现全国范围内的能源资源优化配置。先进的输电技术是构建智能输电网、满足新能源发展需要、实现资源大范围优化配置的关键技术；智能电网技术为电网的安全稳定经济运行提供重要的保障。先进的输电技术、智能变电站、智能电网调度、输电线路状态检测等都是智能电网中的重要环节，共同建设于输电网技术的发展。

(3) 智能配电网技术

智能配电网 (Smart Distribution Grid, SDG) 是智能电网的重要组成部分，它以灵活、可靠、高效的配电网网架结构和高可靠性、高安全性的通信网络为基础，支持灵活自适应的故障处理和自愈，可满足高渗透率的分布式电源和储能元件接入的要求，可满足用户提高电能质量的要求。智能配电网技术有机集成和融合了现代计算机与通信技术、高级传感和测控等技术，并满足了配电系统集成、互动、自愈、兼容、优化的要求。

(4) 智能用电技术

利用现代通信技术、信息技术、营销技术，构建智能用电服务体系是智能电网的重要工作之一。智能用电是依托智能电网和现代管理理念，利用高级计量、高效控制、高速通信、快速储能等技术，实现现场响应迅速、计量公正准确、数据实时采集、收费方式多样、服务高效便捷，构建智能电网与电力用户电力流、信息流、业务流实时互动的新型供用电关系。智能用电服务系统将供电端到用户端的所有设备，通过传感器连接，形成紧密完整的用电网络，并对信息加以整合分析，实现电力资源的最佳配置，达到降低用户用电成本、提升供电可靠性、提高用电效率的目的，从而带动智能家居、智能交流、智能社区、智能城市的发展。

8. 智能电网展望

智能电网不是终点，而是一个过程。智能电网的建设既是逐步使电网具有智能化的过程，也是复杂的系统工程，需要一系列新技术、新设备的支撑，必须在新技术研究和新设备制造方面取得突破。

展望未来，智能电网将呈现三大发展趋势。

一是数字化电网，这是巨型电网与微电网的有机融合。实现基于广域的电网资源配置功能，使得国家能源安全、能源利用效率得到有效提高，促进可再生能源并网销售，使得用户用电信息、价格信息、能源品种信息、停电信息都得到整合、挖掘和送达，客户用电更加具有选择性，节能、减排、气候变化等国家目标分解到每家用户，建立一个有序消费能源、清洁消费能源的社会。

二是在共同信息模式的基础上建立数据的整合体系和数据的收集体系，目标是整合电力系统中的数据，在此基础上通过更多的传感器采集一线数据，并根据市场价格信号进行实时的高效率的资产管理；现在的电表只是达到能自动地读取，如果将这种电表变成双方的、互动的交流，就能够对需求和供应有一个更好的平衡。

三是全面优化的能源利用决策支持系统。基于智能电网技术的综合资源规划和电力需求，将为电力用户提供双向智能传输系统，这一系统建成之后，高峰期至少节省 5% 的电能。此外，随着能源与环境问题变得越来越重要，智能电网支持在电力高峰期将风能、太阳能等新型可替代能源接入电网，保障 2020 年我国可再生能源市场份额达到 15%。这一目标的实现要依靠节约，但更需要智能电网，因为它将为我国的清洁能源市场带来根本性的变化。

智能电网的未来将实现电流与信息流的高效融合、需求的系统实时响应、停电与电能质量围绕的零经济损失、一种更宽辐射带的消费者选择空间、开放的电力市场竞争环境提供给世界以更优质的服务。所有这一切都将是建立在一种新型的基础设施基础上的，而这种新型的基础设施是满足电源超导的、电源分布式的、电源系统智能化的以及传统电能与清洁电能共存的经济体。

1.2 AVC 的理论及其应用

1.2.1 AVC 的分析及其技术

自动电压控制（Automatic Voltage Control, AVC）是指在正常运行情况下，通过实时监视电网无功功率/电压情况，进行在线优化计算，分层调节控制电网无功电源及变压器分接头，调度自动化主站对接入同一电压等级电网的各节点的无功补偿可控设备实施实时的最优闭环控制，从而满足全网安全电压约束条件下的优化无功潮流运行，达到电压优质和网损最小。从本质上说，自动电压控制的目标就是通

过对电网无功功率分布的重新调整, 保证电网运行在一个更安全、更经济的状态。从整体上看, 自动电压控制的研究工作主要集中在以下几个方面:

1) 在空间上, 怎样利用无功功率/电压控制的区域特性将电网划分成为耦合较为松散的区域; 怎样选取合适的中枢母线和控制发电机。本质上是研究如何将控制目标空间降维, 使不可控问题转化为可控问题。

2) 在时间上, 怎样设计不同控制器的时间常数; 怎样将静态时间断面下的控制策略计算与不断随时间变化的电力系统状态结合。本质上是研究电压控制的动态特性。

3) 在目标上, 怎样提高电网安全性和经济性; 怎样在电网的安全性和经济性目标之间进行协调。这是一个研究如何合理求解控制策略的过程。

为避免无功长距离输送或多级变压器输送, 传统的无功电压控制一般采用分散控制。在这种控制方式下, 各电压控制设备 (发电机、有载调压变压器、电容电抗器组) 仅能获取本地信息, 独立地控制本地的电压。这样的分散控制虽然响应速度快, 不依赖于控制中心, 但由于控制器之间无法协调, 仅保证就地将无功电压控制在一定范围内, 但可能会对主网的无功分布、电压水平产生不利影响, 所以不能保证就地控制对于全网来说就是最好的控制方式。

与分散控制相对应的是电压集中控制, 它需要系统范围内各点的电压信息, 由调度中心产生控制信号。在集中控制中, 每个控制器需要全系统的动态信息, 运行人员监控全系统的电压分布, 然后发出改变全系统无功控制的命令。这种控制方式对无功测量准确度和数据通信有较高的要求, 实施起来有一定的困难, 要求对全系统运行机制有透彻的了解。如果要实现闭环自动控制, 对基础自动化水平、信息通道质量和电压无功监控主机系统性能的要求很高, 不仅投资太大, 且功能过于集中, 风险太大。因此采用这种控制方式只适用于较小的系统。AVC 系统是集散控制系统, 是以上分散控制和集中控制功能的综合体现, 它避免了单独采用分散控制或集中控制的弊端, 扬长避短, 采用 3 层无功电压控制体系, 解决了分散控制不利于全网最优的缺点, 也解决了集中控制风险大的缺点, 实现了全网范围内的无功电压优化运行。

AVC 系统是一个集散控制系统, 即所谓的集中决策分层控制, 具体来说主要由 1 个中心控制子系统和 3 个分散控制子系统组成。包括省调度中心的电压无功综合优化控制系统、地区调度中心的电压无功综合优化控制系统、发电厂的自动电压控制系统和变电站 (主要为 500kV 变电站) 的自动电压控制系统。通过调度主站侧以网损最小为目标函数, 电压合格为约束进行优化计算得出各个调节手段的调整目标, 包括发电厂高压侧的母线电压定值、并联补偿设备的最优投切状态、主变的分接头最优位置, 通过调整达到网络运行的最优状态, 实现无功潮流的最优分布和电压的合格, 最终实现电压调度的自动化。

下面详细介绍省级 AVC 的三层控制结构:

1) 一级控制。由控制速度快 ($< 30\text{s}$) 的发电厂组成, 根据高压母线电压设定值进行闭环控制。电厂 AVC 主要由两种方式: 一种是电厂监控系统具有全厂 AVC 控制功能, 一种是在电厂内增加 AVQC 装置, 实现全厂机组的电压无功综合自动控制。电厂 AVC 功能可根据中调下发的定值进行控制, 也可自动精确跟踪根据逆调压原则制定的母线电压计划。由于发电机的电压无功控制是连续的、快速的、安全的, 且具有较大的调整范围, 因此主要用来控制全网的电压水平和实现电压的快速校正控制。一级控制的周期一般为 $10 \sim 60\text{s}$, 高压母线控制死区应不小于 0.5kV (负荷变化引起的随机扰动幅度大致为 $0.3 \sim 4\text{V}$)。

2) 二级控制。由地区 AVC 系统组成。地区 AVC 系统根据省调度中心下发的功率因数考核指标和低压母线电压 (110kV 、 10kV) 考核自动控制地区范围内的 220kV 、 110kV 变电站内主变压器分接头和并联补偿设备, 保证地区电压质量和降低网损, 同时协调省级 AVC 系统进行全网的无功电压控制。根据功率因数的考核进行并联补偿设备的控制, 可保证省级主力电厂有足够的无功备用来控制全网的电压水平, 并可提高电压的稳定性。对功率因数的控制由原来的宽带控制变为窄带控制。二级控制的周期一般为 $1 \sim 5\text{min}$, 功率因数的控制死区一般不小于 0.005 (对负荷为 800MW 的地区系统, 功率因数在 $0.95 \sim 0.99$ 之间时, 相应的无功控制死区大约为 $15 \sim 34\text{Mvar}$)。

3) 三级控制。由省调中心的 AVC 构成, 通过全网的优化计算得到电厂高压母线电压、 500kV 变电站变压器分接头和并联补偿设备的投切状态以及地区功率因数考核指标, 然后通过通信网络将优化控制指标下发到电厂 AVQC、 500kV 变电站 AVC 系统、地区 AVC 系统去执行。由于 500kV 电网和 220kV 电网是电磁环网, 500kV 变电站的控制目前不宜通过在变电站安装 AVQC 装置来实现, 应纳入三级优化控制中进行综合协调控制。三级控制的周期对发电厂一般为 $15 \sim 30\text{min}$, 对 500kV 变电站为每日 $2 \sim 5$ 次, 网损的控制死区一般不小于 0.2MW 。

4) 三层控制的协调关系。由电厂组成的一级控制利用快速和安全的控制来保证全网的优化电压水平, 从而使高压输电系统近似在优化状态下运行。地区 AVC 作为二级控制不但要提高地区电压水平和降低网损, 同时还要通过控制功率因数保证一级控制有足够的备用容量以保证全网的电压优化控制和电压的稳定。三级控制通过全网的优化进行总体的协调控制, 通过控制 500kV 主变压器分接头保证 220kV 和 500kV 电网的总体电压水平, 通过投切 35kV 并联电容器和电抗器来保证 220kV 和 500kV 无功的分层平衡, 通过对二级控制下发功率因数指标保证一级控制的顺利实施。

控制系统电压使其运行在安全稳定的水平是 AVC 追求的目标。由于电压与无功功率的强耦合关系, 调压实际上就是调整系统的无功功率分布。能够影响系统无

功率分布的装置有发电机端电压、有载调压变压器分接头、并联电容器和电抗器、调相机、静止补偿器等，通过对这些装备的调节或投切，可以影响系统的无功功率，具体如下：

(1) 调节发电机机端电压

发电机既能给系统提供有功功率，又能提供无功功率，是电力系统中唯一能同时提供两种功率的电源。除了能够提供有功功率，发电机在必要时能够进相运行，以吸收电网中多余的无功功率。发电机具有连续可调、响应速度快的特点，而且不像无功补偿装置那样需要增加额外的投资。所有这些特点使得发电机成为无功电压控制的主要手段，是保证电压质量和无功平衡、提高电网可靠性和经济性必不可少的措施之一。

发电机机端电压由励磁调节器控制，改变调节器的电压整定值即可改变机端电压。励磁系统一般包括两个主要组成部分，即励磁功率单元和励磁调节器。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），在发电机定子和转子间产生气隙磁通，充当发电机进行机电能量转换的媒介；励磁调节器监测发电机的机端电压、电流或其他状态量，然后按照给定的调节准则对励磁功率单元发出控制信号，控制励磁功率单元的输出，进而调节发电机机端电压达到给定值。

发电机的机端电压与发电机的无功功率输出密切相关。当增加发电机的机端电压时，同时也增加了发电机的无功功率输出；反之，降低发电机的机端电压，也就减少发电机的无功功率输出甚至进相运行。因此，发电机的机端电压的调节受发电机无功功率极限的限制。当发电机输出的无功功率达到其上限或者下限时，发电机就不能继续进行调压。发电机的无功输出极限与发电机的有功出力有关，有功出力较小时，无功功率调节的范围会更大一些，调压的能力会更强一些。多台机组同时进相运行会影响系统的稳定性，因此必须做大量稳定计算以确定系统在安全稳定的条件下安排机组进相运行。

(2) 调节有载调压变压器分接头

在变电站中，为了调压，目前普遍采用有载调压变压器。它通过改变高压绕组（对于三绕组变压器，还有中压绕组）的分接头进行调压。当低压侧母线电压偏高时，调节分接头使得主变压器电压比增大，降低低压侧母线电压；当低压侧母线电压偏低时，调节分接头使得主变压器电压比减小，提高低压侧母线电压。这种调压方式灵活、可靠、投资较小。

需要注意的是，变压器本身不产生无功功率，只是通过其分接头的调节来改变系统无功功率的分布，从而提高或降低系统局部电压。当系统中无功功率电源缺乏时，若通过改变变压器变比升高电压，会使系统其他地方无功功率电源更加缺乏，从而使其电压下降，严重时会引起系统电压大面积下降，甚至导致系统电压不稳定。因此，当系统中无功功率缺乏时，应首选并联补偿调压，而当无功功率充足

时,采用改变变压器电压比才可以达到很好的效果,否则效果相反。

(3) 应用无功补偿装置调节电压

在电网适当的地点接入并联无功补偿装置,能够减小线路和变压器输送的无功功率,因而可减小线路和变压器的电压降落并提高电网的电压水平,同时还能减小电网的功率损耗,提高经济效益。当系统负荷变化时,通过调节无功补偿装置输出的无功功率,就能控制电网的电压。常用的无功补偿装置是并联电容器和并联电抗器,在高峰负荷时投入并联电容器能够提高电网的电压水平;在负荷较低时,可以切除部分电容器,甚至全部切除而投入并联电抗器,防止电压水平过高。20 世纪 80 年代提出的柔性交流输电系统 (FACTS),是以电力电子技术成熟发展为前提,基于这种技术的静止无功补偿器 (SVC) 和静止同步补偿器 (STATCOM) 目前已被电力系统大量采用。它们的优点是:与旋转同步调相机相比,结构简单,且无转动部件,运行维护方便,并且效率也较高;与利用真空开关切换电容的无功补偿相比,后者只能分级调节,完全没有动态响应的能力。

AVC 系统在国内外先后投入使用。1972 年的国际大电网会议提出了协调性电压控制,并对法国电力集团 (Electricite De France, EDF) 以“先导节点”、“控制区域”为基础的电压分级控制方案的结构进行了详细介绍。这种电压分级控制方案将电网划分成互相解耦的区域,按空间和时间把电压控制分为若干个等级,在每个区域中选择控制一个或多个中枢母线或者几台发电机。根据这种控制方案思想开发的分层分区的 AVC 系统在 20 世纪 70 年代曾在法国、意大利等欧洲国家得到应用。

此后,为了应对法国电网联系日趋紧密的情况,EDF 对这种电压分级控制方案进行了完善和改进,提出了新的协调二次电压控制系统,并在多年的实践实验后于 1993 年投入试运行。意大利国家电力公司也实现了电压与无功功率的自动控制,普遍实现了二次、三次电压调整,使用的是在线分层控制结构。这种三级组织模式分级分区的电压控制策略受到了法国、意大利等欧洲国家的认可,并被付诸实施,运行多年以来取得了令人满意的效果。

日本东京则在主要变电所内装设电压和无功自动控制器。该装置能快速准确地投切并联无功补偿设备及控制选择有载变压器分接开关,该方案主要应用在 500kV 变电站,保证了 500kV 及二次电网的电压水平,同时也提高了电压的稳定性。

我国省网 AVC 的最早使用是在 2003 年,当时成功构建了湖南电网 AVC 的主体框架,系统采用的是省调决策层与厂站执行层的两层体系结构,采用了实时网络灵敏度分析技术,提出了以电压为核心的九区控制图。

此外,华东电网中的安徽、福建、江苏三省,东北电网中的黑龙江、吉林两省也有省网 AVC 的应用。其中安徽省调使用的是在 EMS 平台上的 AVC 系统;福建省调使用的是集中决策、分散控制的方式;江苏省调采用的是基于全局模式的无功

电压控制。到目前为止, 全国大多数省网基本上都安装了省网 AVC 系统。

地级电网 AVC 系统使用较为广泛, 其中早在 2001 年以本书著作者牵头在江苏泰州电网运行了基于全网无功优化的集中式电压自动控制系统, 该系统以节点电压合格为目标, 以全网网损尽量小为约束条件, 利用各变电所内无功调节装置进行调节, 实现了地区电网无功电压集中优化控制。江西九江电网在 EMS 系统平台上用遗传算法求得的全网无功优化结果指导给出控制方案, 然后通过 SCADA 下行命令实现闭环。福建厦门电网则采用灵敏度分析技术和费用评估技术, 综合考虑电压、网损、功率因数、设备控制费用等因素建立了数学模型, 实现了对电压的校正和网损的减小。重庆杨家坪电网使用模拟退火算法和多 Agent 技术来建立配电网电压无功控制系统模型, 在实时系统中运行, 在调度自动化主站实现了采用多 Agent 技术的配电网无功优化控制。

在发电厂无功电压控制子系统方面, 福建电网省调直属火电厂采用的是产品 SL300 通信监控平台和 CAM212 综合测控装置的组合, 然后在此基础上增加了对发电机电压和无功的控制功能模块, 可实现多台机组的综合同步控制; 河南省电网则开发了具有自辨识功能的模糊自动电压无功控制装置, 并在新乡电厂的发电机组上首先投入运行。

根据河海大学丁晓群教授和海南省电力公司调度中心唐寅生教授提出的理念, 将 AVC 的发展分为三个阶段: 传统 AVC, 也就是目前广泛使用的 AVC 产品; 二代 AVC, 主要是在传统 AVC 的基础上增加了电网无功功率实时监测技术; 三代 AVC, 即智能电网环境下的智能 AVC。

什么是传统 AVC? 今天在电力系统现场领域使用的 AVC 系统就是传统 AVC。

国内的无功电压控制 (传统 AVC) 的研究始于 20 世纪 80 年代, 其控制模式先后经历了 VQC (变电站内电压无功控制系统)、基于全网优化的集中式自动电压控制、基于“软”分区的全网三级电压控制、基于全网优化的分布式控制。各种控制模式都在其不同的特殊领域发挥了重要作用, 取得了可观的社会和经济效益。下面对目前使用较广泛的三种控制模式: 基于全网优化的地区电网集中式 AVC、基于全网优化的地区电网分布式 AVC 以及基于“软”分区的全网无功优化三级控制的 AVC, 进行分析比较。

(1) 基于全网优化的地区电网集中式 AVC

此种控制模式主要适用于只有单个调度中心和单个监控中心模式下的中小型地调, 其控制过程描述如下:

- 1) 首先通过调度自动化的数据采集系统 (SCADA 系统) 采集全网内各节点遥测、遥信等实时数据进行在线分析和计算;
- 2) 约束条件通常包括各节点电压是否合格、省网关口功率因数等;
- 3) 从全网角度实现无功补偿设备投入时间、数量最优和无功分层、就地平衡

与电压稳定，实现电压合格率最高和输电网损率最小的最优化运行目标；

4) 形成有载调压变压器分接头调节、无功补偿设备投切控制指令，借助调度自动化系统的“四遥”（遥信、遥测、遥控和遥调）功能，并利用通信和 IT 技术，将指令通过数据形式发送到 SCADA 系统，实现对全网各变电所的有载调压变压器和无功补偿设备的集中监视、集中管理和集中控制，实现全网电压及无功优化的闭环控制。

图 1-2 说明了基于全网的集中式二级电压自动控制系统的流程。地区集中式 AVC 系统从 SCADA 系统或者省网 AVC 通过地网 AVC 系统接口获取遥测通信数据和省网关口约束，经过判断电压越限和关口功率因数越限与否后分两部分进行：越限则进行功率因数和电压校正；不越限则进行全网无功优化。经过灵敏度和最优算法计算，形成遥控、遥调指令，并将指令发送回 SCADA 系统。

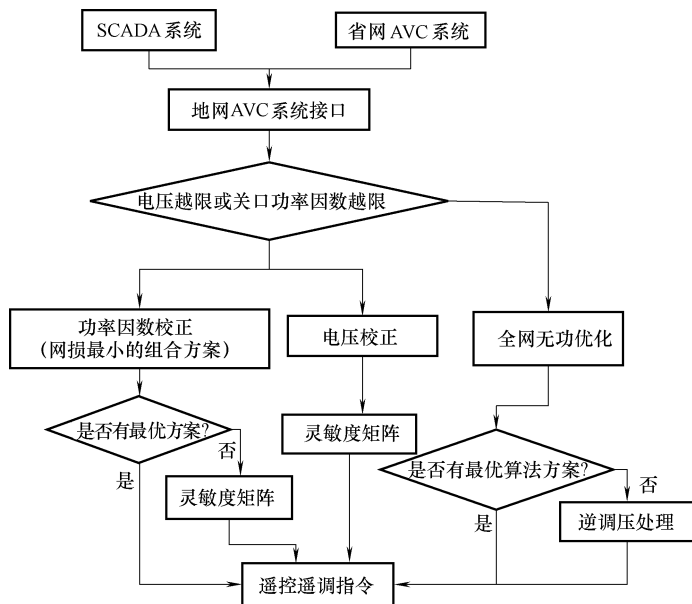


图 1-2 基于全网的集中式二级电压自动控制系统流程图

(2) 基于全网优化的地区电网分布式 AVC

传统的无功电压集中式控制系统的适用于控制只有单个调度中心和单个监控中心模式下的中小型地调，但并不适用于大型地调的全网无功电压控制，也不利于与省网无功电压控制的结合及目前国家电网正在全面推广的大集控、大运行模式。大型城市的电网通常结构复杂，调度室与其监控中心（集控站）分开，而监控中心不止一处。监控中心（集控站）是按地域划分而不是按电网结构的耦合程度划分，各监控中心所控厂站之间有可能紧密结合，但在电网结构上无法按照行政区域划分来解耦，甚至同一个变电所的两台主变压器分属不同监控中心控制，因此只有全网

集中控制已经不能解决调度权与多个监控权之间的组织、优先级、责任归属的问题。随着新的管理理念和运行模式上的变化,新的基于全网优化的分布式协调控制系统产生。图 1-3 所示为分布式 AVC 二级控制系统结构。

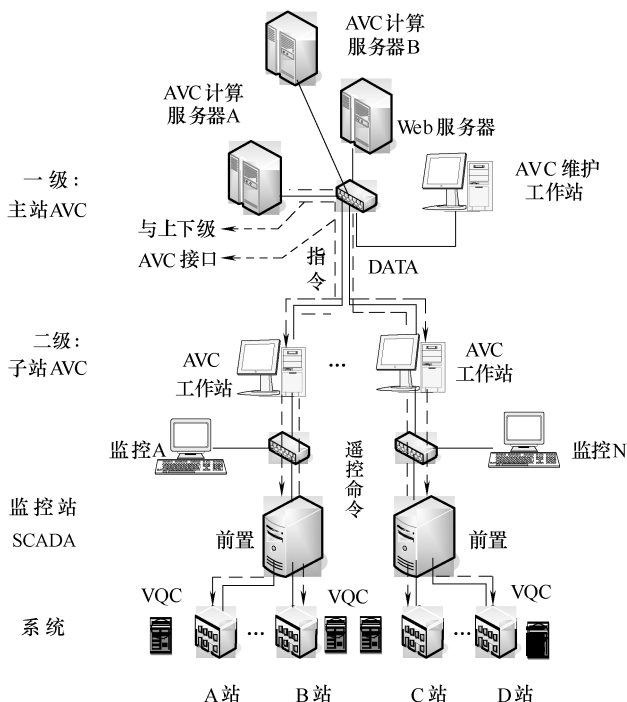


图 1-3 分布式 AVC 二级控制系统示意图

地区电网 AVC 分布式控制系统主要由硬件系统和软件系统两大部分构成,其简明的逻辑框图如图 1-4 所示。

由图 1-3 可以看出对分布式二级控制,首先一级控制的组成部分包括:主站 SCADA 系统,AVC 计算服务器和接口以及 Web 服务器等设备。一级控制主要是通过 SCADA 系统接收现场实时数据,包括监控站 SCADA 的数据,给主站计算服务器进行实时在线计算,同时一级控制还兼顾到了协调控制的原则,即与上级电网以及下级电网的协调控制。二级控制包括:监控站的 SCADA 系统、AVC 工作站和接口等,它是执行层,其目的主要是上传本地实时数据以及接收一级控制下发的命令。同时二级控制还要提供监控站内的实时数据给监控人员监视和分析。分布式二级协调控制很好地解决了集控产生后的管理和运行模式的变化,同时兼顾到了上级电网和下级电网的协调控制。

(3) 基于“软”分区的全网无功优化三级控制的 AVC

结合国内实际的电力调度管理体制和自动化的硬件基础,为了系统地解决多目

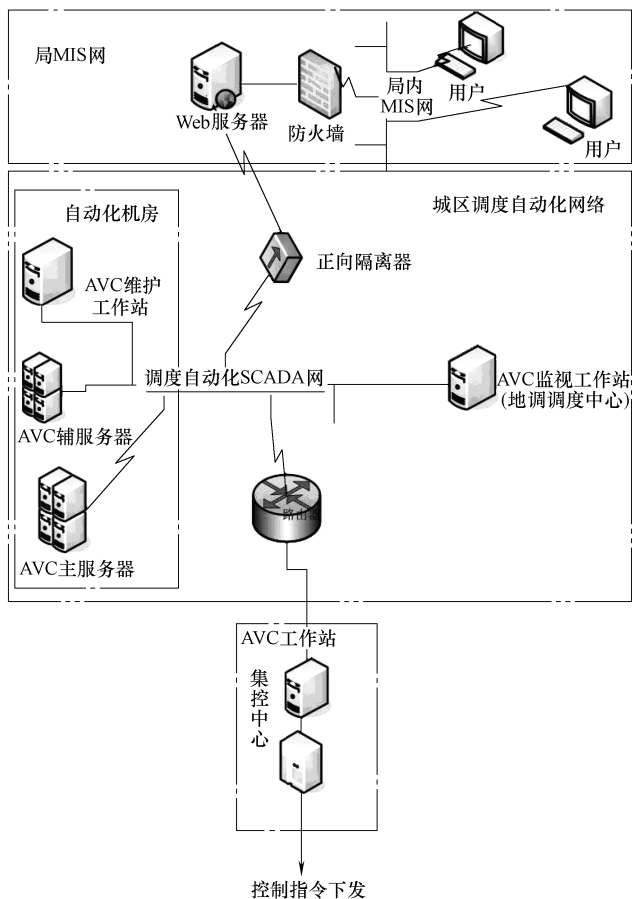


图 1-4 分布式 AVC 多级控制示意图

标决策问题，鉴于国外三级控制，国内提出了基于“软”分级分区的全局无功优化控制策略。在图 1-5 中，在控制中心中，以开放分布式的能量管理系统（EMS）作为决策支持，全局无功优化控制决策系统在软件组织上被分成两个级别，为区别于硬件上的三级控制，分别称之为“软”二级控制和“软”三级控制。

“软”二级控制利用在线自适应分区的结果，采集经过实时状态估计的“熟”数据（在实时状态估计运行不正常时，直接采集 SCADA 的“生”数据），并通过 SCADA 系统，对各个区域周期性地以轮循方式实现自动的、闭环的控制，并通过修改区域内一级控制器的整定值来维持该区域的枢纽母线电压水平和无功发电裕度。“软”三级控制基于状态估计和网络分析，运行在 EMS 的最高层次上，用以协调“软”二级分区控制的行为，以实现安全约束下的网损最小。

江苏和河北两省的“软”三级控制模式的成功使用表明：“软”三级电压控制

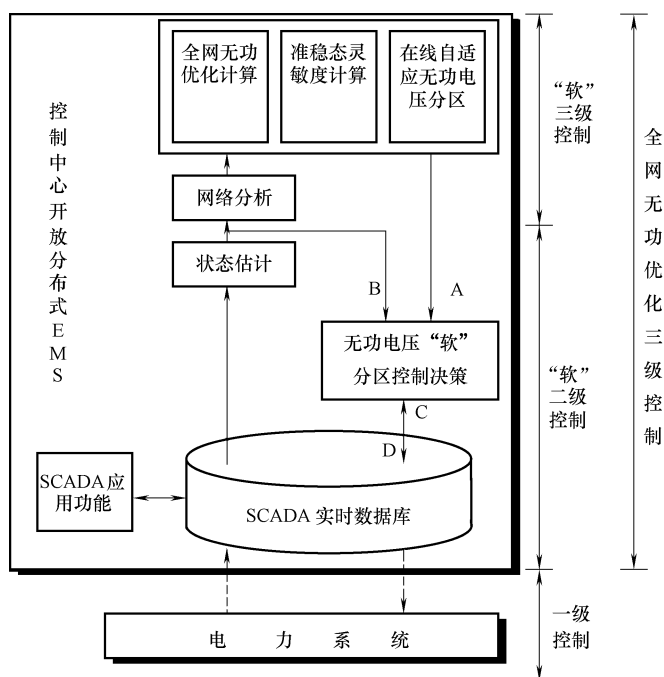


图 1-5 基于“软”分级分区的全网无功优化三级控制

模式在借鉴了国外三级电压控制模式思想的同时结合了国内的电网无功优化的实际情况，很好地解决了在国内没有二级电压控制器的情况下实现三级电压控制的方法。

二代 AVC 与传统 AVC 相比最大的优越性在于其增添了电网无功功率实时监测技术。其目的是进一步促进电网无功补偿装置布局走向就地平衡，进一步推进转变电网提高电压质量与降低线损的方式，逐步把电容器组改为动态平滑连续调节的无功补偿装置，所以这也是个漫长的阶段。但这也有一个原则，即只有无功平衡了，电压才能稳定。

作为二代 AVC 重要基础的无功在线实时监测的基本做法可概括为：根据 SCADA 系统采集到的电压（ U ）、有功功率（ P ）、无功功率（ Q ）等数据，利用无功优化潮流算法，将给定电压约束和功率因数约束条件下的全网无功优化潮流作为目标，按照监测与控制系统要求的刷新速度，以给定电压约束下的全网无功优化潮流为目标，按以下公式求出无功补偿量：

$$\Delta Q = Q_{\text{opt}} - Q_{\text{ret}} \quad (1-1)$$

式中， Q_{opt} 表示发电厂、变电站及分布式电源应该注入电网界面的实时无功优化值； Q_{ret} 表示无功实际值。

尽管 AVC 的投入使用，给电网的运行与分析带来了巨大的效益，但是由于其

功能的不完善,在运行中还存在着一系列急需改进的问题。下面具体分析目前 AVC 在运行过程中发现的问题:

(1) 无功补偿分布不合理

长期以来的一些做法是使用传统的调相调压法规划电网无功补偿容量,长期执行“功率因数调整电费办法”,采用各种不同电压等级的变电所无功补偿装置设计技术规定,这造成了当前电网无功补偿布局不合理的现状:配电网侧电容器补偿容量较少,没有做到无功补偿就地平衡,无功只是从高压侧向低压侧流动,从电源侧向负荷侧流动,造成电网损耗大,电压降落大。

(2) 电压控制结构不合理

自动电压控制系统由安装在变电站的 VQC 无功电压自控装置到地区电网无功电压集中控制系统,再到现在的无功电压分布式控制系统,保证了电网电压质量、安全稳定运行、降低网损及降低运行人员工作强度。但是,自动电压控制系统目前仅在输电侧发挥功效,配电侧无功电压自动控制研究还相对较少,不足以满足人们对电网高效、经济、优化运行的追求,不能满足智能配电网的技术要求。

(3) 电压控制区域不合理

AVC 的变压器分接头动作、电容(抗)器的无功调节无法做到均匀调节,相邻两级电网之间的无功电压控制不和谐。因此无法建立全网统一的电压标准,只能以本地测量电压为依据,分散测量误差使得优化结果受到了一定影响。

(4) 优化目标协调不合理

降损与电压质量目标不统一,无功调控顾此失彼。电网从发电到用电是一个有机的整体,只有做到各个环节相互协调、信息互动,才能从现代电网向智能电网进行转变。随着电网的发展,如何保证各种分布式电源的安全,可靠的接入电网,在传统电压控制中没有体现。

(5) 无功优化结果不理想

传统 AVC 系统一方面存在网损和电压控制顾此失彼的情况;另一方面只实现了静态无功优化,还没有做到真正意义上的动态无功优化。此外,模型未计及谐波电压,而随着非线性元件的广泛使用,谐波的危害愈加剧烈,而且当电网出现较大故障时,尚不具备自愈的能力。

(6) 缺乏动态无功补偿装置

要想做到无功功率的就地平衡,必须要具有平滑的连续调节的无功补偿装置,否则无功功率的就地平衡将无从谈起。目前,不管配电网还是输电网,由于动态无功补偿装置的价格远比并联电容器和电抗器的价格高,普遍使用的还是并联电容器和并联电抗器。而这两种无功补偿装置都只能按组投切,而且并联电容器发出的无功功率随着并联的端电压下降,发出的无功功率也将减小,会导致电压的进一步下降,不利于电压的稳定性。

我国电网这么多年来实施的二级或三级电压控制尚不算是真正意义上的全局无功优化,因为它没有将全网范围内所有控制设备用统一的目标函数进行定量的优化调度,而是只以电压作为单目标的控制对象,这种将目标层次化的做法没有综合考虑网损率指标和控制设备动作次数。同时为了降低难度,通常在对上层进行控制对下层整定值修改时不计下层控制的允许限制和响应能力,这种做法得到的结果显然不能满足控制设备动作次数的限制,不能实现最优化的经济运行。

1.2.2 智能 AVC 的分析及其技术

目前对智能电网的概念尚未有统一认识,但是一致认为智能电网的技术特征包括信息化、数字化、自动化、互动化。当前电力系统中电压控制和无功优化方面主要需要解决的问题是:调整无功补偿装置与容量,发挥现有设备的调压潜力,进一步提高电压质量的同时,增强电网安全稳定运行的能力,减少电网的有功损耗,达到最经济、合理、有效的调压效果。要满足智能电网下的电压自动智能控制,必须要认识到智能 AVC 和传统 AVC 在控制目标、控制对象、控制范围、控制方式方面的不同。

信息化、数字化、自动化、互动化是智能电网的技术特征,也是智能 AVC 的技术特征,在系统的设计和应用上具体可通过结构系统化、分析精细化、控制智能化及互动和谐化来体现。信息化是智能 AVC 的实施基础,对电网运行的实时信息 and 非实时信息进行高度集成,作为智能 AVC 系统的精细分析、智能控制等功能的数据来源。数字化是智能 AVC 的主要实现形式,通过精确描述电网运行状态,实现各类分析及控制信息的高效传输和共享利用。自动化是智能 AVC 的重要实现手段,依靠先进的自动控制策略,对电网运行方式进行自动调整,保证电网经济、高效和安全运行。互动化是智能 AVC 的内在要求,以电压控制作为串联起发电、供电及用户的桥梁纽带,是实现三者的友好互动和相互协调。

智能 AVC 的提出,是智能电网建设迈出的又一个坚定有力的步伐,但是目前智能 AVC 的建设尚属于理念的阶段,具体的实施还要面临巨大的困难。首先,“智能”不是“傻瓜”,智能 AVC 不是简单、直接的功能组织和集成。其次,按照信息化、数字化、自动化和互动和谐化要求,其主要建设难点包括技术条件尚不完善,配网自动化建设任务重,统一数据平台建设阻力大,高水平技术多在输电侧。而且,智能电网中体现的自愈、互动、兼容、优化、集成五大优点的实现技术难度大。

智能 AVC 的技术难点主要在以下几个方面:

1) 集成通信平台的建立。信息技术的快速发展,众多厂家在数据采集、信息传输等技术领域开发出了自己的系统。这就造成了一定的技术壁垒,如系统间的数据不能共享,功能重复等。

2) 灵活的电网拓扑。电网运行状态变化频繁, 相应的电网拓扑变化大, 对建设智能 AVC 提出了挑战, 如何适应以及面对拓扑变化快的现状是我们关心的问题。

3) 系统模型的建立。如果采用精确的系统模型计算时间长, 简单的系统模型计算准确度不够, 如何权衡计算时间和计算准确度是智能 AVC 的技术难点之一。

4) 发电、输电、配电及用电的一体化。系统一体化建设, 要求各个单元能够协调控制, 如何解决控制系统间的协调以及面对电网的快速变化, 如何做到集中控制与分布控制的协调和自适应是智能 AVC 的技术难点之一。

智能 AVC 是智能电网中一个全新的概念, 需要发电、供电、用户三方以及学术界与工程界的共同努力, 相信在不久的将来智能 AVC 在我国将会实现, 也将给我们的电网, 给我们的生活带来不可估计的效益。

1. 预防电网事故

智能 AVC 系统能实时掌控电网运行状态, 及时发现、消除故障隐患, 在尽量少的人工参与下, 避免由电压引起的大面积停电事故, 即具有电网自愈能力。

2. 优化电网运行

优化资源配置、优化资产使用、降低电网损耗和提高设备利用率, 在不同区域间进行及时调度、优化无功潮流流动, 实现整个电力系统优化运行, 即优化能力。

3. 分布式电源友好接入

支持太阳能、风能等分布式电源友好接入, 促进电力与自然环境、社会经济和谐发展的要求, 即解决新能源出现的问题。

4. 降低电网成本

提升电网输电效率、减少运行维护和建设成本, 降低电网企业的综合运营成本, 即少花钱多办事。

5. 增加供电可靠性

增加电网供电可靠性, 实现用户与电网企业的互动, 提升用户参与电能调节的积极性。

1.3 智能 AVC

智能 AVC 是智能电网建设的重要内容之一, 根据智能电网的建设目标, 本章结合 AVC 的需求, 进行智能 AVC 的框架设计和研究, 并提出若干思考, 围绕自动化、信息化和互动化提升智能 AVC 的安全、经济运行水平。

1.3.1 实现智能 AVC 的基本条件

1. 智能 AVC 的研究现状

传统的自动电压控制系统主要是解决电压合格率、降低网损率、有效减少电力

变压器分接开关、电容器、电抗器的动作次数。传统的 AVC 系统虽然能做到电压的自动调节,但是调节过程往往不够精细,没有充分做到无功就地、分层平衡的根本要求,对于无功补偿地点往往不合适、容量不到位的现象无能为力;对于配电侧的无功补偿也没有统一控制起来;对于 AVC 系统与厂、站信息共享还需加强。

目前传统 AVC 软件大多数均以电压合格为目标而制定无功控制策略,这样在软件的实时和运用过程中会带来以下问题:

- 1) 降损与电压质量无功调控顾此失彼;
- 2) 相邻两级电网之间的无功电压控制不和谐;
- 3) 无功补偿装置管理与无功控制不一致;
- 4) 看重电压合格率,很少顾及电网无功就地平衡,失去经济性;
- 5) 电力需求侧不首先做好无功就地平衡,大量采用有载调压变压器 (OLTC),因此,从送端到受端,从高电压侧到低电压电网变压器的标么变比呈递减趋势;
- 6) 20 世纪末,我国电网在网站分界面上,实施以电压为约束的分时段的 $\cos\varphi$ 控制,比单纯电压控制好,但是仍然没有跳出单纯电压控制。 $\cos\varphi$ 不直接,又分时段,没有实时计算,而且还不是无功就地平衡。

国内外智能电网的建设还未具规模,智能 AVC 的课题研究还显得比较空白,湖南省电力公司唐寅生高级工程师和河海大学丁晓群教授首先提出了建设智能 AVC 的理念,以期达到发输配用电各环节及其相关行业和社会均能获得利益的共赢状态。其能满足安全稳定连续供电、电压质量与输电效率同时达到最好、提高发输变电设备的收益率、提高社会用电效益。

2. 智能 AVC 的建设条件

作为重点考虑电力系统中的电压、网损和电力设备使用寿命的传统 AVC 系统,由于它技术先进、运行可靠、效益明显,已经得到了广泛的应用。AVC 作为智能电网的重要组成部分,无疑也面临与智能电网同步建设的任务。或者讲,建设智能 AVC 系统是顺应智能电网的发展潮流,也是无功电压控制技术发展的必然要求。

首先从硬件装备水平来看:

- 1) 近年来,我国电网建设,农村电网改造,电网自动化装备水平越来越高,为实现 AVC 智能化建设打下坚实基础。
- 2) 可控串补 (TCSC)、静止无功补偿 (SVC) 设备等灵活输电装置运行以及智能电表已经得到或即将得到应用。
- 3) 从电网中的设备建设来看,现在的电气设备可靠性已经大大提高,设备使用寿命、免维护水平有了很大的提高。

其次从知识储备和科学技术方面来看:

- 1) 国外最早的 AVC 系统早在 20 世纪 70 年代就有应用,而国内 AVC 系统投

入使用也有十多年的历史，对于无功电压优化运行自动控制的研究，无论在理论研究上，还是在实际应用和人才、知识储备上具备了发展智能 AVC 的条件。

2) 现代科学技术发展迅猛，新技术也层出不穷，发展智能 AVC 在技术上的局限已经几乎不存在，即使目前有不能解决的问题，相信不久的将来也会有其他技术的出现最终解决。

当然，智能 AVC 的建设并不会一帆风顺，因为不仅需要解决传统 AVC 存在的问题，还要积极应对智能电网可能出现的新问题。而优化控制向来是一个综合考虑多指标、多影响因素的复杂问题。目前优化模型较多，各有各的优势和缺陷，如何选择、建立更合理、经济可靠的新型优化模型是电力业内人士的共同追求。智能 AVC 的建设不会是短暂的，需要在长期的工程实践中发展和完善。

1.3.2 智能 AVC 的内涵研究

1. 智能 AVC 的目标

根据 IEEE 制定的电力系统电磁现象的分类标准，电能质量扰动类型分为七大类：瞬变现象、短时间电压变动、长时间电压变动、电压不平衡、波形畸变、电压波动和工频变化。传统 AVC 是为了保证电压约束，涉及静态电压调节和时间积分上的动态调节，平衡无功功率和电压之间的关系，减少变压器及电容（抗）补偿器等设备的动作次数从而达到降低工作人员劳动强度及提高电网运行的安全水平。结合传统 AVC 的目标和智能电网的特征，尝试性地提出智能 AVC 的目标，概括如下：

(1) 兼容传统 AVC

当前，传统 AVC 仍在输电网侧起着重大作用，并且取得了很好的经济和社会效益。智能 AVC 的研究和开发应当在传统 AVC 的基础上进行，并兼容传统 AVC，减少浪费，优化资源，做到有条不紊，逐步取代。

(2) 自适应

不受任何通道或电网故障等因素影响，分布式计算得到的结果适应于任何变化的运行方式需要的功能。

(3) 自愈

智能 AVC 依靠建立在就地计算补偿构成的闭环控制系统进行自愈，该系统首先能够进行电压的自动优化调整；其次在电网电压出现异常和故障时能自行诊断、隔离故障，必要时自动可寻求替代元器件和设备，恢复正常供电，达到减少电压崩溃，最终达到避免目前大量存在的因电压问题导致的停电的目的；再者，智能电网 AVC 应该能够有效抵御攻击，帮助电网提高防灾能力。

(4) 能处理海量数据

当前配电网已存在的用户多、电力元器件和设备也很多，需要采集和监控的节

点繁多的问题。随着智能电网建设的深入,可以预见除了智能配电网增加大量的采集终端设备,输电网及各智能变电站需要采集的数据也将大量增加,智能 AVC 必然要面对和处理海量数据。

(5) 电力市场下的无功优化

电力系统的垄断经营已经阻碍了电力行业的发展和管理水平的提高,电力市场产生的高效率和优化资源配置已经得到广泛认可,我国正在加快电力市场的建设,智能 AVC 作为未来智能电网下的电压无功控制系统,应当考虑到如何适应在电力市场环境下的运行。

(6) 无功调度和有功调度协调

传统无功电压控制是把有功频率控制和无功电压控制分开,简化了控制模型,虽然优化结果也令人满意,但是在有功满负荷运行时限制了无功输出的容量,影响了无功优化结果。智能 AVC 就是智能化的无功优化调度 (Optimal Reactive Power Dispatch, ORPD),综合考虑无功优化调度和有功优化调度从而达到资源的优化配置。

(7) 动态电压调节,动态无功优化

动态无功优化是在充分考虑系统负荷变化、电容器、电抗器和有载变压器分接头等设备一天内动作次数约束的条件下,获得各无功补偿设备最优动作时间、投入容量和变压器的档位值,并在最优的无功设备投切控制策略下使得整个电网的全天电能损耗最小。智能 AVC 不仅要取得计算模型效率和全局最优间的协调,还应处理好电压波动带来的影响。传统无功优化利用当前时刻的优化结果指导下个时刻的设备动作,动态电压调节大部分只是进行某段时间上的积分,然后求取某段时间内的最优无功设备投切策略。这并不是真正意义上的动态无功优化和动态过程,动态无功优化的结果需要更科学、更精确,真正的、实时的动态无功优化需要逐步把电容器组改为动态平滑连续调节的无功补偿装置。

(8) 优化模型考虑谐波电压

随着电网中非线性元件的大量使用,以及并网运行的分布式电源本身可能就是谐波源,谐波污染越加严重,严重影响电网安全经济运行。在无功优化模型中考虑谐波电压的影响,进行谐波检测、谐波评估和谐波抑制,可减少谐波污染,有效地提高电能质量。

(9) 考虑分布式电源的投切,保证电能质量

分布式电源并网运行可能降低系统的安全可靠性,系统故障时可能会加重电压跌落。此外,还需研究分布式电源接入系统引起的电压波动问题,同时还要考虑分布式电源中的某些元器件产生的谐波问题。

(10) 资源和设备的高效使用,降低农网线损

农电网尤其是 10kV 农用配电网,线损率仍处在较高水平。由图 1-6 可看出,

其配电网侧的电能损耗占电力线统全部电能损耗的比例超过 40%，而其中低压配电网的功率损耗又是主要损耗，而且农网功率因数较低，无功优化和电压控制水平较低，所以应合理地配置无功补偿装置、改变无功潮流分布、降低线损、减少变压器和线路流过的无功功率、提高电压质量，从而达到资源和设备的高效利用，提高线路和变压器的输送电能的效率。

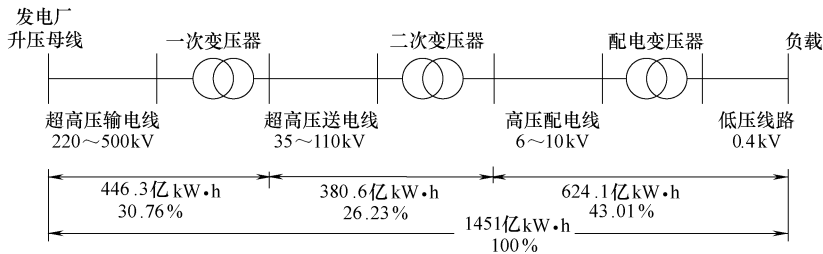


图 1-6 2006 年电网功率损耗比例分配图

(11) 与用户友好互动，协助提高社会用电效率

传统的电网电力供应商与用户之间只存在单向的电能流动，随着智能电网的建设和发展，将出现电网与用户之间双向通信，双向选择传输电能，两者之间实时进行交互信息的局面。这些举措将极大地节约社会资源，真正实现降损节能。当用户向电网输送电能时，智能 AVC 可将用户集成为相互联系的分布式电源，以这样的处理方式来控制电网电压和无功传输。

(12) 进一步减少工作人员劳动强度和设备折旧，保障人员和设备安全

目前变压器档位的更换、变压器和电容器组的投切还一定程度上依赖专家系统和实际经验，对人员依赖程度仍然较大，没有实现设备的最优运行，尤其是出现紧急状况时，这种经验的依赖性更强。智能 AVC 的最终目标是实现电网电压问题的自愈，实现“零”依赖工作人员，完全解放工作人员，保障人员和设备安全。

为了更直观的说明智能 AVC 的先进性，表 1-1 提供了传统 AVC 和智能 AVC 的比较情况。

表 1-1 传统 AVC 和智能 AVC 的比较

项 目	传统 AVC	智能 AVC
通信通道	模拟、数字混合	数字通道
与用户互动	很少	很多
人员依赖程度	较大	很小
可靠性	倾向于故障和电力中断	自适应保护
供电恢复	人工	自愈
功率来源	集中发电	集中发电和分布式电源

(续)		
项 目	传统 AVC	智能 AVC
线损	尽量小	肯定小
潮流分析	有功潮流	有功、无功潮流、双向潮流
减少气体排放	帮助不大	帮助较大
数据库容量	不大	海量

2. 智能 AVC 的特征

在智能电网建设中，它的技术特征是信息化、数字化、自动化、互动化。智能 AVC 的建设，它的技术特征和目标理念是结构系统化、分析精细化、控制智能化、互动和谐化。

(1) 结构系统化

电压作为衡量电能质量的指标之一，贯穿电力系统的发电、输电、配电以及用电等各个环节。

1) 电厂侧智能 AVC 从电力系统源头对系统电压进行控制调节，变被动适应为主动控制。

2) 输电侧智能 AVC 在调度中心、集控站及变电站均设有子系统，对电力系统各级电压进行分布式调节控制。根据系统运行方式、系统通信方式改变，来确定集中或者分散控制。

3) 配电侧智能 AVC 安装于配电所，对保证电网经济安全运行及用户侧的电压质量作用很大，是建设重点。

4) 用户侧智能 AVC 通过对用户负荷及用户实际用电情况进行检测分析，为实行分时电价、电压质量差别电价提供依据。

(2) 分析精细化

电网变化频繁，有规律和无规律运行方案并存，只有及时了解电网实时的运行状态，对各种运行信息进行精细化分析，才能做到胸有成竹，有备无患，事半功倍。

1) 遵循 IEC61970 标准设计接口和以满足公共信息模型（CIM）为标准的电网数据导入、导出技术；实现厂站和智能 AVC 系统的统一数字化，从而保证所有数据来源实时、精确、完整、可信。

2) 电网正常运行时，根据电网实时运行状态，搭建电网运行综合计算分析平台。其中包括理论线损计算、电网经济运行分析、在线安全稳定分析及负荷预报等功能，确保电网安全、稳定运行。

3) 当电网发生事故时，将造成电网运行方式发生改变，系统要能根据电网变化自动调整算法结构，做到自适应，并根据事故类型，给出造成电网事故的原因及

应采取的措施，最短时间内恢复供电。

(3) 控制智能化

传统的无功电压控制系统（AVC）已实现了自动控制的功能。那么，智能 AVC 在控制智能化方面要做些什么呢？先看看我们当前面临的问题：可再生能源和分布式电源安全、可靠地接入电网的技术；高速电气化铁路运行对无功补偿的影响；电压骤降时如何快速恢复正常电压；电网动态无功补偿等问题。智能 AVC 应在控制体系、控制目标、控制策略及控制对象方面做出突破，以应对智能电网所要面临的挑战。

1) 控制体系是智能化控制的物质载体，由发电、输电、配电及用户等四个环节构成，各个控制环节相互协调。

2) 控制目标是智能化控制的内在追求，由电压安全稳定、电压质量合格和电网运行高效三级目标分解协调产生。

3) 控制策略是智能化控制的价值核心，由正常策略和事故策略构成。电网正常运行时，智能 AVC 系统以提高电压稳定裕度，保证电压质量合格及电网高效运行为目标产生正常控制策略。当电网发生事故时，以快速恢复电网正常运行为目标，进而产生事故控制策略，实现电网自愈。

4) 控制对象是智能化控制的实现形式，通过对可控串补（TCSC）、静止无功补偿器（SVC）等灵活输电装置实行控制，改善传统控制手段无法做到的精细、快速控制的效果。

(4) 互动和谐化

电网从发电到用电是一个有机的整体，只有做到各个环节相互协调、信息互动，才能从现代电网向智能电网进行转变。互动化是智能 AVC 的内在要求，也是传统 AVC 建设的空白点。通过 AVC 系统构架互动化、用户需求管理互动化、用户服务互动化，将智能 AVC 打造成系统信息双向流动，各类应用友好兼容的互动和和谐的电压控制系统。

1) 系统构架互动化是互动和谐化的物质基础。由发电、输电、配电和用户四个子系统构成的智能 AVC 控制体系，通过广泛应用的分布式智能和宽带通信技术实现系统各个环节之间信息双向流动，互为参考，灵活调整。

2) 需求管理互动化是互动和谐化的技术追求。只有实时了解电网运行的实际情况以及电力工作人员的具体需求，才能使得智能 AVC 成为用户和厂家之间的互动媒介。

3) 用户服务互动化是互动和谐化的本质要求。实现电网、电网和用户之间的友好互动、相互协调是建设智能电网的内涵所在。智能 AVC 以电压控制为主线，整合系统数据，架起三者之间的桥梁。

3. 智能 AVC 的建设理念

完整的智能 AVC 系统是一个高度集成、融合多种技术的可嵌入式系统,需要具备的模块和功能有:无功和有功双向潮流控制、智能输电网 AVC、Web 发布、智能配电网 AVC、分布式电源兼容、自愈功能、实时在线监测及精细分析和与用户友好互动。如图 1-7 所示,当前虽然已实现了输电网侧 AVC、潮流控制以及 Web 发布三个模块,但是随着智能电网的建设,输电网系统对潮流计算的要求发生很大变化。目前潮流计算的速度还不够快,采用并行计算将大大提高计算速度。智能电网实现无功调度和与用户双向通信后,智能 AVC 的潮流计算必须考虑双向潮流,这将会引起系统网损增大,智能 AVC 的多目标处理技术将会在多种因素之间取得最佳平衡。传统 AVC 的 Web 发布数据信息较少,可视化界面单调呆板,智能 AVC 的 Web 发布可借助先进多媒体技术,通过动画、动态着色、多维虚拟现实等技术从声音和图画展示技术,Web 工作站除自动展示相关运行信息外,还能提供查询子系统用户界面,让用户对历史曲线、设备动作历史记录、历史命令等信息进行远程查询。对不同的用户设置不同权限,使用加密技术防止相关信息意外泄漏。

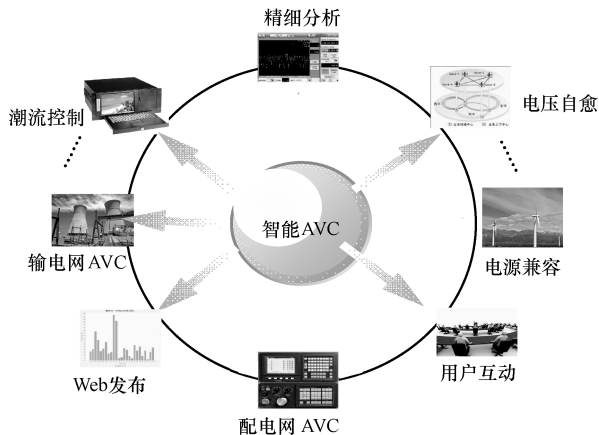


图 1-7 智能 AVC 结构示意图

其中精细分析、电压自愈、分布式电源兼容、与用户友好互动以及配电网 AVC 几个模块都还没有实现。其中精细分析需要实时在线的电能质量监测技术,保证数据信息传输效率高,噪声特性好,使用智能控制技术,可确保实现全网无功实时就得平衡,实现全网电压实时,平滑动态控制;智能 AVC 的自愈功能指的是智能电网发生事故后,系统在较少或没有人为干预的情况下自身恢复电压水平的能力,本质上就是事故后,电网能够实现无功就地平衡;分布式电源具有间歇性、随机性和可控性差等特点,分布式电源的并网运行将会给电网电压带来谐波污染,

其频繁启停导致电压波动等问题,加大电压调整难度,降低电网运行可靠性。分布式电源的并网带来的主要问题还在于分布式电源包含的用电设备和系统将以千位数量级增长,届时传统的 SCADA/EMS 已没有能力监视控制到每个设备的运行信息,取而代之的做法是只监视控制运行工况的边界状况。通过设置在边界的分布式智能控制来解决电网电压无功问题将是实施智能电网面临的主要研发难点和热点,也是实现智能 AVC 的基础之一。

1.3.3 智能 AVC 对数据库的要求

智能 AVC 需要对数据进行实时的监控与管理,才能实现其智能化功能,这也对数据库提出了相应的要求。智能 AVC 需要一套实时/历史数据系统,采集、存储、分析海量的数据,以监控各种设备以及经营系统,为智能 AVC 提供最优的决策支持。

1. 智能数据库特点概述

智能 AVC 需要的是一个领导性的实时/历史智能数据库系统。智能数据库采集、存储和展示大量的工程和运行信息,将深入在整个企业范围内的数据采集上来,以极高的无损压缩方式存储起来,使得以时间序列频繁变化的数据能以原有的数据准确度和时间准确度在线保存多达几十年。它使基于运行状况的及时和准确的决策成为可能,极大地降低了运行成本;其具有完整分布的体系结构,能让正确的人在正确的时间做出正确的决定;智能数据库是一套实时的运行管理解决方案,提供了对生产运行的无限制的观察和分析,能够根据丰富的信息迅速地做出决策,大大提高了生产能力。

(1) 全息无损压缩

智能数据库需要在信息的存储压缩中达到最好的压缩而同时又提供最完整的数据及准确性,保持了对信息的准确记录没有任何损失,并将其送进历史数据库中,而同时又在存储时保持极高的压缩比。数据库系统采用无损压缩技术,每个工艺点的数据可以在线高准确度保存,恢复得到的数据和原始的数据是完全一致的。

(2) 分布式架构集中式管理

智能数据库的每个组件都应具有在一个独立服务器上运行的能力,这可以使得其在扩展的时候,对系统管理方面和系统布置方面几乎没有什么影响。数据库需采用面向服务的分布结构,数据的各个服务可以分布在网络中的任意服务器上。独有的完全分布式架构,使得用户可以在网络上不同的服务器部署数据库系统,但用户使用起来就是一套数据库,完全感觉不到分布式存在。系统应体现其优越的扩展能力,在对现有服务无任何影响的同时,只需添加相应的服务模块,即可对系统容量进行无缝扩展。

(3) 冗余实现全天候不间断运行

冗余服务可以将数据库实时服务按照冗余方式运行, 实现在线热备, 最大限度地保证了实时数据库系统的可靠性、稳定性。

(4) 计算服务

计算服务是一种具有时间确定性的在线计算引擎。计算服务提供了对数据进行二次计算和实施高级运算统计的功能。

(5) 为网络及系统提供健康状况

PDH 是微软公司的 NT 核心操作系统本地性能监控功能的一个帮助库, 它建立在操作系统性能监控功能之上, 但没有对系统监控器添加新的功能。智能数据库可以通过提供简单易用的接口给 PDH, 从而得到系统各计数器的值, 实现整个网络内监测、存档和警报各项性能指示。各计数器是用来体现各方面性能的重要参数。

(6) 数据回放

智能 AVC 通过数据仓库方便地对数据进行回放, 对事故、状况、特殊环节进行反复重现, 从而更加直观地分析问题。

(7) 通过安全网络的数据桥功能

数据库的数据桥功能是用来连接两个都运行数据库系统的网络, 这两个网络之间是隔离的。它提供了一种安全的方式来将数据从一个网络传递到另外一个网络。只允许监控网络向管理网络单方向传输数据, 完全满足国家经济贸易委员会 30 号令中对管理网络与监控网络连接时的隔离要求, 彻底解决了互联网及管理网上病毒、非法入侵对控制网络的侵害。在数据库系统中, 通过数据桥功能可实现内外网实时数据的同步。在实际工程中, 最多用到的就是厂级实时监控信息系统 (SIS) 网络到管理信息系统 (MIS) 网络的数据传送, 数据桥功能既可以将 SIS 网络上一个或者多个实时服务 (数据源) 的数据准确同步到 MIS 网络的一个实时服务中, 也可以将一个实时服务 (数据源) 的实时数据同步到 MIS 网络上多个实时服务中。

2. 智能数据库服务功能

智能 AVC 中对数据库的要求不仅仅在于其特点的概述, 同时, 也需要智能数据库本身能够提供一系列的服务功能。

(1) 目录服务

智能数据库服务地址目录服务, 或称为服务目录, 提供了智能数据库服务名到网络地址的解析方法。该服务充当了智能数据库系统的域名解析服务器和数据源管理者的角色。除了具有从符号到实际地址的解析, 目录服务还保持检测所有智能数据库系统中服务的运行状态信息。当一个服务停止或如果一个服务或服务器失效, 或一个网络路径断开使得一组智能数据库服务被隔离, 目录服务将会检测到这些问题。当客户端应用试图和不可用的服务连接时, 服务目录会立即返回一个错误, 使得用户就没有必要等待超时错误。用一个形象的比喻来说, 目录服务就好比是智能数据库的通信中心 (如电话簿、黄页) 它记录各个服务的名称、类型、状态、地

址、端口等信息，让智能数据库服务之间以及服务与客户端之间的通信更加快捷自如。

(2) 安全服务

安全服务提供了对其他智能数据库服务的控制途径。控制途径可以使用基于网络 ID 号的安全管理服务来启动，这样就消除了进行分离和单独控制的必要；智能数据库的安全服务提供了一种控制和管理用户访问权限的手段。该服务包含了按照不同访问权限排列的各个列表。缺少一个条目将不能访问相应的一个事件。为了使智能数据库的服务能在接受用户访问的时候检查其访问权限，每一个事件都必须明确地声明。

(3) BOSS 服务

智能数据库的 BOSS 服务全称应该为 Boot、Operate、Supervise 和 Services。BOSS 是一个功能强大的管理工具，它可以方便地实现远程网络管理和操作。一旦一个远程服务纳入了 BOSS 的管理之下并建立正常的通信后，一个得到智能数据库安全管理授权的人就可以从远程的工作站上实现下面的操作：通过 BOSS 注册一个需要被管理的服务；创建和删除被管理的服务列表；开始和停止服务；浏览和控制服务；提供服务列表和事件。

BOSS 服务运行在 Windows 操作系统下面，操作系统最好是 Windows 2003 或更高，这可以充分利用多线程和抢先任务的优点。为了满足用户日益增长的需求，智能数据库系列产品不断地开发出大量的、可配置的、人性化的应用程序。通过这些工具可以使管理员更方便、更有效地管理智能数据库系统。

(4) 实时服务

实时服务从各种外部系统采集数据，例如从 SCADA 子主控（制）器、数据记录存储系统，以及底层的 I/O 设备。采集的信息在实时服务的内部用统一的实时数据表来处理，并周期性地产生数据，将数据录入到文件（文档），同时将点状态改变的信息通知给报警服务。这种功能是所有智能数据库实时服务（SSERVER）都拥有的功能。这考虑到了已经存在的智能数据库数据和将要保存到智能数据库系统的数据之间的无缝连接。所有的实时服务都会接受来自配置管理工具（Configuration Manager）的配置信息，并将数据发送至历史服务，实现从实时数据到历史数据的转变。主要的实时服务包括 DnaServ、UnivServ、OPCRTS、DataServ 等。智能数据库的实时服务除了可以正常处理外部系统的数据外，还可以实现在不同网络中间进行数据的发送，达到两个不同网络的数据实时镜像。

(5) 计算服务（CalcServ）

计算服务是智能数据库中的一个虚点处理器或是计算点处理器。CalcServ 是 eDAN 中一类特殊的实时服务，它使用 BASIC 语言来产生数据。CalcServ 允许用户对来自智能数据库其他实时服务点构成的组合式进行计算。它提供了丰富的函数和

高级方式来定义、添加和访问这些函数。计算服务包含两个主要的服务：计算服务 (CalcServ) 和配置管理服务 (CM)。计算服务还利用了一系列的辅助服务。计算服务拥有与实时服务一样的所有的标准特性，如提供实时数据和将数据保存到历史中。它也可以从其他智能数据库实时服务中采集数据并执行定义好的表达式。配置管理服务是一个保存虚点定义的数据库。当浏览实时数据时，就会同计算服务打交道。当定义和浏览一个点的计算过程时，需要与配置管理服务打交道。计算服务中使用的计算指令都来自配置管理服务。配置管理服务中保存了多个计算服务的虚点定义。一个计算服务可以只与一个配置管理服务打交道。虚点定义必须与一个特定的计算服务所绑定。点通过一个站、服务和标识符来定义。绑定的过程是这样的，虚点的站名和服务名要与所绑定的计算服务的名称一致。计算配置服务的客户端程序是 CMCFG，通过它可以对计算服务的 BASIC 表达式进行编辑。进行这样的操作时，其实是同时与计算服务和计算配置服务打交道。因此当使用 CMCFG 工具时，保证计算和配置服务正常运行是至关重要的。

(6) 配置服务

对数据点和其参数进行实时的配置管理是真正的实时系统的标准之一。智能数据库完全支持在线的配置控制。从添加新点、编辑已有、改变报警层到设置新的压缩比，智能数据库提供了在不停止系统运行的条件下进行点的设置配置的功能，同时对正在进行的操作也不产生影响。

(7) 历史服务

智能数据库的历史服务可以提供长期的、在线的、实时的数据保存与恢复。历史服务提供了一种针对于实时数据的高效率的压缩方法。它还提供了跨越多驱动的能力，允许管理员在标准系统下管理大量的数据。在历史服务中使用的压缩技术提供了很高的压缩率，使数据的压缩比达到 30:1，并提供在客户端的解压技术。通过调整精度的位数，可以配置压缩为无损压缩或有损压缩。历史服务为所有选择要进行历史保存的过程信息提供了存储机制。任何在实时计算服务和智能数据库实时服务中的监视点和控制点都可以进行历史记录的跟踪。多年的数据可以由历史服务在线的保持和维护。由于采用的高效高压缩比的技术，使得保存这么多年的历史数据所需的存储空间相对来说很小。

(8) 报警服务

智能数据库报警服务为所有智能数据库监视的参数提供了一种完全功能化的报警通知系统，给出了可视化和声效的通知功能。除了正常的报警，报警确认，报警清除，以及报警复位外，智能数据库报警服务还提供了基于优先级和系统标识的报警跟踪功能。每一个智能数据库点都有数值、时间和状态三部分。状态表示数值的状况，说明了例如数值的稳定性之类的问题，还说明了数值是否超出了正常的操作限定值等。实时服务和报警服务配合工作来维护点的状态信息。实时服务为每一个

点指定状态信息,报警服务接受实时服务来的状态改变。

(9) 通知服务

智能数据库通知服务从智能数据库系统中将信息直接输出到移动通信设备和 Email 系统中。它不直接和智能数据库系统连接,它提供了对特殊事件、瞬时时间和事件的发生动态通知和跟踪功能。智能数据库系统的通知服务可以将系统目前的各种状态通过短消息和电子邮件的方式通知给关键人物。通知服务与计算服务是相辅相成的。通知服务自身并不能完成信息的发送工作。通过计算服务作为中介来帮助通知服务完成上述功能。计算服务可以处理所有采集到数据并对它们进行分析,以便决定何时需要执行一个通知操作,并要求通知服务发出一个信息或电子邮件。这个由计算服务向通知服务提出的请求就如同一个远程功能呼叫 (Remote Function Call),而通知服务就如同一个远程功能处理器 (Remote Function Processor)。对于通知服务没有提供专门的客户端工具,计算服务是它唯一的客户端。

(10) 日志服务

智能数据库的日志记录服务用于接收并存储其他智能数据库服务的消息,通过记录日志可以跟踪各服务的运行情况,方便实时地查看各服务的异常信息。

(11) 冗余服务

智能数据库的冗余服务是专门针对智能数据库的特点开发的冗余软件,它将智能数据库的实时服务按照冗余方式运行,实现在线热备,最大限度地保证了实时数据库系统的可靠性和稳定性。由于智能数据库的冗余服务是为智能数据库定制开发的。所以,它在服务器硬件的需求,主从服务之间的切换时间、数据丢失等方面都远远优于其他冗余软件 (如 Windows 群集服务)。

1.3.4 智能 AVC 的框架设计和研究

我国电网这么多年来实施的二级或三级电压控制尚不算是真正意义上的全局无功优化,因为它没有将全网范围内所有控制设备用统一的目标函数进行定量的优化调度,而只以电压作为单目标的控制对象。这种将目标层次化的做法没有综合考虑电压网损率指标和控制设备动作次数,同时为了降低难度,通常在对上层进行控制对下层整定值修改时不计下层控制的允许限制和响应能力,这种做法得到的其结果显然不能满足控制设备动作次数的限制,不能实现最优化的经济运行。

完整的智能 AVC 系统是一个高度集成、融合多种技术的可嵌入式系统,需要具备的模块和功能有无功和有功双向潮流控制、智能输电网 AVC、Web 发布、智能配电网 AVC、分布式电源兼容、实现自愈、实时在线监测及精细分析和与用户友好互动。当前虽然已实现了输网侧 AVC、潮流控制以及 Web 发布三个模块,但是随着智能电网的建设,输电网系统对潮流计算的要求发生很大变化,目前潮流计算的速度还不够快,采用并行计算将大大提高计算速度,智能电网实现无功调度和

跟用户双向通信后, 智能 AVC 的潮流计算必须考虑双向潮流, 这将会引起系统网损增大, 智能 AVC 的多目标处理技术将会在多种因素之间取得最佳平衡。传统 AVC 的 Web 发布数据信息较少, 可视化界面单调呆板, 智能 AVC 的 Web 发布可借助先进多媒体技术, 通过动画、动态着色、多维虚拟现实等技术实现声音和图画展示。Web 工作站除自动展示相关运行信息外, 还能提供查询子系统用户界面, 让用户对历史曲线、设备动作历史记录、历史命令等信息进行远程查询。对不同的用户设置不同权限, 使用加密技术防止相关信息意外泄漏。

智能 AVC 与智能电网的建设方向一致。智能 AVC 系统功能在延续传统 AVC 的基础上在网络架构、软件架构方面增加了很多智能化的功能特点。

1. 通过规则引擎实现的专家系统

优化控制策略将不再写死在程序之中, 而是有专门程序进行管理, 更改配置更加灵活。这样可以根据变电站负荷性质、运行方式、具体情况的不同, 系统设计了具有按“控制模式”(Control Style) 运行的专家系统。可以自定义系统控制目标, 控制手段, 设置控制目标与运行约束条件的优先级, 设定灵敏度大小形成特定的控制模式, 以满足不同地区电网的差异化需求。

2. 短期负荷预测

可以对中枢点厂站进行短期负荷预测, 定义典型的厂站, 也可以定义典型日(如工作日、双休日)进行分时段负荷趋势。这样可以在策略中考虑负荷趋势, 可以动态的修正策略中考虑因素的灵敏度, 减少设备动作次数。避免因为负荷变化引起的动作振荡。

3. 灵敏度分析改进增量网络法

将电路理论中计算灵敏度的增量网络算法推广到电力网络中, 基于交流潮流模型的灵敏度算法进行分析, 能够方便快捷地求出系统变量对所有线路(支路)参数的灵敏度。

4. 多级协调控制

省地联调能接收省调 AVC 系统实时下达的 220kV 母线电压和关口功率因数目标值, 并能协调控制; 地县联调能接给县调 AVC 系统实时下达的关口功率因数目标值, 并能协调控制县调电压。主网 AVC 可以和配网 AVC 做到协调控制, 做到无功由下至上控制, 电压由上至下控制。

5. 双机热备功能

智能 AVC 系统采用 Mysql (5.1 版) 数据库, 可实现双机热备功能, 并增加了 AVC 的运行可靠性。

6. 建模图库一体化与模板功能

建模图库一体化解决了老版本上由于图库不一致带来的很多维护维护问题, 降低了维护难度。模板机制在建模系统中采用厂站模板、保护模板, 极大地减少了建

模工作量。

7. 提供更加安全的控制机制

这些机制包括：主变压器档位安全处理机制；电容器安全处理机制；设备动作后，关联数据检测功能；异常动作，告警提示功能；完善的数据检测功能。

8. 权限管理

可以配置用户角色功能权限；可以分区设定用户；用户登录后具备时间有效性；限制各类操作人员的操作权限以保证系统安全运行，且各类操作均有记录，并可查询。

9. 智能化的操作

注重用户体验，使得维护，使用简单；控制目标总体状态一目了然，做到出现问题，及时有效告警。正常运行则是免打扰模式；智能的键盘精灵，可以只需要输入厂长号或拼音缩写，就可以快速到相关图形或者所选列表名称；配置免重启：在一些简单配置，参数维护后系统无需停止工作，提高系统可靠性。

智能 AVC 在特点上的智能化带来了其功能上的突破。

(1) 智能 AVC 的控制更加智能、负荷调度规律

智能 AVC 系统需根据电网负荷，拓扑变化自动调整算法结构，做到自适应。在控制对象、控制目标、控制策略、控制约束等方面要做出重大改进，以适应智能电网的挑战。通过以上灵活的配置，可以适应各地的具体需求，如 220kV 变电站关口功率因数。

(2) 电压管理平台

智能 AVC 的管理平台不仅仅提供自动无功电压监视与控制功能，还可以提供提供分析、管理功能，如主变经济运行方式、当前负荷变化趋势、设备动作频繁告警、操作成功率、无功电压当前与历史比较等与无功电压相关的分析功能。

(3) 平台一体化的基础

智能 AVC 的平台既是电压管理控制的平台，也同时是电网运行综合计算分析平台。电网正常运行时，根据电网实时运行状态，其中包括在线线损计算、主变经济运行分析控制、安全稳定分析及负荷预报等功能，确保电网稳定可靠、安全运行。

(4) 遵循标准化接口

智能 AVC 遵循 IEC61970 标准设计接口和以满足公共信息模型（CIM）为标准的电网数据导入，可以 SVG 图形导入工作，也可以自己独立建模，以适应与不同厂家的 EMS 系统的接口，方便维护。

(5) 输电 AVC 与配电 AVC 互动

智能 AVC 注重输电 AVC 与配电 AVC 的互动，输电侧单元在调度中心、集控站及变电站均设有子系统，对电力系统各级电压进行分布式调节控制，其根据系统

运行方式, 系统通信方式的改变来确定集中或者分散控制。配电侧单元安装于配电所, 对保证电网经济安全运行及用户侧的电压质量作用很大, 是建设重点。智能 AVC 系统的网络架构, 如图 1-8 所示。

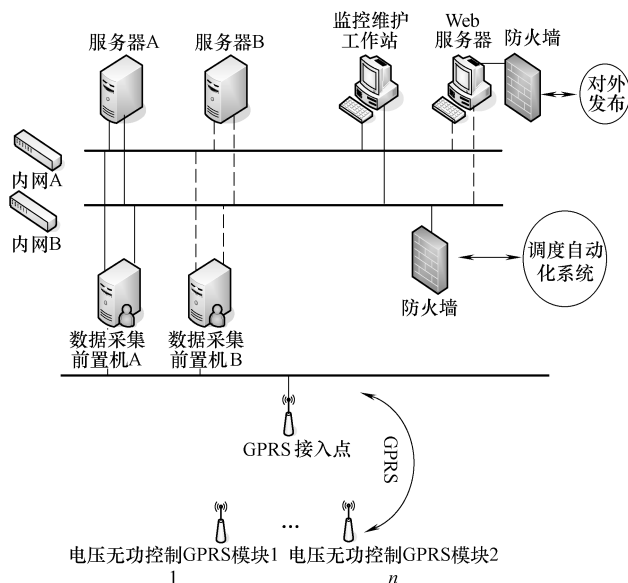


图 1-8 智能 AVC 系统网络架构

智能 AVC 系统一种可能的流程如图 1-9 所示, 该图对智能 AVC 系统进行了细致的描述。

(1) 主要流程

首先从经过完善的智能配电网 SCADA 系统采集数据, 系统分两部分运行: 如果配电网系统正常运行, 则考虑谐波电压、电压波动、冲击电压、分布式电源等电压影响因素后进入电压分析模块, 然后再进入无功分析模块后进行闭环潮流、双向潮流的计算和分析, 实现真正意义上的无功就地补偿, 然后发出控制指令, 命令控制中心控制执行; 如果配电网出现故障, 则交由自愈模块进行故障定位、故障分析和故障解除, 最终恢复系统的正常运行。

(2) 说明

潮流计算: 配电网网络拓扑结构复杂, 并行潮流计算将大大提高计算速度, 但是双向潮流的出现会引起系统网损发生变化, 系统需要在几方面取得平衡。

分布式电源: 分布式电源并网运行可能会降低系统安全可靠, 系统故障时可能会加重电压跌落。此外, 还需研究分布式电源接入系统引起的电压波动问题, 同时还要考虑分布式电源中的某些元件产生的谐波问题。

政策性因素: 阶梯式电价等政策对负荷总量的影响会降低负荷预报的准确度, 最终影响无功补偿容量。

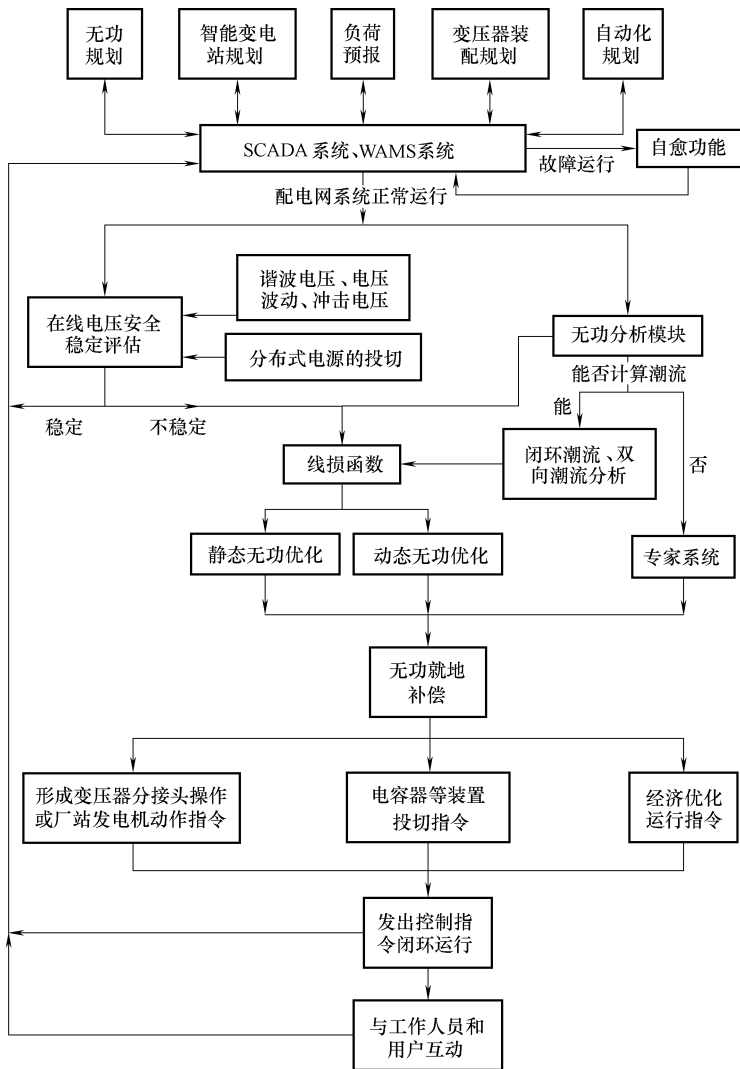


图 1-9 智能 AVC 系统的流程图

第2章 智能 AVC 嵌入式方法的研究

传统 AVC 和 EMS/SCADA 接驳时通常以独立系统的形式存在，它与 EMS/SCADA 系统通过接口进行交互，但是由于是两套独立系统运行给系统的维护带来了许多重复工作同时系统的集成度也降低，因此将 AVC 系统嵌入到 EMS/SCADA 系统将是今后的发展方向。那么就智能 AVC 嵌入而言，如何安全稳定快速的接入 EMS/SCADA 系统呢？首先要了解系统平台的基础条件是否满足智能 AVC 系统嵌入式的要求；其次要考虑智能 AVC 以何种标准接入最适合；最后则要对智能 AVC 在嵌入中可能遇到的一些问题以及解决的方法进行讨论。这些内容将在本章节中做详细的介绍。

2.1 智能 AVC 嵌入 EMS/SCADA 平台基础条件简要介绍

2.1.1 概述

嵌入的 EMS/SCADA 系统必须是一个完全基于国际标准的、开放的电力系统自动化与信息化应用环境，它不仅需要涵盖了 SCADA/PAS/DTS 等常规的电力系统自动化应用，而且可以方便地集成第三方开发的符合标准的应用。

系统平台必须基于国际标准 IEC 61970 CIM 设计，使用最新的软硬件技术，具有先进的支撑平台。

系统平台必须可以运行于 Unix（包括 Tru64、Solaris、AIX 或 Linux 等）操作系统或 Microsoft Windows NT/2000/XP 操作系统，可以充分发挥不同平台的先进特性，可跨越多种 RISC 和 CISC 硬件平台。系统的数据库必须采用高性能的大型商用关系数据库管理系统 Oracle、Sybase、MS SQL Server 等，采用商用数据库存储系统信息、历史数据等数据，提高系统的标准性、开放性、可用性和使用的灵活性，同时提高了系统组态的灵活性，给用户更大的选择空间。系统体系结构设计应为网络分布式，用 CORBA（分布式公用对象请求代理体系结构中间件）作为系统的通信和集成框架，采用客户/服务器网络计算机技术和面向对象的程序设计技术，构造一个全面支持 SCADA/PAS/DTS 一体化的电力调度自动化主站应用环境。

系统平台所有应用都建立在统一的支撑平台之上，系统采用了分布式对象计算技术、商用数据库技术、数据库中间件和通信中间件技术、面向对象技术及基于 Internet/Intranet 的 Web 技术、Java 技术、XML 技术等，方便用户二次开发，并具

有统一的人机界面和操作风格,使用方便。

系统平台应采用统一支撑平台,分布式设计方法,应用层软件(包括 SCADA、AVC、PAS、DTS 等软件)均以组件化、集成化为要求统一设计,运行在统一的支持软件平台上。软件采用面向对象技术,系统模块化程度高,可扩充性好。功能配置可由用户自由组合,用户可根据自己的情况和功能要求配置和重组系统。

系统平台的设计容量在软件上基本没有限制,宜采用动态申请空间的办法,系统应可以方便地扩充到所要求最终规模,并可方便地用新设备替换原有设备。各种设备的扩容均在线进行,不影响实时运行。

系统应提供所有硬件的随机诊断工具和所有支撑软件的调试工具,同时提供对系统平台应用程序的全面调试方法和工具。

系统应可以在服务器和工作站上安装 C、C++、JAVA 和 FORTRAN 等编译和运行环境,用于系统和用户的开发。用户开发的软件经编译链接后,可在线安装并投入实际运行。当系统升级和软件版本更新时,用户数据、系统及第三方软件均能正常运行。

2.1.2 系统平台软件

系统平台宜采用 DCM (Distributed Component Management) 分布式组件管理子系统,该组件是基于 IEC 61970 国际标准实现的控制中心系统的重要组成部分,担负了为客户端定位服务的重要桥梁作用。它提供了服务器的定位、容错、负载均衡和安全管理能力,是开放式电网自动化应用平台的基础设施之一,能满足电力控制中心应用双网、多机、多模块冗余热备用运行,以及高速高可靠通信和信息同步的要求。

电力控制中心系统是完成电网安全、可靠、经济运行的关键应用,要求系统具有满足不间断运行的能力。IEC 61970 标准提供了应用于电力控制中心系统的组件接口规范,标准要求采用对象中间件实现控制中心应用组件的连接。而如何以组件为单位实现高可靠和高可用系统在 IEC 61970 标准中没有明确说明。IES600 系统着眼于在组件级别上管理符合 IEC 61970 标准的系列服务,研制了一套支持 IEC 61970 标准的分布式组件管理子系统,为控制中心系统的高效运行提供了基础。

对于新一代电网调度自动化系统中的高速数据访问(HSDA)、历史数据访问(TSDA)等服务可通过系统组、模块名、服务名进行管理。通过不同系统分组和同组内不同模块实现服务的冗余管理,通过服务名实现服务组件的定位管理。这样,根据新一代电网调度自动化系统的需要,正常运行期间同一个服务可使用主辅方式运行两个甚至多个副本;更新升级系统时,通过交替退出主辅服务的方式保证了系统的不间断运行;调试过程中又可使用不同的 DCM 系统组构建调试系统。

2.1.3 图、模、库一体化

1. 绘图建模

系统平台应提供图模库一体化的编辑软件，绘图的同时完成建模、录库。所有数据库的修改在执行态时写入运行系统数据库中，在活动态时数据投入到实际运行系统中。每个子任务都视为一个事务，当子任务有一个步骤未成功时，所有操作均不能成功。

2. 智能化的图形拓扑

系统平台中的绘图建模软件应可以自动生成拓扑连接点，只要设备连接端点碰触在一起即可自动建立连接关系，且选择一个设备时，与该设备连接的最近设备随之闪亮，当设备图元与母线图元连接时，系统自动在母线图元上生成交汇点。

3. 图模库的多重校核

在绘图建模过程中，系统平台应提供多重校核机制，确保模型正确和图库一致性。这包括（但不限于）：输入参数合法性校核（非法字符、有效范围、名称冲突等）、连接关系合法性校核（不同电压等级导电设备不允许连接、导电设备不允许自身相连等）。同时系统提供检查工具，可以用来检查图形和模型中可能存在的一些错误。

4. 多应用一体化的绘图建模

在系统平台中，不同的应用使用同一套绘图建模工具统一建模和绘制图形，并使用同一套图形来支持多种应用。虽然 SCADA、PAS、AVC 等应用各自所关心的范围有所不同，但它们大部分的内容是相同的。用户可以在初次建模时即提供全面的设备属性信息来支持多种应用，也可以只提供必要的信息来支持当前的应用，日后在扩展应用时再维护相应的信息。

2.2 智能 AVC 接入标准的研究

2.2.1 公共信息模型简介

自 1999 年以来，公共信息模型 (CIM) 被广泛应用于 EMS、SCADA 和调度员仿真训练中，国内外也分别进行了互操作实验。然而，CIM 最初的定义只包含 EMS 环境中涉及的电力系统对象，并有数据模型与算法或功能间的强耦合问题。CIM 经过近十年的发展，现在相对比较成熟，目前 CIM 第 10 版本已公布，对电力企业所涉及对象描述得非常详尽和完整，但仍不能满足所有应用的需求，并且 CIM 本身也处在不断的修正与完善中。2004 年 12 月，国家发展与改革委员会颁布第 75 号公告，明确将 CIM 中的一部分 IEC 61970-301 即公共信息模型基础作为电力行业

标准之一,遵循该标准已成为必须,开发遵循 IEC 61970 标准的 EMS/DMS 更是大势所趋。

国际上,为了验证 CIM 的完整性、正确性、通用性和实用性,以及通过 CIM 进行数据交换的可行性,进行了多次互操作试验。2000~2002 年,美国进行了 4 次互操作试验,在互操作试验过程中验证了对 CIM 的理解,2003 年 11 月在美国俄亥俄州进行了第 5 次互操作试验。目前 CIM 已经被 ABB、ALSTOM、SIEMENS、SISCO 等众多开发商用于 SCADA、NA 和 DTS 等多种应用。

在国内,各研究机构也进行了多次互操作试验。2001 年 7 月,我国的 EMS-API 工作组开始研究基于 IEC 61970 标准(主要是 CIM)的互操作试验。2002 年 1 月由国家电力调度通信中心组织国内的 SCADA/EMS 研发单位进行了基于 IEC 61970 标准的互操作实验,以 CIM/XML 为载体实现电力系统数据和信息的交换。2002 年 8 月,国调中心又基于 CIM/XML 进行了导入导出和潮流计算以及模型的拆分和合并试验。

清华大学是国内 EMS-API 工作组的主要成员单位之一,从 1999 年开始全程参与了 IEC 61970 标准的翻译、消化和互操作实验,对该标准进行了全面的研究和开发。2003 年以后,清华大学采用了 IEC 61970-CIM/CIS 标准进行接口,应用软件在江苏省调、广东省调和金华地调等调度中心得到了成功应用。国调中心也在积极组织试验,推动了基于国际标准的系统和设备的开发,某些方面已经达到国际先进水平。现在,互操作试验的工作重点在实现不同厂家应用产品的互操作。

为了不放弃现有的较为成熟的系统,可在原系统上进行标准化改造,使得改造后的系统能够实现对外提供符合 CIM/CIS 的标准接口。如何使得系统可以方便地升级、扩展,让第三方开发的系统能够较为方便地接入,是开发的重点与关键。近年来,清华大学、中国电力科学研究院、南瑞等研究机构也都在对自己建立的 EMS 系统进行基于 IEC 61970 标准的改造,并根据实际应用提出了各种扩展意见。对 IEC 61970 标准的理论研究主要集中在以下几方面:①基于对 CIM 的理解和分析,设计 SCADA 数据库系统,针对传统数据库与 CIM 数据库的差异,提出将 SCADA 系统模型映射为 CIM 的方法;②基于公共信息模型的电力系统模型的拆分、合并研究;③基于 CIM/XML 导入、导出技术或基于中间件技术的接口方案研究;④公共信息模型的扩展研究。

此外,将 CIM 与可扩展矢量图形(SVG)结合,进行电网的建模技术研究及电力信息可视化设计也都得到了科研人员的关注,所生成的电网模型能方便地用于多种电力应用软件,从而满足不同系统数据和图形交换的需要。

2.2.2 IEC 61970 标准

随着电力系统应用软件的发展和计算机技术的不断普及应用,电力企业中不同

应用程序或系统间的信息共享和数据交换的需求越加迫切。此时, 传统的 EMS 便遇到了以下难题: ①扩展性难题, 用户对老的系统更新换代、对系统中某一部分进行功能扩展或进行后期功能的招标时, 如果采用第三方提供的应用软件, 都会存在难以扩展的问题; ②集成性难题, 系统平台集成第三方的电力应用软件时, 难以做到即插即用, 与其他电力系统实现集成时, 难以实现无缝连接。因此, 用户运行、系统集成、电力市场化的需要及应用软件的发展和计算机技术的进步, 促成了通用模型的形成, 以实现电力系统各应用软件之间的信息交换和管理自动化水平的提高。

EPRI 启动 CCAPI 项目的主要任务是形成一套导则和标准, 来适应不同开发商开发的应用程序之间的综合与互操作, 并将研究成果提交为 IEC 61970 系列标准。制定 IEC 61970 标准的系统模型和通信方式, 便于来自不同厂家的 EMS 系统内部各应用的集成; 便于 EMS 系统与调度中心内部其他系统的互连; 便于不同调度中心 EMS 系统之间的模型交换。这为降低系统开发成本、保护已有投资以及实现电力系统综合调度自动化奠定了基础。

IEC 61970 系列标准, 分为 5 部分:

EMS-API 第 1 部分: 导则和总体要求 (IEC 61970-1);

EMS-API 第 2 部分: 术语表 (IEC 61970-2);

EMS-API 第 301 部分: 公共信息模型 (CIM) 基础 (IEC 61970-301);

EMS-API 第 302 部分: 公共信息模型 (CIM) 财务、能量计划和预定 (IEC 61970-302);

EMS-API 第 303 部分: 公共信息模型 (CIM) SCADA (IEC 61970-303);

EMS-API 第 4 部分: 组件接口规范 (CIS), 级别 1;

EMS-API 第 5 部分: 组件接口规范 (CIS), 级别 2。

2.2.3 公共信息模型

公共信息模型 (CIM) 是 IEC 61970 系列标准的一个重要组成部分, 该模型基于面向对象技术, 提供了一个与平台无关的关于电力能量管理系统的标准逻辑视图。它是一个代表电力企业所有主要对象的抽象模型, 包括了这些对象的公有类和属性及类之间的关系。电力企业中各应用系统共同遵循, 以统一的标准描述电力系统对象, 就能实现高效率的数据交换。

CIM 采用 UML 描述, 提供了一种统一的方法来描述电力系统资源, 使得我们可以通过标准应用程序接口, 实现不同应用程序和能量管理系统之间的集成。CIM 基于面向对象的建模技术定义, 其基本元素包括类、属性和方法, 并支持关联、引用和分层等。CIM 中的每一个包包含一个或多个类图, 用图形方式展示该包中的所有类及关系。然后, 根据类的属性以及类之间的关系, 用文字形式定义各个类。

1. CIM 包

完整的 CIM 模型包括以下包 (Package)，分别在几个不同的标准中定义：

(1) IEC 61970-301 (定义了公共信息模型基础的基本包集)

如图 2-1 所示为 CIM 的各包及它们之间的依赖关系：

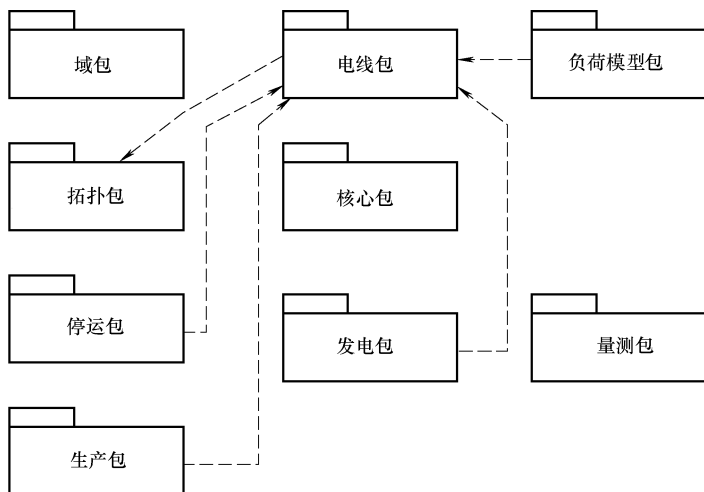


图 2-1 CIM 部分包图

核心包 (Core)：包含所有应用共享的核心的电力系统资源 (Power System Resource) 和导电设备 (Conducting Equipment) 实体，以及这些实体的常见组合。此外，还定义了厂站类 (Substation)、电压等级类 (Voltage Level) 等多个应用公用的模型，这个包不依赖于任何其他包，而其他包中的大部分都具有依赖于本包的关联和泛化。

域包 (Domain)：定义了可能被其他任何包中任何类使用的属性的数据类型。它包含原始数据类型的定义，包括量测的单位和允许的值。每一种数据类型包含一个值 (value) 属性和一个可选的量测单位 (unit)，这个单位指定为一个被初始化为该量测单位文字描述的静态变量。

发电包 (Generation)：该包分成两个子包，即生产包 (Production) 和发电动态包 (Generation Dynamics)。

生产包 (Production)：提供了各种类型发电机的模型，建立了生产成本信息模型，用于发电机间进行经济需求分配及计算备用量大小。这一信息用于机组组合 (Unit Commitment)、水力及火力发电机组的经济调度 (Economic Dispatch)、负荷预测及自动发电控制 (Automatic Generation Control) 等应用。

发电动态包 (Generation Dynamics)：提供原动机 (如汽轮机和锅炉) 的模型，这些模型在模拟和培训应用中需要用到。这一信息用于动态培训模拟 (Dynamic

Training Simulator) 应用的机组建模。

负荷模型包 (Load Model): 以曲线和相关的曲线数据的形式为能量用户及系统负荷提供模型。此外, 还包括影响负荷的特殊情况, 如季节与日类型。这一信息用于负荷预测 (Load Forecasting) 和负荷管理 (Load Management)。

量测包 (Meas): 其中包含描述各应用之间交换的动态测量数据的实体, 如测点 (Measurement) 和限值 (Limit set)。

停运包 (Outage): 该包是 Core 和 Wires 包的扩展, 建立了当前及计划网络结构的信息模型。这些实体在典型的网络应用中是可选的。

保护包 (Protection): 该包是 Core 和 Wires 包的扩展, 建立了保护设备, 如继电器的信息模型。这些实体用于培训模拟和配电网故障定位应用。

拓扑包 (Topology): 该包是 Core 包的扩展, 它与 Terminal 类一起建立连接性 (Connectivity) 的模型, 而连接性是设备怎样连接在一起的物理定义。另外, 它还建立了拓扑 (Topology) 模型, 拓扑是设备怎样通过闭合开关连接在一起的逻辑定义。

电线包 (Wires): 该包是 Core 和 Topology 包的扩展, 建立了输电 (Transmission) 和配电 (Distribution) 网络的电气特性的信息模型。这些信息用于网络应用, 如状态估计 (State Estimation)、最优潮流 (Optimal Power Flow) 等。

(2) IEC 61970-302 (定义了财务和能量计划逻辑视图)

能量计划包 (Energy Scheduling): 提供了计划和结算公司之间的电力交易的能力。它包括了发电、用电、损耗、输电、销售和购买电量的交易。这些类用于电量的结算、发电容量、传输和辅助服务。

财务包 (Financial): 负责结算和账单, 这些包代表了在正式或非正式协定中出现的法律条文。

预订包 (Reservation): 包括电量交易计划、发电容量、传输和辅助服务涉及的信息。

(3) IEC 61970Part303 (定义了 SCADA 逻辑视图)

SCADA 包: 包含了用于监控和数据采集 (SCADA) 应用的建模信息实体, 监控系统支持着操作员对设备的控制, 如分合开关。数据采集负责收集各种遥测数据。

2. CIM 类和关系

类是对现实世界中一种对象的表示, 电力系统中具有唯一身份的一个具体对象则被建模成它所属类的一个实例。改变属性的值比改变类定义更为容易, 因此 CIM 应当避免定义类的太多的具体子类型。相反, CIM 定义一些通用的类, 由属性来给定类型名, 这样应用就可以根据需要使用这一信息去实例化具体的对象类型。每一个属性都具有类型, 典型的属性类型有整型、浮点型、布尔型、字符串型及枚举

型，它们被称为原始类型。然而，许多其他类型也被定义为 CIM 规范的一部分，例如 Capacitor Bank（电容器组）有一个具有 Voltage（电压）类型的 Maximum 属性。

CIM 类之间的关系揭示了类是如何被组织在一起的，各个类主要通过以下三种方式相互关联，即泛化、关联和聚集。

泛化是一个较普遍的类与一个较具体的类之间的一种关系。图 2-2 所示为一个电力变压器（Power Transformer）是电力系统资源（Power System Resource）的一种具体类型。泛化使具体的类可以从它上层的所有更普遍的类继承属性和关系。图中 Breaker 是 Switch 的更为具体的类型，Switch 又是 Conducting Equipment 的更为具体的类型，而 Conducting Equipment 本身又是 Power System Resource 的更为具体的类型。Power Transformer 是 Power System Resource 的另一个具体类型。

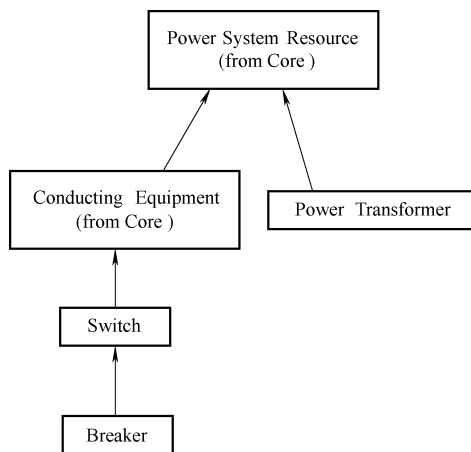


图 2-2 CIM 中泛化关系示例

关联是类之间的一种联系，每种关联都有两个作用，每个作用表示了关联中的一个方向，每个作用还有重数，表示有多少对象可以参加到给定的关系

中。Power Transformer 类与 Transformer Winding 类之间的关联如图 2-3 所示，其两端表示了多值性（作用在本端，数值显示在对端）。下列中理解为“一个 Power Transformer 具有 1 个或多个 Transformer Winding”。

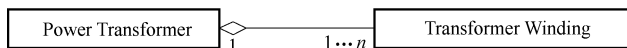


图 2-3 CIM 中简单关联关系示例

聚集是关联的一种特殊情况，表明类与类之间的整体-部分关系，整体类由部分类“构成”，而部分类是整体类的“一部分”，但部分类不从整体类继承。

合成聚集：用于建立合成物的重数为“1”的整体—部分的关系模型即一个部分属于且仅属于一个整体。如图 2-4 所示，一个 Topological Node 只能是一个 Topological Island 的一个成员（Member Of），但一个 Topological Island 却能包含一个或多个 Topological Node。

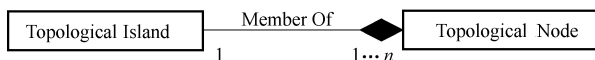


图 2-4 CIM 中合成聚集关系示例

共享聚集：用来建立合成物的重数大于 1 的整体-部分的关系模型，即一个部分可属于多个整体。图 2-5 所示为 Measurement 类与 Measurement 类间的共享聚集，一个 Measurement 类可以是任意数目 Measurement 类集合的一个成员 (Member of)。

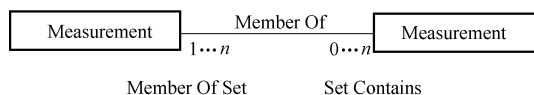


图 2-5 CIM 中共享聚集关系示例

为建立系统的连接关系模型，定义 Conducting Equipment、Terminal、Connectivity Node 及 Topological Node 类。一个 Terminal 类可以为导电设备提供 0、1 或多个外部连接，每个 Terminal 连接 0 或 1 个 Connectivity Node，导电设备的端点通过零阻抗支路连接。

3. CIM 的理解和示例

CIM 不是数据库，对系统抽象的描述仅仅是数据模型（元数据），即指关于数据的数据结构，元数据最基本的用途在于管理数据，从而实现查询、交换和共享。

电力系统应用关心的重点在于电力系统资源模型（Power System Resource），它是 CIM 中最基本的一个类，从 Naming 类继承命名属性，用来描述任何电力系统物理对象或将电力系统物理对象分组，以便建模、监测或测量。如图 2-6 所示，它本身有 4 个关联：①一个电力系统资源类可属于一个或多个公司（Company）；②一个电力系统资源类可有一个停运计划类（Outage Schedule）；③电力系统资源类型（PSR Type）由 Naming 类派生，来细分同一类的电力系统资源；④一个电力系统资源类可关联一个或多个测量类（Measurement）。

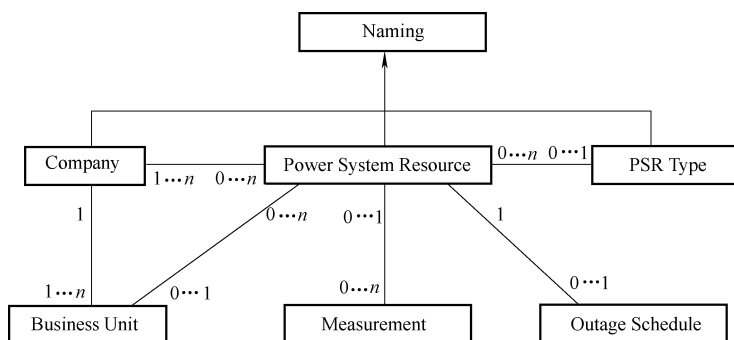


图 2-6 电力系统资源类模型

作为 CIM 的基类，Power System Source 类派生出几十个类，覆盖了电力系统应用中从底层到高层，从具体到抽象的各个层次，涵括了电力线路、电力变压器、发电设备和负荷等表示电力系统物理部件的各类。基于 CIM 的电网系统的总体结构

fiers 包定义了资源标识 (Resource ID) 和统一资源标识 (Uniform Resource Identifier) 及相互转化的服务接口; DAF Events 包通过中间件的事件服务, 提供通知客户端数据变化的方法, 以保证数据访问的一致性。

Get values () : 用于查询一个特定资源的指定属性。

Get extent values () : 用于查询某一个类的指定属性。

Get child values () : 用于查询与某一个给定的父资源相关联资源的指定属性。对于给定的父资源, 服务组件根据其查出的所有子资源和待查的属性, 生成并返回资源描述迭代器。如潮流应用中要获得线路的 r 和 x , 就可将用于标识变压器的 Transformer Winding 类及属性 r 和 x 的具体信息提供给 Get extent values (), 数据库据此查到 r 和 x , 并按 DAF Descriptions 包的定义将数据组织起来返回给潮流程序。

相对于静态的 XML 文件来说, CIS 访问的数据可随时间变化, 能够满足实时、准实时应用的要求。CIS 的一个主要目标是规定在两个或更多的应用之间进行交换的信息内容, 以及用什么服务来传递这些信息。CIS 基于独立的基础体系来设计, 不涉及具体的计算机语言, 能够为数据提供一个公共的内容和格式, 实现具有即插即用特性的应用软件接口。实际应用中, 除有接口描述外, 还必须通过具体的计算机语言来实现这些接口。解决电力系统异构的方法是采用中间件技术, 它可以屏蔽操作系统和网络协议的差异, 为各应用软件提供通信服务。

2. CORBA 技术及应用

电力系统运行在一个典型的异构环境中, 普遍采用中间件来解决这一问题。目前主流的中间件技术有 COM/DCOM/COM +、CORBA、EJB 等。COM/DCOM/COM + 受限于 Windows 操作系统, 对 Unix 系统的支持性差; EJB 受限于 Java 语言。而对象管理组织 (OMG) 制定的公共对象请求代理构架 (CORBA) 规范在跨语言性能、跨平台能力、网络通信能力等方面都具有优点。CORBA 是针对请求代理构建 (ORB) 制定的, 具有以下主要特点: ①实现客户端与服务器的分离, 两者通过代理 (broker) 机制实现信息的传输; ②客户端发出调用请求时, 可以实现自动查找、定位并激活服务端程序。

CORBA 的核心包括 ORB 和 IDL 编译器两个部分, 底层结构为 ORB, 组件的接口通过接口定义语言 (IDL) 来描述语言, 并由 IDL 编译器映射成 C、C++、Java 等语言。单个 ORB 组成系统如图 2-9 所示。

IDL 代码经编译后在客户端产生一个桩 (stub) 文件, 在服务端产生一个构架

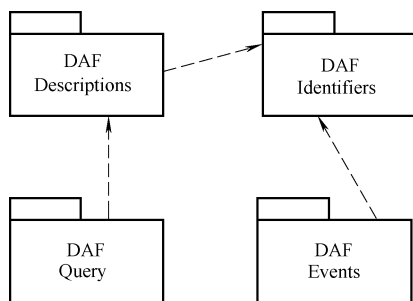


图 2-8 CDAF 的总体结构

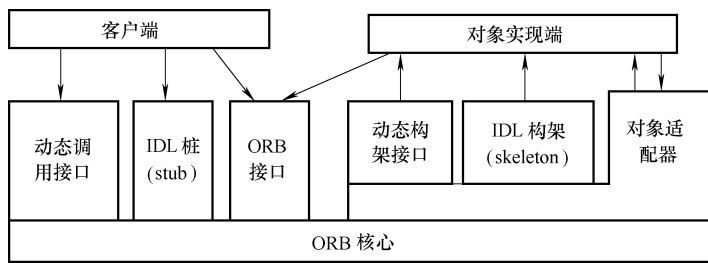


图 2-9 独立 ORB 体系结构

(skeleton) 文件，即可得到相应的 Server 和 Client 程序。对客户端来说，桩文件相当于是服务端所提供的服务对象在客户端的映射。例如，对潮流程程序来讲，其主要内容就是产生与编程语言相对应的桩文件，并通过桩文件把请求发送到底层结构后，这时潮流程程序就可以用它所提供的经过映射的服务构件，将属性序列和类的标识传递给该服务。由此可见，CORBA 规范可以通过代理机制实现信息传输，达到客户端与服务端的分离。对于多 ORB 系统，需要通过网络 ORB 交换协议 (Internet Inter-ORB Protocol, IIOP) 来完成通信。

2.2.5 HSDA 服务器接口研究

1. HSDA 高速数据访问接口

HSDA 主要应用于需要实时数据访问的电力监控领域。电力系统监控分监视与控制两部分。一方面，电力系统过程仪器产生的实时数据（如开关开合状态量，设备运行的有功功率、无功功率、电压和频率等），通过过程通信设备传给远程的 SCADA 服务器，SCADA 服务器将收集到的实时数据进行必要的分析处理、存储，并通过人机界面展示给操作员，从而实现对电力系统的实时监视。另一方面，操作员通过人机界面输入命令或者更新数据，实现对电力系统的控制，此时命令或更新数据沿着与过程数据相反的方向传递，最终到达过程仪器。对于电力控制系统而言，速度是至关重要的，能否有效实时地传输大批量的过程数据以及控制命令关系到整个电力系统运行的安全性。HSDA 的目的就是支持从一个 EMS 到 EMS 内外广泛类型客户的大批量数据的有效实时传输。在图 2-10 中，SCADA 服务器作为 HSDA 服务端，对外提供 HSDA 服务，支持数据的有效实时传输。HSDA 客户端，通常带有人机界面，通过 HSDA 接口从 SCADA 服务器获取实时数据。过程通信设备与 SCADA 之间也可以通过 HSDA 接口进行通信。

由于历史的原因，不同工业过程的 SCADA 系统已经沿着不同的路线发展起来了。电力系统的 SCADA 是在 Unix 平台上发展起来的，而大部分其他工业过程的 SCADA 是在 Windows 平台上发展起来的。对于基于 Windows 的系统，过程控制 OLE (OLE for Process Control, OPC) 已经成为占支配地位的标准。对于基于 UNIX

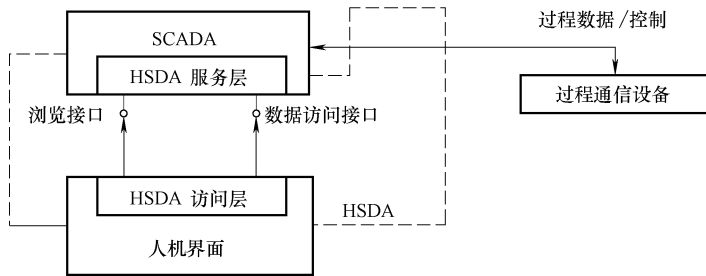


图 2-10 HSDA 的应用范围

的系统，对象管理组织（Object Management Group, OMG）开发了从工业系统访问数据的应用程序接口规范（Data Acquisition from Industrial System, DAIS）。DAIS 以 OPC 为基础，得益于 OPC 的成功。HSDA 引用 OMG DAIS，主要是其中的数据访问（Data Access）部分。OMG DAIS Data Access（下文简称为 DAISDA）主要有两类接口：浏览接口和数据访问接口。其中，浏览接口用于挖掘 DAIS 服务器所支持的工业过程对象及其性质，这些对象及其性质以层次结构进行组织和命名。数据访问接口用于访问工业过程对象性质的值（通常是实时数据）。OMG DAIS 之所以支持高速数据访问，在于其数据访问接口采用了订单机制，可以快速地在服务器和客户端内存空间中定位数据变量。除了一般的请求应答数据交换模式的 API，订单还支持订阅，客户可以向服务器订阅自己关心的数据，只有当数据可得或者更新时，服务器才会将相关的数据传给客户，这样既达到了实时访问的效果，又可以避免传输不必要的数

2. HSDA 访问流程

客户与 HSDA 服务器之间的交互，从客户向服务器申请创建数据访问会话开始，到会话销毁结束，服务器所提供的浏览服务和数据交换服务均通过会话向外发布。其中，浏览服务对象包括视图节点浏览服务对象（DASI:: DataAcceSS:: Node:: IHome）、视图项浏览服务对象（DASI:: Data Access:: Item:: IHome）、视图模式类浏览服务对象（DAIS:: Type:: IHome）和视图模式性质浏览服务对象（DAIS:: Property:: IHome）。数据交换服务对象有简单读写服务对象（DAIS:: Data Access:: simple:: IHome）和订单工厂（DAIS:: Data Access:: Group:: IHome）。

3. DASI 数据交换

DAIS 数据交换包括以下三种情况：

- 1) 客户读数据：客户可以要求从 DASI 服务器缓存中读取数据，也可以要求 DASI 服务器从设备那里获取最新的数据。
- 2) 客户写数据：客户将命令或更新数据通过 DASI 这种标准的发布手段写入

设备。

3) 订阅: 当有数据更新时, DASI 服务器向客户发布最新的工业过程数据。测试环境下的 HSDA 服务器的实时数据来源是传统的 SCADA 服务器, 实时数据通过 DASIDA 接口写入。虽然 DASIDA 的所有写操作都只支持将数据写入设备, 我们还是可以借用它们来更新 HSDA 服务器缓存中的实时数据。对于 HSDA 服务器而言, 数据交换就是: ①客户从服务器缓存中获取视图项值; ②客户将视图项值写入服务器缓存; ③订阅视图项值。在 HSDA 服务器缓存中永远都存放着, 并且也只存放着视图项的最新取值。HSDA 服务器提供的数据交换服务包括简单读写服务和基于订单的数据交换服务。前者通过视图项标识符来指定需要交换的视图项取值。DASI 定义了两种用于唯一标识视图项资源的标识符, 即视图项的 Item ID 和路径名。使用任何一种标识符都可以在视图范围内准确识别视图项。有关简单读写服务这里不作详细叙述, 基于订单的数据交换采用了与简单读写截然不同的方式, HSDA 服务器之所以能完成数据的“高速”交互与此密切相关, 本节将重点介绍基于订单的数据交换。订单通常, 客户只关心视图中某些项的取值, 而且需要经常性地交换这些数据。为了保证实时数据传输的效率, OMG DASI 提出了基于订单的数据访问方式。订单是一组视图项的集合, 它的目的是快速有效地传输这些被选中的视图项的取值。订单中, 使用订单项来表示所选择的视图项, 每个订单项都关联着一个视图项。

(1) 创建订单

订单的创建工作由订单工厂 (DAIS:: Data:: Access:: Group:: IHome) 来完成, 订单工厂对象可以通过会话的 group—home 方法获得。创建订单的方法有两种:

1) 通过订单工厂的。采用 React group 方法创建一个订单, 获取订单管理者对象, 并通过该订单管理者对象配置订单的订单项 (例如通过 create entries 创建订单项, 用 validate entries 设置订单项状态, 或者调用 remove entries 移除订单项等)。

2) 通过订单工厂的 confer group from public 方法克隆一个已有的公共订单, 获得新建订单的管理者, 并通过该订单管理者重新配置订单内所有订单项的客户端句柄。

(2) 基于订单的数据交换

基于订单的数据交换就是通过订单机制实现视图项取值的交换。在服务器端, 通过订单项的服务器端句柄有效地定位客户需要访问的视图项取值; 在客户端, 通过订单项的客户端句柄有效地识别服务器传过来的数据。HSDA 服务器所提供的基于订单的数据交换操作见表 2-1。

表 2-1 HSDA 服务器提供的数据交换操作表

操 作	描 述
同步读 sync_read	以同步的方式从服务器缓存区中读取指定视图项取值。如果订单项不活动,则其取值的 OPCQuality。质量码标为 OPC_QUALITY_OUT_OF_SERVICE
同步写 sync_write	以同步的方式将视图取值写到服务器缓存区,忽略活动的订单项
异步读 async_read	以异步的方式从服务器缓存区中读取指定视图项取值。如果订单项不活动,则其取值的 OPCQuality。质量码标为 OPC_QUALITY_OUT_OF_SERVICE
异步写 async_write	以异步的方式将视图项取值写到服务器缓存区。忽略活动的订单项
刷新 refresh	以异步的方式从服务器缓存区中读取该订单内所有视图项的取值。如果订单项不活动,则其取值的 OPCQuality 质量码标为 OPC_QUALITY_OUT_OF_SERVICE
取消异步操作	HSDA 服务器支持取消还未处理的异步操作(异步读、异步写、刷新),但是对于那些正在被处理的异步操作,服务器无能为力。如果取消成功将回调 on_cancel_complete 方法
订阅 discribe	设置会话订单为订阅状态,当服务器缓存区中该订单所包含的视图项的取值发生改变时,服务器便调用回调对象的 on_data_change 方法将最新的取值传给客户,如果订单项不活动,则忽略

2.3 智能 AVC 嵌入方式的研究

2.3.1 传统 AVC 嵌入 EMS 系统的方法

传统 AVC 嵌入 EMS 的主要是由以下几部分构成:

1. 平台方面

传统 AVC 嵌入 EMS 系统都要求能够开放平台的高级别权限,由 EMS 平台提供 AVC 系统平台节点的准入服务。

2. 模型和数据方面

传统 AVC 嵌入 EMS 系统在数据和模型的获取方面主要由两种方式:

- 1) 由 EMS 系统提供 API 函数共享 EMS 系统数据库中的数据和模型,并在指定的域内进行建表和查询等数据库操作。
- 2) 由 EMS 系统提供基于 XML 的数据文件和模型文件,AVC 系统实时读取文件和自行建库完成数据库读取和查询操作。

3. 发令方面

传统 AVC 嵌入 EMS 系统在发令后是通过消息机制将命令发给 EMS 中转服务程序,EMS 中转服务程序在接到命令后自动转发 AVC 系统的控制命令,命令下发后中转服务程序将本次发令是否成功的信息通过消息回传给 AVC 系统。

4. 界面和调用方面

传统 AVC 嵌入 EMS 系统中的界面由 AVC 系统自行完成并生成可执行程序,

EMS 系统通过直接调用可执行程序来启动主程序和界面程序的运行。

5. 主备调用方面

传统 AVC 嵌入 EMS 系统的主备机制由 EMS 系统来负责启用和关闭不同厂家的 AVC 系统。

2.3.2 基于 IEC 61970 标准的嵌入方式研究

虽然传统嵌入式方法可以实现 AVC 系统嵌入 EMS 系统，但是也存在一些问题。传统 AVC 嵌入 EMS 系统主要存在以下几个弊端：

1) 没有采用标准的数据读取方式而是采用由 EMS 厂家提供封装好的 API 函数的方式来读取数据库。这样做第一会给 EMS 厂家带来较大工作量，因为 EMS 厂家如果之前没有嵌入式的经验，由 EMS 平台提供 API 函数可能对 EMS 来说工作量较大，可能有些功能方面比较难以实现，第二开放较高级别的数据库权限可能带来 EMS 系统的安全隐患。

2) 系统主备切换完全靠 EMS 系统来控制会造成当系统进行切换时，运行的进程被强行关闭，威胁系统安全。

如果采用基于 IEC 61970 中的 CIS 接口部分的标准来实现嵌入，则可避免上述问题，具体的嵌入方式如下：

(1) GDA + CORBA 方式获取实时模型

AVC 嵌入厂家采用由标准的 IEC 61970 中的 CIS 接口部分的标准 GDA 方式来获取模型，对 AVC 厂家来说主要是需要进行基于 CORBA 组件技术的编程来实现 GDA 方式下的模型访问。

(2) HSDA + CORBA 方式获取数据

AVC 嵌入厂家采用由标准的 IEC 61970 中的 CIS 接口部分的标准 HSDA 方式来获取数据，对 AVC 厂家来说主要是需要进行基于 CORBA 组件技术的编程来实现 HSDA 方式下的数据访问。

(3) IDL 定义接口 + CORBA 方式实现遥控

在遥控的接驳方式方面，由于在读取数据和模型方面都采用了标准的方式，遥控方面也应该为标准方式，但是在遥控方面目前 CIM 模型中还没有命令转发的详细标准。虽然没有详细标准但是 AVC 的嵌入式也应该向标准靠拢，采用 IDL 语言来定义接口转发且用 CORBA 组件方式来访问，这类似于对 HSDA 标准方式进行了扩展。

(4) 程序调用方法

程序调用方式上采用独立进程调用，热点相互激活的方式来进行，这样的调用方式保证了双方核心程序相互独立。

2.3.3 系统主备无缝切换的研究

传统方法进行主备切换时,运行的进程被强行关闭威胁系统安全。新的嵌入式 AVC 则采用启动标志的方式来实现主备切换,更利于程序的主备切换和系统的稳定。其主要思想是通过一个标志(量测)来控制主备系统的切换,在正常的情况下两个 AVC 都进行计算和发令,但是只有一个 AVC 计算和发令的结果被采纳。但是这里存在一个问题,当进行切换的时候可能一个 AVC 系统刚发过命令,或者命令还没有发完,这个时候再启动另一个 AVC 可能导致重复发令。为了解决这个问题,系统可以通过设定等待周期的方式进行切换,也就是在切换时当 AVC 系统在读到由自己 AVC 系统进行发令时,不论目前计算到哪里都等待一个周期再进行发令,不同系统根据各自系统的计算周期的情况最后初步定这个等待周期为 5min。这样在切换的时候不论之前系统发令的情况如何都能满足系统不再重复发令,在切换系统时候保证了系统的安全性,同时还建议调度员在切换系统时最好不要在高峰期时段切换。

虽然主备切换的问题通过标志的设定解决了,但是由于不同系统在数据库里一些配置的表是相对独立的,这就造成了可能在 A 系统运行的时候调度员操作了某些设备的闭锁,但在切换系统的时候 B 系统没办法知道 A 系统中调度员操作的闭锁的设备。这样就造成了两个系统的参数上的不统一。要解决这样的问题必须要抽象出来一些共性的东西,存在一个共性的表里让两个系统都可以读取到共性的东西保持系统部分参数的一致。这要抽象出来三类共性的配置:

- 1) 主备切换标志:用量测类型来表示;
- 2) 三级工作模式:开环、闭环、退出三个模式用量测类型来表示;
- 3) 设备状态:禁用和启用也用量测类型来表示。

这些参数配置的界面都由统一的界面录入保存到库里,保证了一致性。在一些设备的异常数据方面,例如挂牌、检修等设备异常标志,最终确定还是通过 HSDA 读取。这些信息都放在 CIM 中,AVC 系统通过设备名在 CIM 中查找需要的信息,抽象出来的主备切换标志这个量测本来 CIM 中没有,现在扩展 CIM 模型增加一个量测。

2.3.4 智能 AVC 嵌入式框架图

图 2-11 所示为智能 AVC 嵌入 EMS 系统后的硬件框架图。从图中可以看出智能 AVC 嵌入 EMS 后,可与 EMS/SCADA 实现无缝嵌入,成为 EMS/SCADA 系统的一个节点服务,提高了系统集成度的同时大大降低了系统在图形和数据上的维护工作量,是今后 AVC 发展的趋势和方向。

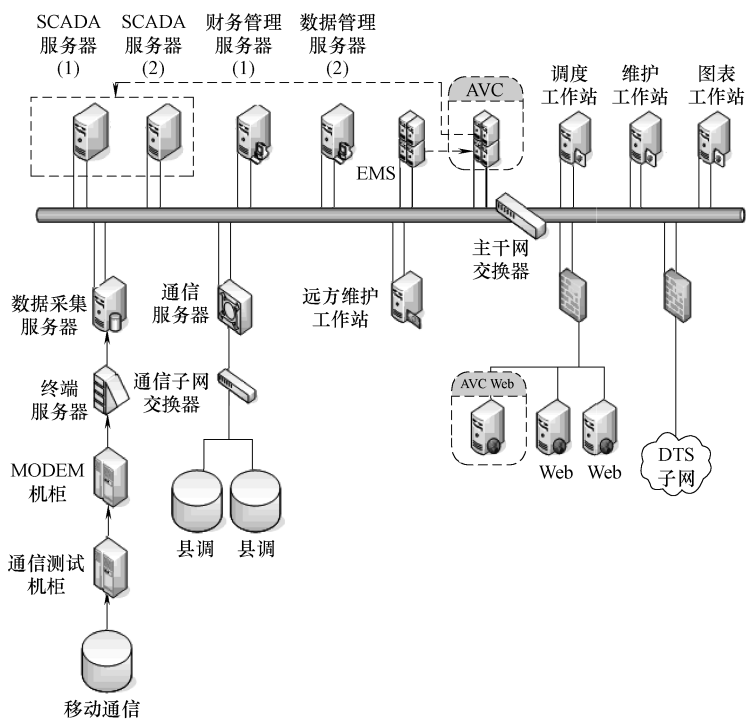


图 2-11 嵌入式硬件框架图

第3章 智能 AVC 与电网“自愈”

3.1 电网自愈

3.1.1 电网自愈概念

建设中国特色的坚强智能电网具有以下几个特征：自愈、可靠、兼容、互动、高效、优质。其中，自愈能力是衡量电网维持自身稳定运行、评估薄弱环节和应对紧急状态的能力，它分为电网的自我控制能力和自我恢复能力两个部分。电网自愈能力依赖于 SCADA/EMS，通过对电网重要参数的检测和有效的控制策略来达到电网的自愈。自我预防是通过系统正常运行时对电网进行实时运行评价和持续优化来完成的；自我恢复是电网经受扰动或故障时，自动进行故障检测、隔离、恢复供电来实现的。

目前，由于全球范围内发生的几次大停电事故，并且通过对大停电事故的研究，提高电网输电能力的需要，调度和控制保护的教训，以及信息技术的快速发展，使电网安全控制的观念正发生明显或悄然的变化。其主要特点如下：

1) 基于测量：更加重视控制保护的测量基础，不仅包括稳态测量，而且包括动态测量。

2) 面向过程：电网控制保护的实时数据基础从基于断面逐步转变为面向过程。

3) 突出协调：控制保护的功能从局部逐步走向全局，重点解决全局与局部的功能协调，全局控制方案与电网快速动态的速度协调两个协调问题。

4) 强调适应：强调电网控制适应复杂系统的变化，不仅重视在线稳态计算，而且重视在线动态计算，强化电网深度计算对控制保护方案的支撑作用。

5) 控制灵活直流输电技术和各种灵活交流输电技术的应用与发展，使电网控制方式更加灵活。

6) 重视方式：强调运行方式是电网安全控制有效且不可缺少的重要基础。

近年出现的自愈电网或电网自愈控制的新概念则涵盖了电网控制保护领域的许多新进展，是电网调度控制的必然趋势。

3.1.2 电网自愈控制

电网自愈控制（Self-Healing Control, SHC）通过共享和调用一切可用电网资

源,实时预测电网存在的各种安全隐患和即将发生的扰动事件,采取配电网在正常运行下的优化控制策略和非正常情况下的预防校正、紧急恢复、检修维护等控制策略,使得电网尽快从非正常运行状态转化为正常运行状态,从而应对电网可能发生的各种事件及组合,防止或遏制电力供应的重大干扰,以减少配电网运行时的人为干预,降低配电网经受扰动或故障时对电网和用户的影响,具有正常运行时,有选择性、有目的地进行优化控制,改善电网运行性能,提高电网稳定裕度和抵御扰动的能力;把预防控制作为主要控制手段,及时发现、诊断和消除故障隐患;具有故障情况下维持系统连续运行的能力,不造成系统运行损失,并且通过自治修复功能从故障中恢复。

电网自愈控制涵盖了自动控制、继电保护、计算机和软件、应用数学等领域的很多新技术、新进展,是一种集成了软件和智能装置的综合控制技术,其基本组成包括基于自愈理论的高级可视化实时预测和快速仿真软件工具、坚强而灵活的电网物理架构、分布而相互协调的智能装置和设备,标准且一体化的智能配调中心。特别地,要实现电网的自愈控制,至少需要满足如下条件。

(1) 具备各种智能化的开关设备和输配电设备

电网中的智能开关设备具有高性能、高可靠性、免维护、硬件软件化特点和在线监测、功能自适应、自诊断等功能,提供网络化远动接口;输配电设备应具有故障自动检测与识别功能,提供可靠的不间断电源,满足户外工作环境和电磁兼容性要求,支持多种通信方式和通信协议,具有远程维护、诊断和自诊断功能。开关设备和配电终端设备有选择性地具有遥信、遥测、遥控、遥调和遥视等“五遥”功能。

(2) 电网系统具有灵活可靠的拓扑

坚强的物理架构是电网进行自愈的物理基础,适应是自愈控制的基本原则之一。智能电网中,输电网必须形成多回路输电形式,配电网要实现“手拉手供电”,网络当中要兼容分布式发电、可再生能源和储能装置,并能灵活调度。同时,网架结构要灵活、坚强、可靠,既能实现正常运行下的拓扑优化,又能实现故障控制中的拓扑快速重构。

(3) 可靠的通信网络

智能电网自愈控制是通过在控制或调度中心自适应地在线、实时、连续分析和远方遥控实现的,要求配电通信网络必须可靠,要考虑主通信网络瘫痪情况下的备用通信网络或备用通信方案。同时,还要求通信速度要快,信息处理能力要强。

(4) 自动化处理软件系统

要实现电网的自愈,离不开自动化软件处理系统,这需要最终嵌入到监控中心系统来实现。届时,将会在很大程度上提高配电网的整体自动化水平、优化能力和

自愈控制能力，为配电网的智能化增加有力的砝码。其具有以下主要优点：连续实时预测系统状态、实时系统状态评估、算法的自适应、实时优化和自愈控制、系统的整体性和统一性、可实现巨大的经济价值和社会效益。

电网自愈的控制原则是不间断供电，从不间断供电角度看，电网安全控制有 4 种结果：避免故障发生、故障后不失去负荷、故障后失去部分负荷、故障后电网瘫痪，如图 3-1 所示。

电网自愈的目标：首先，要通过配电网运行优化预防校正控制，来避免故障发生；其次，如果故障发生，通过紧急恢复控制和维护控制，使得故障后不失去负荷或失去尽可能少的负荷。如果发生了电网连锁瘫痪事故，意味着电网自愈控制失败。

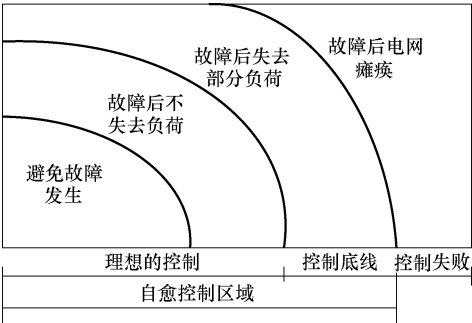


图 3-1 电网安全控制区域

从控制逻辑和结构设计上，电网自愈控制坚持 3 项基本原则，才能有效地解决电网自愈整体与局部，及时性的要求，即

- 1) 分布自治原则：电网的广域性和动态过程的快速性要求控制保护装备必须具有分布自治性，如此才能满足及时控制的要求。
- 2) 广域协调原则：电网安全具有全局性，控制手段具有局部性，控制需要解决全局与局部的协调问题；电网的动态变化与发展过程具有快速性，电网全局控制方案的形成具有慢速性，控制需要解决快速与慢速的协调问题。
- 3) 工况适应原则：控制方案适应变化是控制有效的基础，适应控制必须以测量为基础，要求工况评价和控制方案具有智能。

另外，电网自愈控制需要将电网的运行分成常用的 5 种状态，再根据 5 种状态的相互转换关系，划分成 4 种控制手段。如图 3-2 所示，电网运行 5 种状态为

- 1) 正常状态：在保护和控制装置局部功能正确执行的条件下，如果故障发生，电网能够维持正常运行的状态。
- 2) 脆弱状态：如果故障发生，即使保护和控制装置的局部功能正确执行，电网也将失去负荷的状态。
- 3) 故障状态：故障正在发生的状态。
- 4) 故障后状态：故障发生后达到新的

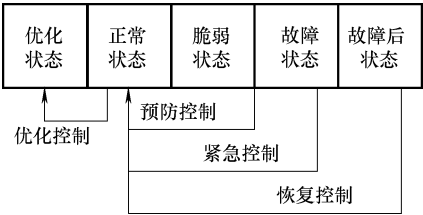


图 3-2 电网自愈控制的状态与控制

平衡状态，此状态还能维持电网的正常运行或者丢失一部分负荷；电网瘫痪则是极

端恶化的故障后状态。

5) 优化状态：通过优化控制，使电网具有更大安全裕度的正常状态。

对应于上述 5 种状态，电网自愈控制包括 4 种基本控制：

1) 预防控制：使电网从脆弱状态回到正常状态的控制。

2) 紧急控制：使电网从故障状态回到正常状态的控制，必须具有快速、及时性。

3) 恢复控制：使电网从故障后状态回到正常状态的控制。

4) 优化控制：正常状态下，使电网具有更大安全裕度的控制。

3.1.3 电网安全控制两个研究的方向

1. 制止级联事件演变成大停电事故

据北美电力可靠性协会（NERC）就美国 1984 ~ 1997 年的电网停电事故统计，每年影响 1 ~ 10 万用户的停电次数为 5 ~ 10 次；影响 10 ~ 100 万用户的停电次数为 1 ~ 5 次；影响 100 ~ 1000 万用户的停电次数为 0.1 ~ 1 次。其中，40% 的大停电事故由级联事件演变而成。导致电网大面积停电的原因很多，涉及电网结构、运行管理、自动装置和人员培训等方面。其中，由级联事件和人为处理不当而演变成的大停电事故，日益引起人们的关注。2003 年“8.14”美加大停电，有学者认为是人为过失造成的。

在我国，因为电力资源分布不均匀，需要实现大电网资源优化配置，如现在采取的“西电东送”和“南北互供”等。但是，具有联动效应的大电网，却存在着发生大面积停电的潜在风险；而风险的缩小或放大，还涉及处理是否得当的人为因素。因此，在存在风险的情况下，用以制止级联跳闸和缩小停电范围的主动解列、灵活分区等措施，以及从集中监视控制发展到分布协调控制，自然成为当前研究的新热点。

2. 从安全防护到灾变防御

面对防止发生大面积停电事故的艰巨任务，除传统的静态安全分析外，主要是加强包括暂态稳定性、电压稳定性和频率稳定性在内的动态安全评估。定时启动的预防性控制软件紧密跟踪电网运行，一旦发现系统薄弱环节便立即提出诸如网络重构、调整保护定值和稳定补救等方案的安全对策。其中，在功角遥测基础上发展起来的广域测量系统（WAMS）较为引人注目。基于相量测量装置（PMU）的 WAMS，支持具有快速、准确特点的状态估计，使得对电压失稳及低频振荡的监视报警、系统动稳极限输电功率的确定等高级系统分析成为可能。此外，WAMS 还可与稳控装置终端相结合，组成广域稳定控制的快速保护系统，或称广域保护/广域控制系统（WAPS/WACS）。

当前，电网的安全控制正从面向物理系统的安全防护走向涉及自然和社会因素

的灾变防御。与面向物理系统便于采用精确解的安全防护不同，灾变防御除面对电力系统外，还涉及自然和社会诸多因素，因此必须与知识工程（如 Multi-Agent）的智能解相结合。面向 Agent（Agent Oriented，AO），是继面向过程和面向对象（Object Oriented，OO）之后的新一代软件系统工程技术。在诸多灾变防御系统的研发热点中，美国开发的电力基础设施战略防护系统（Strategic Power Infrastructure Defense System，SPID）较为引人注目。

3.1.4 智能 AVC 的自愈

智能 AVC 的自愈功能指的是电网发生电压崩溃事故后，系统在较少或没有人干预的情况下自身恢复电压水平的能力。本质上就是事故后，电网能够快速实现无功就地平衡的能力。要实现智能电网的自愈，核心在于在线实时的决策，实现无故障时稳定运行，小故障时自治运行，预防大面积连锁故障的发生也即电网的自我预防，大的故障事件时自我恢复。

自愈首先要自治，就必须要求电网具备自适应计算功能。2003 年发生的“8.14”美国、加拿大停电事故，从第一个故障开始发生到电网崩溃经历了 5 个阶段，最终导致了大停电事故，没有能够阻止事故发生和实现系统恢复，如图 3-3 所示。该故障最终演变为特大系统崩溃的重要原因就是电网不具备自适应计算功能、没有电压和无功控制的自愈功能。在通信通道中断后，电网调度中心失去状态估计和无功潮流的计算能力，动态无功补偿装置容量裕度不够，得不到无功补偿方案，系统不能下发控制指令，失去了实时就地无功平衡的可能。

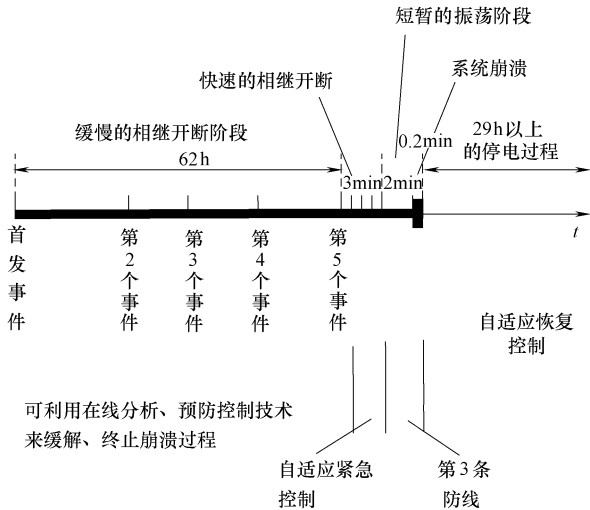


图 3-3 2003 年“8.14”美国、加拿大停电事故经历的 5 个发展阶段

要实现智能 AVC 的自愈功能,借鉴电网运行状态,首先应当将智能电网的运行状况进行分区,其中非正常运行时按工作性质可分为异常脆弱区、故障扰动区、检修维护区。在进行工作区判别后可分别对三个非正常区进行控制,最终确保电网运行在正常运行区或优化运行区,预防大的故障事件连锁发生导致系统崩溃。对正常运行区内的电网进行优化控制,使电网优化运行,实现电网资源优化配置。这样,电网运行可以划分成以下五个区域:优化运行区 (Optimized Operation Zone, OOO)、正常运行区 (Routine Operation Zone, ROZ)、异常脆弱区 (Abnormal and Vulnerable Zone, AVZ)、故障扰动区 (Contingency and Fault Zone, CFZ)、检修维护区 (Repair Maintenance Zone, RMZ)。

优化运行区:电网运行在该区域时,最经济、效率最高,而且能满足清洁环保、和用户友好互动的目标,能够为用户提供优质特殊定制的供电服务,满足电网运行的各种等式约束条件和不等式约束条件,具备较强的抗干扰能力和排除故障、抵御灾害、恢复稳定运行的能力,网络运行具有更大的安全裕度。

正常运行区:满足电网运行时的各种等式约束条件和不等式约束条件,电网能满足一般条件下的稳定、可靠、持续运行,可为用户提供一般、满足正常使用条件的供电服务,能在合理预想事故或扰动后正常运行,具备一定安全运行裕度,需要根据电网运行的实际具体情况来决定是否能够或者有必要进行优化控制使系统过渡到优化运行区域。

异常脆弱区:满足电网运行时的等式约束条件,不满足(或部分满足)不等式约束条件,在电网一次和(或)二次侧有安全隐患存在,比如电压越限(有失去稳定运行的趋势,但还没有失稳)、过负荷等情况。此时,系统运行的安全稳定裕度不够,虽然能持续运行一段时间,但任其发展而不采取任何措施的话,会出现抵抗扰动和故障的能力减弱,系统故障扩大,电网演变到故障扰动区域运行。此时急需快速实施各种预防、校正手段和方案。

故障扰动区:此运行区域内,电网已发生扰动或故障,系统不完全满足电网运行时的等式约束条件,不满足(或部分满足)不等式约束条件,系统运行参数已发生严重越限,电网运行不稳定,可能出现部分用户供电中断,如不采取紧急控制手段,系统运行状况会进一步恶化,形成供电“孤岛”,严重的话导致电压下降过多,电网崩溃。系统在该区域运行时,不再强调经济高效、清洁环保、和用户友好互动这些指标,主要强调保证供电不中断、减少扰动或故障对用户的影响,此时急需快速实施紧急控制或恢复控制措施,尽快恢复系统稳定运行和正常供电。

检修维护区:系统运行在该区域时,设备运行异常或发生严重故障,如系统崩溃,线路供电中断等,需要检修维护人员现场恢复供电。此时不强调经济高效、清洁环保、和用户友好互动这些指标。

3.2 “自愈”的硬件设备及软件决策系统的改进

3.2.1 “自愈”的硬件设备及改进

随着科学技术的发展以及对电网自愈能力要求的不断提高,传统的电网设备并不能很好地提升电网的抵御突发事件以及事故后电网的恢复能力,传统的电网碰到事故时,所能采用的技术较少,或切除故障断线路,或切除部分用户,情况严重时,甚至采取解列运行。本小节将从两个方面对电网硬件设备进行改进。

1. 柔性交流输电技术 (FACTS) 的应用

柔性交流输电技术 (FACTS) 又称为灵活交流输电技术,它是美国电力专家于 1986 年提出来的新技术,曾将 FACTS 定义为“除了直流输电之外所有将电力电子技术用于输电的实际应用技术”。该技术是现代电力电子技术与电力系统相结合的产物,其主要内容是在输电系统的主要部位,采用具有单独或综合功能的电力电子装置,对输电系统的主要参数(如电压、相位差、电抗等)进行灵活快速的适时控制,以期实现输送功率合理分配,降低功率损耗和发电成本,从而大幅度提高系统稳定和可靠性。FACTS 的主要功能可归纳为:①较大范围地控制潮流;②保证输电线输电容量接近热稳定极限;③在控制区域内可以传输更多的功率,减少发电机的热备用(在美国可以由通常的 18% 降低到 15% 或以下);④依靠限制短路和设备故障的影响来防止线路串级跳闸;⑤阻尼电力系统振荡。由其功能可以得出,柔性交流输电技术能大幅提高电网自愈能力。

随着电力电子技术的飞速发展,新的高电压、大功率的电力电子器件不断出现,它为柔性交流输电技术的实现打下了坚实的基础。目前已成功应用的或正在开发研究的 FACTS 装置有十几种。现仅列出以下几种:

1) 静止无功补偿器 (SVC)。SVC 使用晶闸管来快速调整并联电抗器的电抗及投切电容器组,并可兼有事故时的电压支持作用,维护电压水平,消除电压闪变、平息系统振荡等。可以静态或动态地使电压保持在一定范围内,从而提高电力系统的稳定性。

2) 静止同步补偿器 (STATCOM)。这是对 SVC 改进后的装置,它由三相逆变器构成,整个装置无功功率的大小和极性都由它通过的电流来调整,故其整体功能类似于同步调相机。它的调节无功的能力比 SVC 强,因为 SVC 的无功量由电压二次方除以阻抗决定,而 STATCOM 的输出无功则取决于输出端的电流和电压乘积。因此,在事故时电压降低的情况下,STATCOM 比 SVC 可提供更大的无功支持能力,具有一定的事故过载能力。如果采用并联电容器蓄能组或超导储能电抗器所取代,则事故支持的时间还可延长。但是,STATCOM 造价比 SVC 更昂贵。

3) 直流输电 (HVDC)。直流输电中的交、直流转换器是最早应用晶闸管技术的装置之一。

4) 超导蓄能器 (SMES)。此装置由电力电子器件控制一个大容量超导蓄能线圈所组成, 几乎无损耗。放电/充电的效率在 95% 以上, 但造价昂贵。SMES 作为蓄能器, 可快速供应备用电力; 瞬时提供同步或阻尼功率以提高输电的静态和暂态稳定性; 提高远距离输电的输送能力; 延长发电设备寿命; 提供无功功率以改进电压稳定性; 改进电压质量等。采用 GTO 器件后, 可将 SMES 输出的有功和无功率彼此独立地进行控制, 故不仅对短期, 而且对中期动态过程可产生良好影响。

5) 固态断路器 (SSCB)。如果采用晶闸管型的断路器, 则由于断路器只能在交流第一次过零时断开, 其开断延时将达几毫秒。如果采用 GID、MCT 或 MTD 等电力电子器件, 则电流可瞬时被切断, 效果将大为提高。美国 SPCO 工厂所生产的 SSCB 样机, 已达到 15kV、600A, 可在 $4\mu\text{s}$ 内完成开断。

6) 可控串联电容补偿 (TCSC)。TCSC 有下列功能: ①潮流控制, 由于可以连续改变线路电抗, 因此可用来进行潮流控制, 改变电网中的潮流分布; ②阻尼线路功率振荡, 可以阻尼由于系统阻尼不足或由于系统大扰动引起的低频功率振荡; ③提高电力系统暂态稳定, 在系统受到大的冲击时, 可迅速调整晶闸管的触发延迟角, 改变串联电容的补偿度, 以提高暂态稳定性; ④抑制次同步振荡 (SSR), 当系统发生 SSR 时, 迅速调整串联电容器容抗至最小值, 对于次同步频率, TCSC 呈感抗, 这样便会对 SSR 起很强的阻尼作用。

7) 统一潮流控制器 (UPFC)。UPFC 是一种功能最强大、特性最优越的新一代柔性交流输电装置, 也是迄今为止通用性最好的 FACTS 装置, 综合了 FACTS 元器件的多种灵活控制手段, 它包括了电压调节、串联补偿和移相等所有能力。它可以同时并非常快速的独立控制输电线路中有功功率和无功功率。UPFC 可以控制线路的潮流分布, 从而有效地提高电力系统的稳定性。

随着电力电子技术的飞速发展, 灵活交流输电技术的发展前景不可估量, 必将改变电力系统的传统面貌, 并促使电力系统发生重大变革。

2. 广域测量系统 (WAMS/PMU) 的应用

广域测量系统 (WAMS/PMU) 是以相量测量装置 (PMU) 为基础的。PMU 以 GPS 为基础, 能实现电力系统的精准测量, “精” 源于毫秒数量级的采样间隔, “准” 则是因为采样时间的同步性, 所以 WAMS/PMU 系统与 SCADA/RTU 相比, 具有动态测量能力。

WAMS/PMU 电网动态测量可以实现如下功能: 已经发生的电网动态过程的感知, 包括输电线路的功角关系、各种电气状态量的动态行为、发电机的摇摆等; 变化较慢的电力系统动态过程全局大闭环直接控制的测量基础; 局部同步控制保护行动的测量基础; 帮助稳态的状态估计提高计算准确度; 保护和控制行为后验评价的

测量基础；电网故障的动态过程反演、回放与分析的数据来源；电力系统元件模型及参数后验评价与校核的测量数据基础；实际电力系统研究的动态过程数据基础；为 DTS 提供培训用电网实际历史动态数据等。

WAMS/PMU 是电力系统实时测量的重要发展，SCADA/RTU 的稳态测量和 WAMS/PMU 的动态测量不存在否定和替代的关系，它们结合起来相互补充共同起到电网控制保护的数据支持作用。目前两种测量系统处于相互分离状态，未来以数据融合和共享为目标，将会走向一体化。

3.2.2 “自愈”的软件决策系统的改进

“自愈”系统的“2-3-6”框架是由密切联系的 2 环控制逻辑、3 层控制结构、6 个控制环节组成，是电网自愈控制实现分布自治性、广域协调性、工况适应性的基础组织架构。

1. 2 环控制逻辑

电网自愈控制尊重电网动态过程快速性的事实，承认局部控制保护快速性与电网全局控制方案慢速性的矛盾，实事求是地设计了慢速全局响应环和快速局部控制环的 2 环控制逻辑，如图 3-4 所示。

采用这种 2 环控制逻辑设计时，局部控制环具有毫秒/秒数量级的响应速度，对应于控制保护装置和发电厂/变电站自动化系统，采取全局控制方案与局部控制功能协调的方法，执行具体的控制保护行动。全局响应环具有分钟以上数量级的慢速方案形成过程，位于电网调度控制中心。

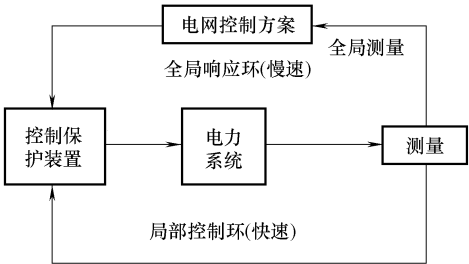


图 3-4 2 环控制逻辑

2. 3 层控制结构

如图 3-5 所示，3 层控制结构由相互衔接的局部的反应层、高端的决策层、中间的协调层组成。

1) 反应层（毫秒/秒数量级）：位于局部控制环，具有分布自治性和行动及时性，实现采集测量和控制行动两个基本功能。

2) 决策层（分钟/小时数量级）：位于全局响应环，具有很强的工况适应性，实现工况评价和控制决策两个基本功能。

3) 协调层（秒数量级）：在反应层与决策层之间，位于全局响应环，具有广域协调

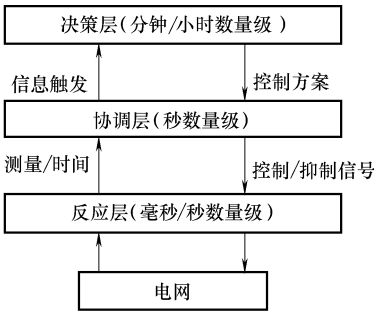


图 3-5 三层控制结构

性，衔接全局与局部，实现全局与局部的速度协调和功能协调。

采用这种 3 层控制结构设计，通过中间的协调层解决全局控制方案与局部控制保护之间速度之间的矛盾。

3. 6 个控制环节

如图 3-6 所示，沿信息流方向，在 3 层控制结构上有采集测量、监视协调、工况评价、控制方案、部署协调、控制行动 6 个控制环节。

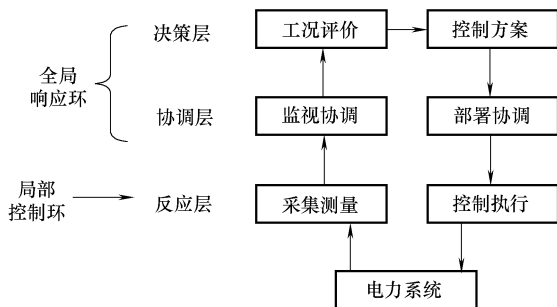


图 3-6 6 个控制环节

1) 采集测量环节：位于反应层，依托局部的测量装置或自动化系统，实现稳态测量（如 RTU）、动态测量（如 PMU）、关键装备状态测量、电网运行事件采集等采集测量功能。

2) 监视协调环节：位于协调层，以采集测量环节为基础，实现反应层与决策层之间的信息流速协调功能、电网基本的监视功能。信息流速协调将毫秒/秒数量级的实时断面信息转变为大量断面信息组成的分钟数量级的过程信息，使决策层来得及响应，是监视协调环节的重要功能。

3) 工况评价环节：位于决策层，以监视协调环节上传的电网实时信息为基础，采用面向过程的方式，对电网实时运行工况的脆弱性进行评价。

4) 控制方案环节：位于决策层，以工况评价环节的脆弱性评价为基础，采用电网深度计算分析方法，制定适应性控制方案。

5) 部署协调环节：位于协调层，以控制方案环节为基础，将电网控制方案解析为控制保护装备可以执行的行动指令或逻辑控制条件。

6) 控制行动环节：位于反应层，其控制保护任务是：①根据部署协调环节下达的控制保护指令，执行全局控制保护任务；②执行局部控制保护功能。

在这种“2-3-6”控制框架设计下，电网自愈控制体系是分层分布控制体系，由相互嵌套和衔接的 3 部分组成：位于局部反应层的发电厂和变电站自动化系统；位于电网调度控制中心、处于协调层的电网监控系统（如 SCADA/WAMS）；在电网监视系统之上，处于决策层的评价决策系统（如 EMS 及其完善发展）。3 种系统

自下而上构成基础，有机结合起来组成传统电网自愈控制系统，如图 3-7 所示。

随着电网通信网络的不断完善和 IEEE1588 精确对时协议在电网通信网络中的广泛应用，电网的全局控制同样可以做到快速控制。这与以往的网络通信延时相比，可谓是质的飞跃。从这个角度来讲，“2-3-6”框架把两个控制环锁定在全局（慢速）控制环和局部（快速）控制环有其不尽合理的地方。同样，电网自愈控制方案不仅仅包含基于全局量测量的控制方式，还包含基于局部量测量的控制方式。另外，“2-3-6”框架的 6 个控制环节中，监视协调（位于协调层）的说法也不尽合理，而部署协调也应该在高级应用层面，而不应该在协调层。况且，该 6 个环节中忽略了配电网实现自愈的几个最重要因素，如电网实时预测、快速仿真与模拟、电网优化等。再者，考虑到智能装置本身就具有部分决策能力，将决策层作为最高层也有其不完善之处。

针对“2-3-6”自愈框架理论本身的不足，改进的电网自愈控制分层框架体系如图 3-8 所示，该框架体系把智能电网自愈控制分为系统层、过程层、高级应用层。

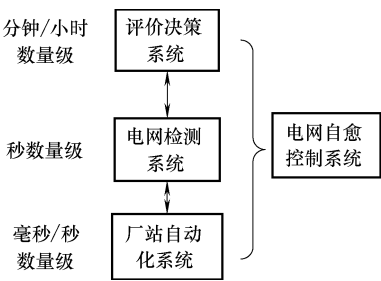


图 3-7 电网自愈控制系统

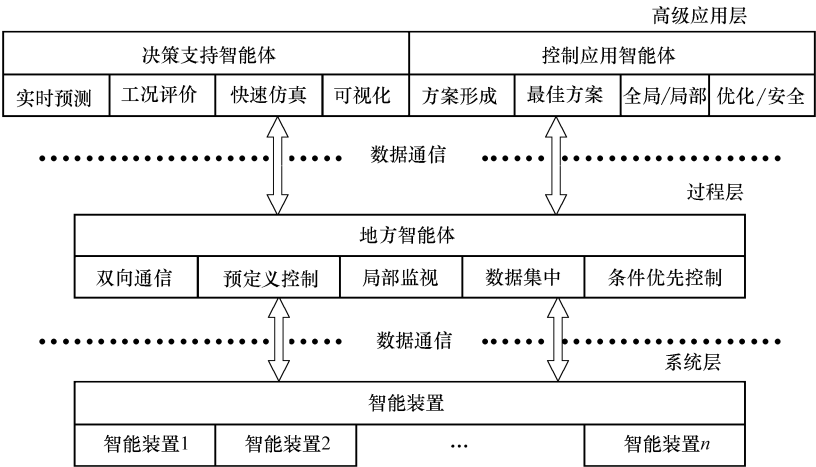


图 3-8 改进的电网自愈控制的分层框架体系

- 1) 系统层由电网智能装置组成，是配电网的物理层，其智能化程度越高，则支持配电网实现自愈的能力就越强。
- 2) 过程层是中间层，由地方智能体组成，包括双向通信、预定义控制、局部监视、数据集中、条件优先控制等。其中，预定义控制能够被事件所快速触发，不

经过高级应用层控制，具有较快的执行速度，包括局部保护、微网自动形成与控制、FACTS 装置自动投入等；条件优先控制由用户设定，具有最高优先级，且不经高级应用层控制，在满足一定的条件下，能够快速执行，保证电网和人员的安全和重要用户的可靠供电；局部监视用来监视区域配电网或重要装置的运行状态；数据集中收集系统层的各种数字量和模拟量，进行预处理，由过程层共享，并通过双向通信把高级应用层和系统层联系起来。

3) 高级应用层由决策支持智能体和控制应用智能体组成。决策支持智能体通过利用来自过程层的数据，对电网存在的安全隐患和即将发生的事件进行实时预测，并进行持续工况评价。快速仿真是基于数据应用的高级软件平台，为配电网提供决策支持，并将结果进行可视化展现。控制智能体包括控制方案的形成、最佳控制方案的确定、进行局部和全局控制协调、进行电网优化和安全控制协调等。一般采取的控制手段可以采取以下形式或部分形式的组合，但并不局限于此：潮流控制或优化、变压器分接头调整、负荷需求侧管理、储能装置投入、分布式发电单元或可再生能源投入、保护动作、FACTS 装置投入、电网拓扑重构、储能装置充放电控制、电动汽车充放电、为用户提供最佳用能建议等。

改进的电网自愈控制的分层框架体系包含但不限于“2-3-6”框架的内容，能够很好地协调局部和全局控制、电网优化和安全控制（预防校正、紧急恢复、检修维护控制等），既能通过高级应用层实现集中控制，又能通过过程层实现局部控制，它是实现配电网自愈控制的分布自治、广域协调、工况适应、重视预防的基础组织架构。

3.3 SVC 和灵敏度分析

3.3.1 SVC 在电力系统中的作用及特点

静止无功功率补偿器（SVC）是一种输出功率随着电力系统特定的控制参数而变化的并联的静止无功功率发生装置或无功功率吸收装置。SVC 主要依靠晶闸管等电力电子器件完成调节或投切功能，能快速、平滑地调节容性或是感性无功功率，进行动态补偿，实现连续而迅速地控制无功功率，通过发出或是吸收无功功率来控制它所连接的输电系统的节点电压。其显著特点是能快速、平滑地调节容性或感性无功功率，实现动态补偿。SVC 在电网中的主要作用主要体现在两个方面：一是通过在长距离输电通道的中间点或受电负荷端加装 SVC，以提高输电能力、增强系统阻尼；二是在负荷中心地区安装 SVC 系统以稳定系统电压，改善系统无功潮流分布，提高系统安全性，增强系统的抗干扰能力。

SVC 和传统同步调相机、电容器、电抗器等相比，具有以下特点：

- 1) 响应速度快, 一般为 0.5 ~ 2 个周波;
- 2) 可进行单相和三相控制;
- 3) 调节性能好, 控制灵活;
- 4) 装置的运行损耗小;
- 5) 可靠性高、维护工作量小、运行费用低。

在输配电系统中, 采用 SVC 可发挥如下作用:

- 1) 控制无功功率, 增加线路的输电能力;
- 2) 提高功率因数, 降低网损;
- 3) 调节系统电压, 提高电压稳定裕度;
- 4) 降低冲击性负荷所引起的电压波动, 改善电能质量;
- 5) 使三相负荷平衡化;
- 6) 加强对低频振荡的阻尼以及抑制同步振荡;
- 7) 抑制电力系统谐波。

从上面的叙述中可知, SVC 有很多的优点, 在智能 AVC 中应加大 SVC 的应用, 可增强电网就地无功平衡能力, 提高电压稳定裕度, 进而提高电网的自愈能力。

伴随我国电网的快速发展, 在局部电网出现了一定时期的中间过渡局面, 当电网结构改变时, 便会出现稳定性和电压的敏感点在电网物理位置上不断变化的现象。与电容器补偿装置相比, SVC 装置造价在数百甚至千万元以上, 电网如果在一定时间内大量采用固定安装式 SVC 需要投入巨额资金, 当电网结构改变后可能造成巨额浪费。面对这种形势, 一种可移动的静止无功补偿装置 (RSVC) 就显现出了巨大的使用价值。通过这种可移动的 SVC 在多处地区电网重要负荷点和电压敏感点安装运行, 将可以大大地提高这一地区的电网无功优化性能和电网运行的安全稳定特性; 而当电网结构变化后, 则可以及时调整安装地点, 使静止无功补偿装置的性能发挥到极致。RSVC 与常规的 SVC 相比, 具有如下优势:

- 1) 具有配置的灵活性, 可依需要安装;
- 2) 降低投资风险;
- 3) 整体组装和试验均在制造厂进行;
- 4) 减少人员成本支出;
- 5) 减少现场工作;
- 6) 可在较短时间内实现安装位置的转移, 并实现对新系统要求的调节控制要求。

虽然 RSVC 较 SVC 显现出更大的优点, 但是它们实现无功补偿的基本原理是相同的。

3.3.2 SVC 的分类

基于 FACTS 技术的 SVC 以其优良的动态无功补偿性能已在实际工程中大量应用。国际电网会议将 SVC 大致分为 7 种,即机械投切电容器 (MSC)、机械投切电抗器 (MSR)、自饱和电抗器 (SR)、晶闸管投切电容器 (TSC)、晶闸管控制电抗器 (TCR)、晶闸管投切电抗器 (TSR)、自换向或电网换向式转换器 (SCC/LCC)。由于其中一些 SVC 装置的固有性能缺陷,以及在工程实际中的使用局限,使得目前应用比较广泛的 SVC 装置主要集中在 SR、TCR 和 TSC 类及它们的组合形式,它们被广泛用于输电系统波阻抗补偿及长距离输电的分段补偿,也大量用于负载无功补偿。下面分别对它们进行了简要的介绍。

1. 晶闸管控制电抗器 (TCR) 型

TCR 具有反应时间快 (10 ~ 20ms)、无级调节、分相调节、平衡有功、运行可靠、适用范围广、价格较为便宜等优点,多用于控制电弧炉负荷产生的闪烁。

2. 晶闸管投切电容器 (TSC) 型

TSC 的特点是分相调节装置本身不产生谐波、损耗小、反应时间短、适用范围广,但它只能进行分级调节,且价格较高,主要适用与 1kV 以下,进口设备最高用在 8kV, 10kV 以上难以广泛应用。

3. 自饱和电抗器 (SR) 型

SR 的优点是不需要复杂的控制系统、反应时间较短、运行可靠、维护较为简单;缺点是噪声大、本身在三相不平衡时会产生较多谐波电流。工作点受电压波动的较大影响,因其制造工艺复杂且价格较高,在大容量领域也难以广泛应用。

表 3-1 列出了常用几种 SVC 的性能参数比较。从表中可以看出,TCR 型 SVC 实际上就是一个可连续调节的电抗器,只能提供感性无功功率,在实际应用中常加入固定并联电容器组 (FC) 来实现发出和吸收无功功率。

表 3-1 目前常用的几种 SVC 性能比较

性能参数	SR	TCR	TSC	TCR + TSC
控制范围	感性、容性	感性	容性	感性、容性
电纳调节	连续无源	连续有源	逐级有源	连续有源
控制的可调性	有限	好	有限	好
分相平衡	有限	有	有限	好
响应速度	约 10ms	约 10ms	10 ~ 20ms	约 10ms
谐波发生量	很小	小	无	非常小
过电压能力	大	一般	无	有限
损耗	中等	中等	小	小

(续)

性能参数	SR	TCR	TSC	TCR + TSC
噪声	大	小	小	小
直接接入高压	不能	不能	不能	不能
控制灵活性	差	好	好	好
投资	较小	大	最小	一般

3.3.3 SVC 的数学模型

静态无功补偿器 (SVC) 在电力系统中的作用主要有两个, 即进行电压调节和提供阻尼。电压调节主要是通过电力电子器件控制 SVC 为相应母线提供容性或感性的无功功率来调节电压; SVC 引入系统中的阻尼主要通过附加的控制环节来实现, 通过增加一些弱阻尼模态的阻尼, 提高系统的动态稳定性。根据不同的控制目标和工程实践的要求, 以及 SVC 本身的不同类型, 其数学模型也有很多种, 下面介绍几种 SVC 的数学模型。

1. TCR 型 SVC

其原理接线如图 3-9 所示。

由图 3-9 可知, TCR 是由电抗器和两个反向并联的晶闸管相串联组成的。令 $u(t) = U_m \sin \omega t$, 即 TCR 所接母线电压为正弦波, 其中 U_m 为母线电压的峰值, ω 为系统电压的角频率。在晶闸管导通期间, 忽略电抗器电阻, 电感电流 $i_L(t)$ 满足关系式 (3-1)。

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = U_m \sin \omega t \tag{3-1}$$

式中, L 为电抗器的电感; 触发时刻 $\omega t = \alpha + k\pi$, $k = 0, 1, 2, 3 \cdots$; α 为晶闸管的触发延迟角, $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ 。

$$i_L(t) = \frac{U_m}{X_L} [\cos(k\pi + \alpha) - \cos \omega t] \quad k\pi + \alpha \leq \omega t \leq (k+2)\pi - \alpha \tag{3-2}$$

式中, X_L 为电抗器的基波电抗, $X_L = \omega L$ 。当 $\omega t = k\pi + \alpha$ 时, 电感电流为零, 晶闸管开始导通; 当 $\omega t = (k+2)\pi - \alpha$ 时, 电感电流下降为零, 晶闸管自动关闭, 电感电流的波形如图 3-10 所示。

从图 3-10 可以看出, 当晶闸管完全导通, 这种运行模式相当于 $\alpha = \omega/2$ 时, 也相当于将电抗器直接并联在系统中, 系统吸收的感性无功功率最大; 当 $\omega/2 \leq \alpha \leq \pi$ 时, 晶闸管处于部分导通状态; 当 $\alpha = \pi$ 时, 晶闸管在任何时刻都处于截止状态,

由于晶闸管的控制作用, 通过调整晶闸管触发延迟角 α 的大小可改变电感电

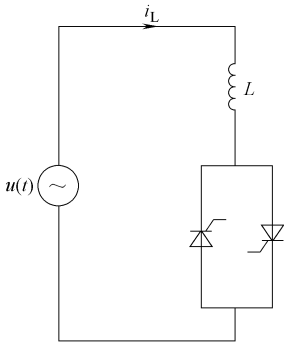


图 3-9 TCR 的原理接线图

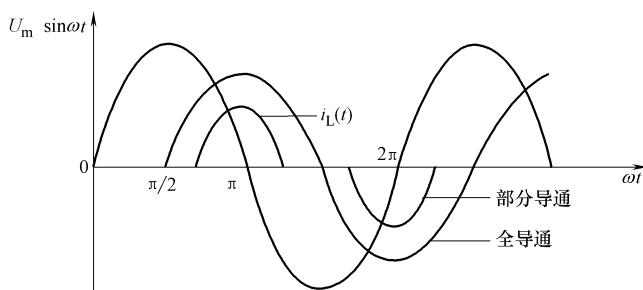


图 3-10 TCR 电流波形图

流的峰值和导通区域，使得流过电抗器的电流发生畸变而不再是正弦波。对电感电流进行傅里叶分解，可以得到电流基波分量的幅值为

$$I_L = \frac{2(\omega - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi X_L} U_m \quad (3-3)$$

对于基波而言，晶闸管控制的电抗器可看成一个可控的电纳，即

$$B_L(\alpha) = \frac{2(\omega - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi X_L} \quad (3-4)$$

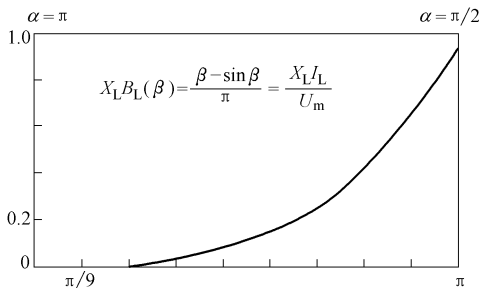
从上式可以看出，TCR 支路的等值基波电纳是触发延迟角 α 的函数，调整触发延迟角 α 的大小可以平滑地改变并联在系统上的等值电抗。

根据关系式 $2\alpha + \beta = 2\pi$ ，式 (3-2) 和式 (3-4) 可变形为

$$I_L = \frac{\beta - \sin \beta}{\pi X_L} U_m \quad (3-5)$$

$$B_L(\beta) = \frac{\beta - \sin \beta}{\pi X_L} \quad (3-6)$$

式中， β 为导通角，当 $\beta = 0$ 时， $B_L(\beta)$ 为零；当 $\beta = \pi$ ，即晶闸管完全导通时， $B_L(\beta)$ 获得最大值 $1/X_L$ ；其与电抗器导纳的关系曲线如图 3-11 所示。



3-11 TCR 的可控导纳与导通延迟角的关系曲线

导通角与等效电纳间是非线性关系，通常在触发回路中插入线性化校正环节来补偿导通角与等效电纳之间的非线性。

2. TCR-FC 型 SVC

其原理接线图如图 3-12 所示。

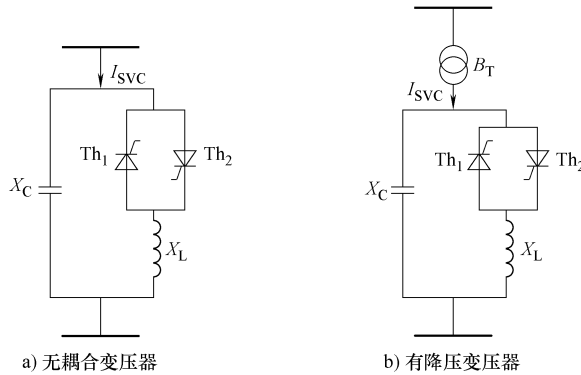


图 3-12 TCR-FC 型 SVC

与 TCR 型 SVC 相比较, TCR-FC 型 SVC 多了固定电容器组 (FC), 根据前面推导的 TCR 数学模型可得, 在没有降压变压器时, SVC 的补偿电纳为

$$B_{SVC} = B_C + B_{TCR} \quad (3-7)$$

式中, $B_{TCR} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi X_L}$; $B_C = \frac{1}{X_C} = \omega C$ 为电容器电纳。因此有

$$B_{SVC} = B_{TCR} + B_C = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi X_L} + B_C = \frac{\pi(2 + X_L/X_C) - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi X_L} \quad (3-8)$$

3. TSC 型 SVC

其原理接线图如图 3-13 所示。

TSC 是由电容器与两个反向并联的晶闸管相串联组成。通过对晶闸管的控制作用, TSC 中的电容器只有两种运行模式, 即将电容器直接并联在系统中或将电容器退出运行, 因此 TSC 不能提供连续的无功功率。设 TSC 支路的电源电压与 TCR 相同, 根据电容器的特性方程, 流过电容器的电流为

$$i_C(t) = C \frac{dU(t)}{dt} = CU_m \cos \omega t \quad (3-9)$$

式中, C 为电容器的电容。

晶闸管从导通状态到自然关闭时刻所对应的电容电流 $i_C(t)$ 为零, 此时电容电压为电源电压的峰值 U_m 。为了减小电容器投入时刻产生的冲击电流, 在实际运用中 TSC 支路中还需串联一个小电感, 此外, 应使得电容器投入时的电源电压与电容器充电电压相等。因此在理想投入情况下, 电容电流的暂态分量为零, 晶闸管触发延

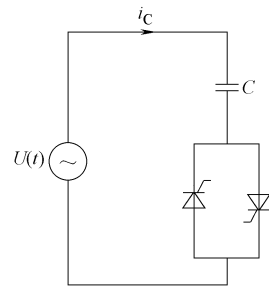


图 3-13 TSC 原理接线图

迟角满足 $\alpha = \pi/2$ ，即任何时刻晶闸管总有一个是导通的，电容器投入之前的电压为电源电压峰值。

在工程实际中，一般将电容器分成几组，每组都可由晶闸管投切，然后根据电网的无功功率需求投切电容器的组数。因此并联在系统上的总电纳值是分级变化的，即 TSC 实际上就是断续可调的提供容性无功功率的动态无功补偿器。在原理上，一般希望电容器分组的级数要多么小就可以做到多么小，希望要多少级就可以做到多少级，从而使得组合产生的电容值级数接近连续，但这样一来控制装置过于复杂，并且造价偏高。可使大多数分组电容值相等，一个折中方案是所谓的二进制方案，即采用 $n - 1$ 个电容值均为 C 的电容和一个电容值为 $C/2$ 的电容，这个 $C/2$ 的电容使组合数从 n 个增加到 $2n$ 个。假设在电容器理想投入情况下，即忽略操作的暂态过程，电容电流与并联电容器数量间的关系如图 3-14 所示。

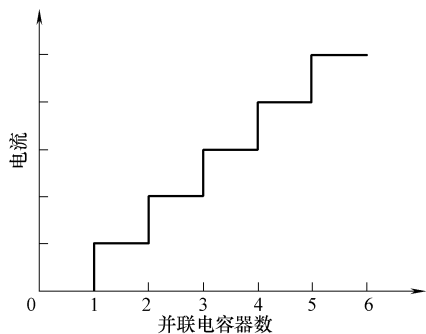


图 3-14 电容电流与并联电容器数量间的关系曲线

4. TCR + TSC 型 SVC

其原理接线图如图 3-15 所示。

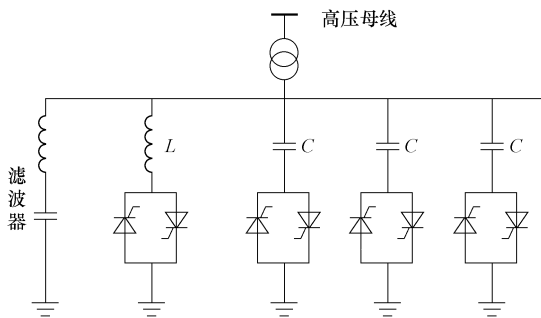


图 3-15 TCR + TSC 的原理接线图

TCR + TSC 型 SVC 是由晶闸管控制电抗器和晶闸管投切电容器组成，如图 3-15 所示。TSC 输出的电容性无功功率是阶梯式可调的，它与 TCR 配合原则上可以得到平滑可调的无功功率输出，其伏安特性曲线如图 3-16 所示。

可以看出，为了获得比较平滑的伏安特性曲线，混合型 SVC 中的 TCR 的容量应略大于每次电容切换时无功的变化，否则会造成伏安特性曲线在切换处断续。

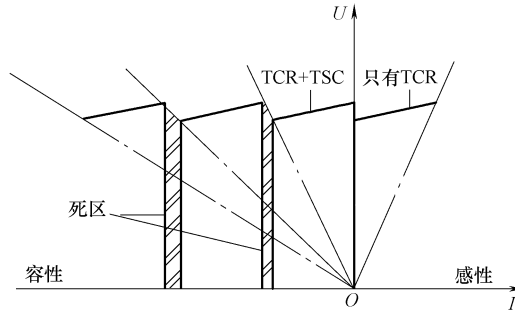


图 3-16 TCR + TSC 的伏安特性

根据式 (3-6), TCR 从系统中吸收的无功功率为

$$Q = \frac{\beta - \sin\beta}{\pi X_L} U^2 \quad (3-10)$$

式中, U 为母线电压的有效值。

电容器在投入运行时, 向系统提供的容性无功功率为

$$Q_C = n\omega C U^2 \quad (3-11)$$

式中, n 为 TSC 投入电容器的组数, 因此 TCR + TSC 型 SVC 向系统注入的无功功率 Q_{SVC} 为

$$Q_{SVC} = Q_C - Q_L = \left(n\omega C - \frac{\beta - \sin\beta}{\pi\omega L} \right) U^2 \quad (3-12)$$

当 $0 \leq \beta \leq \pi$ 时, TCR + TSC 型 SVC 可以连续平滑可调的向系统提供无功功率。而混合型 SVC 的等效电纳和等效电抗为

$$B_{SVC} = n\omega C - \frac{\beta - \sin\beta}{\pi\omega L} \quad (3-13)$$

$$X_{SVC} = \frac{\pi\omega L}{\beta - \sin\beta - n\pi\omega^2 LC} \quad (3-14)$$

由上面推导出的几种典型的 SVC 数学模型, 可以推导出其他类型组合 SVC 的数学模型。在实际应用时, SVC 可以看成并联在系统中的—个可变电纳, 其电纳值由 SVC 的控制器决定。

3.3.4 SVC 模型的潮流实现

根据上文对 SVC 的静态建模, 下面我们对 SVC 模型的潮流实现。假设 SVC 注入其所连接母线 k 的无功功率为

$$Q_{SVC} = U_k^2 B_{SVC} \quad (3-15)$$

则系统母线 k 处的功率平衡方程为

$$\Delta P_k = P_{lk} - \sum_{i \in R_k} P_{ki} \quad (3-16)$$

$$\Delta Q_k = Q_{lk} - \sum_{i \in R_k} Q_{ki} - Q_{SVC} \quad (3-17)$$

式中, P_{lk} 、 Q_{lk} 为 SVC 连接母线 k 的有功、无功负荷; $\sum_{i \in R_k} P_{ki}$ 、 $\sum_{i \in R_k} Q_{ki}$ 分别为母线 k 的有功、无功注入; R_k 为直接连接到 k 的所有母线的集合。

由于 SVC 自身的特点, 对于装有 SVC 的母线不能直接归类于一般的 PV 母线和 PQ 母线, 为了能够准确的表达 SVC 触发延迟角 α 的运行限制, 本书在对 SVC 进行潮流实现时, 在原来的母线类型的基础上, 引入了一个增广的母线类型 PQV。对于 PQV 母线, 其有功及无功注入、电压幅值为指定值, 而将其电压相角及 SVC 的触发延迟角 α 作为状态量。

当 $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$ 时, 母线 k 被作为 PQV 类型母线处理; 如果 α 越限, 则将其作为普通 PQ 类型母线处理, 此时电压幅值和相角作为状态变量, SVC 产生或吸收的无功是电压幅值的函数。SVC 模型的极限处理和母线类型转换规则如图 3-17 所示。

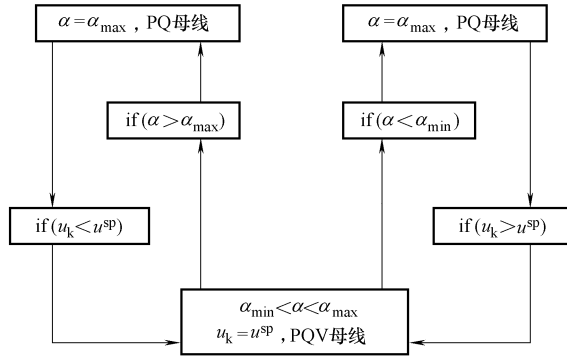


图 3-17 SVC 触发延迟角 α 运行极限的处理

被控母线 k 为 PQV 类型母线时, 潮流方程修改为

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \alpha_k} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \alpha_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial \theta_k \\ \partial \alpha_k \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

式中, $\frac{\partial P_k}{\partial \alpha_k} = 0$; $\frac{\partial Q_k}{\partial \alpha_k} = U_k^2 \frac{\partial B_{SVC}}{\partial \alpha_k}$ 。

被控母线 k 为 PQ 类型母线时, 潮流方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial U_k} U_k & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} U_k & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial U_k / U_k \\ \partial \theta_k \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

上述方法的前提条件是被控母线没有连接发电机或是其他的无功电压控制装置。

3.3.5 灵敏度分析

灵敏度指标以潮流方程计算为基础,属于静态电压稳定的范畴,它利用系统中某些物理变化关系及它们之间的微分关系来研究系统电压的稳定性。电力系统电压稳定静态指标是规划设计和系统运行中的重要技术参数,能够识别系统薄弱区域、关键母线及发电机等。在潮流计算的基础上,只需加入少量的额外计算,便能得到灵敏度值。

电力系统分析中通常用一组微分代数方程来表示,即

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{P}) \\ 0 = \mathbf{G}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{P}) \end{cases} \quad (3-20)$$

式中, \mathbf{F} 描述的是系统的动态部分,包括发电机、励磁系统、动态无功补偿等的动态特性; \mathbf{G} 描述的是系统的静态部分,如网络模型等; \mathbf{X} 为状态变量, $\mathbf{X} = (\delta, \omega, E'_d, E'_q, E_{fd}, U_R, R_f, \dots)$; \mathbf{Y} 为代数变量, $\mathbf{H} = (I_d, I_q, U, \theta, \dots)$; \mathbf{P} 为参数变量, $\mathbf{P} = (\mathbf{P}_L, \mathbf{Q}_L, K_A, K_E, K_F, K_L, \dots)$,包含了在静态和动态部分所出现的参数。

在一个稳定运行点 $(\mathbf{X}(\mathbf{P}_0), \mathbf{Y}(\mathbf{P}_0))$ 附近,即在 \mathbf{P}_0 点的偏导 $\partial \mathbf{X} / \partial \mathbf{P}$ 和 $\partial \mathbf{Y} / \partial \mathbf{P}$ 给出了点 $(\mathbf{X}(\mathbf{P}_0), \mathbf{Y}(\mathbf{P}_0))$ 的灵敏度。在一个平衡点对上式中的 \mathbf{P} 求偏导,并求出在平衡点的偏导值。

$$\begin{cases} 0 = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{P}} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{P}} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{P}} \\ 0 = \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{P}} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{Y}} \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{P}} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{P}} \end{cases} \quad (3-21)$$

由式 (3-10) 得到代数变量的参数灵敏度表达式为

$$\frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{P}} = - \left[\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{Y}} \right]^{-1} \left[\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{P}} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{P}} \right] \quad (3-22)$$

状态变量参数灵敏度表达式:

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{P}} = \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} - \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \left[\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{Y}} \right]^{-1} \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{X}} \right]^{-1} \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \left[\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{Y}} \right]^{-1} \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{P}} - \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{P}} \right] \quad (3-23)$$

令 $\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} - \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \left[\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{Y}} \right]^{-1} \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{X}}$ 作为简化系数的矩阵,则状态变量参数灵敏度表达式 $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{P}} = \mathbf{A}^{-1} \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \left[\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{Y}} \right]^{-1} \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{P}} - \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{P}} \right]$, 式 (3-20) 和式 (3-21) 的最本质的动态特征都可以用简化矩阵 \mathbf{A} 的特征属性来表示。

3.3.6 网损灵敏度指标

所谓网损灵敏度就是负荷节点的有功功率变化或无功功率变化对网络中功率损耗的灵敏度。电力系统电压崩溃的一个特征就是系统网损的突然增大。当分别考虑负荷节点处的有功功率和无功功率的变化对系统网损的影响时，可以得到无功网损灵敏度和有功网损灵敏度。网损灵敏度具有一个明显的特征：当电力系统接近崩溃时，发电机发出的功率无论怎么增长都不能满足增加的负荷对功率的需求，重负荷输电线路也成为无功功率消耗元件，促使其他正常的线路趋于不稳定，从而导致负荷节点的电压迅速下降，网损灵敏度数值会迅速增加，因此，网损灵敏度值可以被用作系统电压静态稳定的指标。

电力系统的潮流方程表示如下：

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) & i \in N-1 \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & i \in M \end{cases} \quad (3-24)$$

式中， U_i 、 U_j 分别为节点 i 和 j 的电压； θ_{ij} 为节点 i 和 j 之间的相角差； G_{ij} 和 B_{ij} 分别为连接节点 i 和 j 的传输的电导和电纳； P_i 和 Q_i 分别为注入节点 i 的有功功率和无功功率； N 为系统的节点数； M 为系统的 PQ 节点数。

网络中功率损耗为所有节点注入功率之和，即

$$\hat{S}_L = \sum_{i,j} \hat{Y}_{ij} \hat{U}_i \hat{U}_j \quad (3-25)$$

式中， Y_{ij} 为导纳矩阵元素。

有功功率网损的表达式为

$$P_L = f_{P_L}(U, \theta) = \sum_{i=1}^n U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (3-26)$$

无功功率网损的表达式为

$$Q_L = f_{Q_L}(U, \theta) = \sum_{i=1}^n U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (3-27)$$

根据式 (3-24) 和式 (3-26) 可以推算出有功网损灵敏度为

$$\frac{dP_L}{dP} = \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial P} + \frac{\partial P_L}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial P} \quad (3-28)$$

$$\frac{dP_L}{dQ} = \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial Q} + \frac{\partial P_L}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial Q} \quad (3-29)$$

将上面两式写成矩阵形式的表达式为

$$\begin{bmatrix} \frac{dP_L}{dP} \\ \frac{dP_L}{dQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial P} & \frac{\partial U}{\partial P} & \frac{1}{U} \\ \frac{\partial \theta}{\partial Q} & \frac{\partial U}{\partial Q} & \frac{1}{U} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial U} \end{bmatrix} = - [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial U} \end{bmatrix} \quad (3-30)$$

同理可得无功网损灵敏度的矩阵形式表达式为

$$\begin{bmatrix} \frac{dQ_L}{dP} \\ \frac{dQ_L}{dQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial P} & \frac{\partial U}{\partial P} & \frac{1}{U} \\ \frac{\partial \theta}{\partial Q} & \frac{\partial U}{\partial Q} & \frac{1}{U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q_L}{\partial U} \end{bmatrix} = - [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q_L}{\partial U} \end{bmatrix} \quad (3-31)$$

式中, J 为潮流雅可比矩阵; $\frac{\partial P_L}{\partial \theta}$ 、 $\frac{\partial P_L}{\partial U}$ 为 P_L 分别对 θ 、 U 的偏导, 具体到节点 j , 即求:

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta} : \frac{\partial \left(\sum_{i=1}^n U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \right)}{\partial \theta} \quad \text{和} \quad \frac{\partial P_L}{\partial U} : \frac{\partial \left(\sum_{i=1}^n U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \right)}{\partial U}$$

令 $j=t$, 计算如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_L}{\partial \theta_t} &= \frac{\partial \left(\sum_{i=1}^n U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \right)}{\partial \theta_t} = \sum_{i=1, t=1}^n U_i U_t (G_{it} (-\sin \theta_{it} (-1) + \\ &\quad B_{it} (\cos \theta_{it}) \times (-1)) + \sum_{t=1, j=1}^n U_t U_j (G_{tj} (-\sin \theta_{tj}) + B_{tj} (\cos \theta_{tj})) \\ &= \sum_{i=1, t=1}^n U_i U_t (G_{it} \sin \theta_{it} - B_{it} \cos \theta_{it}) + \sum_{t=1, j=1}^n U_t U_j (-G_{tj} \sin \theta_{tj} + B_{tj} \cos \theta_{tj}) \\ &= \sum_{i=1, t=1}^n U_i U_t (G_{it} \sin \theta_{it} - B_{it} \cos \theta_{it}) + \sum_{i=1, t=1}^n U_t U_i (G_{it} \sin \theta_{it} + B_{it} \cos \theta_{it}) \\ &= 2 \sum_{i=1, t=1}^n U_i U_t G_{it} \sin \theta_{it} \end{aligned}$$

因此, 可以得到各母线节点的有功网损对相角和电压的偏导数为

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_j} = 2 \sum_{i=1}^n U_i G_{ij} U_j \sin \theta_{ij} \quad (3-32)$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial U_j} U_j = 2 \sum_{i=1}^n U_i G_{ij} U_j \cos \theta_{ij} \quad (3-33)$$

同理可得无功网损对相角和电压的偏导数为

$$\frac{\partial Q_L}{\partial \theta_j} = -2 \sum_{i=1}^n U_i B_{ij} U_j \sin \theta_{ij} \quad (3-34)$$

$$\frac{\partial Q_L}{\partial U_j} U_j = -2 \sum_{i=1}^n U_i B_{ij} U_j \cos \theta_{ij} \quad (3-35)$$

每个母线节点的网损灵敏度的数值计算只需要在每次潮流计算的基础上，再加入少量的计算便可以得出所需结果，因此，网损灵敏度指标具有物理概念明确、计算速度快、准确性好的特点。

本文选取 dQ_L/dQ 作为无功网损灵敏度指标，其物理意义为：母线注入无功功率的改变引起的系统无功损耗的改变量，根据物理意义，应调节具有最大无功网损控制效力的控制变量，使全网的无功损耗最小。因而，分别计算每个节点的无功网损灵敏度，按照从大到小的顺序进行排列，就能找出系统电压稳定薄弱节点，确定无功补偿的最佳位置。对该节点进行无功补偿，就能迅速地减小系统无功的损耗，增强系统的稳定性，并且充分利用无功补偿设备。

无功网损灵敏度的计算流程如下图 3-18 所示。

3.3.7 算例仿真

本文选择对 IEEE 14 节点系统进行无功网损灵敏度的仿真计算，IEEE 14 节点系统如图 3-19 所示。发电机集中在母线 1、2、3、6、8 上，将节点 1 的发电机作为平衡机，节点 2、3、6、8 为 PV 节点，负荷节点采用恒功率模型。由图 3-19 可知，除了发电机以外的其他母线缺乏无功支持，尤其是带负荷的母线 4、5、9、10、11、12、13、14，因此，这些节点很可能成为系统的不稳定节点。

利用公式 (3-31) 对 IEEE 14 节点系统进行无功网损灵敏度的计算，以非发电机母线作为研究节点，因此选择 4、5、9、10、11、12、13、14 节点进行计算。

由表 3-2 的网损灵敏度计算结果可以看出，带有负荷的母线 14、10、9 的网损灵敏度为前三位，其中，节点 14 的灵敏度指标最大，因此，节点 14 被视为系统最薄弱的节点。

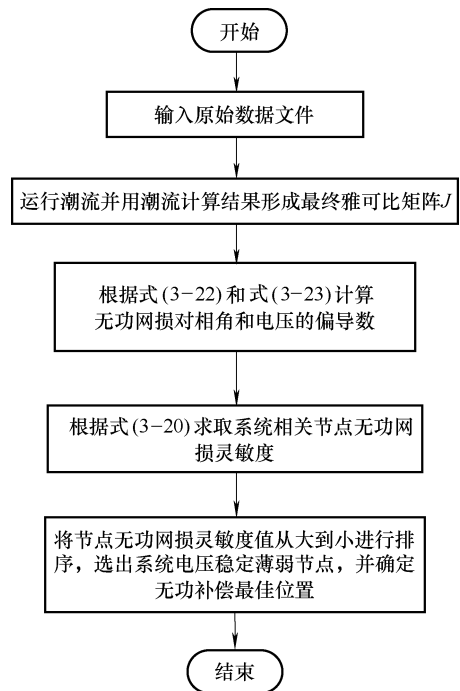


图 3-18 无功网损灵敏度指标算法流程

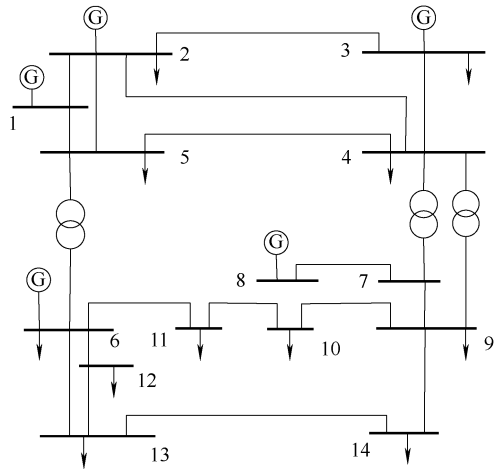


图 3-19 IEEE 14 节点系统图

表 3-2 IEEE 14 节点系统网损灵敏度计算值

排列序号	节点号	网损灵敏度值	排列序号	节点号	网损灵敏度值
(1)	14	0.0881	(6)	4	0.0354
(2)	10	0.0584	(7)	11	0.0341
(3)	9	0.0545	(8)	7	0.0314
(4)	13	0.0405	(9)	5	0.0229
(5)	12	0.0361			

要提高节点电压和系统稳定性，最为有效的手段就是在系统薄弱节点处进行无功补偿，由表 3-2 计算结果可得，节点 14 为最佳无功补偿点。为了更好地展示系统薄弱点的特性，分别选取了节点 14 和节点 9 安装 SVC 进行补偿。在此系统中安装的 SVC 的参数如下： $X_L = 1.0$ ， $X_C = 0.5$ ， $X_T = 0.1$ （各量皆为标么值），对安装了 SVC 的节点按照上文给出的 SVC 模型的潮流实现进行计算。

表 3-3 为安装 SVC 前后各负荷节点电压幅值情况。由表 3-3 可知，安装 SVC 后，各节点的电压有了提高。通过比较在不同节点安装 SVC 可以看出，在薄弱节点 14 安装 SVC，自身的电压值升高了 2.83%；而在节点 9 安装 SVC 后，其自身的电压值升高了 1.32%。纵观所有节点变化量，在最薄弱节点安装 SVC，电压幅值变化明显，说明了利用无功网损灵敏度指标能较快地找到系统的薄弱点，针对此节点进行无功补偿，能达到最好的补偿效果，能最为有效地提高系统电压稳定性。

SVC 作为一种并联的无功补偿设备，能控制自身注入的电流，并根据系统状况进行潮流分布。由计算结果可知，对于带 SVC 节点的并联补偿，对于与其越接近的区域受到的影响越大，补偿效果越好，而对相对远离的区域的节点的影响较小，从而证明了 SVC 能有效地改善电压稳定性，提高负荷裕度。

表 3-3 安装 SVC 前后电压幅值比较

节点号	无 SVC 时	SVC 装于节点 14		SVC 装于节点 9	
	电压值/kV	电压值/kV	增幅	电压值/kV	增幅
4	1. 0119	1. 0173	0. 53%	1. 0142	0. 23%
5	1. 0158	1. 0204	0. 45%	1. 0176	0. 18%
7	1. 0400	1. 0470	0. 67%	1. 0428	0. 27%
9	1. 0128	1. 0231	1. 02%	1. 0262	1. 32%
10	1. 0152	1. 0240	0. 86%	1. 0190	0. 38%
11	1. 0386	1. 0456	0. 67%	1. 0404	0. 17%
12	1. 0519	1. 0584	0. 62%	1. 0533	0. 13%
13	1. 0440	1. 0531	0. 95%	1. 0461	0. 20%
14	1. 0079	1. 0364	2. 83%	1. 0112	0. 33%

第 4 章 基于智能 AVC 多目标建模、 求解与协调控制算法

无功优化的建模和算法历经十多年的发展已经相当成熟，而且在计算实时性和收敛性等方面都取得了很大进步，但是随着电网的不断发展和壮大，新的电力能源的不断接入，传统的无功优化技术无论在模型或者求解上将很难以适应新的电网在多目标需求下的安全经济稳定运行，因此就智能 AVC 而言对传统 AVC 的建模和算法的改进显得十分重要。本章首先介绍传统 AVC 的建模和求解方法，然后研究在新能源接入下的多目标电网优化建模，最后研究在采用进化算法以及模糊多属性决策方法对多目标模型进行求解的问题。

4.1 传统 AVC 建模和求解方法介绍

4.1.1 传统 AVC 的建模

传统的 AVC 是以网损最小为目标，在特定运行断面的电压无功优化在本质上是一个最优潮流问题，数学上可用一个非线性优化模型来描述。一般以电网运行的安全性作为约束条件，以提高电网运行的经济性作为优化目标，实现全网无功的综合优化。其数学模型可简要描述如下：

$$\min f(U, \theta, B, T) \quad (4-1)$$

s. t.

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j \in S_N} P_{ij}(U, \theta, B, T) = 0 & i \in S_N \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - \sum_{j \in S_N} Q_{ij}(U, \theta, B, T) = 0 & i \in S_N \\ \underline{Q}_{Gi} < Q_{Gi} < \overline{Q}_{Gi} & i \in S_G \\ \underline{B}_i < B_i < \overline{B}_i & i \in S_C \\ \underline{T}_i < T_i < \overline{T}_i & i \in S_T \\ \underline{U}_i < U_i < \overline{U}_i & i \in S_N \end{cases} \quad (4-2)$$

式中， $f(U, \theta, B, T)$ 为目标函数，多数情况下为系统的有功网损； U_i 、 θ_i 、 P_{Gi} 、 Q_{Gi} 、 P_{Li} 和 Q_{Li} 分别表示节点 i 的电压幅值、电压相位、电源有功注入、电源无功注入、有功负荷和无功负荷； B_i 为并联补偿设备 i 的并联电纳； T_i 为有载调压变压

器抽头 i 的标幺电压比; S_N 为所有节点的集合; S_G 为机组的集合; S_C 为并联补偿设备的集合; S_T 为有载调压变压器抽头的集合。

4.1.2 传统 AVC 的求解方法

目前现有的 AVC 算法主要有常规的数学规划类数值优化算法、人工智能类的启发式优化算法以及组合优化算法。

1. 数学规划类数值优化算法

(1) 线性规划法 (Linear Programming)

线性规划法的理论成熟、模型简单、算法稳定、收敛性好、计算速度快, 可以处理大量的约束, 因而被广泛地应用到了电力系统无功优化中。虽然无功优化是一个非线性规划问题, 但可以采用逐次线性规划法求解非线性规划问题的思路, 引入线性规划法。在线性规划法中较为经典的是灵敏度分析法。该方法是基于逐次线性化的观点, 将电力系统无功优化的模型表示成灵敏度矩阵的增量形式, 并可以方便地利用灵敏度矩阵来引入各种约束条件, 然后用线性规划法求解。但是, 在迭代中要反复计算灵敏度矩阵, 计算量很大, 很难在大型系统中做到实时应用。在此基础上, 二次灵敏度规划方法是对其进行的改进。实际应用时, 在线性化目标函数和约束条件并逼近最优解的过程中, 步长的选取对收敛性影响很大, 若步长取得过大, 则有可能引起振荡; 步长太小, 又会使收敛速度变慢, 而且要对离散变量做一些近似处理。

尽管线性规划法具有诸多优点, 但由于电力系统无功优化问题有较强的非线性, 因此线性化后的优化效果不是很好。尤其是目标函数是网损最小时, 优化的结果不甚理想。

(2) 非线性规划法 (Non-linear Programming)

根据电力系统自身非线性的特征, 直接采用非线性规划法来求解无功优化问题的方法也有很多。其本质思想是将有约束优化问题转化为序列无约束优化问题来求解。其中最具代表性的是简化梯度法和牛顿法。

简化梯度法以极坐标形式的牛顿潮流计算为基础, 对等式约束用拉格朗日乘数法处理, 对不等式约束用罚函数处理, 沿着控制变量的负梯度进行寻优, 具有一阶收敛性。优化仅在控制变量的子空间中进行, 缩小了问题的规模, 这种算法原理和程序设计都比较简便。其缺点是迭代点在向最优点接近的过程中, 会出现锯齿现象。牛顿法是具有二阶收敛性的算法, 它是基于非线性规划的拉格朗日乘数法, 利用目标函数二阶导数组成的海森矩阵与网络潮流方程一阶导数组成的雅可比矩阵来求解。将牛顿法与电力系统的稀疏性结合起来, 大大减少了计算量。其缺点是数值的不稳定性和对函数不等式约束预估计处理的困难, 而且对应控制变量的海森矩阵对角元素容易出现极小值或零值, 造成矩阵奇异。

(3) 二次规划法 (Quadratic Programming)

二次规划法是将目标函数作二阶泰勒级数展开, 将非线性约束转化为一系列的线性约束, 从而构成二次规划优化模型, 用一系列的二次规划来逼近最优解。二次规划法是处理有约束非线性规划问题的最有效方法之一, 其最大的特点是可以高效地处理不等式约束。二次规划不需要选取、调整惩罚因子, 也不需要确定最佳步长, 比一般非线性规划方法简单、容易求解, 且收敛速度快。其目标函数可以较好地适应无功优化目标函数的非线性特征, 因此在无功优化中得到了广泛的应用。但是, 当约束数量较大时, 二次规划法的计算时间会随着约束数的增加而急剧的增长, 而且初值的选取对该算法也有影响, 初值选取不当可能收敛到局部最优解。

(4) 混合整数规划法 (Mixed Integer Programming)

混合整数规划法能够有效地解决优化计算中的离散变量问题。该方法可以通过分支一定界法不断定界, 以缩小可行域, 逐渐逼近全局最优解。但该方法计算量大, 其计算属于非多项式类型, 随着维数的增加, 计算时间会急剧增加, 有时甚至是爆炸性的, 不适合大规模系统的无功优化计算, 通常应结合分解法来降低计算量。也有一些文章针对混合整数规划法中的离散变量, 以内嵌的二次罚函数建立精确的数学模型。可以选取负曲率二次罚函数和正曲率二次罚函数, 但是这将会使目标函数变成非凸函数, 因此都必须采取相应的措施, 但这会带来新的问题。

(5) 内点法 (Interior Point Method)

自 Karmarkar 于 1984 年提出具有多项式时间可解性的线性规划内点法以来, 各种不同类型的内点法不断被提出。内点法从初始内点出发, 沿着最速下降方向, 从可行域内部直接走向最优解, 其本质是拉格朗日函数、牛顿法和对数障碍函数三者的结合。在对数障碍函数的基础上, 对不等式约束引入松弛变量使之转化为等式约束, 并引入拉格朗日乘子形成扩展的目标函数。内点法的主要优点是计算时间对问题的规模不敏感, 不随问题规模的增大而显著增大, 并且具有很好的鲁棒性和收敛特性。但内点法本质是一种连续算法, 其处理函数不等式约束的能力不强。

(6) 动态规划法 (Dynamic Programming)

动态规划法是用来解决多阶段决策过程最优化问题的一种有效方法。它对目标函数和约束条件没有严格的限制, 而且也可以在一定条件下解决一些与时间无关的静态规划中的最优化问题, 只要人为地引入时段因素, 即可将其转化为一个多阶段决策问题。动态规划法随着状态变量数目的增加会出现“维数灾”, 而且很难确定一个实际问题的动态数学规划模型, 这些都限制了它的广泛应用。

2. 人工智能类启发式优化算法

人工智能算法是从一个初始解群体开始, 按照概率转移原则, 采用某种方式自适应地搜索最优解。该类算法具有全局搜索能力而且可以方便地处理离散变量, 因此在电力系统无功优化中得到了广泛的应用。这类方法主要有神经网络、专家

系统、模糊理论、模拟退火算法、遗传算法、禁忌搜索、粒子群算法、进化规划和多 Agent 系统等。

(1) 人工神经网络 (Artificial Neural Network)

利用人工神经网络方法来解决无功优化问题时,首先利用一个隶属函数将总负荷模糊化,然后将模糊化的负荷输入神经网络,得到各控制变量的隶属度,通过隶属度函数解出控制变量的实际值,最后用专家系统结合灵敏度分析法来处理各变量越界的情况。该方法速度很快,只要在离线情况下训练好神经网络,就能应用于实时无功优化。但其应用效果依赖于隶属函数的选取和神经网络训练的好坏,并且难以随运行方式或网络结构的改变而变化,算法的学习速度一般比较慢,训练时间较长,而且不容易收敛或可能收敛到局部极小点等。因此,实际中很少单独采用专家系统或神经网络方法进行无功优化,一般是用来补充和辅助常规算法的。

(2) 专家系统 (Expert System)

专家系统是一种智能的计算机程序,使用知识与推理过程,求解那些需要专家知识才能求解的高难度问题。它是将已有的电压无功控制经验和知识用规则的形式表示出来,形成专家系统的知识库,然后根据规则由电压无功实时变化值进行推理,来求取调节无功的控制手段。目前,开发的系统大都是基于专家经验和数值计算程序的混合。将专家系统应用于无功优化的主要优点在于:以常规算法为基础,与运行人员的知识相结合后增强了算法功能。然而,不同的专家可能有不同的经验,有时甚至是矛盾的,这将给推理带来困难。对于规模较大、规则较多的系统,完成推理的时间就比较长,推理的速度受到限制。此外,建造和维护大型专家系统也存在困难。

(3) 模糊理论 (Fuzzy Theory)

模糊理论的独特优点是可以处理电力系统优化问题中的参数不确定问题。基于模糊技术的模糊控制具有较强的鲁棒性和被控对象参数的变化对模糊控制的影响不明显等优点。此外,由于控制的强与弱本身具有一定的模糊性,因此可以用模糊集表示电压的偏差和控制变量,并用模糊推理的方法得到优化的控制结果。

(4) 模拟退火算法 (Simulated Annealing Algorithm)

模拟退火算法是一种基于热力学退火原理建立的启发式随机搜索算法,使用基于概率的双向随机搜索技术,能有效地解决离散变量的组合优化问题和连续变量函数的极小优化问题。

(5) 遗传算法 (Genetic Algorithm)

遗传算法本身对控制变量没有连续性的要求,因此可以有效地处理无功优化问题中的大量离散变量。其编码方式灵活,可以有效解决无功优化的混合整数变量问题。但它需要计算大量的适应值,收敛速度慢,而且算法容易产生早熟收敛。

(6) 禁忌搜索 (Tabu Search)

禁忌搜索 (Tabu Search) 算法通过引入一个灵活的存储结构和相应的禁忌准则来避免迂回搜索, 并通过藐视准则来赦免一些被禁忌的优良状态, 进而保证多样化的有效搜索以最终实现全局优化。

(7) 粒子群算法 (Particle Swarm Optimization)

在粒子群算法中, 每个优化问题的解都可以想象成搜索空间上的一个粒子, 所有粒子都有一个被目标函数决定的适应值, 还有一个决定它们飞行方向和距离的速度。在每一次迭代中, 粒子通过跟踪个体极值和当前全局最优来更新自己的位置。然后粒子们就追随当前的最优粒子在解空间中搜索, 从理论上可以找到全局最优解。

(8) 进化规划 (Evolutionary Programming)

大量的研究表明传统的进化规划具有和遗传算法相似的优缺点。其优点是具有通用性、鲁棒性和并行性, 易于解决复杂的非线性的, 尤其是难以有效建立形式化模型的问题。其主要不足是计算时间较长、易早熟收敛。参考文献 [43] 根据从多种进化规划方法中总结出来的变异幅度变化规律, 分析了一种广泛运用的进化规划方法的不足并对其进行改进。

(9) 多 Agent 技术 (Multi-Agent Technology)

多 Agent 技术在无功优化中的应用是刚刚起步。目前, 多 Agent 技术主要用于提高无功电压控制设备之间的协调能力。可以通过建立全网电压无功控制的分区等值模型, 并行求解得到全网无功最优解, 将分布并行优化算法与多 Agent 技术相结合, 建立了基于多 Agent 技术的分布式电压无功优化系统的设计方案。

3. 无功优化的组合算法

无功优化问题中包含了连续变量和离散变量, 常规的数学规划方法在求解时, 通常将离散变量视为连续变量参与优化计算, 得到最优解后再进行归整, 因此该方法在求解无功优化问题时遇到的困难之一就是离散变量的归整问题。对于大规模实际系统的无功优化, 由归整产生的误差可能是不可接受的。虽然混合整数规划法能够有效地解决优化计算中的离散变量问题, 但它的计算过程很复杂, 计算量很大。以遗传算法为代表的人工智能类无功优化算法具有编码方式灵活, 可以有效解决无功优化的混合整数变量问题, 但它们需要计算大量的适应值, 收敛速度慢, 而且容易产生早熟收敛。为了充分利用上述两类方法的优势, 扬长避短, 一些学者对相应的混合策略进行了研究。

利用遗传算法和非线性内点法的混合策略求解无功最优调度问题, 该算法以遗传算法为主体, 通过随机操作来确定个体的离散变量值, 并采用内点法来确定种群中每个个体的连续变量和适应度。也可以将现代内点理论与退火选择遗传算法的组合算法, 用于求解最优潮流问题。一种新颖的混合策略来求解无功优化问题是: 不考虑无功优化中的离散约束, 采用内点法求解得到初始解, 根据优化变量的不同性

质, 将原无功优化问题分解为离散优化和连续优化两个子问题, 并分别用遗传算法和内点法交替求解。该混合策略在计算速度和优化效果方面都具有一定的明显优势。

4.2 基于多目标智能 AVC 系统的建模研究

4.2.1 目标函数

由传统的电力系统无功潮流优化的单目标函数演变为智能 AVC 系统中的多目标无功优化建模, 模型如下:

$$f(x) = \begin{cases} \min(P_{\text{Loss}}) \\ \max(\delta_{\min}) \\ \min(\Delta U) \end{cases} \quad (4-3)$$

式中, $\min(P_{\text{Loss}})$ 表示系统的有功网损最小; $\min(\Delta U)$ 表示系统各负荷节点的电压水平最好 (电压波动最小); $\max(\delta_{\min})$ 表示系统的电压稳定裕度最大。

1. 系统有功网损

$$P_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^N U_i \sum_{j \in i} U_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (4-4)$$

式中, P_{Loss} 为传输系统的有功损耗; U 为电压的幅值 (发电机端电压作为控制变量, 可调节); $i=1, 2, \dots, n$; j 为与节点 i 相连的节点。

2. 系统电压稳定裕度

本节中将收敛的雅可比矩阵的最小模特征值最大化作为系统无功潮流优化的目标之一, 即

$$\max(\delta_{\min}) = \max(\min | \text{eig}(J) |) \quad (4-5)$$

式中, J 为收敛潮流的雅可比矩阵; $\text{eig}(J)$ 表示雅可比矩阵的所有特征值; $\min | \text{eig}(J) |$ 表示雅可比矩阵最小特征值的模。

3. 电压偏移目标函数

电压偏移的目标函数就是将各节点的电压与理想电压值范围的偏移量总和最小化, 即提高负荷节点的电压水平。理想电压值范围与状态变量中节点电压约束条件不同, 前者电压标么值的范围要比后者的范围小, 例如前者为 $[0.95, 1.05]$, 后者为 $[0.93, 1.07]$ 。电压偏移的目标函数主要是使系统运行在一个更为理想的状态条件下, 函数可表达为

$$\min(\Delta U) = \sum_{i=1}^N \frac{\Phi(|U_i - U_i^{\text{ideal}}| - \Delta U_i)}{U_i} \quad (4-6)$$

式中, U_i 为系统负荷节点 i 的实际电压; U_i^{ideal} 为系统负荷节点 i 的期望电压; ΔU_i 为负荷节点 i 允许的最大电压偏移量。本书中 U_i^{ideal} 取值为 1, ΔU_i 取值为 +5%。函数 $\Phi(|U_i - U_i^{\text{ideal}}| - \Delta U_i) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ x & x > 0 \end{cases}$, N 为系统负荷节点的总数, 当节点 i 的 U_i 运行在 $[U_i^{\text{ideal}} - \Delta U, U_i^{\text{ideal}} + \Delta U]$ 时, $\Phi(|U_i - U_i^{\text{ideal}}| - \Delta U_i) = 0$, $\left(\frac{P_{Ti}}{1-s_i}\right)^2 + Q_{Ti}^2 = (3I_{si}U_{si}^2)$ 。

4.2.2 等式约束方程

无功潮流优化的等式约束主要是潮流方程的等式约束, 控制变量的约束条件(变压器分接头的调节、无功补偿容量的确定, 发电机端电压的调节)都必须满足系统的潮流方程。

1. 常规节点

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (4-7)$$

式中, P_{Gi} , Q_{Gi} 分别为节点 i 上发电机的有功和无功出力; P_{Li} , Q_{Li} 分别节点 i 上负荷的有功和无功功率; G_{ij} , B_{ij} 和 θ_{ij} 分别为节点 i, j 之间的电导、电纳和电压相角差; n 为节点总数。

2. 风电节点

$$\begin{cases} \Delta P_i = \sum_{k=1}^N P_{ik} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = \sum_{k=1}^N Q_{ik} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (4-8)$$

式中, N 为风电场中并联运行的异步发电机台数, P_{ik} 和 Q_{ik} 为第 k 台机组的有功和无功。

3. 风电机组的无功运行约束

$$\left(\frac{P_{Ti}}{1-s_i}\right)^2 + Q_{Ti}^2 = (3I_{si}U_{si}^2)^2 \quad (4-9)$$

式中, U_{si} 为风电机组定子侧电压; I_{si} 为定子绕组电流; s_i 为转差率。

4.2.3 不等式约束

无功潮流优化的变量约束可分为状态变量约束和控制变量约束, 其中控制变量

分为可调变压器的电压比、无功补偿容量以及发电机端电压；状态变量分为各负荷节点的电压和各发电机的注入无功以及输电线路最大输电容量的限制。那么无功潮流优化变量约束条件的不等式可表示为

1) 控制变量约束条件为

$$\begin{cases} \underline{U}_i < U_i < \bar{U}_i & i \in S_G \\ \underline{B}_i < B_i < \bar{B}_i & i \in S_C \\ \underline{T}_i < T_i < \bar{T}_i & i \in S_T \end{cases} \quad (4-10)$$

式中, U_i , B_i , T_i 分别表示发电机机端电压、变压器电压比、补偿设备容量; \underline{U}_i , \bar{U}_i , \underline{B}_i , \bar{B}_i , \underline{T}_i , \bar{T}_i 分别表示各控制变量对应的上下限; S_G 为所有机端拓扑点的集合; S_C 为并联补偿设备的集合; S_T 为变压器有载调压抽头的集合。

2) 状态变量约束条件为

$$\begin{cases} \underline{Q}_g < Q_g < \bar{Q}_g & g \in S_G \\ \underline{U}_l < U_l < \bar{U}_l & l \in S_l \\ \underline{L}_e < L_e < \bar{L}_e & e \in S_e \end{cases} \quad (4-11)$$

式中, Q_g , U_l , L_e 分别表示发电机无功出力、各负荷节点运行电压以及线路电流; \underline{Q}_g , \bar{Q}_g , \underline{U}_l , \bar{U}_l 分别对应的各自状态变量的最小、最大值; \bar{L}_e 表示输电线路的额定电流, 一般是由其热稳定极限确定。

4.3 基于多目标智能 AVC 系统的求解研究

4.3.1 多目标优化简介

多目标优化问题是普遍存在的问题。为方便后面的描述, 先做以下定义。

定义 1 (多目标优化问题): 一个通常的多目标问题包括一个含有 n 个参数 (自变量) 的集合, 一个包含 k 个目标函数的集合和一个包含 m 个约束条件的集合。目标函数和约束条件都是自变量的函数。

$$\min y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)) \quad (4-12)$$

s. t.

$$\begin{aligned} e(x) &= (e_1(x), e_2(x), \dots, e_m(x)) \geq 0 \\ x &= (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X \\ y &= (y_1, y_2, \dots, y_n) \in Y \end{aligned} \quad (4-13)$$

式中, x 是自变量矢量; y 是目标矢量, X 是自变量空间; Y 是目标空间; 约束 $e(x) \geq 0$ 确定了可行域。

定义 2 (可行集): 可行集 X_f 定义为自变量矢量 x 的集合, 满足约束:

$$X_f = \{x \in X \mid e(x) \geq 0\} \quad (4-14)$$

X_f 的相是在目标空间的可行区域, 可形式化表示为

$$Y_f = f(X_f) = U_{x \in X_f} f(x) \quad (4-15)$$

为不失一般性, 这里我们只考虑最小化问题, 对于最大化或混合的最大最小问题有着类似的定义。

假设两个目标函数一个是性能 (Performance) 的倒数 (表示为 f_1), 另一个是开销 (Cheapness) (表示为 f_2), 这两者都需要在尺寸大小约束 (e_1) 下被最大化。那么一种最优设计可能是既能够达到最优性能又能使开销最小并且没有违反尺寸大小约束的设计方案。如果存在这样的一个解, 那么实际上解决的是一个单目标优化问题, 即对于任意一个目标的最优解对另一个目标也是最优的。然而, 多目标优化相应于不同目标函数的单独优化却是大不相同的, 这正是多目标优化问题困难所在。因为这多个目标是相互冲突的, 并且不能够被同时优化。相反, 我们必须找到满意的折中解。因此, 对于多目标优化问题, 最优的概念需要重新定义。在单目标优化问题中, 按照目标函数其可行集是全序的: 对于两个解 $a, b \in X_f$, 或者 $f(a) \geq f(b)$, 或者 $f(b) \geq f(a)$ 。求解的目标是找到函数 $f(x)$ 的最小值所对应的解。然而, 当考虑几个目标的时候, 情况又发生了变化: 一般而言, X_f 不是全序而是偏序的, 这一点可以用图 4-1 解释。

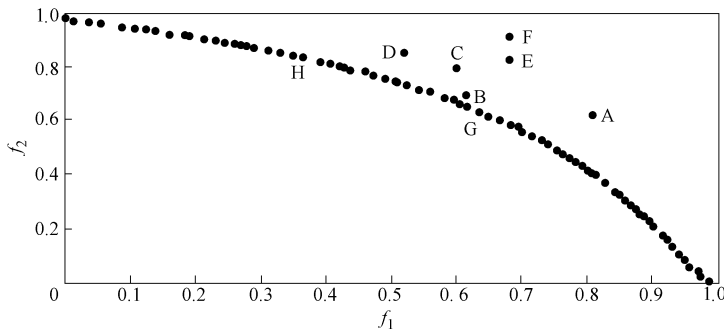


图 4-1 偏序定义参考图

从图 4-1 很容易看出 B 点所代表的解优于 E 点所代表的解。如果仅仅是在一个目标上进行优化那是很容易的事情, 例如 B 点和 C 点, 尽管横轴所代表的目标相等, 但 B 点比 C 点在纵轴所代表的目标上有更好的性能 (值更小)。为了在数学形式上表达这种状态, 大小关系 $=$ 、 \geq 、 $>$ 与单目标问题定义类似。下面把它们扩展到解决多目标优化问题的矢量形式中。

定义 3: 对于任意两个目标矢量 u 和 v :

$u = v$, 当且仅当 $u_i = v_i, i = 1, 2, \dots, k$, 读作 u 与 v 相同;

$u < v$, 当且仅当 $u_i < v_i, i = 1, 2, \dots, k$, 读作 u 优于 v ;

$u \leq v$, 当且仅当 $u_i \leq v_i, i = 1, 2, \dots, k$, 且 $\exists j \in \{1, 2, \dots, k\}, u_j < v_j$, 读作 u 不劣于 v , 或 v 不优于 u ;

$u > v$, 当且仅当 $u_i > v_i, i = 1, 2, \dots, k$, 读作 u 劣于 v ;

$u \geq v$, 当且仅当 $u_i \geq v_i, i = 1, 2, \dots, k$, 且 $\exists j \in \{1, 2, \dots, k\}, u_j > v_j$, 读作 u 不劣于 v , 或 v 不劣于 u ;

在这种定义意义下, 图 4-1 中点的关系: $B < E, B < C$ 。然而当我们比较 A 和 C 或 G 和 H 时, 我们不能说哪一个更优, 因为 A 和 C 与 G 和 H 这两对无法比较。对于 A 和 C , 尽管 A 的纵轴所关联的量更廉价, 但是它的横轴所关联的量要比 C 所关联的量。因此, 在多目标优化问题中, 按照 \geq 关系, 自变量矢量 a, b 有三种可能的关系: $f(a) \geq f(b), f(b) \geq f(a), f(a) \not\geq f(b) \wedge f(b) \not\geq f(a)$ 。在这里, 我们使用下面的符号和术语来区分不同的情况。

定义 4 (Pareto Dominance): 对于任意两个自变量矢量 a 和 b , 有

$a > b$ (a dominates b) if $f(a) < f(b)$;

$a \geq b$ (a weakly dominates b) if $f(a) \leq f(b)$;

$a \sim b$ (a is indifferent to b) if $f(a) \not\geq f(b) \wedge f(b) \not\geq f(a)$;

需要注意的是, **定义 4** 适用于无约束优化问题。对于有约束优化问题, 相应的 a 支配 b 只需满足下面三个条件中的一个:

- 1) a 在可行域中, 而 b 不在可行域中;
- 2) a 和 b 均不在可行域中, 但 a 较 b 有较小的偏离可行域;
- 3) a 和 b 均在可行域中, 但 a 支配 b 。

这样定义后, 通过非劣分类排序值, 就可以将有约束优化问题直接转化为无约束优化问题。

基于偏序的概念, 我们引出了多目标优化问题的最优标准。仍然参考图 4-1, 在 A, B, C, D, E, F 之间 B 点是最优的。它相应的自变量矢量 x_0 没有被任何其他自变量矢量所支配。这也就意味着在某种意义上 x_0 是最优的, 在任何一个目标上它都不能被其他个体支配。这些解被称为 Pareto 最优解, 有时也称作非劣最优解。

定义 5 (Pareto Optimality): 一个自变量矢量 $x \in X_f$, 考虑 X_f 的一个子集 A , 如果 $\exists a \in A, a > x$, 则 x 被称作是对应于集合 A 的 Pareto 最优。

Pareto 最优解的全体被称作 Pareto 最优解集; 相应的目标矢量构成了 Pareto 最优阵面。Pareto 最优解集构成了全局最优解集。然而, 与单目标优化问题一样也存在局部最优, 在某个邻域范围内, 多个局部最优解构成了未被支配解集。这个概念是与 Deb^[5] 所提出的全局和局部 Pareto 最优相对应的。

4.3.2 多目标算法 NSGA- II 的研究

Deb 和他的学生们于 2002 年提出了一种基于精英策略的非劣分类遗传算法 (NSGA- II)。在大多数方面, 该算法与初始的 NSGA 没有太多的相似性。他们为了强调它的起源以及起源的地位而采用了 NSGA- II 这个名字。在 NSGA- II 中, 首先用种群规模大小为 N 的父代种群 P_t 产生种群规模大小为 N 的子代种群 Q_t , 并将两个种群合并在一起形成大小为 $2N$ 的种群 $R_t = P_t \cup Q_t$ 。然后使用非劣分类排序将整个种群 R_t 分等级。尽管与只对 Q_t 进行非劣分类相比, 它需要做更多的工作, 但是它允许在整个子代和父代进行全局的非劣检验。一旦结束非劣分类, 新种群 P_{t+1} 由 N 个不同的非劣等级的个体填充。填充过程从最高非劣等级开始, 接着是第二非劣等级, 依此类推。NSGA-II 的算法框图如图 4-2 所示。

由于整个种群 R_t 的种群大小为 $2N$, 新种群 P_{t+1} 的 N 个位置不能容纳所有的非劣等级。当考虑被允许的最后一个等级中的解时, 该非劣等级可能存在比新种群剩下位置更多的个体。在这种情况下, 使用密度估计的方法从最后一等

级选择位于该等级较稀疏区域的个体填满新种群。这里着重指出的是 R_t 的非劣分类过程和种群 P_{t+1} 的填充过程可以一起执行。这样, 对每一个非劣等级先看它的大小, 看它是否能被新种群容纳, 如果不能, 那么就不必再进行非劣分类, 这样能减少该算法的运行时间。首先, 建立一个随机的种群规模大小为 N 的初始种群 P_0 并初始化进化代数计数器 $t = 0$ 。然后对种群 P_t 进行遗传操作产生子代种群 Q_t , 将 P_t 和 Q_t 合并产生 R_t , 并对具有 $2N$ 规模的种群 R_t 进行非劣分类操作, 并生成下一代种群 P_{t+1} (流程见图 4-3), 进化代数计数器 t 加 1 并判断 t 是否大于最大进化代数 MaxGen。如果是, 那么该算法结束; 否则, 继续进化。如此循环, 直到

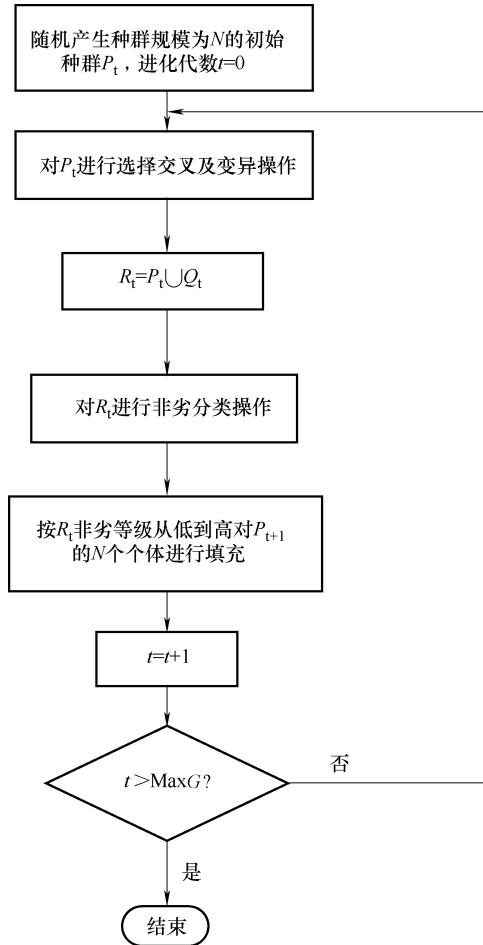


图 4-2 NSGA- II 算法框图

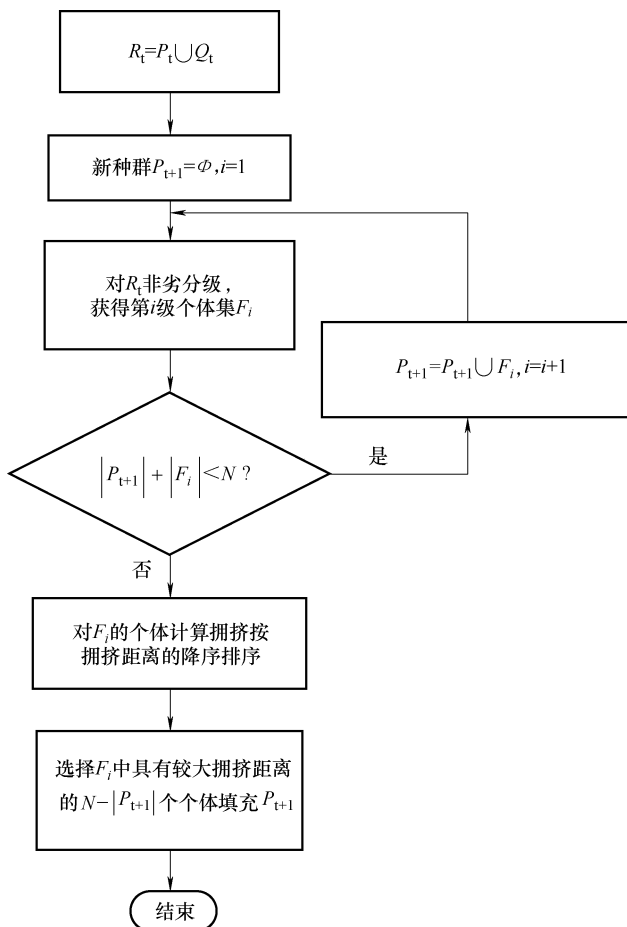


图 4-3 由父代和子代种群生成下一代新种群框图

进化到指定的最大进化代数。

在图 4-3 中, 首先获取 R_t 中的第一非劣等级个体集, 判断并决定该非劣等级能否全被新种群容纳。如果能, 将该非劣等级的所有个体填充到新种群中, 继续判断下一非劣等级能否全被新种群容纳。如此反复, 直到不能容纳该非劣等级的所有个体, 假设为第 $i+1$ 级。对最后不能被完全容纳的非劣组中的个体求其拥挤距离, 并选择分布最广的 $N - |P_{t+1}|$ 个个体填充新种群。

下面介绍该算法中所使用的快速非劣分类方法、拥挤距离尺度、拥挤选择算子, 以及基于实数编码的 SBX 交叉和变异算子。

1. 快速非劣分类方法

为了对具有 N 个个体的种群按照 Pareto 等级进行分类, 每个个体都要与种群中的所有个体进行比较来决定它是否被支配。对于每个个体来说比较的时间复杂度

是 $O(MN)$ ，其中 M 是目标数。持续这个过程，直到从所有个体中找到处于第一非劣等级中的个体，总的时间复杂度是 $O(MN^2)$ 。在这一步，第一非劣等级中的所有个体被寻找到，为了找到随后各等级中的个体，重复上面过程。可以断定，在最坏情况下（每个等级的非劣解集中仅有一个解），这种算法如不采用保留策略，时间复杂度为 $O(MN^3)$ ，而 NSGA- II 中所采用的非支配分类方法所需处理时间最大为 $O(MN^2)$ 。下面将介绍这种方法（假设 p, q 分别表示种群的个体）：

首先，对于每一个个体计算两个量：① n_p ，支配 p 的个体的个数；② S_p ， p 支配的一组解。这两个量的计算时间为 $O(MN^2)$ 。随后，将所有 $n_i = 0$ 的解放入解 F_1 中。对于当前解集 F_1 中的 p ，观察它的 S_p 集，将 S_p 集中每个 q 的 n_q 减 1，完成上述步骤后，如果支配 q 的解个数 $n_q = 0$ ，这也就意味着 q 是仅次于第一等级的个体。此时把 q 放入 F_2 中，重复上述过程，最终将所有的个体按照 Pareto 等级分为多个等级。其中 F_1 中的解是最好的，也就是前面所提到的精英解集，它只支配解而不被其他任何解支配； F_2 中的个体只被 F_1 中的解支配，不被其他解支配，依次类推。每次迭代时间为 $O(N)$ ，由于最多有 N 个解集，那么最坏情况下这个循环的时间为 $O(N^2)$ 。总时间复杂度为 $O(MN^2) + O(N^2)$ 或 $O(MN^2)$ 。

2. 拥挤距离

种群中某个个体 i 的拥挤距离 d_i 是一个在个体 i 周围不被种群中任何其他的个体所占有的搜索空间的度量。为了估计种群中某个个体 i 周围个体的密度，取个体 i 沿着 i 所在的 Pareto Front Line 的两边邻近的两个个体 $(i-1)$ ， $(i+1)$ 的 M 个目标的水平距离之和来刻画数量 d_i ，称为拥挤距离。拥挤距离的求解如图 4-4。下面给出拥挤距离的求解算法：

第一步：对该层（等 Pareto 排序值）的所有点排序，排序结果如图 4-4 所示。

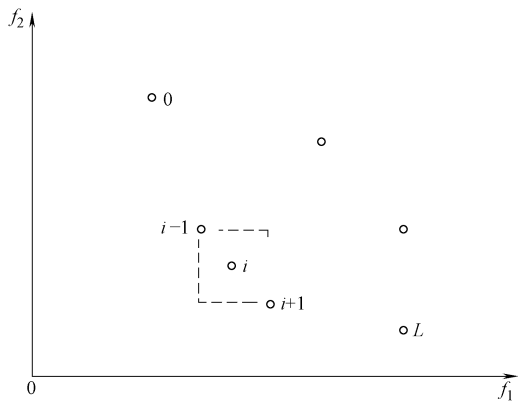


图 4-4 拥挤距离计算示意图

对于两个目标函数值的而言，先选择其中一个目标函数，然后按照该目标函数值从小到大的顺序进行排列，按式 (4-16) 计算距离，进而可以用下面的第三步计算拥挤距离，直到累积完所有的目标函数。

第二步：每个点的拥挤距离 d_i 初始化为 0。

第三步：设 f_m 为目标函数， $m = 0, 1, 2, \dots, M$ 。设 $d_0 = d_L = \infty$ ，端点设置成无穷大保证了端点一定会被选择到下一代中，并且对其他所有个体 $i = 1, 2, \dots$ ，

$L-1$ 分配:

$$d_i = \sum_{m=1}^M |f_m^{i+1} - f_m^{i-1}| \quad (4-16)$$

式中, d_i 表示第 i 个个体的拥挤距离; f_m^{i+1} 和 f_m^{i-1} 分别表示第 $i+1$ 、 $i-1$ 个个体的第 m 个目标函数值。

3. 拥挤选择算子

在 NSGA- II 中, 定义拥挤比较算子 $>_n$, 假设 i 、 j 分别表示种群 P 中的两个个体。如果满足下面任何一个条件:

- 1) $i_{\text{rank}} < j_{\text{rank}}$;
- 2) $i_{\text{rank}} = j_{\text{rank}}$, 并且 $d_i > d_j$;

则称 $i >_n j$, 即个体 i 优于个体 j 。

在个体选择时, 这样定义有如下好处:

- 1) 第一个条件确保被选择的个体属于较优的非劣等级。

2) 第二个条件有利于当节点均处于同一非劣等级时, 可以根据拥挤距离选择位于较不拥挤区域的个体 (有较大的拥挤距离的个体)。这样有利于在联赛选择和新种群填充阶段保持种群的多样性, 同时也就是说经过足够多进化代数后能使最优点集均匀分布在 Optimal Pareto Front Line 上。

这里, 描述一下在 Deb 提供的 NSGA- II 的 C 语言原代码的选择子函数, 首先随机产生两个 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数, 然后将这两个随机数与种群规模 N 相乘并取整, 得到两个随机的个体, 然后按照上面的拥挤选择算子, 如此反复, 选出 N 个较优的个体参与下面的 SBX 交叉以及变异操作。当然, 这选出的种群存在许多重复的个体。

为方便下面的描述, 在此做以下约定:

- 1) 假定在 X_f 中第 k 个变量的取值上下限为 U_k 和 L_k , $k=1, 2, \dots, n$, 即 $x_k \in [L_k, U_k]$, $k=1, 2, \dots, n$;
- 2) 用 $\text{rand}()$ 表示产生 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数;
- 3) 用 i 、 j 表示上面通过拥挤选择算子产生的两个较优的个体 (因为随机性, 这两个个体可能是同一个个体);
- 4) p_c 表示交叉概率, p_m 表示变异概率;
- 5) η_c 表示自定义的交叉算子参数, 并且 $\eta_c \in [0.5, 100]$;
- 6) η_m 表示自定义的变异算子参数, 并且 $\eta_m \in [1, 500]$;
- 7) rnd 、 α 、 β 、 γ 是实变量, child_k^i 表示由 i 产生的新节点的第 k 个分量值大小;
- 8) $\max(a, b)$ 表示 a 与 b 中的最大值, $\min(a, b)$ 表示 a 与 b 中的最小值。

4. 基于连续实数变量编码的 SBX 交叉算子

在 NSGA-II 中, Deb 采用了 SBX 交叉算子, 可从 Deb 提供的 C 语言源代码中提取了 SBX 交叉算子。对于该 SBX 交叉算子的描述如下:

```

rnd = rand ()
if 1 rnd < Pc then /* 通过交叉算子产生后代 */
    rnd = rand ()
    if 2 rnd <= 0.5 then /* 第 k 个分量通过交叉算子产生后代 (概率为 0.5 是因为该分量要么变化要么不变化, 各占一半的概率) */
        if 3 | xkj - xkj | > 10-6 then /* 两个个体在第 k 个分量处距离相差较大 */
            令 maxk = max (xkj, xkj), mink = min (xkj, xkj)
            β = 1 + 2 ×  $\frac{\min(U_k - \max_k, \min_k - L_k)}{\max(U_k - \max_k, \min_k - L_k)}$  /* β ∈ [1, 3] */
            β = 1/β /* β ∈ [1/3, 1] */
            α = 2 - β1+η /* α 大概在 1 到 1.5 之间 */
            rnd = rand ()
            If 4 rnd ≤ 1/α then
                α = α × rnd /* 使 α 在 0 到 1 之间 */
            Else
                α = 1/(2 - α × rnd) /* 使 α 大于 1 */
            End if 4
            γ = α1/(1+η) /* 使 γ 在 1 左右摆动 */
            Else /* 两个个体之间距离差非常小 */
                γ = 1
            End if 3
            /* 下面是通过交叉算子产生的编号为 i, j 的后代 */
            childki = min { max(0.5 × (maxk + mink) - γ × (maxk - mink), Lk), Uk }, k = 1, 2, 3,
            ..., n
            childkj = min { max(0.5 × (maxk + mink) - γ × (maxk - mink), Lk), Uk }, k = 1, 2, 3, ..., n
            Else /* 不通过交叉算子产生后代, 由父代直接产生 */
                childki = xkj, k = 1, 2, 3, ..., n
                childkj = xkj, k = 1, 2, 3, ..., n
            End if 2
            Else /* 不通过交叉操作产生后代, 由父代直接产生 */
                childki = xkj, k = 1, 2, 3, ..., n

```

$$\text{child}_k^j = x_k^j, k = 1, 2, 3, \dots, n$$

End if 1

从上面表达式可以看出,通过 SBX 交叉算子,子代可以在 i 节点和 j 节点所确定的箱内及箱外部附近随机游荡。不足之处在于它引入了一个人工的调节因子 η_c 来确定搜索空间的大小。

而且,若 i 节点和 j 节点所确定的箱空间比较小,则全局搜索能力就非常的弱。特别当它们都不处于第一层的 Pareto Front Line 上时,因为交叉算子本身是反映全局搜索能力的,所以此时对寻找 Pareto Optimal Front Line 的作用就非常小。另一方面,如果 i 节点或 j 节点有一个就位于全局最优的 Pareto Front Line 上,交叉的结果可能会极大偏离 Pareto Front Line 上,并且这种可能性在前期的概率极大,因为通过拥挤选择算子得到的子代获得位于 Pareto Front Line 上(或附近)的节点的概率非常高(但前期在 Pareto Front Line 附近的节点非常有限),所以这种一个节点位于 Pareto Front Line 附近,而另一个节点远离 Pareto Front Line 的情况就非常普遍,这样就不能充分利于 Pareto Front Line 附近节点的信息,前期极大地降低了收敛速度。也就是说,SBX 交叉算子收敛速度太慢;但是 SBX 交叉算子适合用于后期(即经过有限代操作之后,当种群都是精英解时,若箱比较小,得到的子代也位于 Pareto Front Line 附近,若箱比较大,也有助于提高最优 Pareto 集的多样性,所以在后期交叉算子宜采用 SBX)。

因此,非常有必要改进前期的交叉算子,以利用较高的优先级节点(即 rank 值比较低的节点)。而后期采用 SBX,提高 Pareto 最优解集的多样性(即使结果更均匀分布在最优 Pareto Front Line 上)。这样前期提高收敛速度,后期提高解的多样性,就从整体上提高了算法的性能。

4.3.3 改进 Deb 的 NSGA- II 算法的研究

基于 NSGA- II 算法在前期未能充分利用精英解参与交叉和变异操作,致使获取精英解的收敛速度降低,并且存在人为主观因子,以及 NDS 排序未能充分考虑周围的点的信息,降低了前期和中期结果的多样性。基于此,结合单目标优化算法,排序时考虑前一级 Pareto 排序值节点的在该个体周围的拥挤(密度)信息,提出了 NSGA- II 的改进算法 INSGA 算法。

1. 累积排序适应度赋值策略

NSGA-II 的 NDS 排序赋值方法有一个很大的缺点:个体的 Pareto 排序值有时不能很好地反映个体周围的密度信息,如图 4-5 所示。尽管个体 1 周围种群的密度大于个体 2 周围的种群密度,但它们的 Pareto 排序值都为 2。尽管 NSGA- II 算法中有密度信息估计的部分,但所采用的密度信息的估计仅限于同一级非支配个体集中,对于图 4-5 中的个体 1 和 2 仍然具有同样的机会繁殖后代,这是不希望看到

的。因为我们希望个体 2 周围的繁殖后代的能力强于个体 1 周围的繁殖后代的能力。针对这个缺陷,提出了累积排序适应度赋值策略。

累积排序适应度赋值策略同时还考虑了个体的 Pareto 排序值和密度信息。首先,类似于 NSGA-II 对所有的个体进行 Pareto 排序,得到每一个个体的 Pareto 排序值。设在第 t 代种群中支配个体 y 的个体集为 y_1, y_2, L, y_n , 则个体 y 的累积排序值定义为支配个体 y 的所有个体的 Pareto 排序值的和, 即

$$y_{\text{rank}}(t) = 1 + \sum_{i=1}^n y_{i_{\text{rank}}}(t) \quad (4-17)$$

因此, 个体 1 的 rank 值为 5, 个体 2 的 rank 值为 3, 而不是 NDS 排序中因它们都处于第二级 Pareto Front Line 上而赋值均为 2。

在种群 P 上应用累积排序适应度赋值策略的过程如下:

首先, 找到群体中所有 $n_i = 0$ 的个体, 将其存入第一级非支配个体集 F_1 , 这些个体的 Pareto 排序值和累积排序值都为 1。然后, 对于 $F_i (i \geq 1)$ 中的每个个体 p , 考察它所支配的个体集 S_p , 将 S_p 中的每个个体 q 的支配 q 的个体数量 n_q 减 1, 并计算个体 q 的累积排序值 q_{rank} 。如果支配 q 的个体数量 $n_q = 0$, 则将 q 存入下一级非支配集 F_{i+1} 。直到所有的个体排序完毕, 算法中止。

2. 交叉算子

在原始 NSGA-II 算法中, 实数编码的选择和交叉操作是分开的。为了从单目标交叉算子过渡到多目标中, 将选择和交叉操作合并, 具体的交叉算子描述如下:

第一步: 初始化对角阵 $\Gamma = \text{diag}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)$, $\gamma_i \in (-1, 1)$ 的随机数, 且 $\gamma_i \neq 0, i = 1, 2, \dots, n$ 。

第二步: 从父代中随机选择两个个体 $x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i)^T$, $x^j = (x_1^j, x_2^j, \dots, x_n^j)^T$ 。

第三步: 产生一个随机数 rnd , 若 $\text{rnd} \leq p_c$ (即不大于杂叉概率 p_c) 则进行以下杂交操作, 产生后代个体 $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$:

$$y = \begin{cases} x^i + \Gamma(x^i - x^j), & i_{\text{rank}} \leq j_{\text{rank}} \\ x^j + \Gamma(x^j - x^i), & i_{\text{rank}} > j_{\text{rank}} \end{cases} \quad (4-18)$$

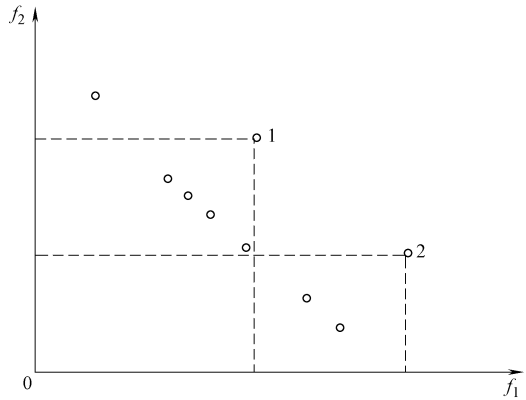


图 4-5 个体周围种群密度影响的示意图

式中, i_{rank} 表示 i 的 Pareto 累积排序值。

若 $rnd > p_c$, 则从个体 i, j 中选择 Pareto 累积排序值较小的作为后代, 即

$$y = \begin{cases} x^i, i_{\text{rank}} \leq j_{\text{rank}} \\ x^j, i_{\text{rank}} > j_{\text{rank}} \end{cases} \quad (4-19)$$

式中, i_{rank} 表示 i 的 Pareto 累积排序值。

重复第二步、第三步, 产生和父代种群规模大小一样的子代种群, 并利用该种群进行变异操作。

上面这个选择和交叉操作结合的算子本身一方面以概率大小为 $1 - p_c$ 的概率保存了父代中的两两比较较优的个体 (不参与交叉); 另一方面, 在两两比较较优的个体附近搜索, 提高了算法的收敛性, 并且搜索范围也较 SBX 大, 有助于提高结果的多样性, 性能在理论上也较 SBX 好。从计算时间花费来说, 因为选择算子和交叉算子结合在一起, 减少了一半的数据存储时间。同时, 也排除了主观交叉因子 η_c 的影响, 使算法更符合进化规律。

3. 变异算子

在上面分析 NSGA-II 的变异算子时, 了解到 NSGA-II 变异算子未充分利用精英解, 也就未能充分地在精英解附近进行局部搜索。为了进一步改进算法的收敛性, 结合单目标优化较好的变异算子, 下面给出改进的变异算子。

第一步, 生成 n 维标准正态分布的随机矢量 $|c| = (|c_1|, |c_2|, \dots, |c_n|)^T$, 即 $c \sim (N(0, 1), N(0, 1), \dots, N(0, 1))^T$; 生成均值为 $0 = (0, 0, \dots, 0)^T$, 方差为 $\sigma^2 = (\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2)$ 的 n 维正态分布 $\Delta\nu$, 即

$$\Delta\nu \sim (N(0, \sigma_1^2), N(0, \sigma_2^2), \dots, N(0, \sigma_n^2))^T \quad (4-20)$$

$$\sigma_i^2 = \text{rand}() \times ((U_k - L_k)/4) \quad (4-21)$$

第二步, 从父代精英解中随机选出一个, 令其为 $best = (best_1, best_2, \dots, best_n)^T$

第三步, 对满足 $\|best - y\| \geq \varepsilon_1$ ($\varepsilon_1 = 10^{-4}$) 的每个 $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$, $\|\bullet\|$ 表示所有分量绝对值之和, 即

$$\|best - y\| = \sum_{k=1}^n |best_k - y_k| \quad (4-22)$$

生成随机数 $r \in (0, 1)$, 若 $r < p_m$ (p_m 表示变异概率), 则由下式产生变异后代 $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T$, 即

$$z = best + V |c| \quad (4-23)$$

式中, V 是对角矩阵, 即 $V = \text{diag}(best_1 - y_1, best_2 - y_2, \dots, best_n - y_n)$; 对不满足 $\|best - y\| \geq \varepsilon_1$ 的每个 $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$, 生成一个随机数 $r \in (0, 1)$ 。若 $r <$

p_m , 则由高斯变异, 产生后代 $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T$:

$$z = best + \Delta v \quad (4-24)$$

若 $r \geq p_m$, 则 $z = y$ 。

重复第三步, 直到对经过交叉算子得到的子代种群的所有个体操作完成才得到父代种群 P_t 的子代种群 Q_t , 进而得到规模为 $2N$ 的合并种群 $R_t = P_t \cup Q_t$, 进而通过拥挤排序选择出下一代种群 P_{t+1} 。

与 NSGA-II 的变异算子相比, 由于使用了父代中的精英点, 提高了精英点附近点的搜索效率, 而且由于精英点在每一代的选择上是通过随机选择获取的, 所以在整个 G 代的运算来看, 又提高了最终结果的多样性。与此同时, 排除了主观变异因子 η_m 的影响, 使之更符合进化规律。

4.3.4 模糊多属性决策方法的研究

对上述电力系统多目标模型如果直接求解只能得到相应 Pareto 最优解集, 但从解集中如何挑选出满意解则相对比较困难, 因此本节采用两类多属性决策方法对目标解集进行挑选。一类为有偏好情况下的多属性决策方法, 另一类为权重信息不完全的区间数多属性决策方法。这两种方法分别对应两种不同情况下的决策, 体现了决策的智能性。

1. 对方案有偏好的区间多属性灰色关联决策方法的研究

假设某区间数多属性决策问题, 有 m 项可行方案 A_1, A_2, \dots, A_m , n 项属性 G_1, G_2, \dots, G_n , 评价属性 G_j 的权重 w_j 不能完全确定, 但是知道 $w_j = [w_j^L, w_j^R]$, $\sum_{j=1}^n w_j^L \leq 1, \sum_{j=1}^n w_j^R \geq 1, 0 \leq w_j^L \leq w_j^R \leq 1, j = 1, 2, \dots, n$ 。用 W 表示属性权重信息的集合。方案 A_i 在评价属性 G_j 下的属性值为区间数 $[a_{ij}^L, a_{ij}^R]$, 区间决策矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} [a_{11}^L, a_{11}^R] & [a_{12}^L, a_{12}^R] & \cdots & [a_{1n}^L, a_{1n}^R] \\ [a_{21}^L, a_{21}^R] & [a_{22}^L, a_{22}^R] & \cdots & [a_{2n}^L, a_{2n}^R] \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ [a_{m1}^L, a_{m1}^R] & [a_{m2}^L, a_{m2}^R] & \cdots & [a_{mn}^L, a_{mn}^R] \end{bmatrix} \quad (4-25)$$

假设决策者对方案 A_i 有一定的主观偏好, 主观偏好是以区间数形式给出, 即 $\theta_i = [\theta_i^L, \theta_i^R]$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

依据灰色关联分析法的基本思想, 给出解决对方案有偏好的区间数多属性决策问题的灰色关联方法。其具体计算步骤为

1) 将决策矩阵进行规范化处理。

对于效益型属性有

$$\begin{cases} b_{ij}^L = a_{ij}^L / \sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij}^R)^2} \\ b_{ij}^R = a_{ij}^R / \sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij}^L)^2} \end{cases} \quad (4-26)$$

对于成本型属性有

$$\begin{cases} b_{ij}^L = (1/a_{ij}^R) / \sqrt{\sum_{i=1}^m (1/a_{ij}^L)^2} \\ b_{ij}^R = (1/a_{ij}^L) / \sqrt{\sum_{i=1}^m (1/a_{ij}^R)^2} \end{cases} \quad (4-27)$$

式中, $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。

规范化后的决策矩阵为

$$B = ([b_{ij}^L, b_{ij}^R])_{m \times n} \quad (4-28)$$

式中, 属性值 $[b_{ij}^L, b_{ij}^R]$ 可以看成决策者对方案 A_i 关于属性 G_j 的客观偏好值。

2) 计算各方案的客观偏好对主观偏好的灰色关联系数。

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |\Delta_{ij}| + \rho \max_i \max_j |\Delta_{ij}|}{|\Delta_{ij}| + \rho \max_i \max_j |\Delta_{ij}|} \quad (4-29)$$

式中, 区间数间距离计算公式 $\Delta_{ij} = \sqrt{(b_{ij}^L - \theta_i^L)^2 + (b_{ij}^R - \theta_i^R)^2}$, $i=1, 2, \dots, m$, $j=1, 2, \dots, n$; ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 一般取 $\rho=0.5$ 。这里的灰色关联系数 ξ_{ij} 反映了在方案 A_i 下决策者对属性 G_j 的客观偏好与主观偏好的相似度, ξ_{ij} 的值越大, 说明在方案 A_i 下属性 G_j 的客观偏好与方案 A_i 的主观偏好越相似。

3) 计算各方案的客观偏好对主观偏好的关联度。

$$\xi_i = \sum_{j=1}^n \xi_{ij} w_j \quad (4-30)$$

式中, $i=1, 2, \dots, m$ 。

这里的关联度 ξ_i 反映了方案 A_i 对所有属性的客观偏好与主观偏好之间的总相似度。如果总相似度越大, 说明决策者对方案的客观偏好与主观偏好越接近, 从而该方案就越优, 反之, 则该方案就越差。

由于客观事物的复杂性及人类思维的模糊性, 人们往往难以给出明确的属性权重。有时会出现属性权重信息不完全的情况。在这种情况下, 需要事先确定属性的权重。

由于种种条件的限制, 决策者的客观偏好与主观偏好之间往往存在一定的相似性。为了使决策具有合理性, 属性权重 w_j 的选择应使决策者的客观偏好与主观偏

好的总相似度最大。因此为了得到 ξ_i ，需要事先确定属性权重 w_j 。为此，可建立多目标最优化模型，即

$$\begin{cases} \max \xi_i = \sum_{j=1}^n \xi_{ij} w_j \\ \text{s. t. } w_j \in W, \sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0 \end{cases} \quad (4-31)$$

式中， $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。

同时，各个方案是公平竞争的，不存在任何偏好关系，因此可建立如下单目标最优化模型：

$$\begin{cases} \max D = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \xi_{ij} w_j \\ \text{s. t. } w_j \in W, \sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0 \end{cases} \quad (4-32)$$

求解此模型，从而得到权重矢量 w ，进而计算出各方案的客观偏好对主观偏好的关联度 ξ_i 。

4) 按 ξ_i 的值对方案进行排序， ξ_i 的值越大，对应的方案越优。

2. 对权重信息不完全的区间数多属性决策 GRA 方法的研究

假设某区间数多属性决策问题，有 m 项可行方案 A_1, A_2, \dots, A_m ， n 项属性 G_1, G_2, \dots, G_n ， $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T \in W$ 表示评价属性的权重向量，其中 w_j 表示评价属性 G_j 的权重，满足 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 和 $w_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n$ 。 W 表示属性权重信息不完全的数学表达式的集合，一般分为 6 类情形：① $w_i \geq w_j$ ；② $w_i - w_j \geq \alpha_i$ ；③ $w_i \geq \beta_i w_j$ ；④ $\gamma_i \leq w_i \leq \gamma_i + \varepsilon_i$ ；⑤ $\theta_i w_j \leq (\theta_i + \varepsilon_i) w_j$ 或 $\theta_i \leq \frac{w_i}{w_j} \leq (\theta_i + \varepsilon_i), w_j \neq 0$ ；⑥ $w_i - w_j \geq w_k - w_l, j \neq k \neq l$ 。其中， $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \theta_i$ 和 ε_i 均为非负常数。

方案 A_i 在评价属性 G_j 下的属性值为区间数 $[a_{ij}^L, a_{ij}^R]$ ，区间决策矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} [a_{11}^L, a_{11}^R] & [a_{12}^L, a_{12}^R] & \cdots & [a_{1n}^L, a_{1n}^R] \\ [a_{21}^L, a_{21}^R] & [a_{22}^L, a_{22}^R] & \cdots & [a_{2n}^L, a_{2n}^R] \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ [a_{m1}^L, a_{m1}^R] & [a_{m2}^L, a_{m2}^R] & \cdots & [a_{mn}^L, a_{mn}^R] \end{bmatrix} \quad (4-33)$$

假设决策者对方案 A_i 有一定的主观偏好，主观偏好是以区间数形式给出，即 $\theta_i = [\theta_i^L, \theta_i^R], i=1, 2, \dots, m$ 。

依据传统灰色关联分析法的基本思想，给出解决属性权重信息不完全的区间数

多属性决策问题的计算步骤如下:

1) 对决策矩阵进行规范化处理 (同上)。

规范化后的决策矩阵记为

$$B = ([b_{ij}^L, b_{ij}^R])_{m \times n} \quad (4-34)$$

2) 确定正理想解和负理想解。

正理想解为

$$y = [y_j^L, y_j^R] = [\max_i b_{ij}^L, \max_i b_{ij}^R] \quad (4-35)$$

负理想解为

$$z = [z_j^L, z_j^R] = [\min_i b_{ij}^L, \min_i b_{ij}^R] \quad (4-36)$$

3) 计算各方案的区间数灰色关联系数。

各可行方案对正理想解的灰色关联系数为

$$V_{ij} = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} | [y_j^L, y_j^R] - [b_{ij}^L, b_{ij}^R] | + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} | [y_j^L, y_j^R] - [b_{ij}^L, b_{ij}^R] |}{| [y_j^L, y_j^R] - [b_{ij}^L, b_{ij}^R] | + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} | [y_j^L, y_j^R] - [b_{ij}^L, b_{ij}^R] |} \quad (4-37)$$

各可行方案对负理想解的灰色关联系数为

$$W_{ij} = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} | [b_{ij}^L, b_{ij}^R] - [z_j^L, z_j^R] | + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} | [b_{ij}^L, b_{ij}^R] - [z_j^L, z_j^R] |}{| [b_{ij}^L, b_{ij}^R] - [z_j^L, z_j^R] | + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} | [b_{ij}^L, b_{ij}^R] - [z_j^L, z_j^R] |} \quad (4-38)$$

其中, 区间数间距离计算公式为

$$| [y_j^L, y_j^R] - [b_{ij}^L, b_{ij}^R] | = \sqrt{(b_{ij}^L - y_j^L)^2 + (b_{ij}^R - y_j^R)^2} \quad (4-39)$$

$$| [b_{ij}^L, b_{ij}^R] - [z_j^L, z_j^R] | = \sqrt{(b_{ij}^L - z_j^L)^2 + (b_{ij}^R - z_j^R)^2} \quad (4-40)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$; ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 一般取 $\rho = 0.5$ 。

4) 计算各可行方案对正负理想解的关联度。

$$V_i = \sum_{j=1}^n V_{ij} w_j \quad (4-41)$$

$$W_i = \sum_{j=1}^n W_{ij} w_j \quad (4-42)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

为了得到 V_i 和 W_i , 需要事先确定属性权重 w_j , 为此, 可建立如下多目标优化模型:

$$\begin{cases} \max V_i = \sum_{j=1}^n V_{ij} w_j, i = 1, 2, \dots, m \\ \max W_i = \sum_{j=1}^n W_{ij} w_j, i = 1, 2, \dots, m \\ \text{s. t. } w_j \in W, \sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4-43)$$

同时, 各个方案是公平竞争的, 不存在任何偏好关系, 可将上面的多目标优化模型转化为如下单目标最优化模型:

$$\begin{cases} \max D = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (W_{ij} - V_{ij}) w_j \\ \text{s. t. } w_j \in W, \sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4-44)$$

求解此模型, 从而得到权重矢量 w 。

5) 计算各方案对正理想解的相对关联度。

$$C_i = V_i / (V_i + W_i) \quad (4-45)$$

按 C_i 由大到小的顺序排序, 相应地, 排在前面的方案最优。

4.4 不同算法间的协调控制应用于智能 AVC 协调控制算法

4.4.1 无功优化和变压器经济运行在线协调控制的研究

1. 变压器经济运行方式的研究

变压器经济运行方式为并列运行, 主要是指各变电站中有两台以上变压器并列运行, 在相同负荷条件下, 优选功率损耗小的运行方式。按此原则, 在多种变压器运行方式中, 按负载从小到大的次序选出变压器经济运行方式的经济运行区间。

在相同负荷条件下, 变压器并列运行的功率损耗不仅与运行方式的组合技术参数有关, 而且与变压器间的负荷分配有关。所以在分析变压器经济运行方式时, 一定要考虑变压器短路阻抗不等以及容量不同等因素的影响。

如各站变压器总台数为 N , 则存在着 $(2^N - 1)$ 种组合运行方式。变压器并列运行经济运行方式的判定, 是从单台变压器技术特性优劣判定开始。由于前面内容已经分析计算了单台变压器技术特性优劣, 所以下面的内容主要分析各种并列运行的临界负荷功率。

(1) 变压器并列运行的条件

变压器并列运行的最理想情况是

- 1) 空载运行时, 并列的变压器间没有环流;
- 2) 带负载运行时, 各变压器能够按其容量的大小成比例的分配负荷;
- 3) 各变压器的负荷电流同相位。

为了达到以上理想的并列运行要求, 并列运行的各变压器必须满足下列四个条件:

1) 绕组联结组标号必须相同。

2) 电压比应相等。有关规程规定: 并列运行的变压器间电压比的差值 $\Delta K = \frac{K_I - K_{II}}{\sqrt{K_I K_{II}}} \times 100\%$ 应小于 0.5%。

3) 短路电压应接近。并列运行变压器短路电压相接近的具体条件是: 变压器间短路电压的差值 $\Delta U_K\%$ 应满足:

$$\Delta U_K\% = \frac{U_{KM}\% - U_{KX}\%}{U_{KP}\%} \times 100\% \leq 5\% \quad (4-46)$$

式中, $U_{KM}\%$ 为变压器最大短路电压的百分数; $U_{KX}\%$ 为变压器最小短路电压的百分数; $U_{KP}\%$ 为并列运行方式中全部变压器短路电压百分数的算术平均值。

4) 容量不能相差太大。变压器运行规程规定: 并列运行的变压器, 其容量比不能大于 3:1。提出此要求的原因是容量不同的变压器并列运行时, 由于容量不同, 其短路电压的有效分量和无效分量也不同, 即前面说的短路阻抗不同。

(2) 容量相同的变压器并列运行经济运行方式的确定

对容量相同、短路电压接近的变压器并列运行的经济运行方式可从三个方面分析判定: 相同台数并列运行的判定; 不同台数并列运行的判定; 相同台数与不同台数并列运行的判定。

1) 相同台数并列运行的经济运行方式的判定。

当变压器总台数为 M , 并列运行变压器台数为 N 时, 则 N 台变压器组合运行方式有 C_M^N 种。对于这 C_M^N 种组合方式, 应依据组合后的损耗情况进行判定, 从而确定经济运行方式。

设有 N 台容量相同的变压器并列以 I、II 两种方式运行, 则其综合功率损耗 $\Delta P_{ZN I}$ 、 $\Delta P_{ZN II}$ 计算式为

$$\Delta P_{ZN I} = P_{0ZN I} + \left(\frac{S}{NS_N} \right)^2 P_{KZN I} \quad (4-47)$$

$$\Delta P_{ZN II} = P_{0ZN II} + \left(\frac{S}{NS_N} \right)^2 P_{KZN II} \quad (4-48)$$

令 $\Delta P_{ZN I} = \Delta P_{ZN II}$, 对式 (4-47) 和式 (4-48) 联立求解, 可得出综合功率

临界负载功率 $S_{LZ}^{N \sim N}$ ，即

$$S_{LZ}^{N \sim N} = NS_N \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_{0Zi \text{ I}} - \sum_{i=1}^n P_{0Zi \text{ II}}}{\sum_{i=1}^n P_{KZi \text{ II}} - \sum_{i=1}^n P_{KZi \text{ I}}}} \quad (4-49)$$

式 (4-49) 用以判断 N 台变压器并列运行 I、II 两种运行方式间技术特性的优劣。同理可以推出按有功功率损耗的临界负荷功率 $S_{LP}^{N \sim N}$ 和按无功功率需求的临界负荷功率 $S_{LQ}^{N \sim N}$ 。

2) 不同台数并列运行的经济运行方式的判定。

① 单台与两台并列运行之间技术特性优劣的判定。设变电站有两台变压器 A 和 B，则当变压器 A 单独运行和变压器 A、B 并列运行（在一定条件下投入变压器 B 时），其综合功率损耗 ΔP_{ZA} 和 ΔP_{ZAB} 为

$$\Delta P_{ZA} = P_{0ZA} + \left(\frac{S}{S_N}\right)^2 P_{KZA} \quad (4-50)$$

$$\Delta P_{ZAB} = P_{0ZAB} + \left(\frac{S}{2S_N}\right)^2 P_{KZAB} \quad (4-51)$$

式中， $P_{0ZAB} = P_{0ZA} + P_{0ZB}$ ； $P_{KZAB} = P_{KZA} + P_{KZB}$ 。

令 $\Delta P_{ZA} = \Delta P_{ZAB}$ ，对式 (4-50) 和式 (4-51) 联立求解，可得出综合功率临界负荷功率 $S_{LZ}^{A \sim AB}$ 为

$$S_{LZ}^{A \sim AB} = 2S_N \sqrt{\frac{P_{0ZB}}{3P_{KZA} - P_{KZB}}} \quad (4-52)$$

将式 (4-50) 和式 (4-51) 的特性曲线分别绘制到图 4-6 上，式 (4-52) 的解 $S_{LZ}^{A \sim AB}$ 即为两条曲线的交点。由图 4-6 可看出存在着两种情况：

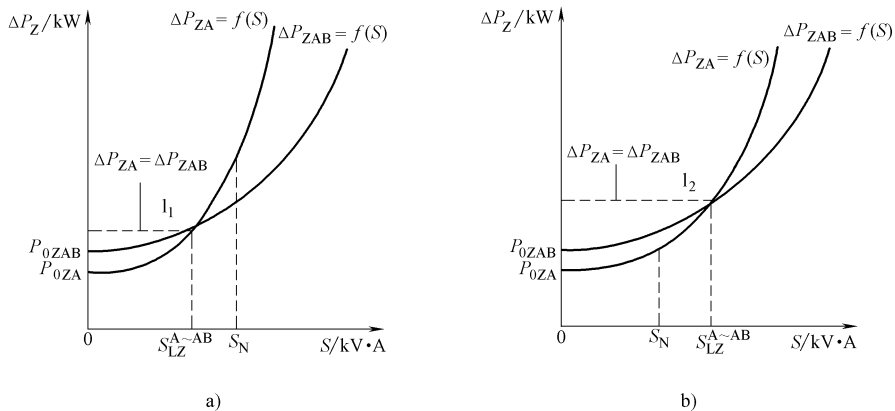


图 4-6 单台与两台并列运行间变压器临界负荷功率

a) 当 $P_{0ZB} < \frac{3P_{KZA} - P_{KZB}}{4}$, 即 $S_{LZ}^{A \sim AB} < S_N$ 时, 如图 4-6a 所示, 两曲线的交点 l_1 位于 S_N 的左侧。当 $S < S_{LZ}^{A \sim AB}$ 时, 单台变压器 A 运行为经济运行方式, 当 $S > S_{LZ}^{A \sim AB}$ 时, 两台变压器并列运行为经济运行方式。

b) 当 $P_{0ZB} > \frac{3P_{KZA} - P_{KZB}}{4}$, 即 $S_{LZ}^{A \sim AB} > S_N$ 时, 如图 4-6b 所示, 两曲线的交点 l_2 位于 S_N 的右侧、在变压器满负荷前一直是变压器 A 运行经济, 当变压器 A 满负荷后才投入变压器 B 并列运行。

同理可以推导出按有功功率损耗最小的临界负荷功率 $S_{LP}^{A \sim AB}$ 和按无功功率需求最小的临界负荷功率 $S_{LQ}^{A \sim AB}$ 。

② N 台变压器并列运行与 $N+1$ 台变压器并列运行之间技术特性优劣的判定。 N 台变压器并列运行与 $N+1$ 台变压器并列运行的综合功率损耗 ΔP_{ZN} 与 $\Delta P_{Z(N+1)}$ 为

$$\Delta P_{ZN} = \sum_{i=1}^n P_{0Zi} + \left(\frac{S}{NS_N} \right)^2 \sum_{i=1}^n P_{KZi} \quad (4-53)$$

$$\Delta P_{Z(N+1)} = \sum_{i=1}^{n+1} P_{0Zi} + \left(\frac{S}{(N+1)S_N} \right)^2 \sum_{i=1}^{n+1} P_{KZi} \quad (4-54)$$

令 $\Delta P_{ZN} = \Delta P_{Z(N+1)}$, 对式 (4-53) 和式 (4-54) 联立求解, 可得出综合功率临界负荷功率 $S_{LZ}^{N \sim N+1}$:

$$S_{LZ}^{N \sim N+1} = S_N \sqrt{\frac{P_{0Z(n+1)}}{\frac{\sum_{i=1}^n P_{KZi}}{N^2} - \frac{\sum_{i=1}^{n+1} P_{KZi}}{(N+1)^2}}} \quad (4-55)$$

同理可以导出按有功功率损耗最小的临界负荷功率 $S_{LP}^{N \sim N+1}$ 和按无功功率消耗最小的临界负荷功率 $S_{LQ}^{N \sim N+1}$ 。

(3) 容量不同的变压器并列运行经济运行方式的确定

当变压器容量不同, 短路电压接近且多台并列运行时, 其负荷额分配是按容量比成比例进行的。

1) 相同台数并列运行的经济运行方式的判定。

设有 N 台容量不同的变压器并列 I、II 两种方式运行, 则其综合功率损耗 ΔP_{ZNI} 、 ΔP_{ZNI} 计算式为

$$\Delta P_{ZNI} = P_{0ZNI} + \left(\frac{S}{\sum_{i=1}^n S_{NiI}} \right)^2 P_{KZNI} \quad (4-56)$$

$$\Delta P_{ZN II} = P_{OZN II} + \left(\frac{S}{\sum_{i=1}^n S_{Ni II}} \right)^2 P_{KZN II} \quad (4-57)$$

令 $\Delta P_{ZN I} = \Delta P_{ZN II}$ ，对式 (4-56) 和式 (4-57) 联立求解，可得出综合功率临界负荷功率 $S_{LZ}^{N \sim N}$ ：

$$S_{LZ}^{N \sim N} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_{OZi I} - \sum_{i=1}^n P_{OZi II}}{\frac{\sum_{i=1}^n P_{KZi II}}{(\sum_{i=1}^n S_{Ni II})^2} - \frac{\sum_{i=1}^n P_{KZi I}}{(\sum_{i=1}^n S_{Ni I})^2}}} \quad (4-58)$$

2) 不同台数并列运行的经济运行方式的判定。

① 单台与两台并列运行之间技术特性优劣的判定。设变电站有两台变压器 A 和 B，则当变压器 A 单独运行和变压器 AB 并列运行，其综合功率损耗 ΔP_{ZA} 和 ΔP_{ZAB} 的计算式分别为

$$\Delta P_{ZA} = P_{OZA} + \left(\frac{S}{S_{NA}} \right)^2 P_{KZA} \quad (4-59)$$

$$\Delta P_{ZAB} = P_{OZAB} + \left(\frac{S}{S_{NA} + S_{NB}} \right)^2 P_{KZAB} \quad (4-60)$$

式中， $P_{OZAB} = P_{OZA} + P_{OZB}$ ； $P_{KZAB} = P_{KZA} + P_{KZB}$ 。

令 $\Delta P_{ZA} = \Delta P_{ZAB}$ ，对式 (4-59) 和式 (4-60) 联立求解，可得出综合功率临界负荷功率 $S_{LZ}^{A \sim AB}$ ：

$$S_{LZ}^{A \sim AB} = \sqrt{\frac{P_{OZB}}{\frac{P_{KZA}}{S_{NA}^2} - \frac{P_{KZA} + P_{KZB}}{(S_{NA} + S_{NB})^2}}} \quad (4-61)$$

将式 (4-59) 和式 (4-60) 的特性曲线分别绘制到图 4-7 上，式 (4-61) 的解 $S_{LZ}^{A \sim AB}$ 即为两条曲线的交点。由图 4-7 可看出存在着两种情况：

a) 当 $P_{OZB} < \frac{3P_{KZA} - P_{KZB}}{4}$ ，即 $S_{LZ}^{A \sim AB} < S_N$ 时，如图 4-7a 所示，两曲线的交点 l_1 位于 S_N 的左侧。当 $S < S_{LZ}^{A \sim AB}$ 时，单台变压器 A 运行为经济运行方式，当 $S > S_{LZ}^{A \sim AB}$ 时，两台变压器并列运行为经济运行方式。

b) 当 $P_{OZB} > \frac{3P_{KZA} - P_{KZB}}{4}$ ，即 $S_{LZ}^{A \sim AB} > S_N$ 时，如图 4-7b 所示，两曲线的交点

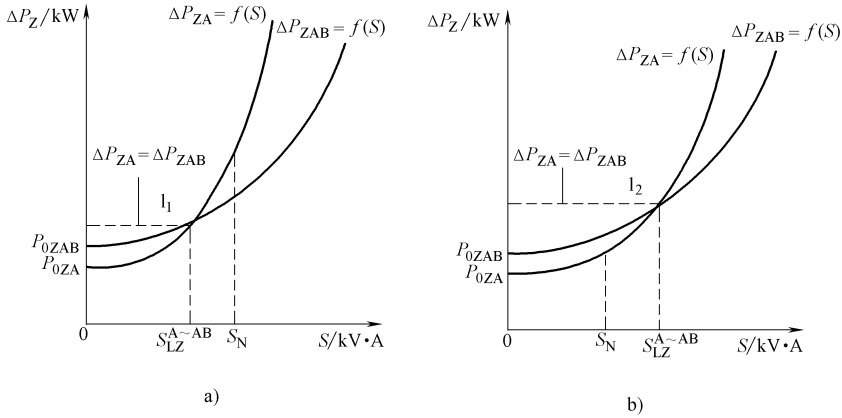


图 4-7 单台与两台并列运行间变压器临界负荷功率

l_2 位于 S_N 的右侧。在变压器满负荷前一直是变压器 A 运行经济，当变压器 A 满负荷后才投入变压器 B 并列运行。

同理可以推导出按有功功率损耗最小的临界负荷功率 $S_{LP}^{A \sim AB}$ 和按无功功率需求最小的临界负荷功率 $S_{LQ}^{A \sim AB}$ 。

② N 台与 $N+1$ 台并列运行之间技术特性优劣的判定。 N 台与 $N+1$ 台变压器并列运行的综合功率损耗 ΔP_{ZN} 与 $\Delta P_{Z(N+1)}$ 的计算式分别为

$$\Delta P_{ZN} = \sum_{i=1}^n P_{0Zi} + \left(\frac{S}{\sum_{i=1}^n S_{Ni}} \right)^2 \sum_{i=1}^n P_{KZi} \quad (4-62)$$

$$\Delta P_{Z(N+1)} = \sum_{i=1}^{n+1} P_{0Zi} + \left(\frac{S}{\sum_{i=1}^{n+1} S_{Ni}} \right)^2 \sum_{i=1}^{n+1} P_{KZi} \quad (4-63)$$

令 $\Delta P_{ZN} = \Delta P_{Z(N+1)}$ ，对式 (4-62) 和式 (4-63) 联立求解，可得出综合功率临界负荷功率 $S_{LZ}^{N \sim N+1}$ 为

$$S_{LZ}^{N \sim N+1} = \sqrt{\frac{P_{0Z(n+1)}}{\frac{\sum_{i=1}^n P_{KZi}}{(\sum_{i=1}^n S_{Ni})^2} - \frac{\sum_{i=1}^{n+1} P_{KZi}}{(\sum_{i=1}^{n+1} S_{Ni})^2}}} \quad (4-64)$$

同理，可以导出按有功功率和无功功率的临界负荷功率 $S_{LP}^{N \sim N+1}$ 、 $S_{LQ}^{N \sim N+1}$ 。

$$S_{LP}^{N \sim N+1} = \sqrt{\frac{P_{0(n+1)}}{\frac{\sum_{i=1}^n P_{Ki}}{(\sum_{i=1}^n S_{Ni})^2} - \frac{\sum_{i=1}^{n+1} P_{Ki}}{(\sum_{i=1}^{n+1} S_{Ni})^2}}} \quad (4-65)$$

$$S_{LQ}^{N \sim N+1} = \sqrt{\frac{Q_{0(n+1)}}{\frac{\sum_{i=1}^n Q_{KZi}}{(\sum_{i=1}^n S_{Ni})^2} - \frac{\sum_{i=1}^{n+1} Q_{KZi}}{(\sum_{i=1}^{n+1} S_{Ni})^2}}} \quad (4-66)$$

(4) 变压器分列运行的经济运行方式

变压器分列运行是指在变电站内分列运行的变压器,或相距较近分列运行的变压器(中间有联络线)。如图 4-8 所示,两台分列运行变压器有三种运行方式:变压器 A 单台运行、变压器 B 单台运行,变压器 A 和 B 分列运行。在供相同负荷条件下,优选损耗小的运行方式,称为变压器的分列运行经济运行方式。

由分段开关共用的运行方式是指两台变压器在同一变电站内,分别向不同段母线供电,当一台停运,另一台可通过母线分段开关(联络开关)向停运变压器所带母线段供电,从而实现共用运行方式。因连接母线很短,故可忽略其电阻和电抗。

基于分列运行变压器采用共用变压器综合功率经济运行方式的临界负荷功率 S_{gL} (kV · A) 的计算式,即

$$S_{gL} = \frac{S_{Ng}^2 P_{0Zb} + S_b^2 \left[\left(\frac{S_{Ng}}{S_{Nb}} \right)^2 P_{KZb} - P_{KZg} \right]}{2S_b P_{KZg}} \quad (4-67)$$

式中, S_{gL} 为两台变压器分别和共用的临界负荷功率 (kV · A); S_b 为被切除变压器的负荷功率 (kV · A); S_{Ng} 为共用变压器额定容量 (kV · A); S_{Nb} 为被切除变压器额定容量 (kV · A); P_{0Zb} 为被切除变压器综合功率空负荷损耗, kW; P_{KZb} 为被切除变压器综合功率额定负荷功率 (kW); P_{KZg} 为共用变压器综合功率额定负荷功率 (kW)。

对于负荷波动较大的分列供电的变压器 A 和 B, 在一定的负荷条件下 ($S \leq$

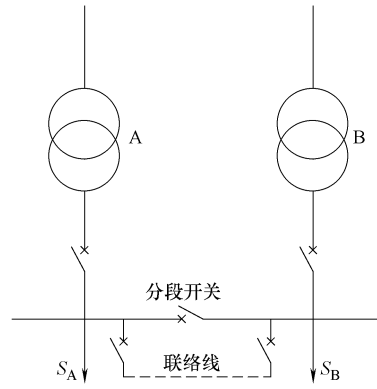


图 4-8 双绕组变压器分列运行示意图

S_{Ng}), 要采用共用运行方式时, 应先比较共用变压器 A 和 B 的技术特性优劣, 然后将判定出的技术特性优的变压器共用和分列运行经济性比较, 确定应该为共用还是分列, 从而选择出最优的运行方式, 以达到降低变压器损耗的目的。

2. 变压器经济负载系数和经济运行区

变压器在运行中, 其自身的有功功率损耗和无功功率需求都是随着负荷的变化而非线性变化的, 其中始终存在一个损耗的最低点。有功损耗最低点的负荷系数称为有功经济负载系数; 无功需求最低点的负荷系数称为无功经济负载系数。

(1) 变压器经济负载系数

1) 有功经济负载系数。

由式 $\Delta P = P_0 + \beta^2 P_K$ 可以写出有功损耗率的计算式, 即

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P}{P_1} = \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} \times 100\% \quad (4-68)$$

式中, P_1 为变压器低压侧有功输入功率 (kW); $\cos \varphi_2$ 为负荷功率因数; β 为负荷率, $\beta = \frac{S}{S_N}$; S 为变压器的负荷视在功率; S_N 为变压器的额定容量 (kV · A)。

由式 (4-68) 可以绘制如图 4-9 的曲线 $\Delta P = f(\beta)$ 及 $\Delta P\% = f(\beta)$ 。由式 (4-68) 及图 4-9 可知, 变压器的有功损失率 $\Delta P\%$ 是变压器负荷系数 β 的二次函数,

$\Delta P\%$ 先随着 β 的增加而下降。当负荷系数 $\beta_{JP} = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}}$, 此时铜损等于铁损。然后

$\Delta P\%$ 又随着 β 的增大而上升。 β_{JP} 是最小损失率 $\Delta P_b\%$ 的负荷系数, 称为有功经济负载系数。

图 4-9 中有功经济负载系数条件下, 变压器有功损耗率最低 (即效率最高)。最小损失率 $\Delta P_b\%$ 计算式为

$$\Delta P_b\% = \frac{2P_0}{\beta_{JP} S_N \cos \varphi_2 + 2P_0} \times 100 \quad (4-69)$$

2) 无功经济负载系数

由式 $\Delta Q = Q_0 + \beta^2 Q_K$, 其中 $Q_0 = I_0\% S_N \times 10^{-2}$, $Q_K = U_K\% S_N \times 10^{-2}$ 可以写出变压器无功需求率的计算式, 即

$$\Delta Q\% = \frac{\Delta Q}{P_1} = \frac{Q_0 + \beta^2 Q_K}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} \times 100\% \quad (4-70)$$

变压器无功需求率的物理意义是衡量变压器在传输有功功率过程中, 变压器自

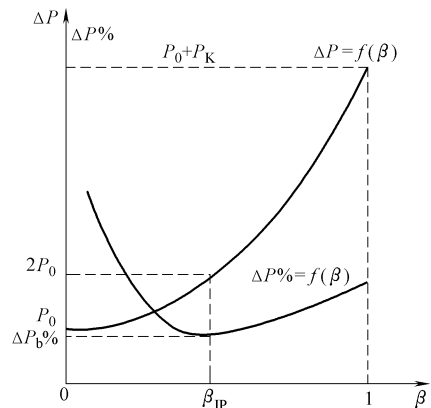


图 4-9 变压器有功功率损失和损失率的负荷特性曲线

身所需求的无功功率值的百分率。

对式 (4-70) 求极值, 令其一阶导数为零, 即 $\frac{d\Delta Q\%}{d\beta} = 0$, 得

$$B_{JQ} = \sqrt{\frac{Q_0}{Q_K}} = \sqrt{\frac{I_0\%}{U_K\%}} \quad (4-71)$$

在无功经济负荷系数条件下, 变压器无功需求率最低, 最低无功需求率 $\Delta Q_b\%$ 的计算式为

$$\Delta Q_b\% = \frac{2Q_0}{\beta_{JP} S_N \cos\varphi_2 + P_0 + \beta_{JP}^2 P_K} \times 100\% \quad (4-72)$$

3) 综合功率经济负荷系数。

综合功率损耗是指变压器有功损耗和其因需无功功率使电网增加的有功功率损耗之和。综合功率损耗的经济运行立足于使电力系统总体效益的提高, 它既考虑了用电单位的节电, 又考虑了供电网损的降低。

由式 $\Delta P_Z = P_{0Z} + \beta^2 P_{KZ} = (P_0 + k_Q Q_0) + \beta^2 (P_K + k_Q Q_K)$, 其中, k_Q 意义如前所述是: 变压器每减少 1kVar 无功功率时, 引起连接系统有功功率损耗下降的 kW 值。 k_Q 值的大小与研究变压器无功负荷、网络电阻以及电压等级有关, 通常取值在 0.01 ~ 0.08 之间。

可以写出变压器综合功率损耗率的计算式:

$$\Delta P_Z\% = \frac{\Delta P_Z}{P_1} = \frac{P_{0Z} + \beta^2 P_{KZ}}{\beta S_N \cos\varphi_2 + P_{0Z} + \beta^2 P_{KZ}} \times 100\% \quad (4-73)$$

对式 (4-73) 求极值, 令其一阶导数为零, 即 $\frac{d\Delta P_Z\%}{d\beta} = 0$ 得:

$$\beta_{JZ} = \sqrt{\frac{P_{0Z}}{P_{KZ}}} \quad (4-74)$$

综合功率经济负荷系数是指综合功率损耗率最低时, 变压器输出视在功率与额定容量之比。

变压器在综合功率经济负荷系数条件下运行时, 其综合功率损耗率最低。

最低综合功率损耗率 $\Delta P_{Zb}\%$ 为

$$\Delta P_{Zb}\% = \frac{\Delta P_Z}{P_1} = \frac{2P_{0Z}}{\beta_{JZ} S_N \cos\varphi_2 + P_{0Z} + \beta_{JZ}^2 P_{KZ}} \times 100\% \quad (4-75)$$

(2) 变压器运行区间划分

1) 变压器经济运行区。

变压器经济运行区确定的原则是: 变压器在额定负荷条件下的运行应属于经济运行区。因此, 经济运行区的上限值定为 $\beta_{L1} = 1$; 经济运行区的下限值所对应的损耗率应与额定负荷损耗率相等, 其值为 $\beta_{L2} = \beta_1^2$ 。在经济运行区间 (即 $\beta_{L2} \sim \beta_{L1}$)

范围内)运行时,变压器的损耗率要低于额定负荷损耗率,即变压器在经济运行区间的运行效率要高于额定负荷条件下的运行效率。

① 综合功率经济运行区。

变压器额定负荷 ($\beta_{L1} = 1$) 损耗率 $\Delta P_{ZN}\%$ 的计算式为

$$\Delta P_{ZN}\% = \frac{P_{0Z} + P_{KZ}}{S_N \cos \varphi_2 + P_{0Z} + P_{KZ}} \times 100\% \quad (4-76)$$

当变压器负荷系数为 β_{L2Z} 时,其损耗值 $\Delta P_{ZL2}\%$ 的计算式为

$$\Delta P_{ZL2}\% = \frac{P_{0Z} + \beta_{L2Z}^2 P_{KZ}}{\beta_{L2Z} S_N \cos \varphi_2 + P_{0Z} + \beta_{L2Z}^2 P_{KZ}} \times 100\% \quad (4-77)$$

令 $\Delta P_{ZN}\% = \Delta P_{ZL2}\%$, 对上述两式联立求解,可得到下列关系式:

$$\frac{P_{0Z} + P_{KZ}}{S_N \cos \varphi_2 + P_{0Z} + P_{KZ}} = \frac{P_{0Z} + \beta_{L2Z}^2 P_{KZ}}{\beta_{L2Z} S_N \cos \varphi_2 + P_{0Z} + \beta_{L2Z}^2 P_{KZ}} \quad (4-78)$$

式中, $S_N \cos \varphi_2 \gg P_{0Z} + P_{KZ}$, $\beta_{L2Z} S_N \cos \varphi_2 \gg P_{0Z} + \beta_{L2Z}^2 P_{KZ}$, 所以式 (4-78) 可简化为

$$\frac{P_{0Z} + P_{KZ}}{S_N \cos \varphi_2} = \frac{P_{0Z} + \beta_{L2Z}^2 P_{KZ}}{\beta_{L2Z} S_N \cos \varphi_2} \quad (4-79)$$

对式 (4-79) 求解,可得到变压器综合功率经济运行区的负荷系数的下限值 β_{L2Z} , 即

$$\beta_{L2Z} = \frac{P_{0Z}}{P_{KZ}} = \beta_{JZ}^2 \quad (4-80)$$

② 有功功率经济运行区。

与综合功率经济运行区相同,有功经济运行区上限值也应取为变压器额定负荷 $\beta_{L1} = 1$ 。同理可以导出变压器有功经济运行区下限值 β_{L2P} 的计算式为

$$\beta_{L2P} = \beta_{JP}^2 \quad (4-81)$$

无功经济运行区上限值亦取变压器额定负载 $\beta_{L1} = 1$ 。同理可以推导出变压器无功经济运行区下限值 β_{L2Q} 计算式为

$$\beta_{L2Q} = \beta_{JQ}^2 \quad (4-82)$$

2) 变压器最佳运行区。

变压器最佳运行区的负荷系数的上限值 $\beta_{J1} = 0.75$ 。

与上面推导经济运行区下限值的方法相同,可推导出与最佳运行区上限值等效损耗率的综合功率最佳运行区下限值 β_{J2Z} , 即

$$\beta_{J2Z} = 1.333 \beta_{JZ}^2 \quad (4-83)$$

3) 变压器运行区间的划分。

由上述变压器经济运行区和变压器最佳运行区的确定,我们将变压器的运行区间划分为最佳经济运行区、经济运行区、最劣运行区。并绘制成图 4-10 所示的运行区间划分图。

由图 4-10 可知,综合功率的运行区间范围是

① 最佳运行区 (优选段)

$$1.333\beta_{JZ}^2 \leq \beta \leq 0.75;$$

② 经济运行区 $\beta_{JZ}^2 \leq \beta \leq 1$;

③ 最劣运行区 (“大马拉小车”运行区) $0 < \beta < \beta_{JZ}^2$ 。

3. 变压器经济运行与无功优化的在线协调控制的研究

长期以来,对电力系统无功电压优化的研究一直是围绕固定的网络拓扑模型下的无功优化,提出了许多的算法和策略,但是考虑不同网络拓扑模型下的无功优化的研究却很少,特别是考虑和变压器在线经济运行计算进行结合的协调控制至今没有见到。

变压器经济运行在策略上只考虑了单个变电站的经济性但是没有考虑到全网的经济性,同时变压器经济运行也没有考虑到诸如电压质量等问题,而无功优化虽然从全网角度考虑了潮流的最优分布、节点的电压约束、节点的无功等约束等,但是没有考虑在不同的网络拓扑变化情况下的电网最优潮流分布,特别是当电网中出现电压和负荷有异常波动的时候如果还是按固定运行方式进行无功优化计算往往无法得到满意的结果。但是如果在无功优化的计算中考虑了单站的在线变压器经济运行计算,以变压器经济运行的计算结果作为无功优化计算的基础,那么将会在很大程度上提高电网的经济性,同时也能提高算法在异常情况下的收敛性,同时增强电网抵御异常情况的能力。

协调步骤如图 4-11 所示。

具体步骤如下:

步骤 1: 协调处理模块开始后,判断当前是否有电压越限的节点,如果有电压越限的节点则转入步骤 2,如果没有电压越限的节点则转入步骤 11。

步骤 2: 电压校正模块,根据当前电网可控设备对电压越限节点的电压进行校正,如果校正成功则转入步骤 3,如果校正失败则转入步骤 4。

步骤 3: 如果校正电压越限成功则保存本次校正的调节方案。

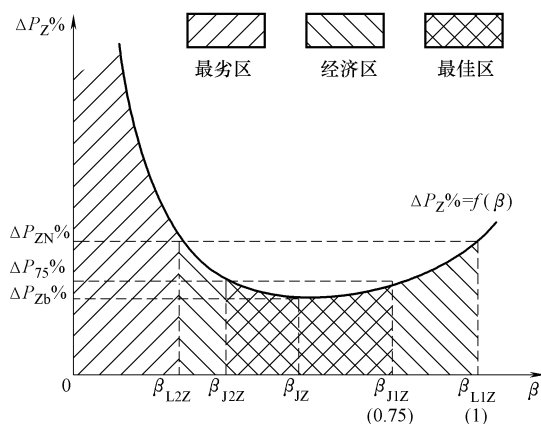


图 4-10 变压器综合功率运行区间划分图

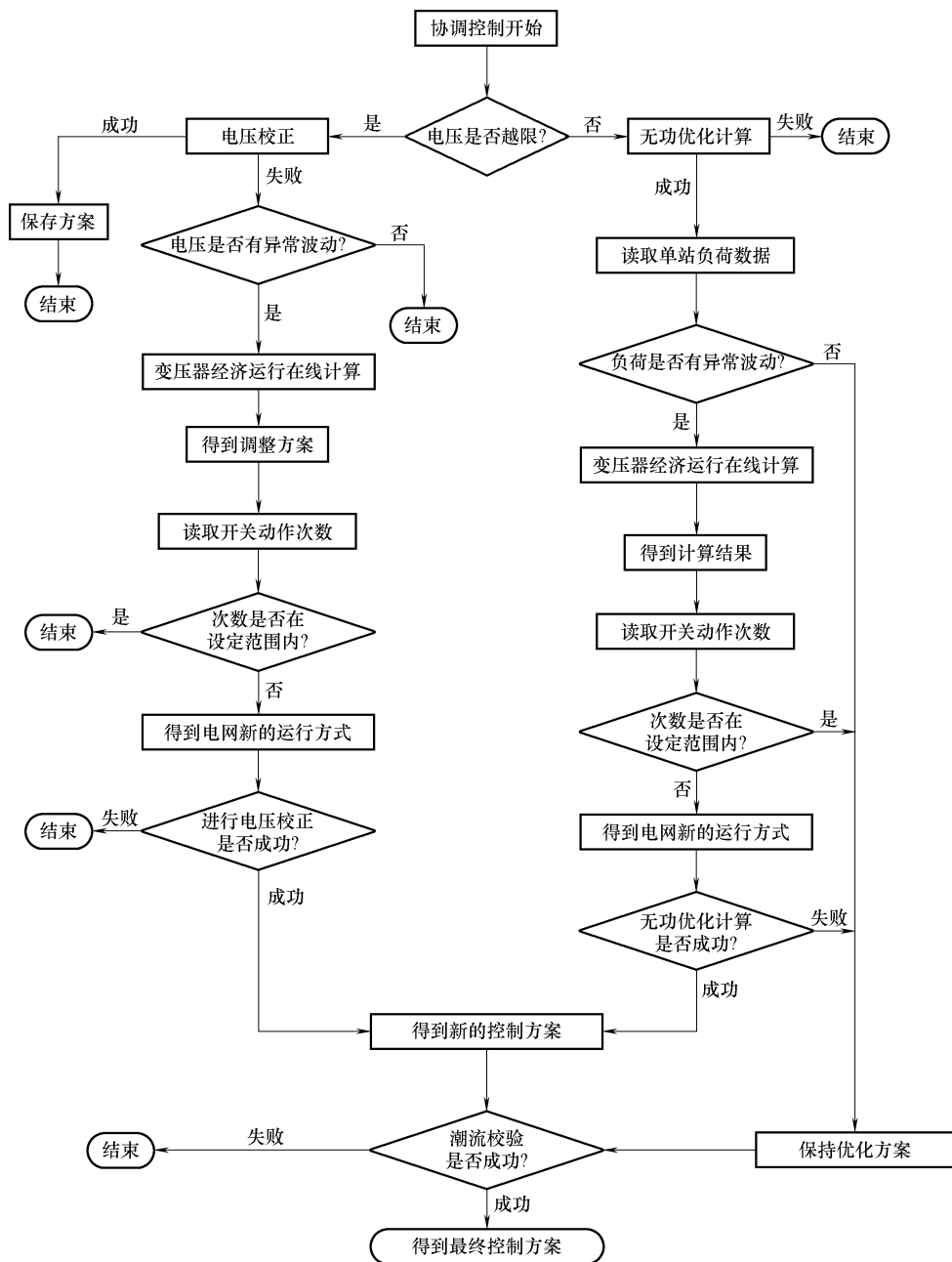


图 4-11 变压器经济运行和无功优化协调控制

步骤 4：观察是否出现电压异常波动的情况，例如电压在短时间内出现大幅的下降或上升，如果出现电压异常波动则转入步骤 5，如果没有出现电压异常波动则

结束本次计算。

步骤 5: 调用变压器在线经济运行模块, 当采用传统的校正调节手段无法实现校正目的时, 同时电压出现异常波动时采用实时计算单站的变压器经济运行策略。

步骤 6: 通过变压器在线经济运行计算的结果, 得到站内变压器可控开关和母联开关的控制命令。

步骤 7: 读取变电站内可控变压器开关和母联开关的动作次数。

步骤 8: 判断可控开关和母联开关的动作次数是否达到动作的上限, 如果开关控制次数已经达到规定上限, 说明本段时间内设备将不能动作则本次计算结束, 如果没有达到规定动作次数上限则转入步骤 9。

步骤 9: 将变电站的变压器经济运行计算结果带入全网模型中, 得到新的电网下的运行方式和新的节点负荷数据。

步骤 10: 在新的电网运行方式下再次做电压校正, 如果电压校正成功则转入步骤 20, 如果电压校正失败则结束计算。

步骤 11: 进行全网无功优化计算, 如果无功优化计算失败则结束本次计算, 如果无功优化计算成功则转入步骤 12。

步骤 12: 读取单站变压器带的负荷数据。

步骤 13: 判断当前负荷情况, 如果负荷短时间内出现较大异常波动则执行步骤 14, 如果负荷短时间内变化不大则执行步骤 21。

步骤 14: 在负荷异常波动的情况下, 调用变压器经济运行模块带入实时数据进行在线计算。

步骤 15: 通过实时的变压器经济运行在线计算得到计算结果。

步骤 17: 读取变电站内可控变压器开关和母联开关的动作次数。

步骤 17: 判断可控开关和母联开关的动作次数是否达到动作的上限, 如果开关控制次数已经达到规定上限说明本段时间内设备将不能动作则转入步骤 21, 如果没有达到规定动作次数上限则转入步骤 18。

步骤 18: 将变电站的变压器经济运行计算结果带入全网模型中, 得到新的电网下的运行方式和新的节点负荷数据。

步骤 19: 在电网新的运行方式和节点负荷数据的改变情况下再次进行全网的无功优化计算, 如果计算收敛成功则转入步骤 20, 如果计算结果发散则转入步骤 21。

步骤 20: 通过步骤 10 或步骤 19 得到成功的协调控制方案。

步骤 21: 保存无功优化收敛后的最优控制方案。

步骤 22: 对步骤 20 或步骤 21 的协调控制方案进行潮流校验, 如果潮流校验成功则转入步骤 23, 如果潮流校验失败则结束本次计算。

步骤 23: 得到潮流校验通过的本次协调控制的最终控制方案。

4.4.2 基于经济压差法的无功优化混合计算研究

1. 经济压差的定义

在有功功率传输值与线路平均电压不变的情况下，维持输电线路无功分点刚好位于线路中点，此时线路首末两端电压之差称为经济压差 ΔU_J 。在上述条件下输电线路流过的无功潮流称为经济压差无功潮流。

无功分点即是无功电流为零的点。经过研究表明，当线路上的过剩无功为 $\Delta Q_{\text{过剩}}$ 时，在线路两端等量补偿线路的无功消耗，即线路两端分别补偿 $-\Delta Q_{\text{过剩}}/2$ ，线路上的有功损耗最小，线路运行最经济。

为了便于理解，简单示意图如图 4-12 所示。通常线路的等效电阻、电抗、电纳均匀分布。由图可知，根据基尔霍夫电流定理，在此种补偿方式下，线路的中点无功电流为 0，即是维持输电线路无功分点刚好位于线路中点，在其他补偿方式均不能达到。

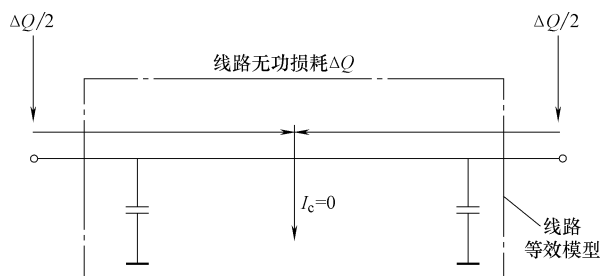


图 4-12 经济压差线路最优补偿示意图

2. 经济压差补偿原理的数学证明

(1) 空负荷运行情况下无功功率分点的最优位置

首先推导输电线路在不带任何负荷运行时，线路本身的充电电容产生的充电电流与整条线路额外产生的有功功率损耗之间的关系。

对于一条长度为 S 的输电线路，令其单位长度的正序电阻、等效电抗、等效电容分别为 r, x, b ；并假定此条输电线路的无功功率分点（即是容性无功电流为零处）位于线路首末之间某处，而此分点与线路首端距离设为 l_0 ，则与线路末端的距离则为 $-(S-l_0)$ ；线路示意图如图 4-13 所示。

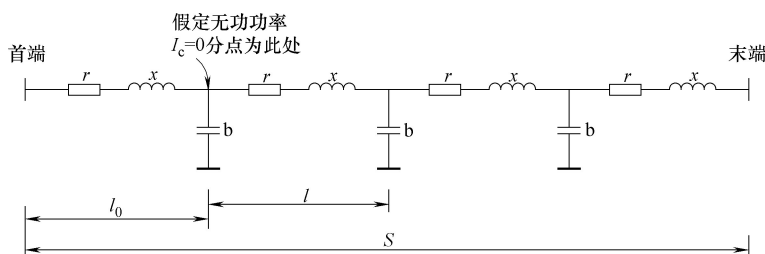


图 4-13 线路等效参数

在无功电流 $I_c = 0$ 相距为 l 的地方, 假设此处的相电压值为 U_p , 则其充电容性电流为

$$I_c = b l U_p \quad (4-84)$$

那么, 对于 l 处相邻的微小段 dl 上的电阻则为 $\Delta r = r \times dl$, 那么在此段 dl 长度上的电阻有功功率损耗为

$$dP_{\text{ploss}} = I_c^2 \times \Delta r = (b l U_p)^2 \times (r \times dl) = b^2 l^2 U_p^2 r dl \quad (4-85)$$

显然 dl 上的三相有功功率损耗值为 $3dP_{\text{ploss}}$, 由于 $U_l = \sqrt{3}U_p$ (U_l 为线电压), 则有 $3dP_{\text{ploss}} = 3b^2 l^2 U_p^2 r dl = b^2 l^2 U_l^2 r dl$ 。令 $l_0/S = x$, 其中, x 则为 $[0, 1]$ 之间任意值。为不失一般性, 取输电线路首末两端的电压平均值 U 为计算电压进行计算, 可以推出由于等效电容的存在, 在整个输电线路造成的额外有功功率损耗为

$$P_{\text{ploss}} = \int_{-(S-l_0)}^{l_0} dP_{\text{ploss}} = \int_{-(1-x)S}^{xS} dP_{\text{ploss}} = b^2 r U_l^2 \int_{-(1-x)S}^{xS} l^2 dl \quad (4-86)$$

进一步进行化简则有

$$P_{\text{ploss}} = \frac{1}{3} r b^2 U_l^2 S^3 (3x^2 - 3x + 1) \quad (4-87)$$

由于 $Q_c = \sqrt{3}U_l I_c = b S U_l^2$, 即为整条输电线路的总充电功率, 那么也可以将上式表示为

$$P_{\text{ploss}} = \frac{1}{3} r S \frac{Q_c^2}{U_l^2} (3x^2 - 3x + 1) \quad (4-88)$$

在上式中仅有 x 是未知变量, 为了探讨其在可行域 $[0, 1]$ 中的最优值, 对 x 求导则有

$$\frac{dP_{\text{ploss}}}{dx} = r b^2 U_l^2 S^3 (2x - 1) \quad (4-89)$$

对 x 求二阶导数, 可得 $\frac{d^2 P_{\text{ploss}}}{dx^2} = 2 r b^2 U_l^2 S^3 > 0$ 。所以 P_{ploss} 存在最小值, 当 $\frac{dP_{\text{ploss}}}{dx} = 0$ 时, 取 $x = \frac{1}{2}$ 即为最小值。

由此, 表明当无功功率分点位于输电线路的中点时, 输电线路上的有功损耗最小, 其最小值为

$$P_{\text{ploss min}} = P_{\text{ploss}} \big|_{x=1/2} = \frac{1}{12} r b^2 U_l^2 S^3 \quad (4-90)$$

而当无功功率分点位于输电线路的首端或是末端的情况下, 输电线路上的有功损耗值为

$$P_{\text{ploss}} \big|_{x=0} = P_{\text{ploss}} \big|_{x=1} = \frac{1}{3} r b^2 U_l^2 L^3 = 4 P_{\text{ploss min}} \quad (4-91)$$

可以发现,在输电线路空负荷情况下,如果使得无功功率分点处在输电线路的中点,那么可以使得线路有功损耗值在理论上达到最小。图 4-14 为有功功率损耗大小与无功功率分点位置的关系图,其中取 $\frac{1}{3}rb^2U_l^2S^3$ 为有功损耗的单位值。

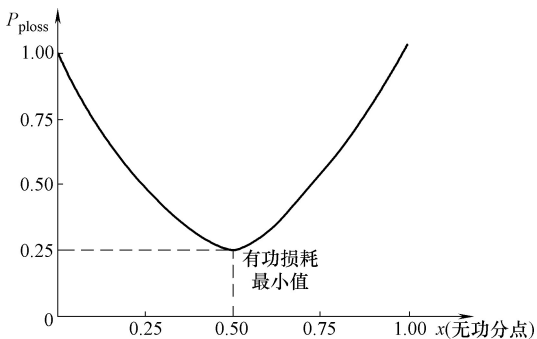


图 4-14 P_{loss} 值与无功功率分点 x 位置的关系

通过上述证明,可以得出如下结论:

1) 在输电线路中,其等效的

充电功率造成有功功率损失与线路的等效电阻成正比,与线路等效电容的二次方成正比,同时也和输电线路电压的二次方成正比,并且与整条线路的长度的三次方成正比。由于等效电阻、电容均与输电线路的长度相关,所以越长的、电压等级越高的输电线路等效的充电无功功率的影响越不能忽视。

2) 无功功率分点的位置决定了输电线路等效充电功率所产生的有功功率损耗大小。上述推导表明:在线路两端进行等量的无功功率补偿可以使得无功功率分点位于输电线路的中点,此时的有功功率损耗值最小,这就是经济压差潮流算法的根据。

(2) 带负荷运行情况下无功功率分点的最优位置

自然功率 P_λ 又称为波阻抗负荷,是表示输电线路的输电特性的一个特征参量。当线路输送有功功率为自然功率时,输电线路等效电抗上的无功消耗与等效电容的无功产生正好平衡,在线路的首端和末端既不产生也不消耗无功功率。在线路输送自然功率情况下,单位长度上对地电容产生的无功与线路电抗吸收的无功相等,而且线路两端的功率因数保持一致,电压和电流沿着线路线性平坦分布。

当输电线路输送功率小于自然功率时,此时充电功率将大于线路消耗无功,会导致线路末端电压高于首端;相反,当线路输送功率大于自然功率时,由于无功不足,需要额外的无功补偿,在没有无功补偿时,线路电压就会下降,如图 4-15 所示。

上文中提到,由输电线路上的电容产生无功功率与电抗上消耗的无功功率之差 $Q_C - Q_L = \Delta Q$,称为过剩无功功率。在输送的有功功率不等于自然功率时,过剩无功往往不为 0。此时线路上的过剩无功功率有如下关系:

$$Q_L = Q_C \left(\frac{P}{P_\lambda} \right)^2 \sin \varphi$$

$$\Delta Q = Q_C - Q_L = Q_C - \left(\frac{P}{P_\lambda} \right)^2 \sin \varphi Q_C = \left[1 - \left(\frac{P}{P_\lambda} \right)^2 \sin \varphi \right] Q_C \quad (4-92)$$

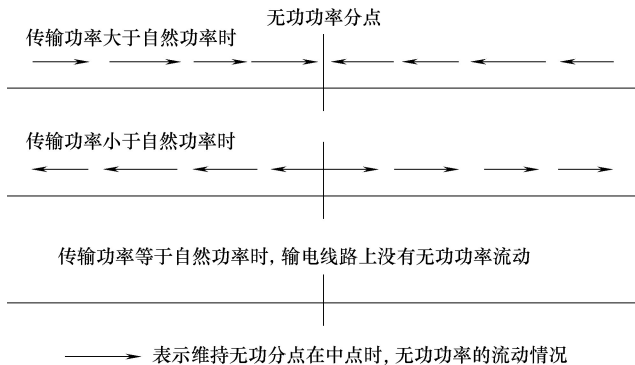


图 4-15 不同传输功率下经济压差无功潮流的形式

式中, P 为线路上输送的有功功率; P_λ 为自然功率; φ 为线路的阻抗角; Q_c 为线路充电功率 ($Q_c = bU^2$)。

对于 110kV 及其以上电压等级的输电线路, 通常情况下 $r \ll x$ 即 $\sin\varphi \approx 1$ 那么上式可简化为

$$\Delta Q = \left[1 - \left(\frac{P}{P_\lambda} \right)^2 \right] Q_c \quad (4-93)$$

与空负荷线路相比, 带负荷运行时线路上微小段 dl 上由于输送无功功率而造成的有功功率损耗的计算式将多一个因子, 即

$$dP_{\text{ploss}} = b^2 l^2 U_p^2 r \left[1 - \left(\frac{P}{P_\lambda} \right)^2 \right] dl \quad (4-94)$$

其余的推导步骤与空负荷情况下相似。按照空负荷时相同的线路模型, 最终得到在带负荷运行时, 线路上输送的无功功率在整条线路上造成的有功损耗为

$$P_{\text{ploss}} = \frac{1}{3} r b^2 U_1^2 S^3 \left[1 - \left(\frac{P}{P_\lambda} \right)^2 \right] (3x^2 - 3x + 1) \quad (4-95)$$

3. 经济压差最优潮流下理想无功布局

(1) 无功功率就地补偿

就地补偿和分层平衡是无功功率补偿的基本原则, 同时也是实现全网经济压差潮流基本条件。在所有的电网中, 按照各自的作用不同, 均可将电网中的各元件大致地分为发电厂、输电线路、降压变电站以及用电负荷。

发电厂一般由发电机、电厂自用设备和升压变压器组成。在发电过程中, 发电机上流动的励磁无功与厂自用设备以及升压变压器上消耗的无功功率均可以通过调节发电机的励磁电力来满足。而且, 发电机的励磁调节可以做到动态平滑的连续调节, 可以根据发电厂的运行情况随之改变, 从而维持升压变压器高压侧尽可能少地向系统输入无功功率, 能够做到发电厂的无功功率就地平衡。

降压变电站中有主变压器、站用变压器，而且有些主变压器低压侧会带负荷。保持变电站的无功功率就地平衡需要在补偿母线上装设足够容量的低压无功补偿装置，尽可能地保证变电站主变压器高压侧尽可能少的与系统进行无功功率交换。对于电力负荷，理论上也能够进行完全就地补偿。电网就地平衡时无功补偿情况如图 4-16 所示。

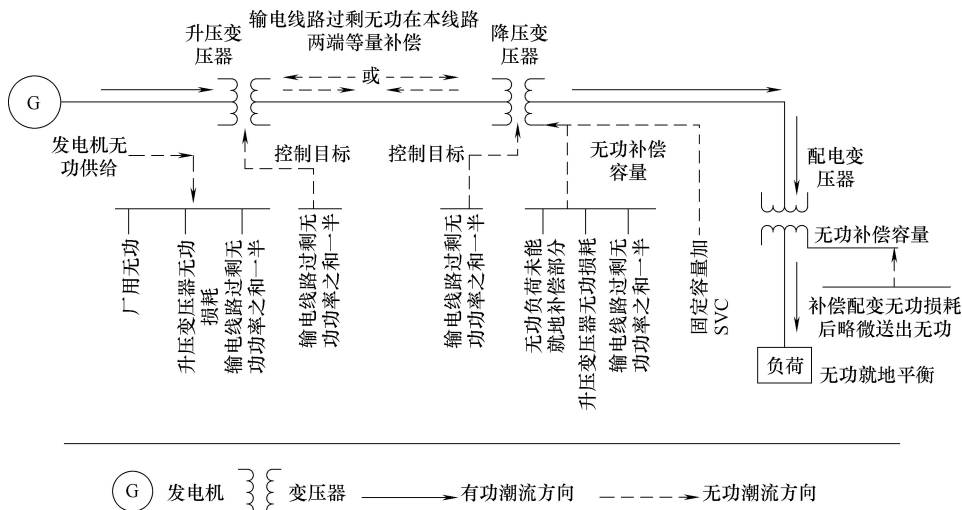


图 4-16 地区电网就地平衡无功补偿

在上述三个元件均已实现就地平衡的理想状态时，输电线路却不能实现沿线动态无功功率平衡。而输电线路流动的无功功率大小将直接影响线路上的有功损耗与电压降落。在上文中已证明，在输电线路两端对线路损耗进行等量补偿时即为最经济的运行状态。在其他元件就地补偿的情况下，输电线路只流动过剩功率的一半 $\Delta Q_{\text{过剩}}/2$ 。如图 4-17 所示，整个电网几乎不流动无功功率，是经济压差最优无功潮流的理想状态。从物理意义而言，即是通过合理的无功补偿，改变线路的对地电容值，实现线路上产生的容性无功刚好等于消耗掉的感性无功，整条线路上不产生额外的无功损耗。

(2) 无功功率分层平衡

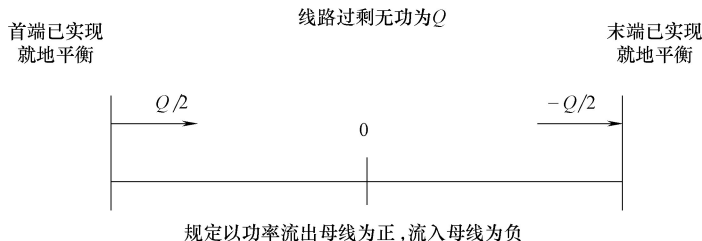


图 4-17 经济压差最优无功潮流的理想状态

大多数无功优化方法将各个电压等级一起进行优化,而在经济压差无功优化算法中,是将以变压器为单位实现分层优化。如果地区电网的结构与有功功率情况不变,以各个变电站为一个节点单位,那么各个节点高压侧注入电网的无功功率大小是实现电网经济压差最优无功潮流的主要因素。所以本书在进行地区电网无功电压优化时,先将多个电压等级的电网进行电压分层。这样既可以减少控制变量,又能提高收敛性,使得同一电压等级的层面处于最优运行。对于地区电网而言,通常按照电压等级可分为 220/110/35kV 三层。

对同一个电压层面而言,变压器的高、中压侧母线所连线路过剩无功之和的一半需要在变压器补偿母线进行分层平衡,而不穿越变压器流入另外一侧电网,要使无功功率尽可能少地流经变压器。在图 4-18 中,以变压器为单位,实现了无功功率分层平衡。

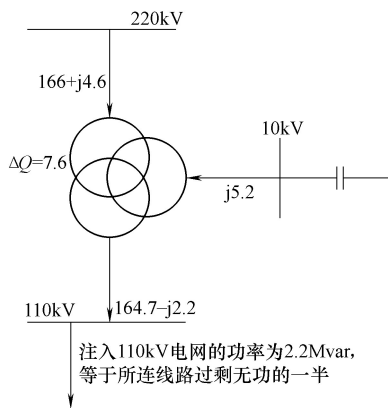


图 4-18 无功分层平衡示意

图 4-18 中,流向 110kV 电网的潮流即是最优无功潮流。为了达到此效果,首先需要在 10kV 用户端做到就地平衡,并满足整个变压器的无功功率平衡式:

$$\Delta Q_T + Q_{\text{load}} - \Delta Q_{220} - \Delta Q_{110} = Q_{\text{comp}} \quad (4-96)$$

式中, ΔQ_{220} 为 220kV 母线上连接线路过剩无功功率的一半; ΔQ_{110} 为 110kV 母线上连接线路过剩无功功率的一半; ΔQ_T 为整个变压器的无功损失; Q_{load} 假定已经实现了无功功率补偿,此时令其为 0; Q_{comp} 是在低压侧母线上的补偿容量,对应图上的数值为 $7.6 + 0 + 2.2 - 4.6 \text{Mvar} = 5.2 \text{Mvar}$ 。这种情况下,变压器的 110kV 母线向系统输送的无功功率值恰好即为线路实现自身就地补偿的值,在负荷就地补偿的条件下达到最优潮流。

(3) 变电站理想的补偿容量

根据经济压差无功功率就地分层平衡的基本原则,得到在经济压差最优潮流下各变电站的最优无功补偿如下:

1) 经济压差最优无功潮流下 220kV 变电站无功补偿容量。

$$Q_{\text{comp}} = -\frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n (\Delta Q_{\text{高}}) + \sum_{i=1}^n (\Delta Q_{\text{中}}) \right] + \Delta Q_{\text{T}} \quad (4-97)$$

式中, Q_{comp} 为整个变压器所需补偿容量; n 为变压器母线所接输电线路条数; $\Delta Q_{\text{高}}$ 为变压器高压侧母线相连线路过剩无功之和; $\Delta Q_{\text{中}}$ 为变压器中压侧母线相连线路过剩无功之和; ΔQ_{T} 为变压器无功损失。

2) 经济压差最优无功潮流下 110kV 变电站无功补偿容量。

$$Q_{\text{comp}} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\Delta Q_{\text{高}} + \Delta Q_{\text{中}}) + \Delta Q_{\text{T}} + \Delta Q_{\text{load}} \quad (4-98)$$

式中, Q_{load} 为低压侧无功负荷。与 220kV 变电站略有差异, 在 110kV 变电站进行无功补偿容量设计时, 需要将低压侧无功负荷就地进行补偿, 减少无功功率流入下级电网。其他计算参数与 220kV 变电站类似。

4. 传统经济压差算法

在传统经济压差求解中, 将电网中的变压器作为一个计算单元, 求得变压器高压侧节点注入电网的最佳无功功率值。以往的无功优化通常单纯地以网损最小为目标函数, 而经济压差算法在满足电网中各高压侧节点之间的输电线路上的电压降落纵分量为最小的同时, 达到线损最小。其目标函数为

$$\begin{cases} \min \Delta U_{\text{J}} = (PR + QX)/U \\ \min \Delta P = (P^2 + Q^2)R/U^2 \end{cases} \quad (4-99)$$

在进行经济压差潮流计算时, 将潮流计算中的部分约束 (如无功出力上下限, 档位调整上下限) 暂不考虑, 而只考虑节点电压约束, 并将发电机无功设定为连续调节。经济压差算法中不考虑变压器内部情况, 所以档位变量 K 不直接参与计算, 设为靠中档运行, 之后根据低压侧电压情况决策出档位动作值。

通过潮流计算之后得到各条输电线路上的过剩无功情况, 从而求出变压器高压侧母线注入电网的无功功率优化值 Q_{opt} 、高压侧母线的优化电压 U_{opt} 以及之前求出的变压器整体无功补偿值 Q_{comp} 。通过微调 Q_{comp} 的大小, 使变压器高压侧注入电网的实际无功功率 $Q_{\text{实}}$ 等于优化值 Q_{opt} 。

5. 基于经济压差法的无功优化混合计算方法

传统的经济压差算法考虑了电网无功补偿的就地平衡基本原理。但是, 对于实现经济压差潮流的算法未能给出清晰的优化过程, 对于优化控制的具体实现尚未给出明确的策略, 而且无法确定分层节点的电压最优值。传统的经济压差算法仅适用于电网中存在大量动态无功补偿装置的情况, 这在当前的技术水平往往很难达到, 是一种前瞻性较强而实用性偏弱的无功优化算法。

针对这种情况在传统经济压差最优潮流的研究基础上, 本节通过对优化算法进行详细的推导, 提出新的基于经济压差法的无功优化混合迭代求解方法, 并构造动

态无功源进行实用化处理, 而且对于分层节点优化电压的计算选取也给出了解决方案, 对迭代判据也进行了改进。通过改进, 提高了经济压差优化算法的收敛性和实用性, 使之能够实际应用于地区电网的无功电压优化。

(1) 经济压差最优无功初值计算方法

当电网处于经济压差最优无功潮流的理想状态下, 此时各个变电站完全能够满足就地平衡的原则。由此可以得到该状态下变电站的理想补偿容量, 并可以将其作为无功迭代计算的初值。由此, 构建其经济压差最优补偿容量初始值计算子模块的计算流程如图 4-19 所示。

(2) 基于经济压差法和灵敏度分析的混合迭代方法

根据经济压差最优无功理论, 整个电网实现经济压差最优无功潮流的理想情况为: 电网中的所有元件均需要实现完全的就地补偿, 并且能够跟随负荷的变化情况动态地调整无功出力。此时根据经济压差补偿原理将线路损耗在两端进行等量补偿, 将使整个电网处于最优无功潮流的状态。传统的经济压差算法可以通过此最优状态计算出各节点的最优无功补偿, 但对于如何达到此最优状态未进行深入的探讨。此外, 传统的经济压差算法要求各节点均能够平滑动态地调节无功。对于发电机节点而言, 在一定调整范围内能够实现此要求, 但对变压器而言, 当前主要的补偿设备仍是并联电容、电抗器。虽然电力电子技术发展迅猛, 但在现阶段仍无法在所有的变压器均装设 SVC、STATCOM 等补偿设备, 所以变压器节点不能动态平滑调节地调整无功功率, 在某些极端情况下有些节点甚至没有配置任何的无功源。所以如何利用当前的控制手段, 对经济压差算法进行实用化改进, 尽可能地使电网处于最优运行也是本节解决的问题。

1) 最优无功补偿的迭代求解。

传统的经济压差算法是在实现经济压差最优潮流的前提下, 通过就地补偿的原则求取的各节点最优无功补偿值。但是对于达到这一最优的无功潮流的具体方法研究较少, 而且按照传统的经济压差理论进行无功补偿之后, 电网的无功潮流将会发生改变, 此时用于求取最优无功补偿容量的计算参数也会发生变化。因此, 采用迭代求解与灵敏度分析相结合的方式, 通过迭代方式的探究, 给出了基于经济压差法的最优无功值的详细迭代求解过程。

在进行迭代求解节点最优无功补偿容量时, 尝试了如下两种思路:

① 以节点的注入无功功率 Q 为迭代变量, 迭代步骤如下:

a) 利用经济压差最优无功初值计算模块求取 Q_{comp} 初值, 在各个节点上按照此补偿参数进行无功补偿;

b) 对于计算网络而言, 在补偿初值带入之后, 相当于节点无功负荷的计算参数发生变化; 对无功负荷参数进行修正, 重新进行潮流计算、迭代求解 Q'_{comp} ;

c) 当各节点的 Q'_{comp} 值在前后两次迭代计算之后变化很小时, 得出变压器无功

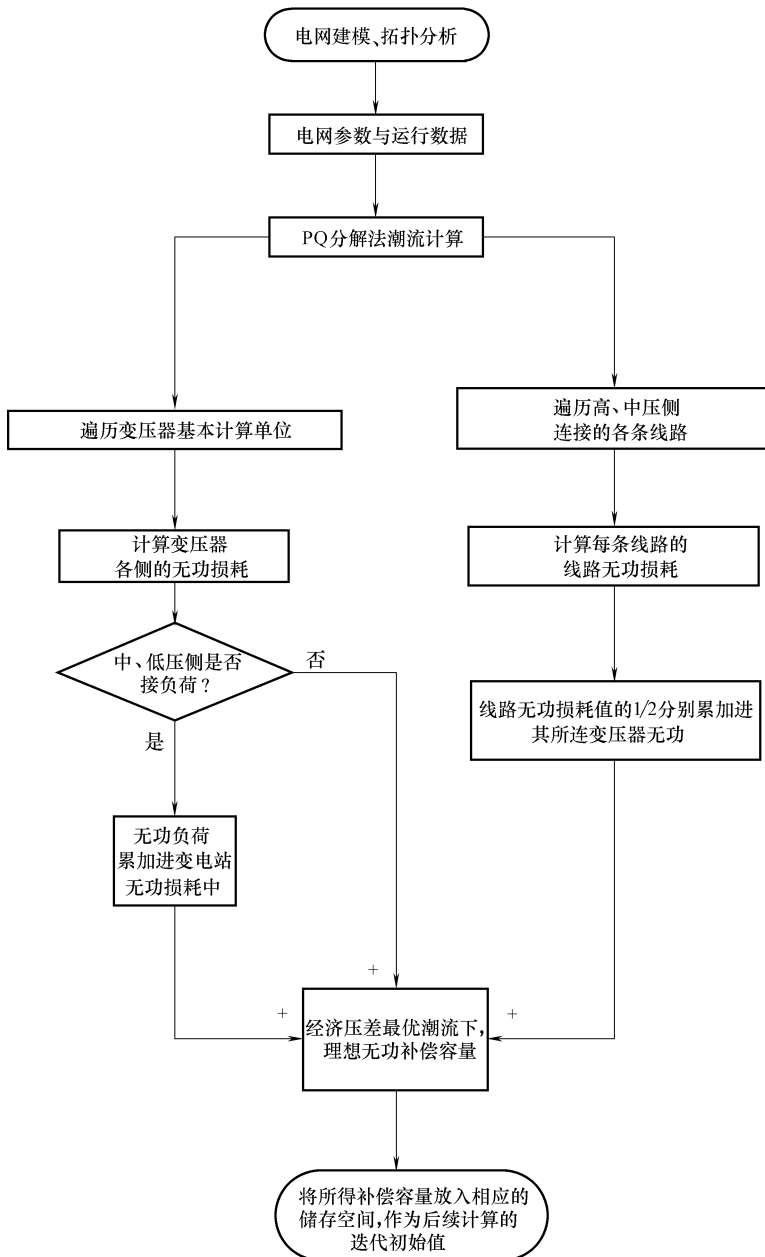


图 4-19 经济压差最优无功初始值计算模块

补偿容量的最终值。

根据这种思路计算，发现该方法在计算中不容易收敛，而且对于潮流迭代的初

值要求很高。这种迭代思路相当于将所有的变压器节点均看作 PQ 节点, 可以随意控制其注入无功大小, 却未考虑电压约束, 任其节点的电压变化波动。与传统的经济压差算法思想类似, 试图通过仅改变节点注入无功进行无功优化。然而, 随着系统中 PV 节点的减少, 使得电网的电压支撑能力降低, 导致整个系统的收敛域变小, 最终导致潮流计算不收敛, 算法鲁棒性较差。

② 以节点电压 U 为迭代变量, 考虑节点无功/电压之间的紧密联系, 利用 PQ 分解法形成的 B'' , 计算无功电压灵敏度矩阵, 迭代步骤如下:

a) 利用经济压差最优无功初值计算模块求取 Q_{comp} 初值, 在各个节点上按照此补偿参数进行无功补偿;

b) 利用全网无功/电压灵敏度矩阵, 将初值带入之后求取各节点新电压幅值; 对各节点电压幅值进行修正, 重新进行潮流计算, 迭代求出新无功补偿容量值 Q'_{comp} ;

c) 当各节点的 Q'_{comp} 值在前后两次迭代计算之后变化很小时, 得出变压器无功补偿容量的最终值。

经济压差算法的计算前提是各个节点有充足的无功, 所以可设定其为 PV 节点。在迭代过程中, 充分考虑到了电压的约束条件, 整个系统有足够的无功电压支撑, 易于收敛。而且在求解过程中, 可直接利用 PQ 分解法时自动生成 B'' 矩阵求解无功电压灵敏度矩阵 S , 提高了程序利用率。

2) 动态无功源控制空间的构造。

根据传统经济压差算法的要求, 每个节点都能够精细地调整无功出力。但是在实际电网中, 具有调相能力的发电机、SVC、STATCOM 等装置才具有精细准确的无功调节能力, 普通变压器节点往往无法达到此要求。在本小节中, 通过对此进行了实用化改进, 使之等效地实现经济压差优化效果。通过构造了一个动态无功源的控制区间^[50], 从动态无功控制源的控制力入手; 然后从该控制区间中, 选取最具控制力的动态无功源进行等效补偿, 解决部分节点无法精细调节无功功率的问题, 使之能够在现有的控制条件下最大限度地实现经济压差优化。

设整个电网中有 d 个动态无功源, 构成集合 D , 有 m 个无法自身动态无功调节的节点, 构成集合 M 。构造动态无功控制源的步骤如下:

① 对于属于集合 D 中的第 j 个动态无功源, 将其设置为 PQ 节点。对于其他的动态无功源, 如果是发电机节点, 可以假定其 AVR 调节速度足够快, 能够保持机端电压不变, 将其设定为 PV 节点; 当其调节范围处于极限时, 则按照 PQ 节点处理。如果是 SVC、STATCOM 这类无功源, 则将其考虑为 PQ 节点。在计算所有节点的无功电气灵敏度时, 应包含 PV 节点的全维增益矩阵 B'' ; 同时在 PV 节点所对应的对角元上加上一个很大的正数, 这样就能保证在进行无功调节时不对其产生影响, 反映了 PV 节点的对电压的控制能力。

② 在第一步的基础上, 可以求解动态无功源 j 对于集合 M 内所有节点电压的控制灵敏度 $-[B'']^{-1}$, 对于无法自身动态无功平衡的节点 $i(i \in M)$, 表示为 S_{ij} 。该数值越大表明动态无功源 j 对节点 m 的控制力越强, 相应的电气距离就越小, 反之则控制力越弱。

③ 对于集合 M 中的每个动态无功源都通过步骤①、②进行控制力求解。

④ 将各个动态无功源节点的控制能力看做一个一维的 d 无功控制空间。在此空间中, 使用 d 维矢量 $(S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{id})$ 来描述动态无功源节点 i 的控制力。

利用在 B'' 矩阵相应的对角元上加一个非常大的正数, 可以模拟具有快速调节能力的动态无功源能够维持其自身电压不变的物理响应, 而且此物理响应也将对它关系密切的负荷节点产生影响。在求逆 B'' 矩阵求解灵敏度时, 该节点路集上的节点都会受到对角元极大数的影响, 相邻的矩阵元素将相应的成为一个较小的数, 反映在物理意义上即与该动态无功源相邻的节点电压变化也较小。

在此 d 维矢量空间, 第 j 个分量充分体现了第 j 个动态无功源的控制能力。在改进经济压差算法优化计算时, 对于自身无法实现精细无功平衡的节点 i , 其所需的无功功率值将由选定控制力最强的动态无功源 j 进行分担, 且存在如下关系:

a) $\Delta U_i = S_{ij} \Delta Q_j$, 即动态无功源 j 无功功率变化时对节点 i 的电压影响;

b) $\Delta U_i = S_{ii} \Delta Q_i$, 即节点 i 自身无功功率变化时对自身电压的影响。

如果上述两种手段使得节点 i 电压的变化有相同的效果, 则有 $S_{ij} \Delta Q_j = S_{ii} \Delta Q_i$, 即是 $\Delta Q_i = S_{ij} \Delta Q_j / S_{ii}$ 。如果令 $\alpha = S_{ij} / S_{ii}$, 则有 $\Delta Q_i = \alpha \Delta Q_j$ 。上式表明, 对于自身无法无功平衡的节点 i , 可以通过动态无功源 j 进行无功分担, 其等效无功补偿值可以用上式近似表示, 这样就能够较好地解决传统经济压差算法的实用性问题。

3) 迭代判据的改进。

传统的经济压差算法以单个变压器为单位, 当其高压侧母线注入电网的无功功率达到优化值 Q_{opt} 时, 判定其计算终止, 并采用基于九区图的无功电压控制策略。显然, 传统的方法仅实现了局部变压器的优化, 而且基于九区图的控制方式容易造成控制振荡, 难以实际操作。在本节中, 首先假设待优化的电网中各个节点均有充足的平滑调节的无功源, 并将这些离散量当做连续变量处理。将收敛判据改进为: $\max |Q_{i+1} - Q_i| < \varepsilon$ (其中, Q_i 为第 i 次迭代计算之后无功补偿优化解)。该语句的含义为: 在经济压差最优无功潮流下, 各节点的最优无功出力是确定的, 那么可取所有节点的前后两次优化迭代值之差的最大值进行判定。如果此最大差值都小于某一个正数 ε , 可以认为此时全网已经达到经济压差最优无功潮流的无功分布, 该值即为最优无功补偿值。按照此判据, 可以避免局部最优, 并且具有可操作性。在实际操作中, 对于并联电容器这样的离散无功源, 电容器补偿最小单位通常为

0.3Mvar, 不妨取 $\varepsilon = 0.3\text{Mvar}$ 作为判定值。

4) 分层平衡节点电压幅值的实现步骤。

在传统的经济压差算法中, 仅考虑了同一电压层次上的无功优化, 对于分层界面上的电压水平未能给出优化方案。在经济压差最优潮流的下, 各节点之间电压降比较小, 整个电网电压水平紧凑。同一电压层面上平衡节点的电压幅值大小, 对于电压质量和网损均十分重要。平衡节点的电压幅值应该通过一定的办法选取, 而不应该固定在原来的值。根据电网安全优质运行的原则, 可以按照如下标准选取: 达到全网网损最小, 且满足各节点电压都合格的电压值作为同一电压层面上平衡节点的电压幅值。

不失一般性, 令平衡节点的电压合格范围为 $0.95 \sim 1.15$, 不妨以 0.1 为一个调整单位, 遍历计算。若存在不合格节点电压, 则在网损值上加上大数, 最后选取网损值最小的平衡节点的电压幅值。在地区电网无功电压控制中, 出于安全因素, 变压器分接头在同一时刻仅能调节一档, 此约束条件刚好能够缩小电压优化值的解空间。

5) 混合迭代算法实现步骤。

通过上述实用化改进和利用基于经济压差法的混合迭代方法, 求取最优无功补偿容量 Q_{comp} 的具体步骤如下:

- ① 搭建电网模型, 并进行网络拓扑分析, 输入电网参数与运行数据。
- ② 调用 PQ 分解法潮流计算子程序, 计算全网初始潮流, 并将无功电压灵敏度矩阵 B'' 存入相应的存储空间。
- ③ 调用经济压差迭代初值计算模块, 计算出无功补偿容量初值 Q_0 。
- ④ 根据初值 Q_0 , 通过无功电压灵敏度矩阵 S 计算出各母线电压新值, 并将其修正。重新调用潮流子模块与初值计算子模块, 得到最优无功新值 Q_1 。
- ⑤ 判断 $\max |Q_{i+1} - Q_i| < \varepsilon$ 是否成立。如果不成立, 则循环进入③; 否则, 则输出 Q_{i+1} 作为最优无功补偿值, 并将此时的全网网损放入储存空间。
- ⑥ 选定平衡节点电压幅值, 如果此时各节点电压合格且网损最小, 则选定此值为平衡节点电压幅值; 否则, 改变其电压幅值大小, 重新进入③进行迭代计算。
- ⑦ 判断节点 i 的无功源性质; 分两种情况: 如果是动态无功源, 则直接以 Q_{i+1} 作为最优无功值; 如果离散无功源的节点, 按照与 Q'_{comp} 最接近的离散无功值进行无功补偿, 之后在其动态无功源控制空间中寻找最具控制力的动态无功源进行差额等值补偿。由于差额往往较小, 只需微调动态无功源的无功出力; 如果该点不具有无功补偿能力, 则其无功补偿值完全由动态无功源等效补偿。

综合上述步骤, 适用于无功优化的改进经济压差算法流程如图 4-20 所示。

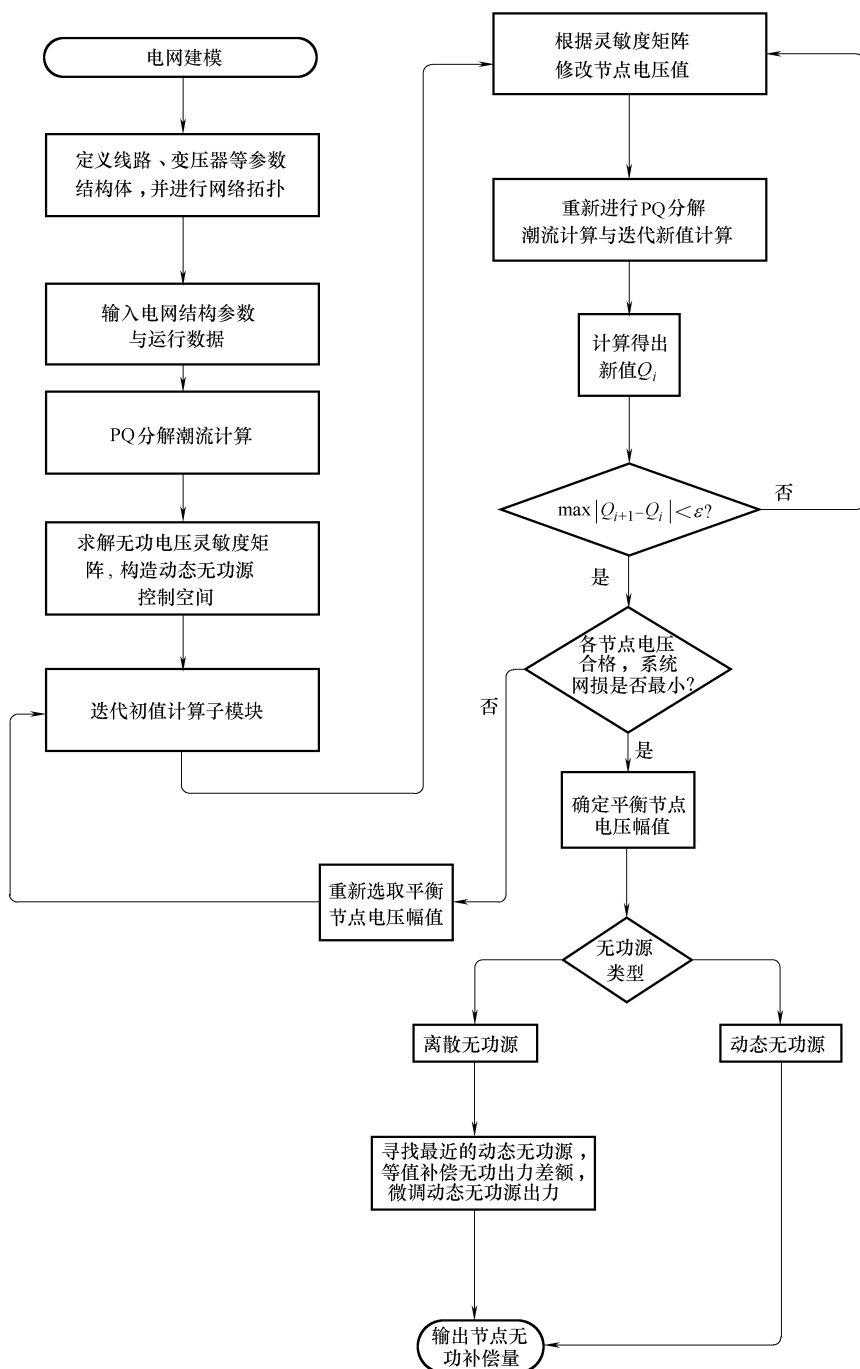


图 4-20 适用于无功优化的改进经济压差算法流程

第 5 章 智能 AVC 在线预防控制及评估的研究

5.1 基于电压稳定的智能 AVC 在线预防控制及校正方案的研究

5.1.1 静态电压稳定预防控制方法研究

预防控制的概念最早由学者 DyLiacc 提出，通过在预想事故下的系统安全分析来确定系统的安全状态，当发现系统处于不安全状态时，采取相应的控制措施使其返回到安全状态，从而保证系统的安全稳定运行。静态电压崩溃预防控制措施的研究是电力界最关心的课题之一，是静态电压稳定研究的最终目的。静态电压崩溃预防控制的目标是以尽可能小的控制代价保证系统在正常运行方式及预想故障条件下均具有足够的电压稳定裕度。对于在线静态电压崩溃预防控制，一般需考虑正常运行方式、元件 $N-1$ 开断及部分多重元件开断的情况，预想故障集的规模一般较大。

现有的静态电压崩溃预防/校正控制主要针对正常运行状态或单个预想故障的情况，在满足预定的电压稳定裕度要求和设备运行约束条件下，最小化控制代价或负荷切除量。从理论上说，多预想故障预防控制需要将所有预想故障条件下的电压稳定裕度要求都作为约束条件。然而由于预想故障集的规模一般较大，故多预想故障静态电压崩溃预防控制问题的规模可能很大。考虑到这一问题的复杂性，有两种代表性解决办法。第一种方法是采用基于灵敏度的方法，将相应问题线性化，而后采用迭代的方法求解。第二种是采用基于最优潮流的一体化的控制算法，应用非线性规划的方法直接求解。下面分别简要介绍这两种方法。

1. 基于灵敏度和连续线性规划法的静态电压稳定预防控制

采用基于灵敏度和连续线性规划技术的控制算法，由于在处理裕度不足和裕度为零两类情形时要用到不同的技术和模型，因此将电压稳定控制问题分为电压稳定增强控制问题和电压稳定预防控制问题。对预防故障集进行筛选与排序后，将故障分为严重故障和失稳故障，分别对应于电压稳定增强控制和电压稳定预防控制。

(1) 基于电压稳定性的预想故障筛选与排序

采用一种两阶段法来进行故障的筛选与排序，如图 5-1 所示。在第 1 阶段采用快速的方法从有几百个故障的故障集中筛选出严重故障集。筛选的方法有两种：一

是以负荷裕度小于当前系统稳定裕度的一个百分比为判据，通常取 25% 即可；二是直接选取负荷裕度最小的 K 个故障进入严重故障集， K 取 30 到 50 之间。这一阶段的计算量很大，快速成为最重要的要求。此外，要求不漏选失稳故障或最严重的故障。

在第 2 阶段从严重故障集中识别失稳故障，并根据需要进行排序，对其他严重故障进行较为精确的裕度计算，并进行排序。通常严重故障集中有几十个故障，因此这一阶段的关键在于评估的准确度。

(2) 电压稳定增强控制

从采用的优化模型上讲，稳定控制问题的处理方法可分为两类：一是作为目标函数处理；二是作为约束条件处理。当将稳定裕度最大化作为控制目标时会以牺牲其他目标为代价，因此需要采用多个目标加权的优化控制模型。从采用的优化模型上讲，它又可以分为两类：一是建立单一的特殊最优潮流问题的数学模型，采用非线性规划技术求解，同时得到控制解和系统运行点；二是采用将优化控制问题与稳定裕度计算问题分开来迭代求解的技术。后一种方法与前一种方法相比更为“开放”。稳定裕度计算子问题和优化控制子问题都可以有多种模型和方法来“组装”，以适用于各种场合。在执行增强控制功能之前，要先执行故障的筛选和排序功能，得到一个严重故障集。对每一个严重故障，采用间接方法识别和计算得到稳定临界点，对其中稳定裕度不满足的故障，计算其控制灵敏度。每次更新控制后，要对控制后系统进行潮流计算，以检查是否有运行约束越限，并计算其相应的灵敏度。而在结束判据中也包含所有运行约束都满足的要求。当所有严重故障都计算完后，根据灵敏度信息来选择参与控制集。而后要求解形成的线性规划控制子问题，得到解后，要对其中的离散控制变量如变压器分接头等进行离散化处理。最后对系统的控制进行更新。

需要指出的是，在电压稳定增强控制中容易出现两个问题：一是不同故障间的控制方向相抵触的问题；二是施加增强控制后系统运行约束越限的问题。尽量将它们放在一个 LP 问题中统一求解，让 LP 帮助找到一个折中的控制方案。不仅选择不满足裕度要求的严重故障进入 LP，还应选择少量刚刚满足裕度的故障进入，算法流程图如图 5-2 所示。

(3) 电压稳定预防控制方法

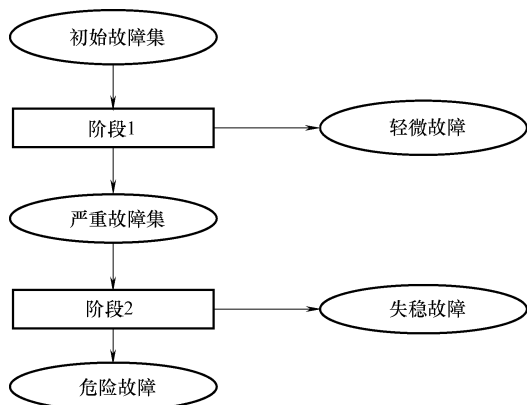


图 5-1 两阶段法故障筛选与排序示意图

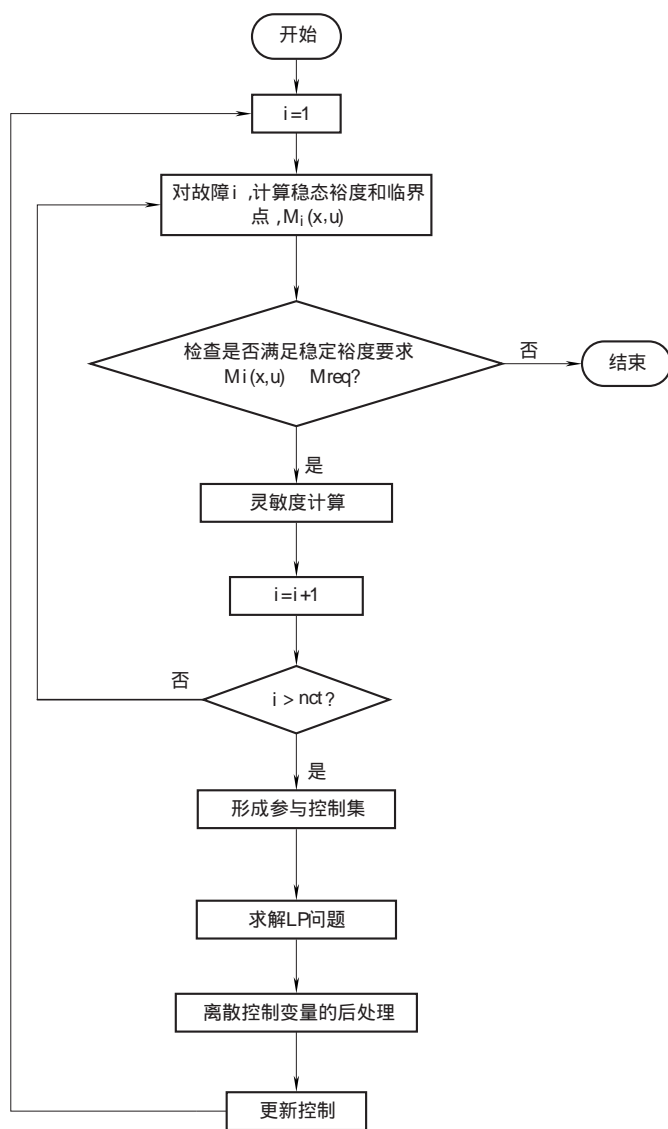


图 5-2 电压稳定增强控制的流程图

下面介绍对于失稳故障的电压稳定预防控制方法。失稳故障可分为两类：一类是故障后的系统不存在新的静态稳定平衡点；另一类是故障后的系统存在静态稳定平衡点，但是系统无法过渡到这个新的稳定平衡点，例如故障实际的切除时间大于极限切除时间。第 1 类失稳故障可以采用静态方法来研究，而第 2 类失稳故障只能采用暂态稳定方法来研究。此处将对于前者进行处理，是电压稳定预防控制问题。预防控制算法要同时考虑多个这类失稳故障，而紧急控制算法只需考虑一个失稳故

障。不论哪种方式都存在如下困难：没有一个对应的故障后潮流解，从而无法形成雅可比矩阵，无法直接计算控制的灵敏度。

现有的处理方法主要有两类。一类是间接方法，即将问题分解为一个恢复潮流可解性的子问题和一个根据灵敏度矢量搜索最小减负荷方向的子问题来迭代求解。其中，在恢复潮流可解性和求解负荷空间稳定临界点的环节上又可分为基于最优乘子的阻尼牛顿潮流算法和基于局部参数化的连续潮流方法两种算法，后者要求已知一个可行的初始卸负荷策略。另一类是直接方法，即直接求解 KKT 条件的最优潮流算法。该方法的机理是在潮流可行域边界上系统二阶海森矩阵非奇异、可解，并通过最小卸负荷的目标函数实现。因该方法要形成和因子化二阶海森矩阵，计算量大，无法预估最佳减负荷地点而使得控制变量数目巨大，造成在线实用化很困难。

考虑到工程上要求多种控制方式的协调和同时处理多个失稳故障，采用根据潮流不可解通常由于故障而引发，从而利用故障型连续潮流工具得到一种新的潮流不可解程度度量指标，以及失稳故障对应的一个虚拟的稳定临界点（I 型分岔点），并利用该点处的可用于预防控制的灵敏度信息，构造了基于连续线性规划（SLP）的预防控制算法，将稳定控制问题纳入到电力市场环境辅助服务获取上，可同时处理多个失稳故障。实际系统的实践表明，上述方法是有效的。

1) 电压稳定预防控制问题的演化。

电力系统电压稳定预防控制问题的完整数学列式为

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } C(u) \\
 & \text{s. t. } f(x, u, \lambda_0) = 0 \\
 & \quad f(x_{\Delta}, u, \lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{req}}) = 0 \\
 & \quad f_i(x_i, u, \lambda_0) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_c \\
 & \quad f_i(x_{i,\Delta}, u, \lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{req}}) = 0 \\
 & \quad h(x, u, \lambda_0) \leq 0 \\
 & \quad h_i(x_i, u, \lambda_0) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_c
 \end{aligned} \tag{5-1}$$

式中， λ_0 表示当前系统在一个预定的方向上的负荷水平； $\Delta\lambda_{\text{req}}$ 表示在该预定方向上要求的最小负荷裕度指标； x 是基态系统预防控制后的状态矢量； u 是要求解的系统控制矢量； x_{Δ} 是基态系统在 $\lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{req}}$ 负荷下的状态矢量； x_i 是预防控制后且第 i 个故障后系统状态矢量； f_i 表示第 i 个故障后系统节点潮流方程； $x_{i,\Delta}$ 是系统在第 i 个故障后且在 $\lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{req}}$ 负荷下的状态矢量； h 表示基态系统运行约束，如节点电压和支路电流约束， h_i 表示第 i 个故障后系统运行约束（比基态下宽松）， $i = 1, 2, \dots, n_c$ 。

式（5-1）的意义是：通过计算得到一组控制成本最小的控制解 u ，使得系统当前有解且满足基态运行约束，每个故障后都有静态平衡点且满足故障下的运行约束，当前及其故障后系统在更高的负荷水平 $\lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{req}}$ 下也有解。这是唯一的可以

封闭表达的静态稳定控制问题表达式。如果不采用基于一个预定方向的负荷裕度指标,如采用最小奇异值指标等,则无法写出上述封闭的解析表达式。

这是一个非常复杂的非线性规划问题,可采用 Benders 分解法将它划分为若干个普通最优潮流问题来分层迭代求解。这里仅研究它的一个子问题,即采用了如下两个假设:首先,令 $\Delta\lambda_{\text{req}}$ 为零,从而忽略了负荷水平 $\lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{req}}$ 下的等式约束。这是因为它可以通过一个独立的静态稳定增强控制来解决,由于可以应用灵敏度方法,这个问题相对容易处理。其次,假设式中不等约束可以通过静态安全校正来实现。这样电压稳定预防控制问题的表达式简化为

$$\begin{aligned} & \text{Min } C(u) \\ & \text{s. t. } f(x, u, \lambda_0) = 0 \\ & f_i(x_i, u, \lambda_0) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_c \end{aligned} \quad (5-2)$$

将此问题转化为如下等价问题,即

$$\begin{aligned} & \text{Min } C(u) \\ & \text{s. t. } f(x, u) = 0 \\ & \lambda_{i,\max}(x_i, u) > 1 \quad i = 1, 2, \dots, n_c \end{aligned} \quad (5-3)$$

式中, $\lambda_{i,\max}$ 为失稳故障 i 的故障裕度指标,它是运行点 (x, u) 的函数。

由于无法写出 $\lambda_{i,\max}(x, u)$ 的显式解析表达式,从而无法直接计算。基于它对控制的灵敏度并略去高阶项,可写出如下等价的线性不等式约束:

$$\lambda_{i,\max}(x_0, u_0) + S_i \Delta u \geq 1.0 \quad i = 1, 2, \dots, n_c \quad (5-4)$$

式中, S_i 为故障 i 对应的灵敏度矢量。

因此,电压稳定预防控制问题可以分解为一个电压稳定临界点及其控制灵敏度的求解问题和一个基于此灵敏度的优化控制子问题的交替迭代求解问题。下面首先介绍等价问题式 (5-3) 的模型,即所谓故障型连续潮流模型和表达式。

2) 故障型连续潮流。

由于多重复杂故障可以看作是由多个单一故障叠加而成的,而单一故障其实是多重复杂故障的一些特殊情形。所以为简单起见,先给出几种典型单一故障的参数化潮流方程。

① 单个发电机退出的参数化。

假设节点 i 处的发电机退出运行,则相应的参数化后的节点潮流方程为

$$\begin{aligned} P_{Gi}(1 - \lambda) - P_{Di} - U_i \sum_{j \in I} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - U_i^2 G_{ii} &= 0 \\ (1 - \lambda) Q_{Gimax0} &\leq Q_{Gi} \leq (1 - \lambda) Q_{Gimin0} \end{aligned} \quad (5-5)$$

式中, G_{ij} 、 B_{ij} 为导纳阵中的互导和互纳; G_{ii} 为节点 i 的自导; θ_{ij} 为节点 i 和 j 之间的相角差; U_i 、 U_j 为节点 i 和 j 的电压幅值; P_{Gi} 、 P_{Di} 分别为节点 i 处的发电机有功和有功负荷; Q_{Gimax0} 、 Q_{Gimin0} 分别为发电机初始的无功输出限值; Q_G 为发电机无功

输出； I 表示所有与节点 i 相关的节点集合。发电机的实际无功输出限值将随参数 λ 变化而变化，节点 i 的类型会在计算中发生 PVPQ 转化。当参数 $\lambda = 0$ 时，节点潮流方程就是发电机 i 未发生故障时的潮流方程；当参数 $\lambda = 1$ 时，节点潮流方程就是发电机 i 被移除后的潮流方程。

② 单个并联电容器（或电抗器）退出的参数化。

假设节点 i 处的电容器发生故障，则相应的参数化后的节点潮流方程为

$$Q_{Si}(1 - \lambda) - Q_{Di} - U_i \sum_{j \in I} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + U_i^2 B_{ii} = 0 \quad (5-6)$$

式中， Q_{Si} 为故障前电容器的容量； B_{ii} 为节点 i 的自纳； Q_{Di} 为节点 i 的无功负荷。当参数 $\lambda = 0$ 时，节点潮流方程就是电容器 i 未发生故障时的潮流方程；当参数 $\lambda = 1$ 时，节点潮流方程就是电容器 i 被移除后的潮流方程。

③ 单个负荷退出的参数化。

假设节点 i 处的负荷发生故障退出运行，则相应的参数化后的节点潮流方程为

$$\begin{aligned} P_{Gi} - P_{Di}(1 - \lambda) - U_i \sum_{j \in I} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - U_i^2 G_{ii} &= 0 \\ Q_{Si} - Q_{Di}(1 - \lambda) - U_i \sum_{j \in I} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + U_i^2 B_{ii} &= 0 \end{aligned} \quad (5-7)$$

当参数 $\lambda = 0$ 时，节点潮流方程就是负荷 i 未发生故障时的潮流方程；当参数 $\lambda = 1$ 时，节点潮流方程就是负荷 i 被移除后的潮流方程。

④ 单个支路退出的参数化。

假设支路 $i-m$ 发生故障退出运行，则相应的节点 i 处的参数化潮流方程为

$$\begin{aligned} P_{Gi} - P_{Di} - U_i \sum_{j \in I, j \neq m} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - U_i U_m (G_{im}(1 - \lambda) \cos \theta_{im} + \\ B_{im}(1 - \lambda) \sin \theta_{im}) - U_i^2 G_{ii}^{\text{new}} &= 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Di} - U_i \sum_{j \in I, j \neq m} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - U_i U_m (G_{im}(1 - \lambda) \sin \theta_{im} - \\ B_{im}(1 - \lambda) \cos \theta_{im}) + U_i^2 B_{ii}^{\text{new}} &= 0 \end{aligned} \quad (5-8)$$

式中， $G_{ii}^{\text{new}} = G_{ii} + \lambda G_{im}$ ； $B_{ii}^{\text{new}} = B_{ii} + \lambda (B_{im} - b_{im0})$ ； G_{ii} 和 B_{ii} 为支路 $i-m$ 未发生故障时的系统导纳阵的自导纳。同样的，节点 m 处的参数化潮流方程也容易推导出。当 $\lambda = 0$ 时，节点潮流方程就是支路 $i-m$ 未发生故障时的潮流方程；当参数 $\lambda = 1$ 时，节点潮流方程就是支路 $i-m$ 被移除后的潮流方程。

⑤ 多重复杂故障的参数化。

多重复杂故障的系统参数化潮流方程就是上述几种情形的线性叠加。此处仅仅采用了一个参数 λ ，当参数 $\lambda = 0$ 时，节点潮流方程就是系统未发生故障时的静态潮流方程；当参数 $\lambda = 1$ 时，节点潮流方程就是系统所有故障设备被移除后的静态潮流方程。必须说明的是，这里故障造成系统解列成岛的情形已经被排除了。一般

地讲, 变压器支路故障可能造成少数发电机或负荷节点从系统中解列出来。处理的办法是考虑这些节点上的注入型设备的故障退出, 而忽略考虑该条支路的故障。至于一些极端故障将系统解列为两个或两个以上独立运行系统的情况, 需要另外的工具检讨故障后几个独立岛的电压稳定性。

为简化起见, 用式 (5-9) 来表示参数化后的系统潮流方程:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad x \in R^n, \lambda \in R, 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (5-9)$$

式中, $\lambda \in R$ 是故障参数; $f: R^n \times R \rightarrow R^n$ 为 n 维潮流方程。要研究一个多重故障发生后对于系统的非线性影响, 就是要观察当参数 λ 从 0 变到 1 的过程中系统状态变量 x 的变化。

从式 (5-9) 容易看出, f 在区间 $[0, 1]$ 上是关于 λ 的连续函数, 同时也是分段可微函数。之所以是分段可微函数, 是因为实际的潮流方程还必须满足一个函数不等式约束, 即发电机无功出力的上下限值约束。如下式:

$$Q_{gimin} \leq Q_{gi}(x, \lambda) \leq Q_{gimax} \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (5-10)$$

式中, ng 为发电机数目; Q_{gimax} , Q_{gimin} 分别为发电机的无功输出限值。虽然潮流计算和连续潮流计算中都必须满足上式, 但是通常它并不出现在对式 (5-10) 微分的推导中, 因为它是通过潮流计算中的一个启发式的逻辑 (即 PVPQ 转换逻辑) 来实现的。

潮流问题是多解的, 是由一个稳定解和多个不稳定解组成的。因此一个关键问题是如何跟踪系统的解曲线, 以使得它由初始的稳定运行解很好的沿着稳定解曲线前进, 而不会在各组解之间来回跳动。连续方法作为一种具有此性质的方法已经得到了广为应用。这样, 如果故障后系统存在一个静态稳定运行解 (即 $\lambda = 1$ 的解), 则该模型跟踪得到的就是这个解; 如果不存在, 则多重复杂故障系统参数化模型必然得到一个 λ 小于 1 的分岔点。

采用拟弧长参数化方法来扩展系统方程, 扩展后的方程如下:

$$\begin{cases} f(x^j, \lambda^j) = 0 \\ (x^j - x^{j-1})^T \dot{x}^{j-1} + (\lambda^j - \lambda^{j-1}) \dot{\lambda}^{j-1} - \Delta s = 0 \end{cases} \quad (5-11)$$

式中, 第二个方程是一维拟弧长参数化方程, 它可以保证扩展雅克比矩阵在鞍结型分岔点是非奇异的; 上标 j 表示待求点; $j-1$ 表示前一个解点, 是已知量; λ^{j-1} 表示参数 λ 对弧长在前一点的偏导数; \dot{x}^{j-1} 表示状态变量 x 对弧长在前一点的偏导矢量; Δs 是计算步长, 具有拟弧长的意义。忽略上标, 其相应的扩展雅克比矩阵为

$$\begin{bmatrix} f_x(x, \lambda) & f_\lambda(x, \lambda) \\ \dot{x} & \dot{\lambda} \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

当 f_x 奇异时, 上述矩阵是非奇异矩阵。

⑥ 虚拟的静态稳定临界点。

对上述问题的计算中, 如果可以找到 $\lambda \geq 1$ 的运行点, 则计算终止。可以得出结论, 该故障是个安全故障, 如图 5-3 中故障 1; $\lambda = 1$ 对应的潮流解就是系统故障后的静态潮流解。如果在 λ 小于 1 时, 系统就到达鼻点, 即 $\lambda_{\max} < 1$, 则可以判断该故障是一个失稳故障, 因为系统不可能存在一个故障后的稳态潮流解, 如图 5-3 中故障 2 所示。此时 λ_{\max} 对应的系统运行点 x^* , 称为虚拟的静态稳定临界点。

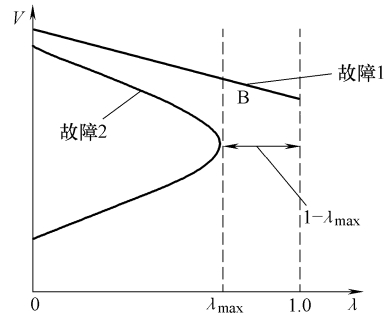


图 5-3 故障连续潮流的 λ - V 曲线

这个静态稳定临界点可能是鞍结型分岔点, 也可能是约束诱导型分岔点, 因为在连续潮流计算中要满足式 (5-10)。

这个静态稳定临界点 B 与负荷型连续潮流得到的静态稳定临界点不同, 后者具有较为清晰的物理意义, 而前者则没有明确的物理意义。因为系统实际故障及切除时的过渡过程, 并不一定是沿着上述模型所描绘的轨迹进行的。但是, 没有明确的物理意义, 并不意味着它没有研究价值。因为判别一个故障是否会造成系统的静态稳定的失去, 只是研究的第一步。由该模型所得到的虚拟的静态稳定临界点能很好地给出了这些信息。

⑦ 故障失稳裕度指标。

用故障连续潮流工具可以得到节点电压幅值随故障参数变化的鼻值曲线, 如图 5-3 所示。横坐标是故障参数 λ , 纵坐标是某一节点的电压幅值。当 $\lambda = 0$ 时, 系统 $f(x, \lambda) = 0$ 表示基态电力系统。图 5-3 中故障 1 为安全故障, 故障 2 为失稳故障。一个评价电力系统故障情况下静态失稳程度的指标, 称为故障失稳裕度 λ_{\max} 。该指标仅在小于 1 时存在意义。这里可以有一个基本假设, λ_{\max} 越小, 故障越严重; λ_{\max} 越接近于 1, 故障越轻微。如果能采用一些控制措施来将这一故障失稳裕度提高 $1 - \lambda_{\max}$, 那么这个潜在的失稳故障就能被消除。

尽管由故障连续潮流得到的静态稳定临界点并不具有负荷连续潮流得到的静态稳定临界点所具有的物理性质, 因此是一个虚拟的崩溃点。但是它仍然可以提供各种控制对于故障失稳裕度的灵敏度信息。

3) 静态稳定预防控制问题。

目标函数采用下式:

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^{n_{\text{type}}} w_i \sum_{j=1}^{n_i} (c_j^+ \Delta u_j^+ + c_j^- \Delta u_j^-) \quad (5-13)$$

构造一个线性规划优化控制子问题, 其中关于灵敏度的约束条件有:

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^{n_{\text{ct}}} S_{ij} \Delta u_j \geq 1.0\alpha - \lambda_{i,\max}(x_0, u_0) \quad i = 1, 2, \dots, n_{\text{ct}} \quad (5-14)$$

式中, S_{ij} 表示在故障 i 时控制变量 j 对于故障失稳裕度 λ_i 的灵敏度; α 是补偿因子, 一般取为 (1.001 ~ 1.01)。

预防稳定控制中各类控制的参与情况, 不仅反映了系统稳定的严重程度, 而且会给电力市场的参与各方带来十分敏感的经济信号和切身的利益得失。

① 灵敏度的列式。

在故障型连续潮流工具的基础上, 采用基于故障型连续潮流的虚拟稳定临界点的灵敏度方法进行预防控制。稳定临界点的计算可以采用直接方法, 这样特征矢量可以与临界点同时得到。但由于故障参数化潮流模型不具有所谓参数解耦的性质 (就是无法写为 $f(x, \lambda) = f(x) + \lambda D$ 的形式), 所以通过变量代换进行矩阵降阶的方法就无法使用了。这样, 由于初值很难确定, 收敛域未知和矩阵稀疏性的破坏等因素, 直接方法在此处不是最好的选择。此处的稳定临界点的计算采用一种间接方法, 即采用连续潮流跟踪解曲线与测试函数判断且修正步长的方法。系统的参数化潮流方程为

$$F(x, \lambda, p) = \begin{pmatrix} f(x, \lambda, p) \\ e(x, \lambda, p) \end{pmatrix} = 0 \quad (5-15)$$

式中, $p \in R^m$ 是控制变量矢量。由于要考虑发电机无功输出上下限值约束, 方程 $f(x, \lambda, p) = 0$ 是一个连续但不可微的函数。

② 鞍结型分岔点。

在分岔点故障参数 λ 对于控制矢量的导数, 也就是灵敏度可以写为

$$\lambda_p|_* = \frac{\Delta \lambda}{\Delta p} = \frac{-w' F_p|_*}{w' F_\lambda|_*} \quad (5-16)$$

因此, 在电压崩溃点的一个邻域内, 如果已知灵敏度, 则可以用下式来估计故障参数 λ 的变化量:

$$\Delta \lambda = \lambda_p|_* \Delta p \quad (5-17)$$

由式 (5-16) 可以看出, 灵敏度计算的关键在于扩展非零左特征矢量 w' 的计算。一旦求得 w' , 全部灵敏度的计算是非常容易的。可以用下面公式来求扩展的左特征矢量 w' :

$$w'^T = \left[\begin{array}{cc} f_X^T & e_X^T \\ f_\lambda^T & e_\lambda \end{array} \right] \bigg|_*^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5-18)$$

特征矢量 w 的计算就是形成转置的扩展雅可比矩阵及其因子化, 加上一次前代和回代的计算量。

③ 约束诱导型分岔点。

如果分岔点 (x_*, λ_*, p_*) 是一个约束诱导型分岔点, 扩展后的系统方

程为

$$F(x, \lambda, p) = \begin{bmatrix} f(x, \lambda, p) \\ U_k - U_{k, \text{set}} \end{bmatrix} = 0 \quad (5-19)$$

式中, $U_k \in X$ 为节点 k 的电压幅值, $U_{k, \text{set}}$ 为该点电压的设定值。 $F_x|_*$ 的维数是 $(n+1) \times n$, 它的秩为 n 。约束诱导分岔点的灵敏度公式与鞍结型分岔点完全相同。但是这里必须注意的是: 在约束诱导型的分岔点, 不是 f_x 奇异, 而是 F_x 奇异。然而, 在连续潮流求解过程中, 不是用上面的 $e(x, \lambda, p) = U_k - U_{k, \text{set}}$ 来扩展方程的, 仅仅在遇到和识别这种分岔点后, 采用这一方法来计算它的左特征矢量而已。

两种不同分岔点公式的形式一样, 但 F 和 w' 的含义不同。

下面给出左特征矢量的计算方法:

$$w^T = -e_x^T |_* (f_x^T |_*)^{-1} \quad (5-20)$$

④ 算法流程。

下面给出静态稳定预防控制方法的步骤。

步骤 1: 对于失稳故障集中的每个故障, 计算控制对于故障失稳裕度的灵敏度。对部分临近失稳的故障, 进行校验。如果失稳, 则进入参与故障集, 计算裕度和灵敏度。

a) 对每个失稳故障, 用故障连续潮流求取虚拟的静态稳定临界点 (x_*, u_*) 和故障失稳裕度 $\lambda_{i, \text{max}}$ 。如果所有的 $\lambda_{i, \text{max}}$ 都大于 1, 则转入步骤 4。

b) 对每个故障, 计算临界点处故障失稳裕度指标 $\lambda_{i, \text{max}}$ 对于各种控制变量的灵敏度。对于 $\lambda_{i, \text{max}} > 1$ 的故障, 即经控制后变为安全的故障, 采用上次迭代计算的灵敏度。

步骤 2: 构造和求解线性规划控制子问题。

a) 根据灵敏度信息来选择参与控制集, 构造线性规划控制子问题。

b) 求解线性规划控制子问题, 得到一组优化控制解 Δu 。

c) 控制解 Δu 的协调化处理, 如离散控制变量的离散处理。并联的多台变压器应该一起参与控制且控制量相同, 如果并联中的 1 台被调整了, 则另外几台也应相应调整。

步骤 3: 对系统施加控制后转到步骤 1。

步骤 4: 计算控制后系统在基态及其原失稳故障下的稳定裕度。

2. 基于非线性规划法的静态电压稳定预防控制

(1) 多预想故障静态电压崩溃预防控制的数学描述

多预想故障静态电压崩溃预防控制的目标是在满足正常运行条件的可行性及各预想故障条件下的电压稳定裕度要求的前提下, 使电网的综合控制成本最小, 其数学模型包括如下三个部分。

1) 目标函数。

自动电压调节 (AVR) 机组取受控制节点的电压幅值作为控制量, 取无功出力作为控制量, 并联无功补偿设备取并联电纳作为控制量, 主变压器分接头取标么电压比作为控制量, 负荷取切负荷比例作为控制量, 则多预想故障静态电压崩溃预防控制的目标函数可描述为如下的最小化综合控制成本:

$$\min \left\{ \sum_{i \in S_{AVR}} w_{vi} (U_i^0 - U_i^c)^2 + \sum_{i \in S_{AQR}} w_{qi} (Q_{Gi}^0 - Q_{Gi}^c)^2 + \sum_{i \in S_C} w_{ci} (B_i - B_i^c)^2 \right. \\ \left. + \sum_{i \in S_T} w_{ti} (T_i - T_i^c)^2 + \sum_{i \in S_L} w_{li} P_{Li}^0 L_i \right\} \quad (5-21)$$

式中, w_{vi} 、 w_{qi} 、 w_{ci} 、 w_{ti} 和 w_{li} 分别为电压控制、无功控制、并联补偿设备投切控制、有载调压变压器分接头调节和切负荷控制的权重; U_i 、 Q_{Gi} 、 B_i 、 T_i 、 P_{Li} 和 L_i 分别为节点 i 的电压幅值、节点 i 的电源无功注入、节点 i 的并联电纳、有载调压变压器抽头 i 的标么电压、节点 i 的有功负荷及切负荷比例; 上标 c 表示电网当前的实际运行状态; 上标 0 表示预防控制后电网的正常运行状态; S_{AVR} 为自动电压调节 (AVR) 机组的控制目标节点集; S_{AQR} 为自动无功调节 (AQR) 机组的机端节点集; S_C 为并联补偿设备的集合; S_T 为有载调压变压器的集合; S_L 为负荷节点集合。

一般切负荷的成本比其他控制手段要大得多; 有载调压变压器及并联补偿设备的调节成本次之; 机组无功出力或电压的调节成本则相对较小。在多预想故障静态电压崩溃预防控制中, 由于除切负荷之外的各种控制手段均存在上调或下调的可能性, 因此采用二次方形式的控制成本函数较为方便; 而切负荷只存在上调的可能性, 既可以采用二次方形式的控制成本函数, 也可以采用线性控制成本函数; 由于二次方形式的控制成本倾向于对每个量进行小的调整, 为避免不必要的切负荷, 采用线性控制成本较为合适。

目标函数中权重的具体取值可根据现场需要进行调整。一般情况下, w_{vi} 和 w_{qi} 取较小值, 如 0.1; w_{ci} 和 w_{ti} 取较大的值, 如 1.0; 而 w_{li} 取更大的值, 如 10.0。

2) 正常运行条件的可行性约束。

预防控制后系统的正常运行状态需要满足潮流平衡方程约束, 各控制量需要满足相应的可行性约束, 这些约束条件可简要描述如下:

$$\left\{ \begin{array}{ll} P_{Gi}^0 - P_{Li}^0 (1 - L_i) - \sum_{j \in S_N} P_{ij}^0 (U^0, \theta^0, B, T) = 0 & i \in S_N \\ Q_{Gi}^0 - Q_{Li}^0 (1 - L_i) - \sum_{j \in S_N} Q_{ij}^0 (U^0, \theta^0, B, T) = 0 & i \in S_N \\ \underline{Q}_{Gi}^0 \leq Q_{Gi}^0 \leq \overline{Q}_{Gi}^0 & i \in S_G \\ \underline{U}_i^0 \leq U_i^0 \leq \overline{U}_i^0 & i \in S_N \\ \underline{B}_i \leq B_i \leq \overline{B}_i & i \in S_C \\ \underline{T}_i \leq T_i \leq \overline{T}_i & i \in S_T \\ 0 \leq L_i \leq \overline{L}_i & i \in S_L \end{array} \right. \quad (5-22)$$

式中, 等式约束为潮流平衡方程约束, 5 组不等式约束分别为节点无功注入、节点电压幅值、并联无功补偿设备的电纳、有载调压变压器抽头的标幺电压比和切负荷比例的上、下限约束; P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点 i 的有功和无功注入; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 的有功负荷和无功负荷; U 、 θ 分别为节点电压幅值矢量和节点电压相位矢量; B 、 T 分别为控制量 B_i 和 T_i 构成的相应矢量; S_N 表示所有节点集; S_C 表示发电机机端节点集。

3) 预想故障条件的电压稳定裕度约束

对于电压崩溃预防控制问题, 要求电网在正常运行及预想故障条件下均具有相应的电压稳定裕度, 为说明方便, 将正常运行条件看做是预想故障的一个特例。

对于电压崩溃预防控制问题, 要求预防控制后, 在正常运行状态的基础上发生预想故障, 在不施加新控制措施的前提下, 系统仍具有期望的电压稳定裕度。这就要求各控制量在预想故障后保持为正常运行状态值, 即各 AVR 机组的电压设定值、各 AQR 机组的无功设定值、各并联无功补偿设备的并联电纳、各有载调压变压器抽头的标幺电压比、各负荷的切负荷比例均保持不变。

设预想故障集为 S_K , 对于任意预想故障 $k \in S_K$, 电压稳定裕度约束可简要描述如下:

$$\left\{ \begin{array}{ll} P_{Gi}^k - (1 + \lambda^k) P_{Li}^0 (1 - L_i) - \sum_{j \in S_N} P_{ij}^k (U^k, \theta^k, B, T) = 0 & i \in S_N \\ Q_{Gi}^k - (1 + \lambda^k) Q_{Li}^0 (1 - L_i) - \sum_{j \in S_N} Q_{ij}^k (U^k, \theta^k, B, T) = 0 & i \in S_N \\ \underline{Q}_{Gi}^k \leq Q_{Gi}^k \leq \overline{Q}_{Gi}^k & i \in S_C \\ \underline{U}_i^k \leq U_i^k \leq U_i^0 & i \in S_{AVR} \end{array} \right. \quad (5-23)$$

X^k 为预想故障 k 对应的静态电压稳定裕度的期望值; 等式约束为第 k 个预想故障条件下负荷增长 X^k 比例后的潮流平衡方程, 与后续的不等式约束一起共同保证了负荷增长 X^k 比例后运行状态的可行性, 事实上这保证了相应故障条件下电网的静态电压稳定裕度至少为 X^k ; 两个不等式约束分别表示预想故障条件下发电机无功出力 and AVR 控制节点电压的约束条件。由于预想故障前后控制量不进行调整, AVR 控制目标电压设定值维持不变, 故 AVR 控制点的实际电压不应高于正常运行电压 V_i^0 , 其中 X 表示未知数。

对于静态电压稳定问题, 机组的有功出力调节一般按以下两种方式处理: ①有功负荷及有功网损的变化均由平衡机承担; ②有功负荷的变化由指定的一台或多台机组按预定比例分摊, 有功网损的变化则由某一指定的平衡机承担。对于上述任意一种有功调节方式, 非平衡机的有功出力 P_{Gi}^k 只与 X^k 有关, 在电压崩溃预防控制问题中为已知值。

(2) 电压崩溃预防控制的计算方法

前文所给的目标函数式 (5-19)、正常运行条件的可行性约束式 (5-20) 及预想故障条件的电压稳定裕度约束式 (5-21) 构成了多预想故障静态电压崩溃预防控制问题的完整描述。这是一个多运行方式联合优化问题, 运行状态数为预想故障数加 1。

对于实际电网的在线电压崩溃预防控制问题, 预想故障集一般包括正常运行方式、元件 $N-1$ 开断及少数多重元件开断, 其规模一般较大。如果不对预想故障集加以筛选, 则问题的计算规模将相当可观, 且随着电网规模的增大, 预想故障集的规模将随之增大, 计算规模将近似以节点数二次方的数量级迅速增大。对于这样复杂的大规模非线性规划问题, 直接求解即使可能, 其所需要的内存空间及 CPU 时间也将是巨大的, 难以满足在线多预想故障电压崩溃预防控制的要求。

借鉴规划领域积极约束集策略的思想, 可以根据最优解处预想故障的电压稳定裕度约束是否实际起作用, 将预想故障区分为积极约束故障和非积极约束故障。由积极约束故障构成的集合称为积极约束故障集, 记为 S'_k 。显然, 对于任意的预想故障集 S , 若有 $S'_k \subseteq S \subseteq S_k$, 则采用 S 替代式 (5-21) 中的 S_k , 对于预防控制问题的解没有影响。虽然在求得预防控制问题的最优解前无法确切知道积极约束故障集, 但可以利用当前运行状态下各预想故障的电压稳定分析结果估计积极约束故障集的大致范围, 即关键预想故障集, 记为 S''_k 。

根据上述分析, 可采用下述方法求解多预想故障静态电压崩溃预防控制问题:

①对预想故障集进行扫描, 逐一计算各预想故障条件下的电压稳定裕度; ②若所有预想故障均能满足裕度要求, 当前解即为原问题的最优解, 计算结束; ③以裕度分析结果为基础对预想故障集进行筛选, 确定关键预想故障集 S''_k ; ④将式 (5-21) 的全预想故障集 S_k 替换成关键预想故障集 S''_k , 然后对式 (5-19) ~ 式 (5-21) 进行多运行方式联合优化求解; ⑤根据步骤④中给出的预防控制策略调整电网的运行状态; ⑥重复步骤①~⑤, 直至所有预想故障均能满足裕度要求时终止。

多预想故障静态电压崩溃预防控制算法的流程图如图 5-4 所示。

在预想故障集的选择方面, 对于并联

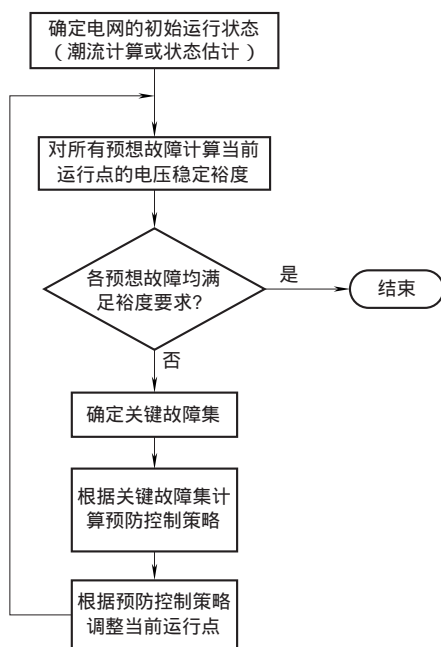


图 5-4 电压崩溃预防控制算法的流程图

线路或并列主变压器, 只将初始潮流较大的元件加入预想故障集, 以减小预想故障集的规模, 进而减小静态电压崩溃预防控制问题求解的计算量。

关键预想故障集的生成策略是上述算法成败的重要环节。增大关键预想故障集的规模, 可以较好地保证关键预想故障集包含积极约束故障集, 减少外循环的次数, 但过大的关键预想故障集规模将使多运行方式联合优化求解的计算量大大增加, 反而降低算法的总体执行效率; 减小关键预想故障集的规模, 可以减小针对关键预想故障集的预防控制问题的计算规模, 但可能因关键预想故障集没能完全包含所有的积极约束故障而增加外循环的次数。

关键预想故障集的选择原则是在尽可能包含所有积极约束故障的同时尽可能地缩小其范围, 可采用如下的关键预想故障集生成策略: ①对于第一次外循环, 若不满足裕度要求的预想故障不超过一定数目 M , 取所有不满足裕度要求的预想故障构成关键预想故障集, 否则取实际裕度与期望裕度之差最小的 M 个预想故障构成关键预想故障集; ②对于后续循环, 直接取所有不满足裕度要求的预想故障构成关键预想故障集。

对于实际电力系统的多预想故障静态电压崩溃预防控制问题, 积极约束故障集的规模一般较小 (绝大多数情况下为 1), M 取 3~6 即可获得较好的效果。

多预想故障静态电压崩溃预防控制问题本质上是一个静态非线性规划问题, 多运行方式联合优化算法可以采用原对偶内点法或预测校正原对偶内点法, 具体算法和公式这里不再赘述。

5.1.2 基于电压稳定约束的智能 AVC 控制方法的研究

1. 基于电压稳定约束的智能 AVC 电压及动态无功储备下限计算方法

从系统的运行实践和经验来说, 当全网的电压水平足够高时, 一般能保证系统在正常和预想故障方式下具有期望的电压稳定裕度。随着电压水平的下降, 系统的电压稳定裕度逐渐减小, 最终可能导致系统在某一预想故障条件下电压稳定裕度不足甚至电压失稳。故协调方案之一是给出保证系统具有期望电压稳定裕度的 AVC 控制电压下限。

另一方面, 相对于并联补偿的电容器、电抗器, 发电机的动态无功具有响应快速, 调节平稳等优势。国际上已发生的电压失稳事故表明, 发电机无功储备耗尽导致的发电机过励保护动作, 引起的机端或高压母线电压失控, 是故障后系统电压失稳形成、扩散, 乃至发生系统电压崩溃的重要因素之一。故保留足够的发电机动态无功储备是遏制系统故障后电压崩溃事故突发的有效措施之一。然而保留过多的发电机动态无功储备, 不充分利用已有的发电机无功容量显然是不经济和不合理的, 其对策是通过电压稳定分析, 给出系统在正常和所有故障方式下满足期望电压稳定裕度的最小无功储备。

一般来说, 发电机无功出力增大 (无功储备减少), 将使电压稳定裕度减少。故障后, 如果并联电容不能及时投入, 则发电机动态无功储备将决定电压稳定的程度。在电网的实际运行中, 发电机动态无功储备可分为两部分: 一部分是为保证电网的安全运行而预留的必需的无功储备; 另一部分是由于电网的当前实际无功需求不足而多出来的不必要的无功储备。在计算发电机最小动态无功储备时应剔除不必要的无功储备。根据这一思想, 可在发电机机端添加虚拟的无功负荷, 以吸收多余的无功储备, 并保证在所有预想故障条件下, 仅依靠发电机的动态无功储备, 就能满足期望的电压稳定裕度。

根据上述分析, 电压稳定约束的 AVC 控制电压及动态无功储备下限计算问题的数学模型可简要描述如下:

$$\min f(U^0) - \sum_{i \in S_G} W_{Si} Q_{Si} \quad (5-24)$$

$$\begin{cases} P_{Gi}^0 - P_{Li}^0 - \sum_{j \in S_N} P_{ij}^0(U^0, \theta^0) = 0 & i \in S_N \\ Q_{Gi}^0 - Q_{Li}^0 - Q_{Si} - \sum_{j \in S_N} Q_{ij}^0(U^0, \theta^0) = 0 & i \in S_N \\ \underline{Q}_{Gi}^0 < Q_{Gi}^0 < \overline{Q}_{Gi}^0 & i \in S_G \\ 0 < Q_{Si} < \overline{Q}_{Gi}^0 & i \in S_G \\ \underline{U}_i^0 < U_i^0 < \overline{U}_i^{\text{current}} & i \in S_N \end{cases} \quad (5-25)$$

$$\begin{cases} P_{Gi}^k - (1 + \lambda^k) P_{Li}^0 - \sum_{j \in S_N} P_{ij}^k(U^k, \theta^k, B, T) = 0 & i \in S_N \\ Q_{Gi}^k - (1 + \lambda^k) Q_{Li}^0 - Q_{Si} - \sum_{j \in S_N} Q_{ij}^k(U^k, \theta^k, B, T) = 0 & i \in S_N \quad k \in S_K \\ \underline{Q}_{Gi}^k < Q_{Gi}^k < \overline{Q}_{Gi}^k & i \in S_G \\ \underline{U}_i^k < U_i^k < U_i^0 & i \in S_{AVR} \end{cases} \quad (5-26)$$

式中, Q_{Si} 表示拓扑点 i 的虚拟无功负荷; 目标函数 $f(U^0)$ 应保证在电压控制域内是单调递增的, 以使上述优化问题的目标总体上倾向于降低控制点的电压水平。

由于电压水平的下降存在下降方向的问题, 即从某一较高的初始电压水平沿着不同的方向降低控制点的电压, 均可给出相应的电压下限。遗憾的是, 若在上述优化问题中指定电压的下降方向, 各控制点的电压幅值将耦合在一起, 严重破坏海森矩阵的稀疏性, 所需的内存空间及 CPU 时间在实际系统中都将是难以承受的。出于算法性能的考虑, 我们不指定电压的确切下降方向, 而是通过选择不同的目标函数来影响电压的下降方向。实用中, 取下述的目标函数可获得较为合理的结果。

$$\min \sum_{i \in S_{AVR}} (U_i^0 - \underline{U}_i)^2 \quad (5-27)$$

采用上述的数学模型, 计算结果正常运行方式下的节点电压值即构成 AVC 控制电压下限, 正常运行方式下各机组的无功储备即为动态无功储备下限。当所有 AVC 控制点的电压都高于所给电压下限, 各机组实际无功储备均大于动态无功储备下限时, 可保证系统在正常和故障条件下均具有期望的电压稳定裕度。

由于电网的实际运行点一般为某一较优解, 若电网的当前实际运行点在正常和预想故障方式下均具有期望的电压稳定裕度, 给出的 AVC 控制电压及机组动态无功储备下限应保证当前实际运行点位于可行域内, 即所有 AVC 控制电压下限均应低于当前的实际电压, 所有发电机的无功储备下限均应低于当前的实际无功储备。

2. 计及电压稳定约束的智能 AVC 在线控制流程

传统 AVC 在控制中甚少涉及电压稳定问题, 智能 AVC 的在线控制则需要考虑了电压稳定和电压预防控制等问题, 控制流程如图 5-5 所示。

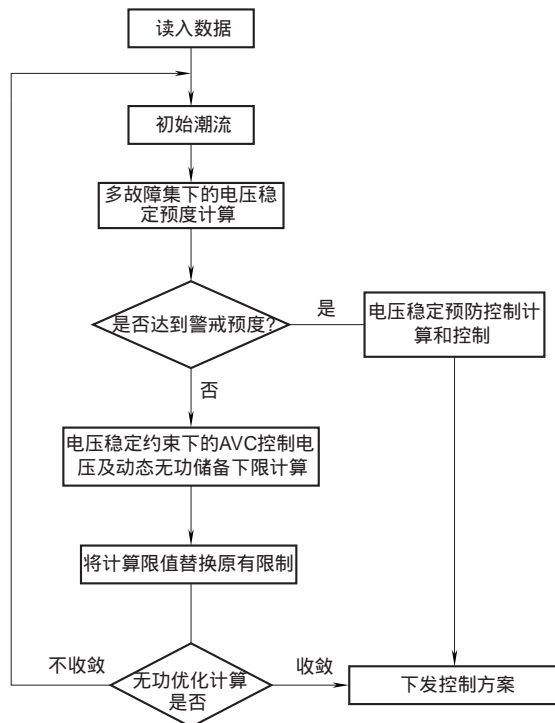


图 5-5 计及电压稳定约束的智能 AVC 在线控制流程

具体控制流程:

- 1) 首先读入电网数据和模型;
- 2) 进行初始潮流的计算;
- 3) 进行电压稳定预度计算;

- 4) 对当前电压稳定预度进行判断, 当电压稳定预度小于设定值时转入步骤 5), 如果电压稳定预度大于设定值, 则进行步骤 6);
- 5) 进行电压稳定预防计算和控制, 提高电压稳定预度;
- 6) 进行电压稳定约束下的 AVC 控制电压及动态无功储备下限计算;
- 7) 将计算的限值替换无功优化限制;
- 8) 进行无功优化计算, 如果计算收敛进入步骤 9), 否则进入步骤 2);
- 9) 下发控制方案。

5.2 智能 AVC 在线告警及评估的研究

5.2.1 在线智能告警分析的研究

传统 AVC 在告警和异常出现时只是给出告警或异常信息的结果并未给出产生告警或异常的原因, 导致了用户无法及时准确的定位这些问题产生的原因, 给用户处理一些极端情况带来困难。针对这种情况, 如果能对告警和异常的原因实时准确的给出问题的演推过程, 则能对一些异常问题采取及时有效的解决方法保证电网更加安全稳定运行。

1. 基于推理机的在线告警组合方式研究

(1) 推理机简介

推理机是专家系统中的重要组成部分, 它实现了专家系统中对知识的推理, 利用专家的经验知识, 用一定的推理方法, 推出结果。推理机构以某种推理策略, 在知识库中选择适用的知识, 再根据用户提供的问题进行推理, 得到用户需要的结论。推理就是不断改变工作存储器的过程, 从已知的事实出发, 通过与专家知识的匹配, 把适用的专家知识找出来, 取其后件, 然后将后件放入工作存储器中, 继续匹配。当然由于对问题的了解不足, 又会要求用户输入一些对问题求解有帮助的数据, 直到找到最终解。其推理过程如图 5-6 所示。推理控制是对知识的选择, 它直接决定着系统推理的效果和效率。

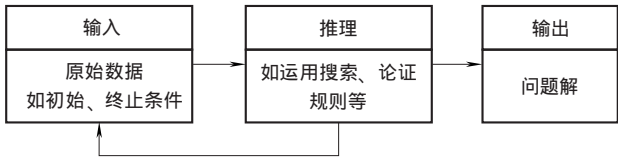


图 5-6 推理过程示意图

(2) 推理机控制策略的研究

推理的控制策略是求解问题时所使用的策略,它决定了求解问题的质量和求解问题的效率,主要由冲突消解策略和推理方向两部分构成。

1) 推理方向研究。

推理方向可以分为正向推理、反向推理、混合推理和双向推理四种,它确定了推理时所采用什么样的驱动方式。当然既然要推理,首先就得要求系统要有知识库用来存放专家知识,一个数据库来存放初始已知事实和问题状态,还需要一个对专家知识进行推理的推理机。下面详细介绍这四种推理方向。

① 正向推理。

正向推理用于断言那些与知识库中规则的前提相匹配的事实,并用找到的事实,进一步推断出新的事实。正向推理是从已知的信息出发,在知识库中选择合适的知识,然后将所选择的知识构成知识集,接着从知识集中选择一条知识,继续推理,将推出的结果作为继续推理的条件,如此反复,直到求出解为止。正向推理的详细处理过程如下:

- a) 通过判断断言一个事实,并送入数据库中;
- b) 使已经断言的事实与知识库中某个规则的前提按某种算法匹配;
- c) 将事实与前提进行合一替换;
- d) 将替换应用于规则的后件,即结论;
- e) 断言结果,并将其送入数据库中,应用于进一步的推理;
- f) 重复 a) ~ e) 步直到推出结果或知识库中再无可适用的知识为止。

正向推理算法如图 5-7 所示。

正向推理的主要缺点是在求解的过程中许多操作与问题求解无关,目标性不强,这样会造成系统的效率低,具有盲目性。在推理过程中,会推出一些与用户不相关的东西,这样推理的效率就会降低,不利于开发。正向推理的最大优点是系统能对用户输入的信息做出快速反应。正向推理中有一项重要工作就是在推理过程中要从知识库中选择可用的知识,而这就需要将知识库中的知识与数据库中的事实进行匹配,而匹配的问题是一个既复杂又重要的环节。

② 反向推理。

反向推理是以某个假设目标作为出发点的一种推理,用于判断用户查询一个事实是否为真,利用存在的一条规则,从知识库中的已知信息来判断查询。反向推理首先提出假设,然后判断所提出的假设是否是一个原始数据,依次检查相关知识是否可用,查看该知识应用的必要条件是否满足。这些必要条件要么已经满足,要么作为新的子目标再用上面的方法继续寻找相关知识,直到求出问题的解为止。反向推理的详细处理过程如下:

- a) 提出要证明的假设;
- b) 看该目标是否已经在已有的数据库中,看该目标是否成立;

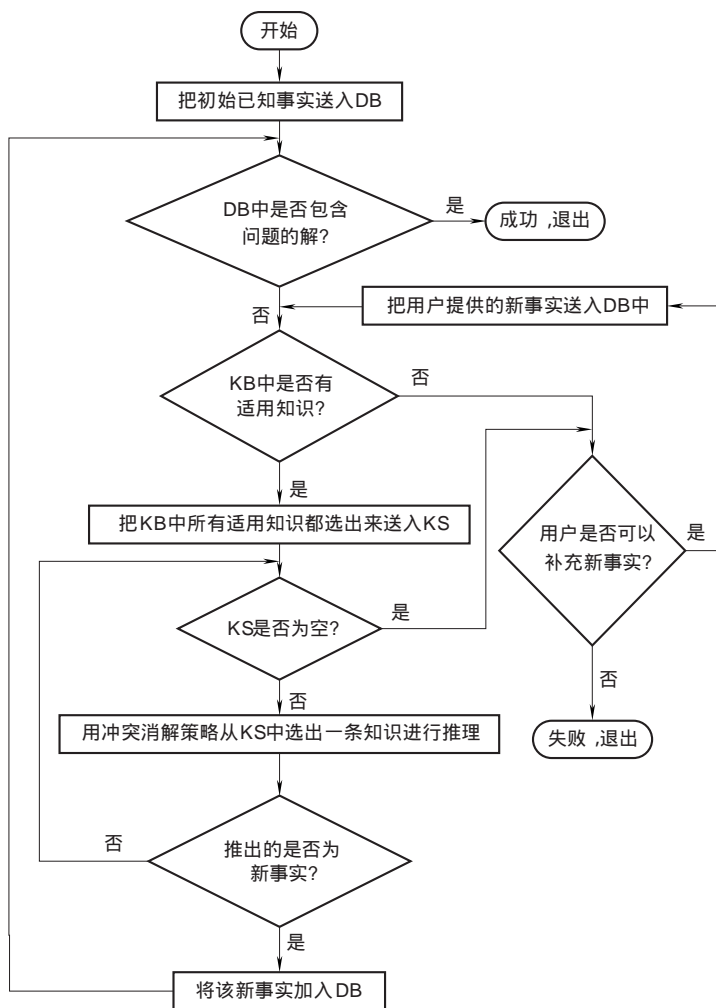


图 5-7 正向推理算法

- c) 查看该目标是不是证据，并做出判断；
- d) 从知识库中找出能推导出该目标的知识，然后由找出的知识形成知识集；
- e) 从知识集中选择一条知识，将选出的知识作为下一次的假设目标，然后到第二步，如此反复，直到求出解为止。

反向推理算法如图 5-8 所示。反向推理的主要缺点是盲目地对初始目标的选择，并不像正向推理那样能充分利用用户提供的信息；其主要优点是反向推理对知识的使用目标性极强，与目标无关的知识不必使用。

③ 混合推理。

针对正向推理在推理过程中目标性不强和反向推理在推理过程中盲目地选择目

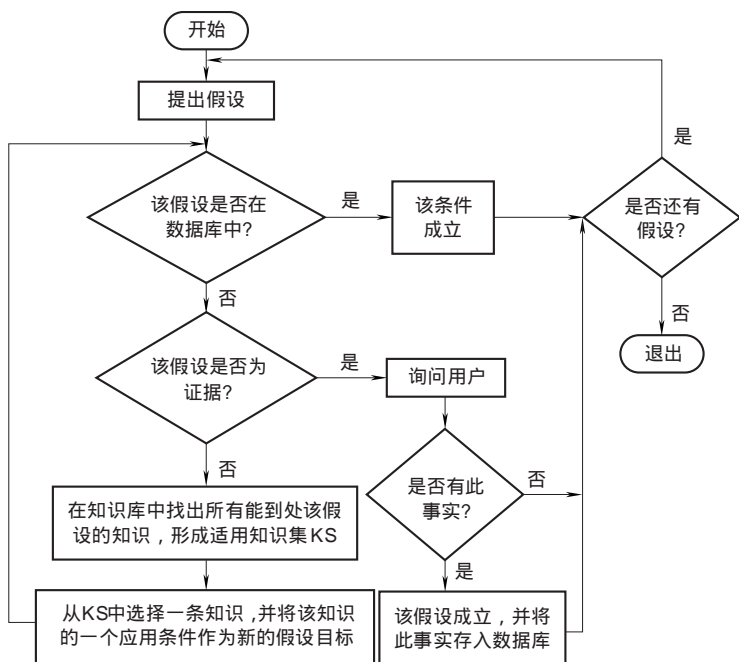


图 5-8 反向推理算法

标的各自缺点，混合推理在一定程度上综合利用正向推理和反向推理的各自优点，取长补短。混合推理一般为了选择初始目标，先用正向推理从初始事实中推导出部分结果，根据此结果选择一个目标，然后为求解该目标，用反向推理得到更多用户提供的信息，然后再用正向推理，可以求得的目标更接近，如此反复直到求出问题的解。混合推理分为两种情况：一种推理过程是先正向推理后反向推理的方法；另一种推理过程如图 5-9 所示是一种先反向推理后正向推理的方法。

混合推理的主要优点是综合了正向推理和反向推理各自的优点，整个求解的过程更容易理解。这种推理方式主要用于下面几种问题的求解：当工作存储器的初始事实不够，通过正向推理方式并不能满足知识库中任何一条规则的前件；通过初始条件看能不能查看其他存在的结论；在通过正向推理得出的结论可信度达不到期望效果的时候，利用反向推理来提高推理结果的可信度。其主要缺点是相比正、反向推理的控制策略更加复杂。混合推理一般用于求解复杂问题。

④ 双向推理。

双向推理控制策略是正向推理和反向推理的结合,这种推理方法改善正向推理不一定达到目标和通过反向推理不能推至初始事实的缺点,双向推理的成功就是能找到正向推理得出的中间结果满足反向推理的数据要求。但双向推理较难实现,原因主要有两点:一是怎样才能找到正向推理与反向推理结合点的问题;二是怎样才

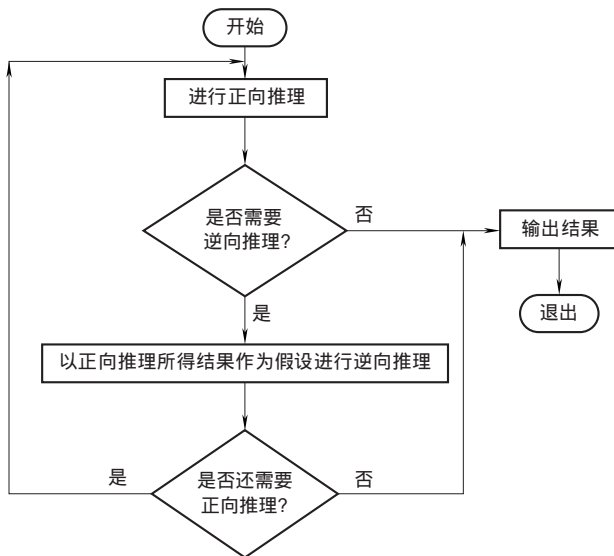


图 5-9 混合推理算法

能很好判断结合问题，也就是如何利用正向推理的中间结果去判断某个总体目标是否被满足，这是一个非常难解决的问题。由于上面的原因，在一般的专家系统的设计过程，使用双向推理策略的不多。

2) 冲突消除策略。

冲突消解策略解决的问题是，从多条可用知识中按某种方法选择一条知识。冲突消解策略即执行冲突消解过程所依据的原则。冲突消解的任务对正向推理和反向推理各不一样，在正向推理过程中，冲突消解将决定选择某一组事实来激活知识库中的某一条规则。在反向推理过程中，冲突消解将决定某一假设与知识库中某一规则后件进行匹配，根据此规则推出相应的前件作为新假设。比较常用的冲突消解策略有

- ① 按规则可信度或权威性排序。可信度大或权威性高的规则优先执行。
- ② 按规则的针对性排序。选择要求条件较多的知识，可以得到更具针对性和可靠性的推理结果。
- ③ 按就近原则排序。把最近使用的知识作一个标记，作为最高优先级。
- ④ 具有有效数据驱动的规则优先执行。事实的有效性可根据启发式函数来衡量。
- ⑤ 按知识库中知识的顺序排序。以知识在知识库中的顺序决定优先级。
- ⑥ 数据冗余限制。当一条知识的操作产生冗余事实时，则这条知识的优先级降低，冗余事实越多，优先级越低，如果产生的事实全部为冗余事实时，则这条知识为不可用知识。冲突消解策略是一个基本控制策略，在以上所介绍的其他控制策

略中, 往往都涉及冲突消解策略。

(3) 基于推理机的在线告警组合方式的研究

通过推理机的分析和推理, 我们可以将一些告警和异常信息通过的推理策略进行问题推理和还原。主要可以进行以下一些问题的推理。

1) 异常和告警的推理功能。

通过对异常事件的反向推理和分析, 完成对异常信息的推理得到问题产生的全过程, 使得运行人员及时发现问题。例如:

① 通信异常告警情况。

某站通信异常→AVC 系统未收到遥测返回报文→厂站端无遥测报文返回→AVC 已发送遥测召唤命令。

② 通道异常告警情况。

某站通道异常→ping 命令返回 false →AVC 尝试向厂站发送 Ping 命令。

③ 设备失败闭锁告警情况。

设备失败闭锁告警→17: 26 开始闭锁时间 20min →17: 15 ~ 17: 25 连续调节 3 次失败→17: 25 第三次调节失败→17: 20 第二次调节失败→17: 15 第一次调节失败→某电容器投入。

2) 控制命令的推理功能。

对一些系统不发令或无法调节的特殊情况做出系统发令的解释, 验证系统控制的正确性。

① 电压越限告警系统无命令的情况。

某母线电压越下限→上级厂站已无调节手段→本站 AVC 已无调节手段→档位调节已经超过限制→补偿设备已投。

② 电压越限系统控制命令的情况。

某母线电压越上限→上级厂站 1#变压器档位由 3 变为 2 档→本站 AVC 已无调节手段→档位调节已经超过限制→补偿设备未投入。

3) 自学习推理和分类功能。

智能告警和异常信息分类功能是指对告警和异常信息进行按是否可以由智能 AVC 系统控制的操作类型来分类: 一类是智能系统自己可以自动解决异常信息, 比如 AVC 闭锁设备、连续调节不成功、档位已经达到调节次数等; 另外一类是系统没办法自己解决的, 比如电压越限无调节手段等。自学习推理功能就是在对可由智能 AVC 系统自动解决的这部分信息中通过推理来自学习类似场景下的模糊推理, 通过模糊推理来确定如何解决这些异常信息。

2. 基于关联规则和范例推理的在线告警关联分析及求解研究

电力系统 AVC 系统在线告警信息复杂多样, 很多时候很难通过观察来发现一些隐含的问题和联系。本节通过关联规则的研究提出对告警和异常进行关联分析,

同时对分析后的结果通过范例推理进行告警事故的决策。

(1) 关联规则研究

1) 关联规则简介。

关联规则挖掘发现大量数据中项集之间有趣的关联或相关联系。随着大量数据不停的收集和存储,许多业内人士对于从他们的数据库中挖掘关联规则越来越感兴趣。从大量商务事务记录中发现有趣的关联关系,可以帮助许多商务决策的制定,如分类设计、交叉购物。

关联规则挖掘的一个典型例子是购物篮分析。该过程通过发现顾客放入其购物篮中不同商品之间的联系,分析顾客的购买习惯。通过了解哪些商品频繁地被顾客同时购买,这种关联的发现可以帮助零售商制定营销策略。例如,在同一次去超级市场,如果顾客购买牛奶,他也购买面包(和什么类型的面包)的可能有多大?通过帮助零售商有选择地经销和安排货架,这种信息可以引导销售。例如,将牛奶和面包尽可能地放近一些,可以进一步刺激一次去商店同时购买这些商品。

数据是事务的或关系的,如何由大量的数据中发现关联规则?什么样的关联规则最有趣?如何帮助或指导挖掘过程发现有趣的关联规则?对于关联规则挖掘,什么样的语言结构对于定义关联挖掘查询是有用的?下面我们通过关联规则的产生来了解一下关联规则的主要内容。数据挖掘(Data Mining),又称数据库中的知识发现(Knowledge Discovery in Database),在最近几年里已被数据库界所广泛研究,其中关联规则(Association Rules)的挖掘是一个重要的问题。关联规则是发现交易数据库中不同商品(项)之间的联系,这些规则找出顾客购买行为模式,如购买了某一商品对购买其他商品的影响。发现这样的规则可以应用于商品货架设计、货存安排以及根据购买模式对用户进行分类。

Agrawal 等人于 1993 年首先提出了挖掘顾客交易数据库中项集间的关联规则问题,以后诸多的研究人员对关联规则的挖掘问题进行了大量的研究。他们的工作包括对原有的算法进行优化,如引入随机采样、并行的思想等,以提高算法挖掘规则的效率,并对关联规则的应用进行推广。

2) 基本概念和问题描述。

设 $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ 是二进制文字的集合,其中的元素称为项(item)。设 D 为交易(transaction) T 的集合,这里交易 T 是项的集合,并且 $T \subseteq I$ 。对应每一个交易有唯一的标识,如交易号,记作 TID。设 X 是一个 I 中项的集合,如果 $X \subseteq T$,那么称交易 T 包含 X 。

一个关联规则是形如 $X \Rightarrow Y$ 的蕴涵式,这里 $X \subset I, Y \subset I$, 并且 $X \cap Y = \Phi$ 。规则 $X \Rightarrow Y$ 在交易数据库 D 中的支持度(support)是交易集中包含 X 和 Y 的交易数与所有交易数之比,记为 $\text{support}(X \Rightarrow Y)$, 即

$$\text{support}(X \Rightarrow Y) = |\{T: X \cup Y \subseteq T, T \in D\}| / |D|$$

规则 $X \Rightarrow Y$ 在交易集中的可信度 (confidence) 是指包含 X 和 Y 的交易数与包含 X 的交易数之比, 记为 $\text{confidence}(X \Rightarrow Y)$, 即

$$\text{confidence}(X \Rightarrow Y) = |\{T: X \cup Y \subseteq T, T \in D\}| / |\{T: X \subseteq T, T \in D\}|$$

给定一个交易集 D , 挖掘关联规则问题就是产生支持度和可信度分别大于用户给定的最小支持度 (minsupp) 和最小可信度 (minconf) 的关联规则。

3) 关联规则的种类。

我们将关联规则按不同的情况进行分类:

① 基于规则中处理的变量的类别, 关联规则可以分为布尔型和数值型。

布尔型关联规则处理的值都是离散的、种类化的, 它显示了这些变量之间的关系; 而数值型关联规则可以和多维关联或多层关联规则结合起来, 对数值型字段进行处理, 将其进行动态的分割, 或者直接对原始的数据进行处理, 当然数值型关联规则中也可以包含种类变量。

② 基于规则中数据的抽象层次, 可以分为单层关联规则和多层关联规则。

在单层的关联规则中, 所有的变量都没有考虑到现实的数据是具有多个不同的层次的; 而在多层的关联规则中, 对数据的多层性已经进行了充分的考虑。

③ 基于规则中涉及的数据的维数, 关联规则可以分为单维的和多维的。

在单维的关联规则中, 只涉及数据的一个维, 如用户购买的物品; 而在多维的关联规则中, 要处理的数据将会涉及多个维。换成另一句话, 单维关联规则是处理单个属性中的一些关系; 多维关联规则是处理各个属性之间的某些关系。给出了关联规则的分类之后, 在下面的分析过程中, 就可以考虑某个具体的方法适用于哪一类规则的挖掘, 某类规则又可以用哪些不同的方法进行处理。

4) 关联规则价值衡量方法。

当我们用数据挖掘的算法得出了一些结果之后, 数据挖掘系统如何知道哪些规则对于用户来说是有用的、有价值的? 这里有两个层面, 即用户主观的层面和系统客观的层面。

① 系统客观层面。

很多的算法都使用“支持度-可信度”的框架。这样的结构有时会产生一些错误的结果。于是人们引入了兴趣度, 用来修剪无趣的规则, 即避免生成“错觉”的关联规则。一般一条规则的兴趣度是在基于统计独立性假设下真正的强度与期望的强度之比。然而在许多应用中已发现, 只要人们仍把支持度作为最初的项集产生的主要决定因素, 那么要么把支持度设得足够低以使得不丢失任何有意义的规则, 要么冒丢失一些重要规则的风险。对前一种情形计算效率是个问题, 而后一种情形则有可能丢失从用户观点来看是有意规则的规则的问题。

有研究者给出了感兴趣的规则的定义 (R-interesting), 之后他们又对此作了改进, 把事件依赖性的统计定义扩展到兴趣度的定义上来, 并定义了否定关联规则的

兴趣度。

除了把兴趣度作为修剪无价值规则的工具,现在已有许多其他的工作来重新认识项集,如 Brin 等考虑的相关规则。在讨论了蕴涵规则 (implication rule), 规则的蕴涵强度在 $[0, \infty]$ 之间变化, 其中蕴涵强度为 1 表示完全无关的规则, ∞ 表示完备的规则, 如果蕴涵强度大于 1 则表示更大的期望存在性。

另一个度量值——“收集强度” (collective strength), 设想使用“大于期望值”来发现有意义的关联规则。项集的“收集强度”是 $[0, \infty]$ 之间的一个数值, 其中 0 表示完备的否定相关性, 而值 ∞ 表示完备的正相关性。

② 用户主观层面。

上面的讨论只是基于系统方面的考虑, 但是一个规则的有用与否最终取决于用户的感受。只有用户可以决定规则的有效性、可行性。所以我们应该将用户的需求和系统更加紧密地结合起来。

可以采用一种基于约束 (constraint-based) 的挖掘。具体约束的内容可以有

- a) 数据约束。用户可以指定对哪些数据进行挖掘, 而不一定是全部的数据。
- b) 指定挖掘的维和层次。用户可以指定对数据哪些维以及这些维上的哪些层次进行挖掘。

c) 规则约束。可以指定哪些类型的规则是我们所需要的。引入一个模板 (template) 的概念, 用户使用它来确定哪些规则是令人感兴趣的而哪些则不然。如果一条规则匹配一个包含的模板 (inclusive template), 则是令人感兴趣的; 如果一条规则匹配一个限制的模板 (restrictive template), 则被认为是缺乏兴趣的。

其中有些条件可以和算法紧密的结合, 从而既提高了效率, 又使挖掘的目的更加的明确化了。其他的方法还有:

Kleinberg 等人的工作是希望建立一套理论来判断所得模式的价值。他们认为这个问题仅能在微观经济学框架里被解决, 他们的模型提出了一个可以发展的方向。他们引入并研究了一个新的优化问题——分段 (Segmentation) 问题, 这个框架包含了一些标准的组合分类问题。这个模型根据基本的目标函数, 对“被挖掘的数据”的价值提供一个特殊的算法的视角, 显示了从这方面导出的具体的优化问题的广泛的应用领域。

Korn 等就利用猜测误差 (这里他们使用“均方根”来定义) 来作为一些从给定的数据集所发现规则的“好处” (goodness) 的度量, 他们所定义的比例规则就是如下顾客大多数分别花费 1:2:5 的钱在面包、牛奶、奶油上, 通过确定未知的 (等价的、被隐藏的或丢失的) 值, 比例规则可以用来做决策支持。如果数据点线性地相关的话, 那么比例规则能达到更紧凑的描述, 即关联规则更好地描述了相关性。

(2) 横向和纵向告警分析功能

通过以上关联分析的简要介绍,如果可以对目前告警和异常信息进行横向和纵向的关联分析,得到在线的分析结果,那么必将有助于运行人员综合判断问题的性质和找出解决问题的最佳方法。

1) 纵向关联异常分析内容研究。

对告警进行纵向异常关联性分析主要是通过关联分析找出一些反复出现的异常信息或不规则出现的现象,通过分析这些现象找到一些隐含的诱因。其主要分析内容如下:

- ① 遥测异常纵向关联分析;
- ② 遥信异常纵向关联分析;
- ③ 滑档异常纵向关联分析;
- ④ 控制失败异常纵向关联分析;
- ⑤ 通道连接异常纵向关联分析。

2) 横向关联异常分析内容研究。

对告警信息进行横向异常关联性分析主要是通过关联分析找出一些异常信息与不同类异常信息之间的关系,通过分析这些现象找到一些异常信息之间的潜在内在联系。其主要分析内容如下:

- ① 数据异常与算法收敛间的横向异常关联性分析;
- ② 不同告警间的横向异常关联性分析;
- ③ 用户操作对系统稳定性横向异常关联性分析。

3) 基于范例推理的理论基础研究。

范例推理既是人类推理的一种重要形式,也是人工智能研究中的一种范式。它不同于通过链式推理产生问题结论的基于规则的推理,是一种基于过去实际经验或经历的推理。该方法的思路非常简单,当预测未来情况或进行决策时,基于范例的推理首先寻找是否存在一个同样的训练范例。如果找到一个,则返回附于该范例上的解。如果找不到同样的范例,则系统将寻找与现有情况最相类似的训练范例,并选择最佳的相同的解决方案。范例推理中的知识表示是以范例为基础的,范例的获取比规则获取要容易,从而大大简化了知识的获取。对过去的求解结果进行复用,而不是再次重新推导,可以提高对新问题的求解效率。过去求解成功或失败的经历可以指导当前求解时该怎样走向成功或避开失败,从而改善求解的质量;对于那些目前没有或根本不存在的,可以通过计算推导来解决的问题(如法律中的判例),范例推理也特别适用。范例推理方法已被广泛应用于医疗诊断、法律、电路或机械设计、故障诊断、农业、气象、软件工程等各个领域,并获得了良好的效果。

① 范例推理概述。

在认知科学理论的启示和支撑下,美国耶鲁大学 RogerShank 于 1982 首次提出了 CBR 理论的认知模型及框架。之后, Kolodner 和她的学生以此为基础,开发出

了 CBR 系统。从此, CBR 理论突破了认知科学的理论框架, 开始走向人工智能领域的研究和应用。同人类的思维和处理问题模式一样, CBR 系统首先通过对比问题范例与先前范例的相似性, 来决定选择以前的哪一个或哪一些范例, 并修改或修正以前问题的解法。在这一点上, 与其他的人工智能解决问题的方法 (如专家系统利用领域内通用的启发性知识和规则, 通过逐步的推导, 得出问题的解) 截然不同。而且更重要的是 CBR 系统固有的属性, 它采用增量式的学习方法 (新的解决问题的方法和问题范例一同被系统记录并存储起来, 以备将来之用), 使系统的学习能力不断提高, 知识和经验也不断增加。一个完整的 CBR 系统一般包括几个循环过程, 有时称为 CBR 的生命周期, 如图 5-10 所示。

a) 检索: 根据输入待解决的问题的有关信息, 从范例库中检索相似的范例集。

b) 重用: 从检索到的一组范例中获得求解方案, 判别是否符合要求, 若符合, 则重用这些方案, 否则需要修正。

c) 修正范例: 从相似范例中修正求解方案, 使之适合于求解当前问题, 得到当前问题的新求解方案。

d) 保存范例: 将新范例及其解根据一定的策略存入范例库中, 这是 CBR 的学习方式。

范例推理方法已被广泛应用于医疗诊断、法律、电路或机械设计、故障诊断、农业、气象、软件工程等各个领域, 并获得了良好的效果。

② 互信息理论

互信息理论来源与数据挖掘中模糊粗糙集的概念 (这里对模糊粗糙集不再做详细说明)。使用模糊粗糙集方法时, 需要了解一定的领域知识, 比如模糊隶属函数的确定等。在某些情况下, 这种先验知识是缺乏的, 此时我们可以使用互信息方法来进行替代。互信息 (Mutual Information) 是信息理论中用来表示变量间相关程度的一个基本概念。假设随机变量 X 、 Y , 则互信息 $I(X, Y)$ 可以定义为

$$I(X, Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y) \tag{5-28}$$

式中, $H(\cdot)$ 表示 \cdot 的信息熵。互信息的定义还可以写为

$$I(X, Y) = H(X) - H(X|Y) = H(Y) - H(Y|X) \tag{5-29}$$

上式表示出了由于知道了属性 $X(Y)$ 而减小的关于属性 $Y(X)$ 的不确定度, 也即互信息表征了属性 $X(Y)$ 对属性 $Y(X)$ 的贡献。在式 (5-28) 中, 对于离散变量互信息的计算是很简单的, 但是连续变量的互信息计算则比较复杂。

散变量互信息的计算是很简单的, 但是连续变量的互信息计算则比较复杂。在

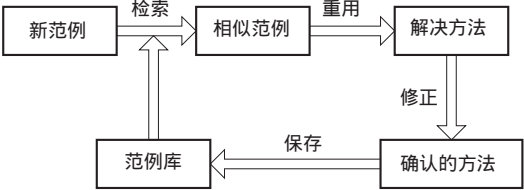


图 5-10 CBR 工作过程

本文中采用一种简便而准确的互信息估算方法来计算互信息。互信息的概念可以扩展到包括更多变量, 矢量 (X_1, X_2, \dots, X_n) 和输出 Y 之间的联合互信息 (Joint Mutual Information, JMI) 的定义为

$$I(X_1, X_2, \dots, X_n; Y) = \sum_{i=1}^n I(X_i; Y | X_{i-1}, X_{i-2}, \dots, X_1) \quad (5-30)$$

JMI 描述了由特征矢量 (X_1, X_2, \dots, X_n) 而导致的 Y 的不确定度减少, 即表示了特征矢量对 Y 的贡献。因为不是所有的特征矢量属性都对输出有贡献, 而且各个属性的贡献也是不同的, 所以通过选择与输出变量互信息最大的属性子集, 可以得到一个对输出属性贡献最大的属性集。

属性 $\forall \{a\} \in S$ 重要性定义为

$$\gamma_{|a|} = (I(S; Y) - I(S \setminus \{a\}; Y)) / I(S; Y) \quad (5-31)$$

基于互信息的属性选择算法描述如下:

- a) $F \leftarrow (X_1, X_2, \dots, X_n)$, $S \leftarrow \{\emptyset\}$;
- b) 对所有 $X_i \in F$, 计算 $I(X_i; Y)$;
- c) $j = \arg\max_{X_i \in F} I(X_j; Y)$, $F \leftarrow F \setminus \{X_j\}$, $S \leftarrow \{X_j\}$;
- d) 对所有 $X_i \in F$, 计算 $I(X_i; S; Y)$, 令 $\delta = I(S; Y)$;
- e) $j = \arg\max_{X_i \in F} I(X_j; S; Y)$, $F \leftarrow F \setminus \{X_j\}$, $S \leftarrow S \cup \{X_j\}$;
- f) 若 $(I(S; Y) - \delta) > 0$, 返回 d); 否则 $S \leftarrow S \setminus \{X_j\}$;
- g) 输出属性子集 S 和属性重要性 γ 。

③ 自组织映射。

自组织映射 (SOM) 神经网络由输入层和输出层组成, 输入层的每个神经元都通过权值与输出层的每一个神经元相连接, 输出层的神经元一般是以二维形式排列的, 输出层神经元之间通过许多局部连接形成广泛连接, 如图 5-11 所示。SOM 网络自组织学习的基本原理为对于网络的每个输入模式, 调整一部分网络的连接权值, 使权值矢量更加接近或偏离输入矢量, 该调整过程即为竞争学习过程。通过学习, 所有权值矢量在输入矢量空间中相互分离, 形成各自代表的输入模式, 实现特征自动识别的聚类分析功能。

假设网络输入层有 n 个神经元, 输出层有 m 个神经元, SOM 的学习算法描述如下:

a) 网络初始化。给连接权玛、学习速率 $\eta(0)$ 和邻域 $n_j(0)$ 赋值。

b) 提供新的输入。输入矢量为 $X = (x_1$

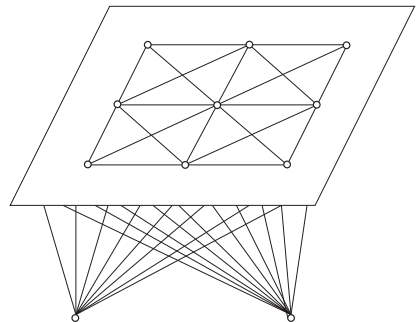


图 5-11 SOM 网络结构图

$(t), x_2(t), x_3(t) \cdots, x_n(t))$, 其中 $x_i(t)$ 为时刻 t 输入层神经元 i 的状态。

c) 计算距离。计算输入模式与各输出神经元 j 间的距离 d_i 为

$$d_i = \sum_{i=1}^n [x_i(t) - \omega_{ij}(t)]^2, 1 \leq j \leq m \quad (5-32)$$

d) 选择与输入模式距离最小的输出层神经元, 假设该神经元用 j^* 表示。

e) 修改神经元 j^* 以及 j^* 的邻域 $N_{j^*}(t)$ 内各神经元的权值, 按下式进行:

$$\omega_{ij}(t+1) = \omega_{ij}(t) + \eta(t)[x_i(t) - \omega_{ij}(t)] \quad (5-33)$$

其中, $j \in N_{j^*}(t), 1 \leq j \leq n, 0 < \eta(t) < 1$

f) 转 b), 重复之。

SOM 方法的主要优点有: 对输入数据有聚类的作用, 并且可以用聚类中心代表原输入, 起到数据压缩的作用; 保持拓扑有序性, 输入中特性相似的点映射后在空间上是邻近的; 分布密度匹配, 原数据分布密的区域在映射图上对应的区域也较大, 分布稀疏的对应区域也较小, 从而可以提高分辨率。因此在本节中采用 SOM 方法进行聚类分析。

4) 基于混合知识推理的告警解除方法研究。

基于范例的推理就是充分利用以前的经验来进行推理, 求解新问题的过程。本节针对告警或异常事故的重复性以及随机性等特点, 提出了基于混合知识推理的方法来进行告警事故自动排除。该方法将范例推理、自组织映射以及互信息理论进行了有效的结合。首先使用互信息理论确定了范例的表示、组织方法; 然后通过使用自组织映射将历史范例进行聚类: 先将新问题所对应的范例与各个聚类中心进行匹配, 得到最相似聚类, 然后再在该聚类中进行二次匹配, 最后将得到的最相似范例集进行重用、校正, 得到最终预测结果。使用互信息方法可以进行范例属性和匹配权重的合理选择, 同时使用自组织映射对历史范例进行聚类, 可以减少范例匹配次数、减少匹配时间。使用本节方法不仅可以合理利用历史范例, 而且还可以通过属性选取、聚类而获取附加知识。

① 基于互信信息理论的范例表示方法。

范例库是 CBR 中最重要的一个部分, 范例内容一般有如下两个主要组成部分: 问题或情景描述, 即范例发生时解决的问题以及周围环境的状态; 对问题的解决方案。在本书中的 CBR 系统中, 基本范例是由问题的一系列特征属性组成的特征矢量和问题解矢量所组成的。一个典型的负荷范例可以定义为一个二元组, 即

$$C_i = \langle p_i, s_i \rangle \quad (5-34)$$

式中, $P_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \cdots, a_{in}\}$ 是一个非空有限集合, 表示与告警或异常信息相关的描述信息, 包括日期类型、异常类型、设备类型等; s_i 表示解决方案。一个范例库可以表示为

$$C_i = \{C_1, C2, \cdots, C_m\} \tag{5-35}$$

范例的特征项权重对检索的质量与速度有着至关重要的作用，特征项的权重体现了不同的特征具有不同的重要性。在本节我们采用杭州地区 2000 年度每日的负荷、气象相关数据，以日负荷预测为例，引入互信息理论来确定与待决策相关的各个属性的重要度（见表 5-1）。具体过程如下：

表 5-1 属性重要度表

条件属性	日期类型	有功值
	无功值	电压上下线
	无功上下限	闭锁次数
	反校报文	动作次数
特征属性	排除方案	

首先，将日期、有功值、无功值等相关的各个因素列出作为条件属性，将待求的告警排除方案作为特征属性，然后按照互信计算公式进行处理。

$$I(X,Y) = H(X) + H(Y) - H(X,Y) \tag{5-36}$$

式中， $X、Y$ 为随机变量； $H(\cdot)$ 表示 \cdot 的信息熵。分别计算各个条件属性与特征属性之间的互信息，并将其作为各个范例属性的重要度指标，结果如图 5-12 所示。

范例知识的表示不仅要使知识成为有结构、有组织的体系，还要保证知识易于检索、存取和学习。目前，在知识系统中较多采用的是产生式、语义网络法、框架法、面向对象等诸多表示方法。产生式表示法又称产生式规则表示法，是一种称为 Post 机的计算模型，模型中的每条规则称为一个产生式。它的优点是采用直观、自然的因果关系表达知识，便于进行推理；易于模块化处理；可表示不确定知识、启发式知识、过程性知识；格式清晰，便于设计、检测。它的缺点是规则库庞大导致工作效率不高，不能表达具有结构性的知识。语义网络法是通过概念及其语义关系来表达知识的一种网络图。它的优点是能直观表示结构化的知识，便于理解，有联想性。它的缺点是缺乏严格的表示体系，处理比较复杂。框架表示法是以框架理论为基础发展起来的一种结构化的知识表示方法，主要用于描述事物的内部结构以及事物间的类属关系。它的优点是易于表达结构性知识，具有可继承性、自然性，便于理解。其缺点是不利于表达过程性知识。在面向对象的方法中，类、子类、具体对

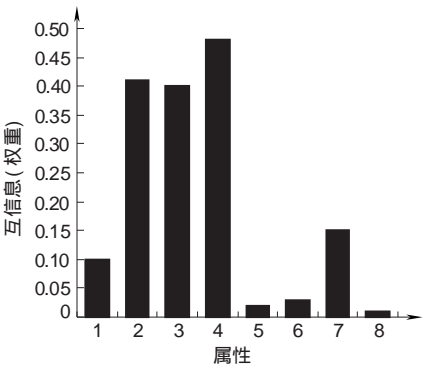


图 5-12 各个属性互信息（权重）

象构成了一个层次结构, 而且具有继承性。它的特点是具有面向对象的优点, 具有模块性、继承性和多态性。

② 范例的检索与匹配。

范例检索是利用范例库的索引机制, 根据范例相似性度量方法, 从范例库中找到与当前求解问题最相似的一个范例 (或范例集)。如图 5-13 所示, 在本书中首先使用 SOM 对范例库中的历史范例进行聚类分析, 从而得到反映数据特征各个聚类以及聚类中心。然后让新问题所对应的新范例与各个聚类中心进行比较, 从而得到新范例所属的聚类, 然后再在该聚类中寻找同新范例最相似的历史范例。其步骤如下:

- a) 将新问题转化为新的范例。
- b) 使用 SOM 对范例库中的历史范例进行聚类分析, 并得到各个聚类的中心。

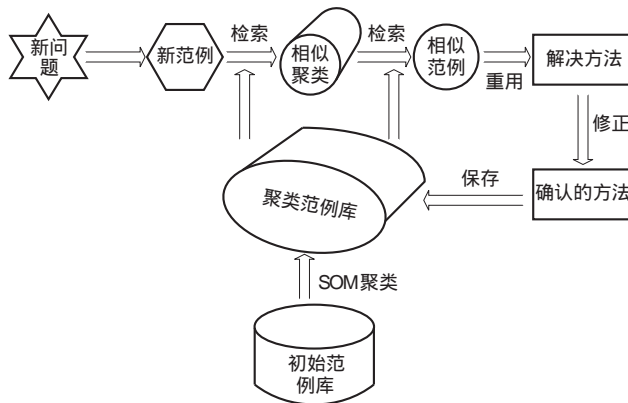


图 5-13 SOM-CBR 工作过程

c) 将新范例各个属性值与各个聚类中心点各属性值进行比较, 使用 k -最近邻域法确认与新范例最接近的一个聚类。 k -最近邻法是 CBR 系统中定义相似性的一类重要且基本的方法。范例是由 n 个数值属性所描述。每个范例代表 n 维空间中的一个点, 这样所有的范例就被存放在 n 维空间中。当给定一个新对象时, 一个 k 最近邻分类器就搜索 n 维空间, 并从中找出 k 个与未知对象最为接近的范例, 这 k 个范例就是未知对象的“ k 个最近邻”。所谓最近就是指 n 维空间中两点之间的欧氏距离最小, 而 n 维空间中两点 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 之间的欧氏距离为

$$d(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (5-37)$$

实际上范例的相似性匹配包括两个步骤, 即根据范例特征值的描述, 评估新范例和旧范例各特征之间的相似性; 根据相似性匹配函数, 评估新范例和旧范例的综

合相似度。

设 $C_a = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 为新范例, f_i 为范例的属性, $i = 1 \sim n$ 。 $C_b = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 为范例库中的历史范例, a_j 为历史范例的属性, $j = 1 \sim n$ 。范例的相似度为

$$S(C_a, C_b) = \sqrt{\sum_{k=1}^n w_k \times \left[1 - \left(\frac{f_k - a_k}{R_k}\right)^2\right]} \quad (5-38)$$

式中, w_k 为范例特征矢量中第 k 个特征的权重; R_k 表示第 k 个特征的取值范围。根据式 (5-38) 可以计算得到范例库中 k 个与新范例最相似的历史范例。在本节中, 各个特征的权重选取可根据图 5-12 得到的属性重要性确定。

d) 在上面得到的聚类中再次利用 k -最近邻域法, 从而得到在该聚类中与新范例最匹配的历史范例集。

e) 用得到的历史范例集进行范例的重用、修正, 得到新的求解方案。

f) 将新范例及其结果存入范例库中。

③ 范例重用。

可采用最相似聚类中的最相似范例集进行重用, 选取相似度为性能指标, 其定义为

$$\Delta\delta = \frac{|T_v - T_h|}{T_v} \quad (5-39)$$

式中, $\Delta\delta$ 表示相识度; T_v 表示求解范例条件实际加权值; T_h 表示历史范例条件实际加权值。

④ 校正。

在对告警信息的排除方案中, 部分方案可能会影响到电网的控制和潮流的变换, 所以在排除方案形成后, 需要根据当前电网的情况加入在线校正的计算, 并用潮流计算和对一些硬约束条件的判断, 保证在该方案下, 电网无新的异常情况产生。

⑤ 新范例的存储。

进行一次新的预测后, 按照范例的表示方式将其组织成新范例, 并根据索引机制存入范例库中。

5.2.2 智能评估内容和交互方式的研究

传统的 AVC 只注重控制命令的安全性和正确性, 但是对电网的评估则很少涉及, 只是给出系统的降损等简单的电网信息, 这对电网运行人员来说是远远不够的。智能 AVC 系统则提供对电网的智能分析和评估, 根据当前的电网情况, 给出在线评估报告用户可以根据这个报告实时的了解当前电网是否健康, 是否在经济运行, 电压质量是否高等。除了可以让运行人员可以一目了然的了解电网的无功电压

情况外，还可以指出对电网的薄弱自处给运行人员以足够的关注。

1. 智能评估内容

智能评估需要研究的内容主要包括以下几点：

1) 分析电网无功的补偿曲线找到全网无功薄弱节点和补偿容量。通过电网实时计算的无功补偿曲线可以分析电网的无功补偿薄弱点和无功补偿大致容量，为运行人员提供无功规划的数据支持和选点的参照。

2) 分析当前的设备网损变化情况。通过对当前各个设备的网损计算的排序和分析可以显示出不同设备和片区的损耗情况，得到线损较大设备，分析线损较大设备的原因。

3) 分析负荷的变化情况。通过各区域负荷的变化和历史情况描绘负荷增长曲线，分析负荷变化规律，为运行人员获得负荷变化规划提供数据参考。

4) 分析变电站运行方式的变化情况。分析变电站运行方式的变化情况，结合历史信息分析给出不同时间段内变压器的最优运行方式，给运行人员提供参考依据。

5) 分析异常数据。分析数据源中的异常数据和尖冲数据，结合历史信息分析出经常出现问题数据和不稳定数据，帮助运行人员及时了解异常数据的变化情况，发现和解决问题。

2. 智能监视及配置

传统的 AVC 在线监视的内容比较单一，常常只有在线的网损和母线电压的监视等内容，且人机交互内容很少，常使得运行人员为了了解某一关心的数据情况，点击很多界面还没有获得需要的信息。针对这样的问题智能 AVC 通过在线提交智能评估报告和便捷的智能人机交互配置让用户既可以定义自己关心的内容又可以一目了然地了解电网的整体情况。智能配置功能主要是实现用户对关心的电网内容进行自定义，而智能诊断报告则将电网的基本情况结合用户关心的内容，在线生成诊断报告，用户通过报告的内容可以立刻了解电网的基本情况和运行人员关心的内容。

第 6 章 智能配电网 AVC 的研究

6.1 配电网

电力系统由发电、输电、配电和用户（即负荷）组成，完成一次能源向二次能源的转换、传送、分配和消费。其中配电网是直接面向用户的基础设施，位于电力系统的末端，是联系电源系统或输变电系统与用户、向用户分配和供给电能的重要环节，整个电力系统对用户的供电能力和供电质量最终都必须通过它来实现和保障。

6.1.1 配电网概述

配电网是由架空线路、电缆、杆塔、配电变压器、隔离开关、无功补偿电容以及一些附属设施等组成的。在电力网中起重要分配电能作用的网络就称为配电网。

1. 配电网的分类

配电网按电压等级来分类，可分为高压配电网（35 ~ 110kV），中压配电网（6 ~ 10kV），低压配电网（220/380V）。在负荷率较大的特大型城市，220kV 电网也有配电功能。

按供电区的功能来分类，可分为城市配电网、农村配电网和工厂配电网等。

在城市电网系统中，主网是指 110kV 及其以上电压等级的电网，主要起连接区域高压（220kV 及以上）电网的作用。

从投资角度看，我国与国外先进国家的发电、输电、配电投资比率差异很大，国外基本上是电网投资大于电厂投资，输电投资小于配电投资。我国刚从重发电轻供电状态中转变过来，而在供电投资中，输电投资大于配电投资。从我国城网改造之后，将逐渐从输电投资转入配电建设为主。

2. 配电网的运行状态

配电网的运行是指组成配电网系统的所有环节都处于执行其功能的状态。系统运行中，由于电力负荷的随机变化以及外界的各种干扰会影响配电系统的供电可靠性和供电能力。系统运行分为正常运行状态、检修状态和故障运行状态，如图 6-1 所示。配电网运行包括了所有这些状态及其相互间的转移。各种运行状态之间的转移需通过不同控制手段来实现。

配电系统相对于输电系统来说，由于电压等级低、供电范围小，但与用户直接

相连,是供电部门对用户服务的窗口,因而决定了配电网运行有如下特点和基本要求:

1) 10kV 中压配电网在运行中,负荷节点数多,一般无法计算实时记录负荷,无法应用现在传统潮流程序进行配电网的计算分析,要求建立新的数学模型和计算方法。

2) 随着铁道电气化和用户电子设备的大量使用,配电网运行中有大量的谐波源、三相电压不平衡、电压闪变等污染,要求准确测量与计算配电网中的谐波分布,从而采取有效措施抑制配电网运行中的谐波危害。

3) 由于环保条件日趋严格的制约,要求配电网运行能制定不影响城市绿化、防火、防爆、防噪声等技术和组织措施,以便减少配电网运行对环境的污染。

4) 随着用户对供电可靠性和电压质量指标的提高,还靠人工操作已无法适应,要求现代配电网运行不断提高自动化、智能水平。

3. 配电自动化

由于配电系统上述特点的存在,使得对其分析不能完全遵循应用于发电、输电系统的方法。人们要求对配电网进行在线与离线的智能化管理,使其处于安全、可靠、优质和高效的运行状态。配电自动化就是在这种背景下应运而生。

(1) 配电自动化概念

配电自动化是利用现代电子、计算机、通信和网络技术,将配电网在线数据、离线数据、用户数据、网络结构和地理图形进行信息集成,构成完整的自动化系统。其中运行及控制部分功能的自动化由配电自动化系统(DAS)实现,又可具体分为 SCADA 系统、电压无功控制、保护的协调管理及控制、馈线控制、故障处理(故障检测、定位、隔离后故障区供电)、自动抄表和负荷管理等。

配网自动化技术将配电在正常及事故情况下的监测、保护、控制、计量和供电部门的工作管理有机地融合在一起,改进供电质量,与用户建立更密切更负责的关系,以合理的价格满足用户要求的多样性,力求供电经济性最好,企业管理更为有效。

(2) 配电自动化系统结构

配电自动化系统一般由主站、通信网络、变电站自动化系统或配电自动化二级主站、配电自动化远方终端 DA-RTU、线路 FTU、自动读表终端等组成,如图 6-2 所示。

配电自动化主站是配电自动化系统的控制与管理中心。它一般采用客户/服务器结构,以 SCADA 系统和 GSI 系统作为基本平台,并配备各种应用软件完成 DA/

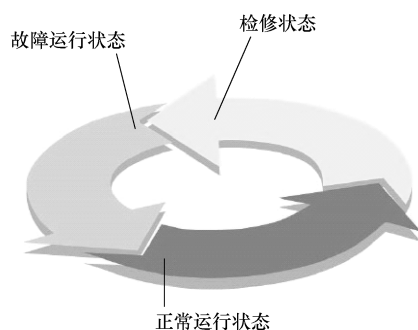


图 6-1 配电网运行状态

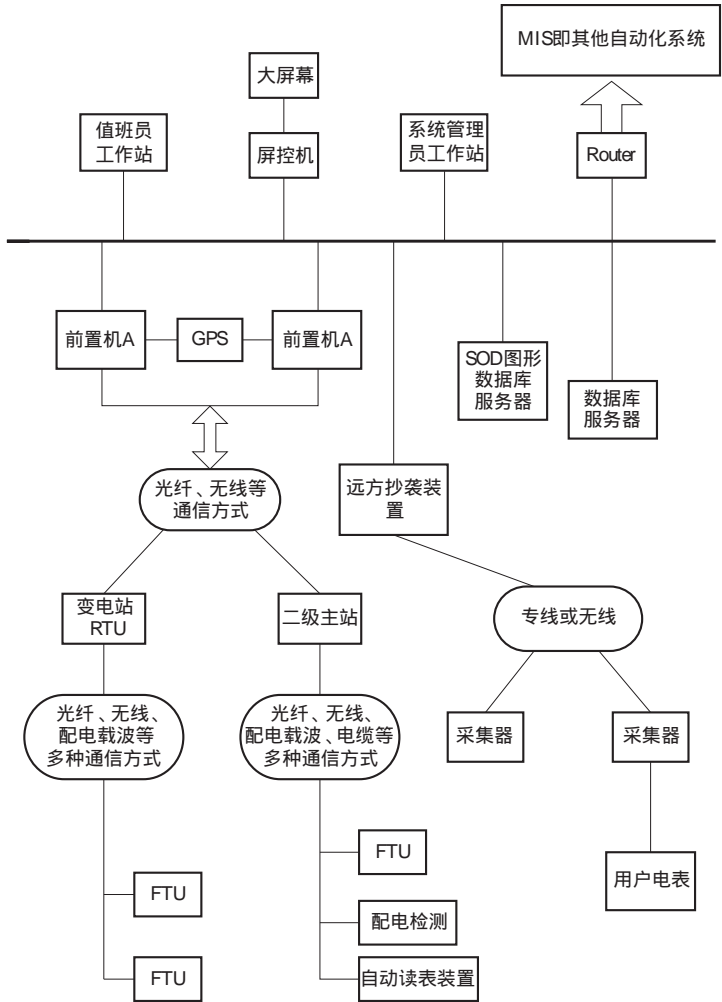


图 6-2 配电自动化及其管理系统配置图

DMS 的功能。

变电站自动化系统完成变电站设备的实时监控、管理。它一般是集中式 RUT 与变电站各种保护监控装置通信构成的系统，或由间隔级微机综合保护、监控装置配合后台通信处理机构成的分布式计算机系统。

配电自动化二级主站是配电自动化系统的中间层，主要用于完成小区内配电网馈线自动化功能，并作为通信节点，向主站转发小区内 RTU/FTU 或其他智能装置的数据。

配电自动化远方终端单元 DA-RTU 分为安装在变电站或开闭所的站内 RUT 及安装在配电线路上的 FTU 两种设备。DA-RTU 与配电自动化主站或二级主站通信，提供配电系统运行监控及管理所需的数据，执行主站发出的对配电设备的控制、调

节命令。

配电自动化系统的监控对象具有点多、分散的特点,通信系统一般采用主干通道与分支通信网相结合的结构,分为用户、线路 FUT、变电站或几级主站、控制中心等几个层次。用户(如配变监测、自动读表)终端数据由线路 FTU、变电站 RTU、二级主站转发,可选用有线、配电线载波、无线电、电话线等通信方式。线路 FTU 数据由变电站或二级主站转发,可选用光纤、无线电、有线等通信方式。变电站或二级主站可选用光纤、无线扩频、数字微波、载波或有线等方式,直接与控制中心通信。

6.1.2 配电网潮流计算

配电网潮流算法是配电网分析的基础,配电网的网络重构、故障处理、无功优化和状态估计等都需要用到配网潮流的数据。由于配电网结构特点都是开环运行的,配电网呈辐射状,配电线路的电阻电抗比 (R/X) 大,利用常规方法进行潮流计算会导致算法不收敛,而前推回代法是线性收敛的,从而解决了潮流计算收敛难的问题。

1. 主干馈线配电网潮流计算

在典型的配电网中,一般仅有根节点的节点电压固定不变,而其他节点都可视为 PQ 节点。如图 6-3 所示,配电网仅有一条主干馈线, n 个节点, $n-1$ 条支路。在根节点电压和节点负荷功率已知的情况下通过以下步骤可以求出全网节点电压和功率分布。

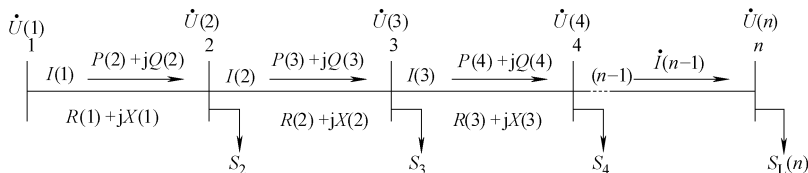


图 6-3 配电网主馈线图

(1) 节点电压计算

考虑 1 和 2 两节点,其电压降为

$$\dot{U}(1) - \dot{U}(2) = \dot{I}(1) [R(1) + jX(1)] \quad (6-1)$$

$$P(2) - jQ(2) = \dot{I}(1) \dot{U}(2) \quad (6-2)$$

由式 (6-1) 和式 (6-2) 可以得到两点间电压降的纵分量和横分量分别为

$$\Delta U = \frac{P(2)R(1) + Q(2)X(1)}{U(2)} \quad (6-3a)$$

$$\delta U = \frac{P(2)X(1) + Q(2)R(1)}{U(2)} \quad (6-3b)$$

暂时忽略横分量的影响,则节点 2 电压幅值计算如下

$$U(2) = U(1) - \Delta U = U(1) - \frac{P(2)R(1) + Q(2)X(1)}{U(2)} \quad (6-4)$$

由上式可得

$$U(2) = \sqrt{\frac{1}{4}U^2(1) - P(2)R(1) - Q(2)X(1)} + \frac{1}{2}U(1) \quad (6-5)$$

将 $U(2)$ 计算结果代入式 (6-3b), 可计算出电压降横分量, 并由下式计算两节点间相角差为 $\alpha = \arctan \frac{\delta U}{U(2)}$ 。

同时可用横分量对式 (6-5) 中计算的电压幅值进行修正。对于图 6-3 所示的系统, 从式 (6-5) 式中可以得出各节点电压计算的递推公式为

$$U(i+1) = \sqrt{\frac{1}{4}U^2(i) - P(i+1)R(i) - Q(i+1)X(i)} + \frac{1}{2}U(i) \quad (6-6a)$$

$$\alpha(i) = \arctan \frac{\Delta U(i)}{U(i+1)} \quad (6-6b)$$

在上式中电压的单位为 kV, 阻抗的单位为 Ω , 功率的单位为 $\text{MV} \cdot \text{A}$ 。

(2) 节点功率计算

1) 支路功率损耗。

$$P_{\text{Loss}}(i) = \frac{R(i)[P^2(i+1) + Q^2(i+1)]}{U^2(i+1)} \quad (6-7a)$$

$$Q_{\text{Loss}}(i) = \frac{X(i)[P^2(i+1) + Q^2(i+1)]}{U^2(i+1)} \quad (6-7b)$$

式中, $i=1, 2, \dots, B$, B 为支路数。

2) 节点功率。

$$P(i+1) = \sum_{j=i+1}^N P_{\text{Load}}(j) + \sum_{j=i+1}^{N-1} P_{\text{Loss}}(j) \quad (6-8a)$$

$$Q(i+1) = \sum_{j=i+1}^N Q_{\text{Load}}(j) + \sum_{j=i+1}^{N-1} Q_{\text{Loss}}(j) \quad (6-8b)$$

式中, $i=0, 1, 2, \dots, N-1$, N 为节点数。

从式 (6-8a) 和式 (6-8b) 可以看出节点处的功率为节点后所有节点负荷功率和支路损耗功率之和。

(3) 收敛条件

以前后两次迭代的电压偏差作为迭代收敛条件, 下式表明节点电压幅值最大偏差小于设定阈值, 即认为迭代收敛, 则迭代过程结束。

$$\max \{ |U^K(i) - U^{K-1}(i)| \} < \varepsilon \quad (6-9)$$

通过以上分析得到单一支配电网潮流计算步骤为

1) 初始化, 令所有支路功率损耗为零;

2) 根据式 (6-8a) 和式 (6-8b) 两式计算各节点功率;

3) 根据式 (6-6a) 和式 (6-6b) 两式计算各节点电压幅值和相角增量。根据前后两次迭代的电压偏差是否小于设定阈值判断是否收敛, 如果不小于设定阈值, 则进行下一步, 否则停止迭代过程。

4) 根据式 (6-7a) 和式 (6-7b) 计算各支路的功率损耗, 返回步骤 1)。

2. 前推回代法

前推回代法是配电网支路类算法中被广泛研究的一种方法。该方法从根节点起按广度优先搜索并对配电网进行分层编号, 编号反映了前推回代的顺序。考虑到配电网的辐射型结构, 其一般是由一条主馈线带有数条分支, 各分支又带有各自的子分支, 依此类推。定义主馈线为第一层, 从左向右依次定义主馈线上的各节点, 然后定义离电源最近的节点的分支线及其上的节点, 每一层最后一个节点号要比它的下一层的第一个节点号小 1。此方法简便、有效, 利于编程, 对于任何复杂的辐射状配电网的网络编号都适用。具体编号方法可如图 6-4 所示, 其中 [] 代表层, () 代表支路号、数字代表节点号。

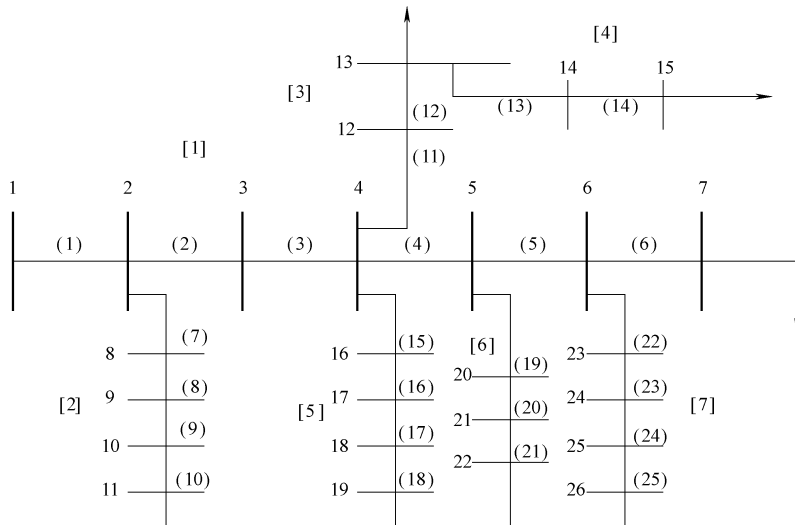


图 6-4 某辐射型配电网

潮流算法如下:

(1) 计算节点注入电流

$$I_i^k = (S_i / U_i^{k-1}) - Y_i U_i^{k-1} \quad (6-10)$$

式中, U_i^{k-1} 为 $k-1$ 次迭代的节点 i 的电压; S_i 为节点 i 的注入功率之和; Y_i 为节点 i 的并联导纳。

(2) 回代过程

设第 L 条支路的起点为节点 L_1 , 且终点为 L_2 , 则有

$$J_L^{(k)} = -I_{L2}^{(k)} + \sum_i \quad (6-11)$$

式中, J_L 为第 L 条支路上的电流, I_{L2} 为节点 L_2 上的注入电流, \sum_i 为从 L_2 点出发的各分支支路上的电流和。

(3) 前推过程

$$U_{L2}^{(k)} = U_{L1}^{(k)} - Z_L J_L^{(K)} \quad (6-12)$$

(4) 判断收敛条件

前推回代法还有另外一种形式, 如图 6-5 所示。由图 6-5 所示简单馈线段为例经过简单推导可以得出:

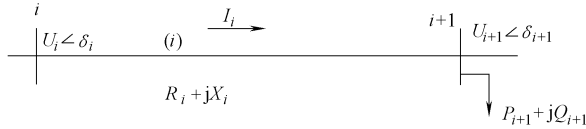


图 6-5 某配电网中的一段馈电线段

$$U_{i+1} = \left\{ (P_{i+1}R_i + Q_{i+1}X_i - \frac{1}{2}|U_i|^2)^2 - (R_i^2 + X_i^2)(P_{i+1}^2 + Q_{i+1}^2) \right\}^{\frac{1}{2}} - (P_{i+1}R_i + Q_{i+1}X_i - \frac{1}{2}|U_i|^2)^{\frac{1}{2}} \dots \quad (6-13)$$

$$\begin{aligned} P_{i+1} &= \sum_{j=i+1}^n PL_j + \sum_{j=i+1}^n LP_j \\ Q_{i+1} &= \sum_{j=i+1}^n QL_j + \sum_{j=i+1}^n LQ_j \end{aligned} \quad (6-14)$$

式中, PL_j 和 QL_j 为节点 j 的负荷功率; LP_j 和 LQ_j 为支路 j 上的线损。

$$\begin{aligned} LP_i &= \frac{R_i(P_{i+1}^2 + Q_{i+1}^2)}{|U_{i+1}|^2} \\ LQ_i &= \frac{X_i(P_{i+1}^2 + Q_{i+1}^2)}{|U_{i+1}|^2} \end{aligned} \quad (6-15)$$

式 (6-13)、式 (6-14) 和式 (6-15) 构成了前推回代的基本方法。

配电潮流前推回代算法的迭代步骤如下:

- 1) 初始化。给定配电馈线根节点电压, 并为其他节点电压赋初值。
- 2) 考虑负荷电压静特性, 计算负荷数据。
- 3) 从各负荷节点出发, 先子节点后父节点, 通过前推计算, 由节点电压分布求支路功率分布。
- 4) 根节点出发, 先父节点后子节点, 通过回推计算, 由支路功率分布求节点电压分布。
- 5) 判断相邻两次迭代电压差的模分量的最大值 $\max |\Delta U_i|$ 是否小于给定的收敛

指标,若是,则停止计算;否则,转到步骤2)。

6.1.3 配电网无功优化

配电网是电力系统的重要组成部分之一,在电力系统的各环节中,配电网处于末端直接与用户相联系。长期以来,重视有功调度而忽视无功功率的分布,导致大量无功功率在配电网中流动,既增加了配电网有功损耗,又影响了电压质量,降低了配电网运行效率。因而对于如何利用和配置无功资源进一步降低配电网损耗,提高电压合格率,提高配电网运行经济性的研究,无论是从运行实际还是从研究现状来看都表现出很强的迫切性。

配电网无功优化就是建立在已有综合自动化基础之上,在保证配电网安全可靠运行的前提下,根据不同的负荷水平,控制配电网中已有无功补偿控制设备(如同步发电机、有载调压变压器、无功补偿器等),合理调整配电网中无功功率分布,一方面使配电网满足一定安全约束,使各节点电压满足要求;另一方面使配电网的有功损耗最小,无功补偿设备的投资最小。为此,必须解决好无功补偿的配置方式和最佳补偿容量两个问题。

1. 配电网无功补偿方式

配电网中最常用的无功补偿装置是并联电容器,并联电容器具有投资省、安装不受自然条件限制、运行简便、可靠性高等优点。

(1) 按电容器是否投切分类的方式

进行无功补偿的并联电容器组分为不可投切电容器组和可投切电容器组,无功补偿方式也可以分为固定补偿和分时、分组、分相补偿,以及无功自动补偿。

1) 采用不可投切电容器组进行固定补偿。

以前,电容器基本都采用固定补偿。此种情况下,电容器的容量和投运都是固定不变的,这就需以系统的最小负荷方式来确定补偿点及其补偿容量,容量相对较小。采用无功电容固定补偿的方法可以提高线路的功率因数,但是如果固定的按最大无功缺额功率进行补偿,在负荷减小时就会出现过补偿;如果按最小无功缺额功率补偿,在负荷增大时就会出现欠补偿。所以这种补偿方式的最大缺点就是在后半夜电压高时电容器不能切除,形成无功过剩,向线路倒送无功,对电网的电压调整造成困难,且电容器可能与邻近变压器会发生谐振,威胁电网安全。此外,固定补偿并不能减少电压的波动范围,仅能提高运行电压水平,这对于一些电压水平已偏高的配电网将导致供电质量的变化。

固定补偿具有费用少、装置简单的特点,是我国配电网普遍采用的无功补偿方式。但是固定补偿的灵活性太低,已不太适合现在快速发展变化的农村电网。固定补偿适用于负荷变化不大的电网,可以用于进行无功基荷的补偿。

2) 采用可投切电容器组进行分组投切。

现在,自动控制技术的发展,使得电容器自动投切装置已经很成熟了,能做到按电压高低和无功需求的变化分组、分时、分相投切,而且免维护,基本解决了固定补偿的缺点。不论对季节性负荷,还是日波动较大的负荷,电容器自动投切装置都可以为其提供有效的无功补偿容量。但是电容器自动投切装置的投资与固定补偿的电容器装置的投资相比一般要大几倍。

(2) 按电容器安装位置分类的无功补偿方式

在配电网中主要采用并联电容器来进行电网的无功补偿。无功补偿方式主要有变电站集中补偿、低压集中补偿、线路杆上无功补偿和用户终端分散补偿,如图 6-6 所示。

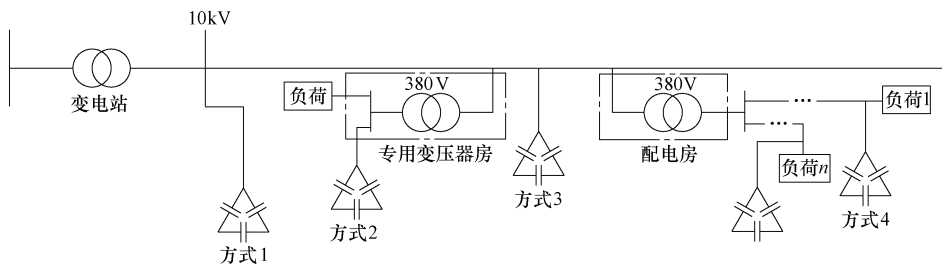


图 6-6 配电系统无功补偿方式

1) 变电站集中补偿方式。

针对输电网的无功平衡,在变电站进行集中补偿(方式1),补偿装置包括并联电容器、同步调相机、静止补偿器等,主要目的是改善输电网的功率因数、提高终端变电所的电压和补偿主变压器的无功损耗。这些补偿装置一般连接在变电站的10kV母线上,因此具有管理容易、维护方便等优点,但是这种方案对配电网的降损起的作用很小。由于在站内运行环境较好,控制也比较方便,再加上主变压器容量大,降损效果显著,所以安全性和经济性都较好。这种方式的不足之处在于不能补偿配电线路和配变的无功缺额。而对于配电网而言,后两者所占的无功损耗又较大,所以单单安装变电站无功补偿装置是不够的。

变电站集中补偿总补偿容量按主变压器容量的15%~30%考虑。采用集中补偿方式,一般需要设专门的电容器室或采用室外集中布置。另外,还需要配置较完善的保护以及控制投切电容器的一、二次设备,投资较大。此种方法不能解决下一级电网的网损。

2) 低压集中补偿方式。

配电变压器380V侧进行集中补偿(方式2),作用是补偿各个配电变压器及配电线路的无功缺额,就地提供负荷的无功功率,有效地减少无功流动,减少10kV线路和配电变压器的无功损耗,保证负荷的电压合格。

目前,国内较普遍采用的配电变压器380V侧进行集中补偿方式,通常采用微

机控制的低压并联电容器柜,容量在几十至几百千乏不等。根据用户负荷水平的波动投入相应数量的电容器进行跟踪补偿。其主要目的是提高大容量综合配变和专用变压器用户的功率因数,实现无功就地平衡,对配电网和配电变压器的降损有一定作用,也有助于保证该用户的电压水平。这种补偿方式的投资及维护均由专用变压器用户承担。

3) 线路杆上无功补偿方式。

线路杆上无功补偿方式(方式3),即在高压侧节点(10kV线路和配电变压器高压侧)加装无功补偿控制装置和电容器组,作用在于补偿线路上的无功缺额,减少10kV线路的有功无功损耗。由于配电网中大量存在的公用变压器没有进行低压补偿,使得补偿度受到限制。由此造成很大的无功缺口,需要由变电站或发电厂来填补。大量的无功沿线传输使得配电网网损仍然居高难下,因此可以采用10kV户外并联电容器安装在架空线路的杆塔上(或另行架杆),进行无功补偿,以提高配电网功率因数,达到降损升压的目的。

4) 用户终端分散补偿方式。

目前我国城镇,低压用户的用电量大幅增长,企业、厂矿和小区等对无功需求都很大,直接对用户末端进行无功补偿(方式4)可最恰当地降低电网的损耗和维持网络的电压水平。

《供电系统设计规范》(GB50052—2009)指出,容量较大、负荷平稳且经常使用的用电设备无功负荷宜单独就地补偿。故对于企业和厂矿中的电动机,应该进行就地无功补偿,即随机补偿。

针对小区用户终端的负荷小、波动大、地点分散、无人管理等特点,应该开发一种新型低压终端无功补偿装置,并满足以下要求:①智能型控制,免维护;②体积小,易安装;③功能完善,造价较低。

与前面三种补偿方式相比,这种补偿方式将更能体现以下优点:①线损率可减少约20%;②减小电压损失,改善电压质量,进而改善用电设备启动和运行条件;③释放系统能量,提高线路供电能力。其缺点是由于低压无功补偿通常按配电变压器低压侧最大无功需求来确定安装容量,而各配电变压器低压负荷波动的不同时段造成大量电容器在较轻负荷时的闲置,设备利用率不高。

2. 配电网无功优化模型

在配电网当中,无功优化调节一般通过调整同步发电机的无功出力、投切无功补偿电容器组和调节有载调压变压器的分接头来实现,这就要用优化方法来确定发电机的机端电压、无功补偿容量、补偿地点、变压器分接头位置及它们之间的相互配合,其数学模型包括目标函数、等式约束和不等式约束。

(1) 优化目标函数

在实际工程应用中,无功补偿装置必然会产生有功损耗及运行维护费用。另外,当配电网无功资源不足时,需要增加无功补偿设备,产生额外投资。因而,系统在追求有功网损最小的同时,应综合考虑无功补偿装置总投入最小,并建立目标函数。

$$f(u, x) = \min \left[\sum_{i=1}^n Q_{Ci} (\Delta P_C CT + K_1) + C \Delta P \right] \quad (6-16)$$

式中,前两项考虑无功补偿装置总投入最小,最后一项考虑有功网损最小; $u = [D_{QC}, D_T]$ 为控制变量; $x = [U_D, \theta]$ 为状态变量; D_{QC} 指无功补偿电容器投切组数; D_T 为有载调压变压器档位调节; n 为加装无功补偿装置的节点数; Q_{Ci} 为节点 i 上无功补偿容量 (kvar); ΔP_C 为每 kvar 无功补偿容量的有功损耗; C 为上网电价 [元/(kW·h)]; T 为年运行小时数 (h); K_1 为电容器年运行维护费用 (元/kvar); ΔP 为系统有功损耗,可用下式表示:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (6-17)$$

(2) 等式约束

等式约束即满足潮流约束方程。变压器分接头的调节、无功补偿容量的确定、发电机机端电压的调节都必须满足潮流方程。

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (6-18)$$

式中, P_i 、 Q_i 、 U_i 分别为节点 i 处的注入有功功率、无功功率和电压; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的电导、电纳和相角差; N 为节点总数。

(3) 不等式约束

无功优化问题中的变量约束可分为控制变量约束和状态变量约束。分接头可调变压器变比 T 、补偿电容量 C 和发电机机端电压 U_g 为控制变量;节点电压 U 和发电机注入无功 Q_g 为状态变量。

控制变量的不等式约束如下:

$$\begin{cases} T_{imin} < T_i < T_{imax} \\ C_{imin} < C_i < C_{imax} \\ U_{gkmin} < U_{gk} < U_{gkmax} \end{cases} \quad (6-19)$$

式中, T_{imax} 、 T_{imin} 为变压器变比的上下限; C_{imax} 、 C_{imin} 为并联补偿电容量的上下限; U_{gkmax} 、 U_{gkmin} 为发电机机端电压的上下限。状态变量的不等式约束为 $U_{imin} <$

$U_i < U_{imax}$, U_{imax} 、 U_{imin} 为节点电压的上下限。

6.2 智能配电网 AVC

随着能源价格的上涨、环境污染的加重以及互连电网灾难性事故的频发,同时电网与电力市场、客户之间的关系越来越紧密,客户对电能质量的要求逐步提高,可再生能源等分布式发电资源数量不断增加,传统的电力网络已经难以满足要求。为此,提出发展智能电网的设想,以实现传统电网的升级换代。

6.2.1 智能配电网与配电网 AVC

智能电网的建设中,智能配电网应当是建设重点,这是由智能配电网在智能电网中的重要地位决定的。智能配电网是智能电网的重要组成部分,关系到我国电网的智能化是否能够顺利实现。

1. 智能配电网概念

智能配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接入和微网运行,鼓励各类不同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、优化和作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、定制电力技术等,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,其架构如图 6-7 所示。

2. 智能配电网的特征

与传统的配电网相比较,智能配电网具有如下特征:

1) 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。

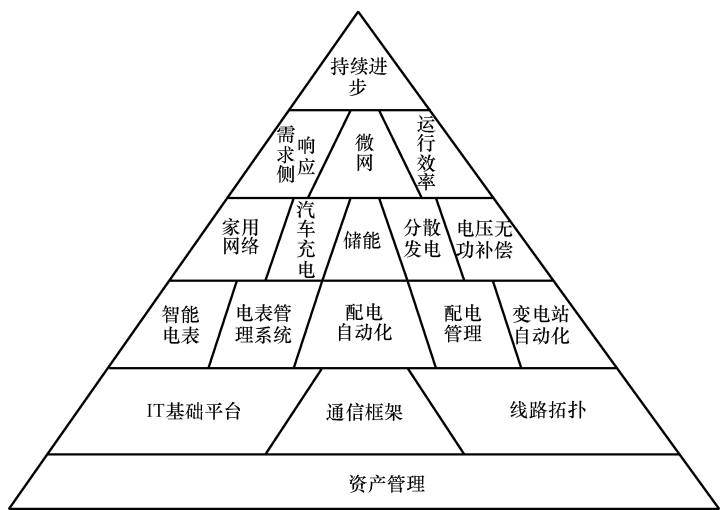


图 6-7 智能配电网框架

2) 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，实现无功电压的优化控制，保证电压合格，实现对电能质量敏感设备的不断、高质量、连续性供电。

3) 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，与配电网实现无缝隙连接，实现“即插即用”，支持微网运行，有效地增加了配电网运行的灵活性和对负荷供电的可靠性。

4) 更强的互动能力。通过智能仪表和用户通信网络，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。

5) 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。

6) 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。

3. 智能配电网的功能要求

要保证配电网安全、可靠、经济地运行和向用户供电，不仅需要电力网络和通信网络的物理支持，还需要有集成各种高级应用功能的软件支持。

1) 从网架结构上来讲，智能配电网应该具有可靠而灵活的分层、分布的拓扑，满足配电系统运行控制、故障处理、系统通信的要求。

2) 从运行控制上来讲，智能配电网应该既具有正常运行时实时可靠地系统监

视、隐患预测、智能调节、优化运行的能力,又具有系统非正常运行时的预防校正、紧急恢复、检修维护控制能力。

3) 从通信上来讲,智能配电网应该具有建立在开放的通信架构和统一的技术标准基础之上的高速、双向、集成的通信网络设施,以实现电力流、信息流、业务流的一体化统一。

4) 从软件组成上来讲,智能配电网应该是基于 Unix、Windows NT 平台的完整系统,高度集成 SCADA、PAS、DA、GIS、DMS,既能满足配电系统安全运行的要求,又能满足各类用户方便使用的要求。

4. 智能配电网发展目标

智能配网的发展目标主要有以下几个方面:

1) 实现故障快速处理。采用智能优化技术迅速判断出故障区域,将故障隔离在最小范围内并最大限度地恢复受故障影响的健全区域供电,缩短停电时间、减小停电面积,提高供电可靠性。智能配网能在较短的时间内完成大量开关的切换操作,实现大面积停电快速恢复。

2) 实现配网优化运行。智能配网具备遥测功能,能监测配电网的负荷分布,利用配电自动化系统对配电网进行分析和优化计算,通过遥控实现配电网网络重构;通过均衡负荷扩大供电能力;通过经济运行降低损耗;通过对分散无功和调压资源的协调控制提高供电电压质量。

3) 实现相关系统集成。遵循 C61968 推荐的企业服务总线,采取规范的接口方式,实现与调度自动化系统(SCADA)、生产管理系统(PMS)、营销管理系统(CIS)等的互连,提高智能配网系统运行管理的智能化水平。

4) 实现分布电源接入。安全、无缝地容许包括分布式电源如光伏发电、风电、小型燃气轮机、先进的电池系统等各种不同类型的发电和储能装置接入系统,并做到“即插即用”。与此同时,分布式能源的接入和控制也对智能配网提出了新的要求,尤其是涉及配网潮流计算和分析以及分布式电源对系统的影响。

5) 实现用户互动技术。通过与用电营销系统的结合,与用户建立起双向实时的通信,通知用户其电力消费的成本、实时电价和电网目前的状况、计划停电信息以及其他一些服务的信息,同时也支持用户根据这些信息制定自己的电力使用方案。让用户参与电力系统的运行和管理。

5. 智能配电网 AVC 研究现状

配电网 AVC 的研究和应用国内外并不多见,智能配电网 AVC 的研究就更少见,智能配电网 AVC 的建设面临重重困难。

(1) 硬件方面

配电网投资比例少,很多先进设备和基础设施不到位,导致配电网遗留问题解决不了,新技术应用不得力。配电网本身具有面向用户、用户数量多、设备多、要

求不一、设备线路改动多、网络拓扑复杂等特点,而目前配电网在线监测、测控设备少,严重影响数据采集、遥控和遥调功能,制约了电网优化控制软件的投入使用和配电网自动化水平的提升。

然而,好的消息是,各界人士已经意识到需要加快建设智能电网的必要性,并付诸了实施。现代技术发展和交融迅速,相信随着智能配电网建设的深入,智能配电网 AVC 的建设在硬件方面的问题将逐步解决。

(2) 软件方面

配电网 AVC 的研究和应用几乎是空白,配电网 AVC 的研究参考少,知识储备不够,更困难的是智能配电网必然会与普通配电网有很大区别,面临着大变动后智能配电网在电压控制和无功优化方面有什么样的新问题,原来的优化模型是否还有可用之处等一系列问题。此外,政策等不定因素对配电网的影响更直接更明显。可以肯定的是电费计价方式的改变和分布式电源的广泛并网运行必然会影响负荷总量的变化,直接影响负荷预报的准确度,从而给无功容量预测精度带来很大影响。

但是,这些问题不是说智能配电网 AVC 没有必要、没有可能建设成功。相反,智能配电网 AVC 的建设相当有必要,它必将会极大地优化配置资源,节约社会能源,减少网损,控制功率因数,产生巨大的社会效益和经济效益。当前,应充分发挥想象力,调动积极性,加大投入研究开发智能配电网 AVC。

6.2.2 智能配电网 AVC 的关键技术

1. 自愈技术

自愈是智能配电网区别于传统配电网的重要特征,同时也是智能配电网 AVC 的关键目标。智能配电网 AVC 自愈是指配电网的自我预防、自我恢复的能力,这种能力来源于对电网重要参数的监测和有效的控制策略。自我预防是通过系统正常运行时对电网进行实时运行评价和持续优化来完成的;自我恢复是电网经受扰动或故障时,自动进行故障检测、隔离、恢复供电来实现的。

智能配电网 AVC 自愈的控制原则是不间断供电,目标是:首先,要通过配电网运行优化和预防校正控制,来避免故障发生;其次,如果故障发生,通过紧急恢复控制和检修维护控制,使得故障后不失去负荷或失去尽可能少的负荷。如果发生了电网连锁停电或瘫痪事故,意味着电网自愈控制失败。在控制逻辑和结构设计上,配电网自愈控制应该坚持分布自治、广域协调、工况适应、重视预防的基本原则。

智能配电网 AVC 自愈涵盖了自动控制、继电保护、计算机和软件、应用数学等领域的很多新技术,是一种集成了软件和智能装置的综合控制技术。其基本组成包括基于自愈理论的高级可视化实时预测和快速仿真软件工具、坚强而灵活的配电网物理架构、分布而相互协调的智能装置和设备、标准而一体化的智能配调中心。

特别地,要实现配电网的自愈控制,至少需要满足如下条件:

(1) 具备各种智能化的开关设备和配电终端设备

配电网中的智能开关设备具有高性能、高可靠性、免维护、硬件软件化特点和在线监测、功能自适应、自诊断等功能,可提供网络化远动接口;配电终端设备应具有故障自动检测与识别功能,提供可靠的不间断电源,满足户外工作环境和电磁兼容性要求,支持多种通信方式和通信一协议,具有远程维护、诊断和自诊断功能。开关设备和配电终端设备有选择性地具有遥信、遥测、遥控、和遥调等“四遥”功能。

(2) 配电网系统中拥有双电源或多电源,具有灵活可靠的拓扑

坚强的物理架构是配电网进行自愈的物理基础,适应是自愈的基本原则之一。智能配电网要实现“手拉手供电”,网络当中要兼容分布式发电、可再生能源和储能装置,并能灵活调度;同时,网架结构要灵活、坚强、可靠,既能实现正常运行下的拓扑优化,又能实现故障控制中的拓扑快速重构。

(3) 可靠的通信网络

智能配电网 AVC 自愈是通过在控制或调度中心自适应地在线、实时、连续分析和远方遥控实现的,要求配电通信网络必须可靠,要考虑主通信网络瘫痪情况下的备用通信网络或备用通信方案。同时,还要求通信速度要快,信息处理能力要强。

(4) 自动化处理软件系统

要实现智能配电网 AVC 的自愈,离不开自动化软件处理系统,要最终嵌入到配调监控中心系统来实现。届时,将会在很大程度上提高配电网的整体自动化水平、优化能力和自愈控制能力,为配电网的智能化增加有力的砝码。自动化处理软件系统具有以下优点:①连续实时预测系统状态;②实时系统状态评估;③算法的自适应;④实时优化和自愈控制;⑤系统的整体性和统一性;⑥巨大的经济价值和社会效益。

2. 先进的通信和数据处理技术

智能配电网是一个高度开放的网络系统,需要通过建立先进的通信系统来实现系统每一部分都能双向通信。

AVC 系统应当对 SCADA 等平台一体化设计,实现数据的无缝连接。而目前配电 SCADA 系统由于起步晚、配电网设备多、用户多、改动多、故障频率高等原因尚不完善。配电 SCADA 系统作为配电网自动化的基础,需要加快研究和开发进度。

传统 AVC 数据库容量较小,随着智能配网建设的深入,必然要求智能配电网 AVC 考虑和存储海量数据。系统可采用数据全息无损压缩技术和先进的分布式数据库技术。

此外,智能配电网 AVC 自身携带的某些工具软件,高度集成接口、趋势、报表等服务在数据库内,使得系统更简洁高效。不仅如此,系统还应做到将异常数据自动推送出来,便于用户将更多的精力放在应用的易用性和实用性上,提高自动化水平;借助海量数据的迅捷吞吐和长时间的数据在线存储,完整、精确和无损地再现任一时间段的故障回放;将可视化组态工具嵌入数据库,与数据捆绑,方式更加灵活,历史状态回放更加方便;服务器不对未请求的压缩数据解压,避免系统速度变慢;数据在压缩状态下传输,极大减少对网络带宽的占用;在客户端解压压缩数据,充分有效利用网络中计算资源系统可容纳更多用户同时访问,加快互动化。

3. 信息化技术

信息化是指信息的高度集成、共享与利用以及各类信息精确、高效的采集和传输。其中涉及的关键技术包括通信整合技术、采集抄表及测量技术、企业信息整合技术。

(1) 通信整合技术

配电网通信方式多样,各种通信方式在不同的应用场合都得到了应用。智能配电网通信整合技术目标是通过建立高速、全整合的双向通信技术基础构架,使得智能配网能够进行动态的、互动的实时信息和电力交换。通过这个通信构架可以建立即插即用环境,使得智能传感器、控制设备、控制中心、保护系统和用户能够相互沟通。

(2) 采集抄表及测量技术

智能传感测量技术的设备主要包括 OTC、OPT 和智能电表和智能的传感器等。OTC、OPT 可实现测量、保护与控制设备的数据共享,减少互感器的使用量。智能电表能够完成自动抄表,智能选择用电方式等操作。智能配网采集抄表及测量技术目标是实现配电网全方位的信息采集,并在用户侧提供交互接口。

(3) 企业信息整合技术

信息技术的发展已经到了一个内容时代,各个信息系统的内容抽取和互相通信是智能配网的一个支撑,只有全局的信息整合,才能实现信息的智能。企业信息整合技术采用最新的信息集成技术,结合国内外标准体系,构建一体化的信息共享与交互平台。目前,推荐采用基于 IEC61998 的企业服务总线技术实现配电网信息的一体化整合。

4. 自动化技术

自动化是指电网控制策略的自动优选、运行状态的自动监控和故障状态的自动恢复。其中涉及的关键技术主要有高级电网设备以及主动配电网管理等。

(1) 高级电网设备

使用新材料技术和纳米技术设计的下一代电力系统设计能够更强、更可靠,并能提供实时诊断来提高电网性能。这个技术包括超导电缆,故障电流限制器,复合导线,FACTS,高级储能设备,分布式电源,高级变压器和断路器,智能负荷等。

(2) 主动配电网管理

配电网管理系统收集所有潜在的电网元素的信息, 分析、诊断并提供解决方案, 从确定性和概率性两个方面, 自动采取合适的动作, 提供信息和解决方案给系统运行人员。这种高级控制算法将提供一些应用, 如分布式能源接入、需求侧响应调度、配网自动化、变电站自动化、保护自适应、市场价格、电网建模、高级可视化系统。同时需要整合资产管理过程和运行规划优化。

5. 互动化技术

互动化是指电源、电网和用户资源的友好互动和协调运行。其中涉及的关键技术主要有需求侧响应和用户门户、决策支持和人机界面等。

(1) 需求侧响应和用户门户

通过需求侧响应和用户门户, 真正实现客户作为电力协调运行的一部分, 而不是以前的只是被动的用电, 这包括需求侧分析、负荷控制、电力市场等技术的支撑。

(2) 决策支持和人机界面

在时间上运行人员的决定时间已经由分钟变成秒级, 智能配电网需要广阔的、无缝的实时的应用和工具, 来配置运行人员。这包括人工智能支持的人机界面、运行人员智能告警、半自动代理软件、可视化工具和系统、高性能仪表盘、先进控制和实时动态仿真等。

智能配电网 AVC 系统在人机交互界面应该能够精细显示实时工况和事项, 并能根据用户要求自己选择显示工况和事项、事件回放、更新速度等信息。

6. 灵活的分布式电源

分布式电源种类很多, 包括小型水电、风力发电、燃料电池等。配电网中的分布式电源, 靠近负荷中心, 降低了对电网扩展的需要, 并提高了电网供电可靠性, 逐渐得到广泛应用。与此同时, 由于民用洁净能源技术的日益成熟, 使得一些分布式电源有望在不就的将来走入千家万户。

大量的分布式电源并于中压或低压配电网运行, 彻底改变了传统的配电系统单相潮流的特点, 要求系统使用新的保护方案、电压控制和仪表来满足双向潮流的需要。通过高级的自动化系统把这些分布式电源无缝集成到电网中并协调运行, 将可带来巨大的效益。除了节省对输电网的投资外, 还可提高全系统的可靠性和效率, 提高对电网的紧急功率和峰荷电力支持及其他辅助功能。同时还为系统运行提供了巨大的灵活性, 必要时可提供紧急供电保证系统正常供电。

6.3 智能配电网 AVC 与低电压治理系统的开发和实施

随着生产和生活水平的提高, 农村电网广大电力用户不仅满足于供上电, 也对

电能质量提出了要求。虽然国家电网公司对于电能质量各项指标早有规定,其中要求低压(220/380V)电压允许偏差值为 $-10\% \sim +7\%$,但农村局部地区在用电高峰期间仍达不到此要求。

6.3.1 低电压概述

为更好地服务家电下乡,推进社会主义新农村建设,国家电网公司在开展农村用户电压质量调查的基础上,部署开展农村低电压综合治理,力争用两年左右的时间基本解决当前农村存在的低电压问题。

1. 低电压产生的原因

农网一般供电线路半径较长,供电变压器容量较小,供电线路的线径较细,无功补偿设备少,线路电压损失较大,加之“家电下乡”政策的落实,农村用电不断攀升,用电负荷大幅增长,线路末端电压低的情况越发严重。

1) 在农村电网中,部分地区供电半径大、低压线路线径细、下户线设计标准低,且设计电压等级220V偏多。随着家电下乡和农村经济的发展,农村生产生活用电负荷增加,致使用电高峰期变压器不堪重负,线路过电流导致电压降增大,形成末端用户的电压偏低。

2) 城郊及农村地区,由于平时用电负荷较低,一旦到了冬、夏两季用电高峰期,人口密度大,用电负荷集中,用电量将比平时高2~3倍,直接导致了电压降低。

3) 配电变压器超负荷现象严重,导致电压质量下降、供电范围内的配变负荷率大。

4) 资金匮乏,大规模的电网建设与改造难度加大。

5) 无功电压监测管理相对较弱,对局部重负荷地区、偏远地区,电压监测装置安装、监测分析和“低电压”预控不力。

2. 低电压改造采取的措施

国家电网公司坚持技术措施与管理措施并重原则,从规划设计、建设改造、生产运行、营销服务等环节入手,落实低电压综合治理工作方案,强化过程跟踪,采取多种措施开展农村低电压综合治理。

1) 开展摸底排查,全面掌握电网信息情况。根据投诉记录,结合负荷实测对电压质量差的台区进行低电压普查,并利用电压监测装置,对各配电台区低电压数据记录和分析,查找原因。对客户投诉比较集中、情况特别严重的地区及时进行整改解决落实,对当前各级电网运行情况进行认真分析,详细掌握低电压形成的原因和特点。

2) 科学制定、合理安排电网建设改造规划。通过电网运行分析、梳理电网薄弱环节,积极筹措资金,分轻重缓急统筹安排项目实施。

3) 加强电网运行分析。在运行分析的基础上, 建立保障电压质量的常态机制, 每个季度要对配电网的用户电压质量问题进行专题分析, 完善配电网电压质量监测, 提出有效的整改措施, 并在夏季用电高峰来临之前, 超前预控, 确保不发生大面积停电。

4) 加大对农网配电设备的巡检力度, 开展配电变压器负荷测量和电压测量, 对重负荷的配电设备、故障率高的设备以及三相负荷不平衡的地区, 及时采取有效措施予以整治。

5) 加强无功电压监测管理。对局部重负荷地区、偏远地区, 安装电压监测装置, 重点开展监测分析和低电压预控。对无功容量不足或补偿方式不合理的低电压用户, 通过合理配置和优化无功装置, 动态补偿予以改善。

6) 完善重要时段的供电方案。针对迎峰度夏期间用电需求较大, 或是春节期间外出务工人员集中返乡, 局部区域用电需求激增的现象。一方面要指导居民用户合理开展错峰、避峰用电; 另一方面要提前开展调查摸底, 分析用电高峰时周期特点, 对可能引发低电压的配电变压器地区进行临时性增容改造。

3. 无功补偿对低电压的影响

无功功率过少使系统电压降低, 线路中无功电流越大, 造成的系统电压降落也越大, 末端电压也就越低。

采取对 10kV 线路、配电变压器低压侧进行优化补偿的方式, 可减小线路中无功功率, 减小线路电压的损失, 保证末端电压保持在合格基础上。

图 6-8 所示为系统无功补偿方式的配置图。在 10kV 线路上安装线路高压无功自动补偿装置, 在每台配电变压器低压侧安装台区低压无功自动补偿装置。

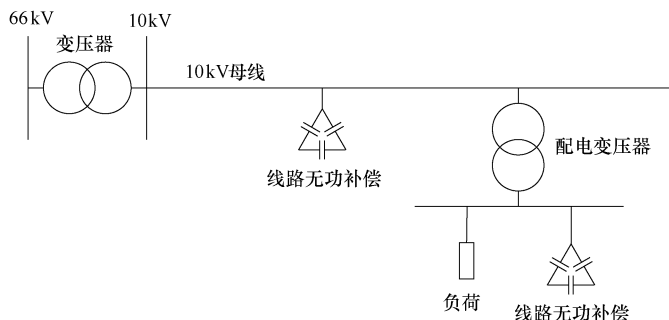


图 6-8 系统无功补偿方式配置图

为了解决农网负荷波动大的问题, 线路高压无功补偿装置和台区低压无功补偿装置, 均采用分组自动投切补偿装置。

无功补偿控制器具有电压时间控制、功率因数控制和电压无功控制三种控制方式。

1) 电压时间控制。首先,按整定的时间划分投切时段,当时间处于投时段时,再按电压控制,即当系统电压低于设定的电压投入门限时投入电容器,当系统电压大于设定的电压切除门限时切除电容器。

2) 功率因数控制。功率因数低于功率因数下限定值时投入电容器,功率因数高于上限定值时切除电容器。

3) 无功电压控制。此方式首先为电压优先原则,系统电压低于设定的电压投入门限时投入电容器,系统电压高于切除门限时切除电容器,若系统电压在两者之间时,以无功作为投切判据。当无功量小于无功下限时,电容器投入;当系统无功量高于无功上限时,切除电容器;当系统无功在无功上限与无功下限之间时,装置不动作。

6.3.2 低电压治理的典型方法

华北电网公司在总结试点农村低电压综合治理工作经验的基础上,研究提出了农村低电压治理的典型方法。

1. 变电站、线路、配变电压三级联调技术

(1) 目的

低电压问题涉及面广、用户数量多,采取单一调压手段已无法满足电压调整需求的供电区域,应充分利用系统各级电压无功设备的调压裕度,克服单一调压方式的局限性,提高农网电压调控能力,改善供电质量。

(2) 方法

以居民客户端电压为依据,综合利用现代通信技术、自动控制技术、短期与超短期负荷预测等手段,实现对有载调压主变压器、变电站站内无功补偿设备、线路无功补偿设备及调压装置、配电变压器低压侧及用户侧无功补偿设备等同层多项和不同层多级电压无功协调控制,有效改善供电电压质量。

(3) 条件

1) 变电站主变压器应为有载调压型变压器,且具备远方控制有载分接开关功能;

2) 变电站站内无功补偿设备可实现远方投退;

3) 居民客户端电压监测点数据可通过无线公网、无线专网或电力载波等通信方式上传;

4) 可选配能够实现远方控制的 10kV 线路、配电变压器低压侧及用户侧自动无功补偿装置;

5) 可选配能够实现远方控制的 10kV 线路调压器。

2. 县级电网无功优化补偿技术

(1) 目的

由于无功电源缺乏造成较多居民客户端电压偏低的县域电网, 可根据县级电网无功优化计算结果, 开展变电站、中低压线路、配电变压器、用户侧无功优化补偿建设, 实现无功分层分区就地平衡, 减少无功大量流动造成的损耗, 提高客户端供电电压质量。

(2) 方法

依据无功优化计算分析软件或相关管理系统, 根据不同电压等级电网历史、实时及预测的负荷情况, 按照分层分区无功就地平衡的原则, 经无功潮流优化计算, 在综合考虑技术经济性的基础上, 合理确定电压无功设备的类型、补偿容量、补偿方式和安装位置等, 开展无功优化补偿建设。在负荷波动幅度较大或相对重要的变电站, 建议采用压控调容式电容器成套补偿装置, 实现变电站无功潮流的优化控制。在供电半径长、负荷重、功率因数低的 10kV 线路, 建议采用配电变压器低压侧集中补偿与中压线路补偿相结合的无功补偿模式, 选用自动分组投切的无功补偿装置; 在供电半径较长、负荷轻且较为集中的 10kV 线路, 建议采用 10kV 线路集中补偿模式, 选用自动投切无功补偿装置; 在供电半径较短、负荷轻的 10kV 线路, 建议采用配变低压侧集中无功补偿模式, 实现配电台区无功就地平衡。

(3) 条件

1) 变电站、中低压线路、配电变压器等设备主要运行参数应实现自动监测与上传;

2) 应配备无功优化计算分析软件或相关管理系统, 可开展县级电网无功优化计算;

3) 无功优化补偿管理系统应能实现与调度自动化、配电自动化、营销等管理系统的接口, 综合利用相关实时运行数据。

3. 35kV 配电化建设

(1) 目的

在负荷密度较低、用户分布范围较广、用户侧供电电压偏低的中西部偏远地区或山区, 短期内负荷发展较慢, 若建设 35kV 标准化设计变电站, 则容量闲置较多, 占地面积紧张; 若依靠 10kV 线路供电, 则供电半径较长, 供电能力不足。在这种情况下, 应开展 35kV 配电化建设, 缩短建设周期, 降低工程造价, 减少占地面积, 缩短 10kV 线路供电距离, 提高供电能力, 改善电压质量。

(2) 方法

根据“小容量、密布点、短半径”的原则, 在 35kV 与 10kV 线路交叉或邻近地方及 10kV 线路的负荷中心, 开展“户外式、小型化、造价低、技术先进”的 35kV 配电化建设, 可减少重新架设 35kV 和 10kV 线路工程量, 节省投资, 缩短工期。

建议变电站采用“四框式”结构, 紧凑布局; 主变压器高压侧采用跌落式熔

断路器保护；选用瓷横担，轻型 35kV 线路，采用积木式 10kV 配电装置，模块化 10kV 配电装置设计；选用复合导线和其他通信方式，实现无人值班。

(3) 条件

- 1) 主变压器容量配置不宜过大，宜在 3150kV · A 及以下；
- 2) 10kV 出线不宜过多，宜为 2 ~ 3 回；
- 3) 具备 GPRS 无线网络或专用通信通道实现远程通信。

4. 中低压线路调压器应用技术

(1) 目的

在电压波动较大或电压降较大的中低压线路，通过采用在线路中后段安装自动调压装置的方式，提升用户侧供电电压质量。

(2) 方法

在对中低压线路电压降落和居民客户端电压情况进行详细监测和认真分析的基础上，研究确定调压器安装位置及容量。

中压线路调压方式一：在充分利用原有铁心，夹件等器部件基础上，对变压器箱体、绕组线圈、变压器油进行适当改造和处理，加装有载分接开关后，将老旧的 35kV 变压器或 10kV 配电变压器改造为线路自耦调压器，开展设备的梯度利用，提高设备综合利用率。

中压线路调压方式二：购置成套线路调压器，进行柱上安装，缩短建设周期。低压线路调压方式是在对供电半径长、线路后段所带用户数量不多、“低电压”问题较为严重的低压线路进行充分的经济技术分析后，选择合适位置安装数字式电压补偿装置，从而提升客户端供电电压质量。

(3) 条件

1) 中压线路调压方式适用于供电半径较长（大于 15km）、线径较细，功率因数大于 0.9，暂无线路改造计划或改造代价过大，短期内暂无资金实施 35kV 变电站布点改造，末端配电台区低压用户电压偏低，采用变电站调压方式难以满足供电质量要求的 10kV 线路。

2) 低压线路调压方式适用于供电半径较长（大于 500m）、线径较细，功率因数大于 0.9，暂无低压线路改造计划或改造代价过大，短期内暂无资金实施配变布点改造，末端低压用户电压偏低，采用调整配电变压器分接头调压方式难以满足供电质量要求的低压线路。

5. 宽幅无载调压配电变压器应用

(1) 目的

采用宽幅无载调压配电变压器，增大配电变压器自身调压范围，克服传统配电变压器调压范围无法满足电压调整需求的缺点，提升配电台区电压调控能力。

(2) 方法

详细分析配电台区所带负荷特性及变化规律,充分利用配变综合参数监测终端或人工定期监测等手段,准确掌控配电台区电压最大波动范围,因地制宜,研究采用 $\pm 24 \times 2.5\%$ 、 $\pm 3 \times 2.5\%$ 或其他调压区间的定制宽幅无载调压配电变压器,并根据配变一次侧电压输入和负荷波动情况,及时调整分接头,使配变二次侧输出电压处于合格范围。

(3) 条件

1) 适用于中低压线路供电半径较长,配电变压器一次输入电压较低或所带末端低压用户电压偏低,采用常规 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2 \times 2.5\%$ 无载配电变压器调压,无法满足首末端低压用户供电质量的配电台区。

2) 应根据配变负荷变化规律和特点,制定相关的管理制度和办法,及时调整配电变压器分接头。

其他治理方法有:老旧变压器扩容改造、单三相混合供电模式应、调容配变和子母配变应用、电压质量监测网络建设、农村低压负荷需求侧管理、配电变压器负荷三相不平衡治理、配电变压器分接头调整管理、建立健全电压质量管理与考评体系、农村低电压综合治理管理信息平台建设等。

6.3.3 农网全网电压无功协调控制系统

《电力系统电压和无功电力技术导则》指出:电压是电能质量的重要指标,电压质量对电力系统的安全与经济运行,对确保用户安全生产和产品质量以及电气设备的安全与寿命有重要的影响。电力系统的无功补偿与无功平衡是确保电压质量的基本条件,有效地控制和合理的无功补偿,不仅能确保电压质量,而且还可提高电力系统运行的稳定性和安全性,降低电能损耗。

本软件系统重点包括三级:第一级是指对全县变电站无功电压控制,主要包括调整主变压器分接头和无功补偿设备;第二级是指对 10kV 线路电压无功控制,主要包括线路自耦调压器和无功补偿设备;第三级是指对 10kV 配电变压器无功电压控制,主要包括调整有载配电变压器分接头和无功补偿设备,以调整无功为主。三级联调的控制策略由全网电压无功控制系统完成,分为开环运行和闭环运行两种方式。

1. 系统概述

(1) 农网电压协调控制系统利用电网三级协调控制改善“低电压”现象。

三级协调控制的控制逻辑和策略需综合考虑农网各电压等级、各类调压与无功设备的协调控制,系统地对电网“低电压”现象进行综合治理,参与协调控制的控制设备如图 6-9 所示。需要说明的是这些参与协调控制的控制设备视电网条件可以是一部分而非全部。相应的协调控制以“相邻协调”控制为基础(“相邻协调”是指“用户”与“配变”协调控制、“配变”与“线路”协调控制、“线路”与

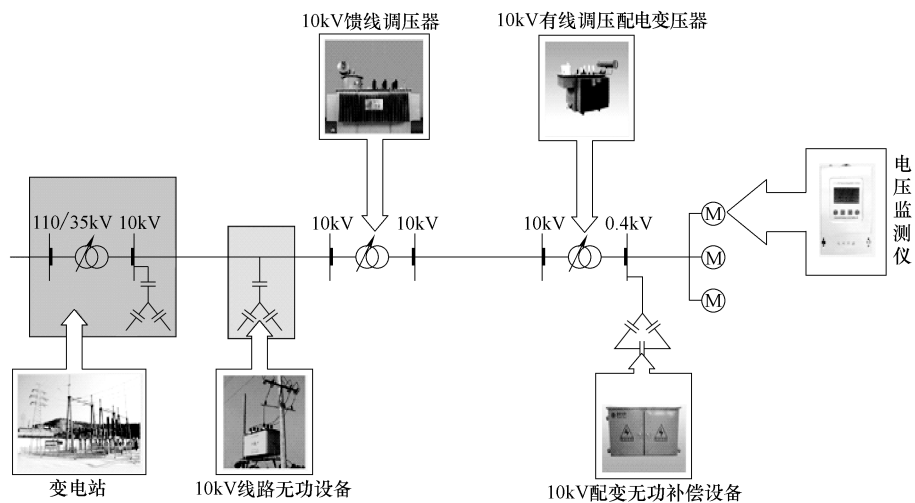


图 6-9 参与协调控制的设备

“变电站”协调控制)，构建更为复杂的“隔邻协调”控制（“隔邻协调”是指在“相邻协调”控制基础上，综合各级调控能力，允许穿越协助调压的协调控制）。

(2) 三级无功电压协调控制系统架构

针对三级协调控制系统横跨一级安全区、三级安全区、外网的情况，从外网至三级安全区采取无线通信 + 专线的方式，三级至一级安全区采用串口通信的方式，以此可保障信息传输的安全性，如图 6-10 所示。

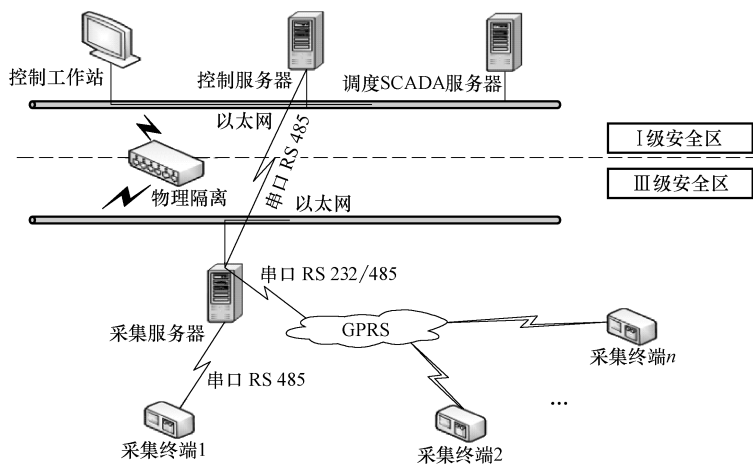


图 6-10 三级无功电压协调控制系统架构

(3) 三级无功电压协调控制系统架构的设计及实现

因为三级协调控制设计到整个农电网，相应的数据采集与控制命令的通信通

道、数据流涉及多种安全区。譬如，需对变电站层的进行控制，而变电站层的控制需要与调度进行数据交换，调度属于一级安全区域；对 10kV 线路及配电变压器的监控、低压用户电压监测的采集服务器位于三级安全区域，采集通信方式为 GPRS，而 GPRS 通信涉及外网。鉴于此种状况，系统采用串口通信完成一级安全区域与三级安全区域的安全通信，三级安全区域与外网采用加密的无线通信和专线实现安全通信。

(4) 三级无功电压协调控制系统控制策略

三级协调控制不同于现有的 VQC、AVC 系统，相比较其协调控制更复杂。主要涉及对有载调压主变压器的调压控制、站内无功补偿设备控制、10kV 线路调压器控制、10kV 无功设备控制、有载调压配电变压器的调压控制、配电变压器的低压无功补偿设备控制、配变台区低压用户电压监测等同层的多项、不同层的多级协调控制。在对每层控制时都应考虑其对其他层的电压无功影响；在每层需要控制时，都应合理考虑是否是通过其相邻上层还是其越级上层进行调控，这样确定动作顺序的目的主要是准确定位低电压源头，从统筹最优角度在源头上解决问题。

(5) 三级无功电压协调控制系统数据采集

由于三级协调控制必须实现现有无功电压设备的数据接口，而现有无功电压设备来自不同厂家、不同型号，通信协议不同，采集方式不同。跨越不同安全区域时也涉及多种通信方式。因此需要根据不同设备情况开发兼容多种通信协议、多种采集方式的数据采集程序。

2. 系统主要功能模块介绍

系统共分为以下几大功能模块，见表 6-1。

表 6-1 系统主要功能模块

模块	功 能 介 绍
系统管理	可以添加、编辑、删除区域信息和用户信息
接口管理	与变电站层 SCADA 交互,接收数据与发送控制命令
电网建模	对电网结构参数和运行参数进行图形化管理
参数维护	对系统运行参数以及电网考核约束进行维护设置
电网监视	对高、中、低压网进行图形化监视以及控制实验
变电站控制子系统	变电站层优化控制子系统
事项告警	对系统产生的事项进行文字告警以及短信告警
曲线报表	查询系统历史事项以及电压合格率等报表、曲线
Web 展现	提供浏览器访问方式,对电压合格率等项进行图、表展现

(1) 系统管理

用户管理：可以添加、删除用户信息，编辑修改用户信息、添加用户角色、修

改角色权限。

(2) 接口管理

农电网电压协调控制系统通过接口程序实现与集控 SCADA 系统实时通信，自动获取变电站层 SCADA 系统实时数据。系统在线拓扑分析和优化计算，实时地与变电站层 SCADA 系统通信，向变电站层 SCADA 系统发出控制命令，通过集控 SCADA 系统实现对电容器（电抗器）等无功设备的自动投切、主变压器分接头的自动升降及发电机无功出力的调节。

线路、配电变压器层采用 GPRS 通信模块，按一定周期实时地与线路、配电变压器层数据采集设备通信，实时获取电网运行数据，同时系统通过优化计算，实时地将线路层控制命令通过 GPRS 模块发送至设备，实现对电容器等无功设备的自动投切，配电变压器、线路调压器分接头的自动升降。

(3) 电网建模

能够编辑电力系统所要描述的系统接线图并录入对应的电网数据。

1) 高压电网结构图，如图 6-11 所示。

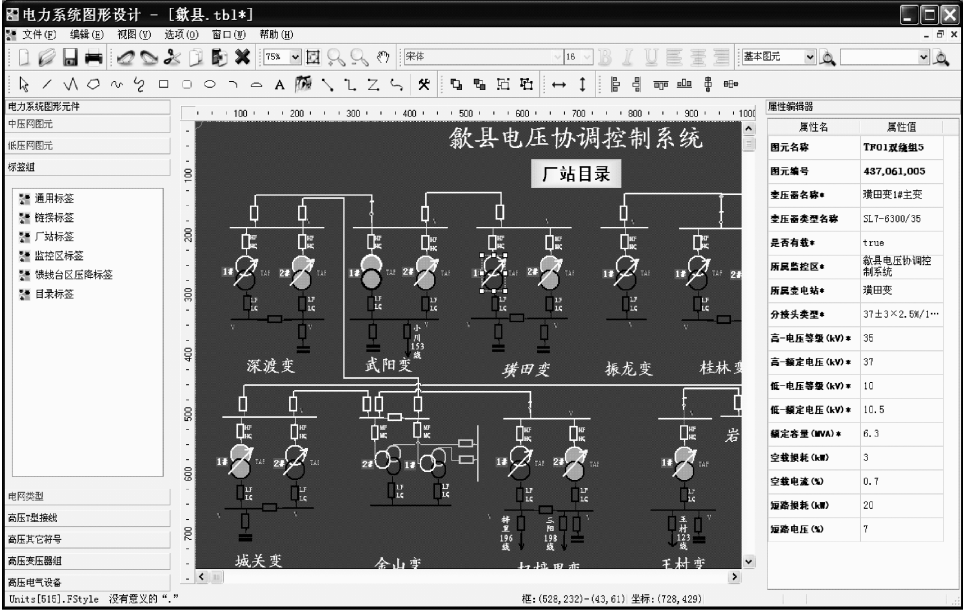


图 6-11 高压电网结构图

对于 10kV 以上的变电层电网，生成一张高压图，并将相应设备的台账信息和电网量测点号进行录入，以备电网进行优化计算。

2) 中压电网结构图，如图 6-12 所示。

对于 10kV 的每条馈线，生成一张中压图，并将相应设备的台账信息和馈线监测设备编号进行录入，以备中压网优化计算以及控制使用。

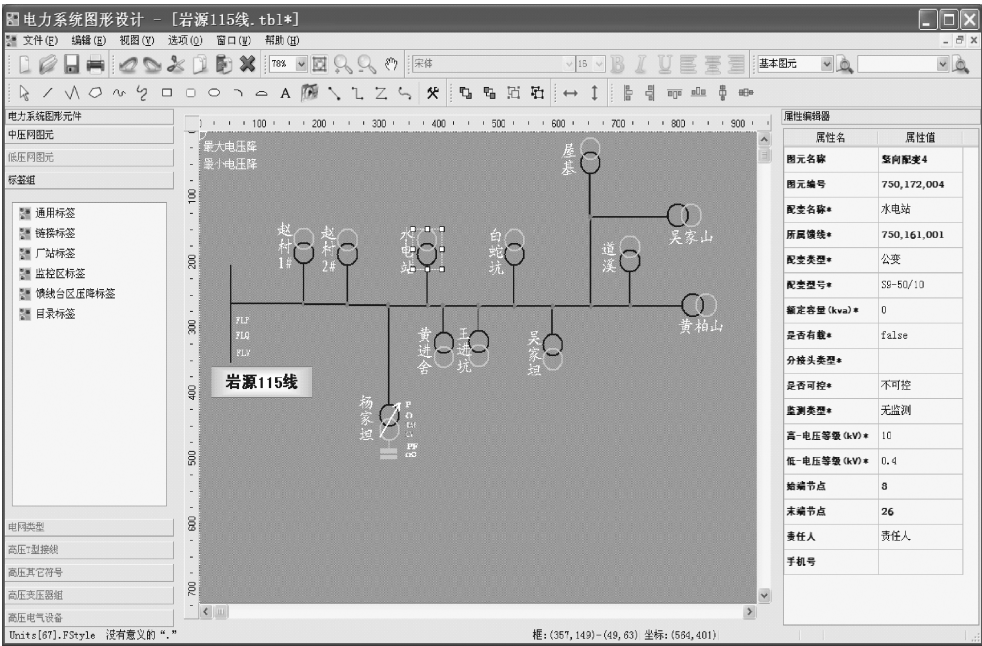


图 6-12 中压电网结构图

3) 低压电网结构图, 如图 6-13 所示。

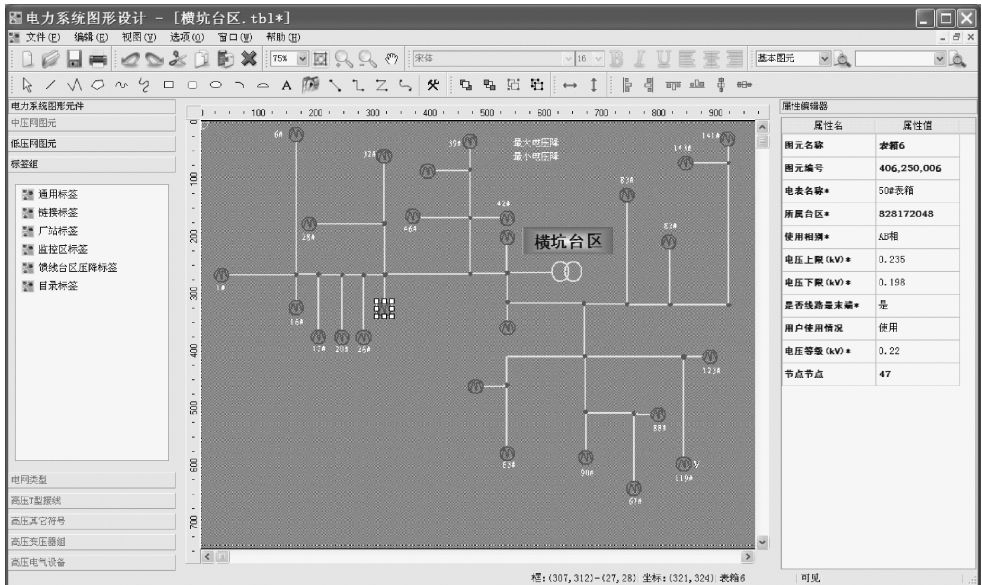


图 6-13 低压电网结构图

对于每条 10kV 馈线下的每个台区，生成一张低压图，并将相应设备台账信息和电压监测仪监测点号进行录入，以备监测用户电压用。

(4) 参数维护

对系统相关参数进行配置，包括变电站层状态、设备闭锁时间、电压考核上下限，设备动作次数等，可远程进行配置，客户端进行设置后将结果更新到服务器。

1) 对系统变电站层状态进行维护，包括：全网优化状态（参与计算、不参与计算）、监控中心优化状态（参与计算、不参与计算）、变电所优化状态（参与计算、不参与计算）、设备优化状态（参与计算、不参与计算）。

2) 闭锁设置包括：成功闭锁时间、失败闭锁时间、未处理闭锁时间。

3) 系统变电站层考核指标设置包括：

① 考核电压。具体包括电压越限判断连续测点次数、根据时间段设置各个限值，时间段可由用户定义、母线电压警戒限设置、母线电压考核限设置。

② 功率因数。具体包括全网功率因数设置、功率因数越限判断连续测点次数和变电站功率因数设置。

③ 动作次数。具体包括变压器分接头、电容器、电抗器每天动作次数分配，电容电抗器动作权级，使用年限、本月总运行时间、本月总停运时间、最后一次动作、当天动作次数、最近一周动作次数。

4) 变电站层数据采集点号维护包括：遥测数据（厂站号、遥测号、遥信名、SCADA 厂站号、SCADA 遥测号）和遥信数据（厂站号、遥信号、标志位、系数、SCADA 厂站号、SCADA 遥测号）。

5) 控制点号维护包括：各监控站控制接口（厂站号、控制设备名、控制点号）。

(5) 电网监视

电网监视功能可监视到变电站层的一次图形、中压馈线图形以及台区图形，并可刷新电网实时数据，可通过图形查看到设备参数及状态。中低压线路还在监视界面做控制实验（远程通过 GPRS 控制设备），可监视发生的事件信息。

1) 全网目录。

全网目录可提供快捷直观的图形目录，方便用户快速连接进入电网图形，并实时监视馈线、台区相关电压监测点电压越限情况，如有越限，相关目录标签将闪烁提示，如图 6-14 所示。

全网目录包括馈线目录、台区目录、标签链接和越限提示。

2) 高压一次接线图监视。

高压一次接线图可监视变电站层一次主接线图，刷新电网实时数据，显示设备优化控制状态，显示厂站功率因数，并具有电压越限标签自动提示，如图 6-15 所示。高压一次接线图主要包括：变电站层全网图形显示、实时刷新电网量测数据、



图 6-14 全网目录图

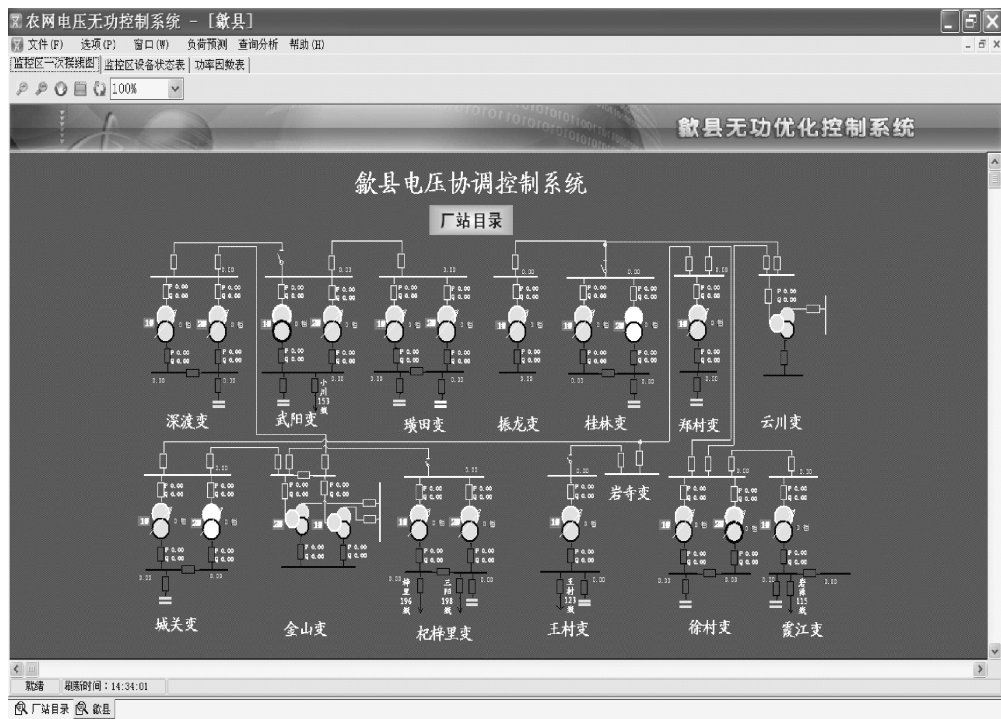


图 6-15 高压一次接线图监视图

显示设备优化控制状态、各变电站功率因数列表、设备优化控制状态设置、设备台账查询、人工置数、标签链接等。

3) 馈线接线图监视。

馈线接线图可监视馈线为单位的接线图，刷新有监测的设备实时数据，显示母线到相应监测点的电压降值。此外，还可在图形上进行设备控制实验，远程控制设备，并具有电压越限标签自动提示，如图 6-16 所示。馈线接线图主要包括：馈线图形显示、实时刷新量测数据、中压线路电容器控制实验、中压线路调压器控制实验、中压配变控制实验、中压配变电容器控制实验、设备台账查询、标签链接等。

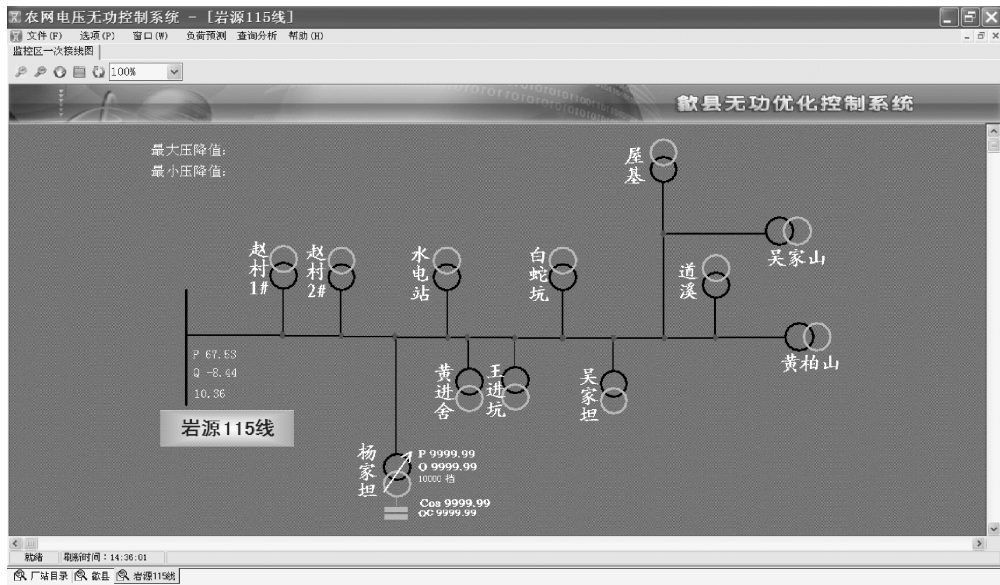


图 6-16 馈线接线图

4) 台区接线图监视。

台区接线图可监视台区为单位的接线图，刷新电压监测点实时数据，显示配变到相应监测点的电压压降值，并具有电压越限标签自动提示，如图 6-17 所示。台区接线图主要包括：台区图形显示、实时刷新量测数据、电压越限标签自动提示、设备台账查询、标签链接。

(6) 变电站优化控制子系统

1) 量测数据处理。

① 遥测、遥信关联检测。通过线路功率或电流判断线路开关遥信号是否正确，如果遥测值正常且有较大的功率或电流（相对于零漂数值），而当某一端开关拉开时，确认该开关状态错误，如两端均拉开，则确认开关状态正确，遥测出错。刀闸状态辨识结合其开关状态，当某开关为合时，其刀闸也应为合。

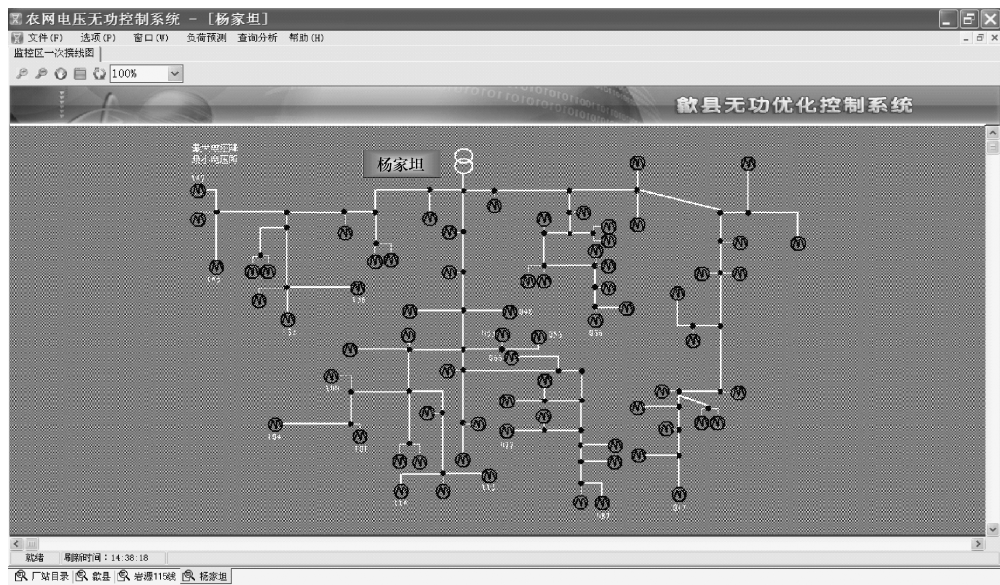


图 6-17 台区接线图监视

② 数据过滤。通过接收实时数据,判定母线电压是否在正常数值范围以内,如处于正常范围之外,则系统定性此数据为坏数据,加以过滤。

③ 死数据判定。检测遥测数据,判定死数据(15min 不变化)告警要求;测点次数应具有连续性;数据的准确度用户可外部设置;死数据状态下,是否封锁变电所由用户决定,可外部设置。

2) 安全保护处理。

① 根据设备保护遥信列表置设备保护状态,包括变压器保护信号、电容器、电抗器保护等。

② 对于保护信号动作,将触发相关设备保护状态,系统不会对该设备发令。

③ 当保护信号复归,本系统是否自动解除相关设备的保护状态,可由人工按不同保护信号单独设置。

④ SCADA 系统中自定义遥信状态,本系统也可以进行处理。比如设备故障检修、刀闸、挂牌。

⑤ 判断变压器是否并列运行,并列运行变压器统一调节,保持分接头在同一档或电压比一致。

⑥ 滑档,将档位转化成标准档位后进行比较。在判断到滑档后,将变压器故障闭锁,并作为事项提示用户。

⑦ 并列运行主变档位不相当,进行告警处理。

⑧ 对于档位不一致的并列运行变压器能自动调节以保持分接头在同一档或电

压比一致。

⑨ 在规定时间内对同厂站只操作一个设备（并列运行变压器联调除外）。

⑩ 同变电所相同容量电容器组循环投切。

3) 控制结果处理。判断上次控制设备控制是否成功，如成功，设定成功闭锁，并累加动作次数；如失败，设定失败闭锁，并累计连续失败次数，如失败次数达3次，将该设备置事故闭锁对所有设备闭锁条件检查是否可以解锁，如满足解锁条件，进行解锁。根据其他状态确定设备控制状态。

4) 电压越限的判定。通过接收实时数据，判定电压处于某考核限值范围之外，若连续若干次都处于某范围之外，系统才定性此电压越限。

进行电压越限判定时，要求测点次数应具有连续性；考核限用户可外部设置；电压越限包括高、中、低3侧；对考核母线设定考核标志，一般母线为监测母线设监测标志；考核限及警戒限均分时段设定，系统自动根据当前时间确定约束范围。

5) 功率因数越限的判定。通过接收实时数据或系统通过计算，判定功率因数是否处于考核限值范围之外，若连续若干次都处于某范围之外，系统则定性此功率因数越限。

进行功率因数越限判定时，要求测点次数应具有连续性，考核线用户可外部设置，功率因数包括全网功率因数、单站功率因数。

6) 参与计算设备选择。设备计算状态为 true、全网控制状态为投入、变电所状态为正常时允许该设备参与计算，设备计算状态由其他状态决定。要使设备计算状态为 true，设备控制状态必须为建议或可控，且设备为典型负荷时段允许动作设备类型。

7) 控制命令处理。变电所优化控制子系统应能对并列运行变压器发出的命令进行处理，控制命令先后排序，并控制返校处理。

(7) 线路优化控制子系统

1) 功能要求。

① 能够以线路为单位，综合考虑本地及下级设备电压情况，结合负荷预测结果实现对10kV线路调压器的遥调控制；

② 能够以变电站为单位，综合考虑上级无功情况，结合负荷预测结果，从降损角度实现多条线路无功补偿设备的协调投切控制；

③ 能够预判控制命令执行后电网运行情况变化，防止引起设备振荡。

2) 其他要求。

量测数据处理、安全保护处理、控制结果处理、参与计算设备选择的要求与变电站优化控制子系统相同。

(8) 配电变压器优化控制子系统

1) 功能要求。

① 能够以台区为单位, 综合考虑本地及下级设备电压情况, 结合负荷预测结果实现对有载调压配电变压器的遥调控制;

② 能够以 10kV 线路为单位, 综合考虑上级无功情况, 结合负荷预测结果, 从降损角度实现多个配变无功补偿设备的协调投切控制;

③ 能够预判控制命令执行后电网运行情况变化, 防止引起设备振荡。

2) 其他要求。

量测数据处理、安全保护处理、控制结果处理、参与计算设备选择的要求与变电站优化控制子系统相同。

(9) 事项预警

事项显示模块显示各种由系统产生的需要监视人员知道的内容, 可以分为控制方案、建议方案、异常信息、网络通信状态、进程运行状态等。

内容分类显示的类型可由用户定义, 显示内容的时间跨度也可由用户定义。此外, 还可定义重要的信息可由弹出框显示, 定时消失并通过短信通知相关负责人员。

(10) 曲线报表查询分析

1) 曲线查询。

电压曲线: 允许查询当天或者按日查询电压曲线, 变电站层可按变电站、母线电压等级查询, 馈线层可按馈线、配变查询, 台区按台区、电压监测点查询。所有查询曲线均显示电压上、下限值。

负荷曲线: 对有功、无功曲线可按日及变电站、馈线及配变进行查找, 可显示最大、最小有功及无功。

档位变化曲线: 以曲线显示月、日变压器有载分接头档位。

电容器动作曲线: 以曲线显示月、日电容器投切变化。

功率因数曲线: 按日对各个变电所的功率因数曲线进行查询。

2) 报表统计。

状态查询: 对设备当前控制状态、用户定义控制状态、设备保护状态、设备闭锁状态, 设备闭锁时间、设备闭锁开始时间进行查询, 并提供用户手动解锁功能。

电压合格率查询: 对母线电压分日、月、年以厂站、电压等级查询电压合格率、最高电压、最低电压, 并允许设定电压合格范围。

历史事项查询: 可对本月系统产生的各种指令, 包括控制命令、建议命令、警告信息等进行查询。对系统产生的历史指令按时间、指令类型、电气范围分段查询。时间可以按日、时段查; 指令类型可以按操作类型、执行结果、设备类型查; 电气范围按监控站、变电站查询。

设备运行率查询: 对变压器、电容器的投运率、检修率进行查询, 可按月、日查询投运时间、检修时间、运行率、可用率。

设备动作次数查询：可按时间范围、发令单位、设备类型、动作类型查询。时间范围可以分为月、多日、单日；发令单位可以分为系统发令、调度员发令；设备类型分为电容器、电抗器、变压器；动作类型分为升、降、投、切。

(11) Web 展现

统计表：提供 A、B、C、D、综合类电压合格率统计表，提供主变压器、线路、配电变压器调压动作统计表。

统计图：提供 A、B、C、D、综合类电压合格率对比图，提供电压质量对比图，电压损失图。

运行分析：提供配电电压无功、配变无功电量、馈线无功、三项不平衡运行分析图，提供负荷波动预测曲线。

监控图：嵌入“电网监视”模块，无需客户端，通过浏览器即可查看电网运行状况。

第7章 智能 AVC 接纳可再生能源的研究

7.1 可再生能源发电的重要性及发电分类

电力系统从 1880 年以后一个多世纪的发展历史，也是人类社会从蒸汽时代进入电气时代的历史。从 20 世纪中后期开始，以电子技术为基础的信息技术蓬勃发展，把人类社会带入了信息时代。电力系统和电力网络的出现，使包括汽车和计算机在内的其他 20 世纪大部分技术创新成为可能。人类的工业生产和社会生活都是建立在电力系统基础上的。大规模集中生产的电力，经远距离输送，满足分散用户的实时需求，这一过程通过集中调度来控制。为了提高电力系统运行的经济性和可靠性，长期以来，电气工程师们致力于提高电力系统的自动化水平。自动化技术和 IT 技术的发展对电力系统的技术升级起到了决定性的作用，并且从 20 世纪 80 年代以来不断改造电力这一“古老”行业，使它不断保持活力，能够继续作为经济和社会的基础而支撑人类文明的持续发展。

人类文明的发展史是一个不断适应自然变化并做出选择的历史。在 21 世纪，能源和环境问题成为人类面临的两个最大挑战，而它们又是密切联系的两个问题。自从工业革命大量燃烧化石能源开始，大气中的二氧化碳浓度急剧升高的记录与全球温度升高的记录同步。越来越多的研究发现了人类活动排放温室气体与全球气候变化之间的联系，以及由此造成的经济社会影响。减少温室气体排放已在全球范围内达成共识，1997 年生效的《京都议定书》对推动全球范围温室气体减排的合作发挥了重要作用。从应对气候变化与经济发展策略的考虑出发，2003 年英国政府首先提出“低碳经济”的概念。欧盟范围内的以风力和光伏为代表的清洁能源发电技术迅速发展。碳交易制度开始出现，并且交易额迅速增加。有预测认为 10 年内全球碳交易市场容量将超过石油。目前在国际政治经济领域，应对气候变化，实现温室气体减排已经成为不可回避的主题。2007 年 1 月 10 日，欧盟委员会宣布了一项由欧洲理事会（European Council）签署通过的能源计划，到 2020 年，欧盟单方面的温室气体排放量要减少 20%，如果在全球范围内能达成协议，温室气体排放量可减少 30%，而让可再生能源的比重在欧盟能源结构中的比例达到 20%，是实现这一目标的关键。2009 年 12 月联合国在丹麦哥本哈根举行的应对气候变化国际会议，为《京都议定书》之后的全球气候减排道路奠定了基础，因而被认为是一次重要的国际会议。

我国自从 1978 年改革开放以来,尤其是 2001 年加入世界贸易组织以来,经济快速发展,成为制造业大国。同时,资源和能源的消耗也迅速增加,2006 年我国已经超过美国成为世界上最大的碳排放国。从国家经济发展战略角度来看,高碳排放标志着经济的发展是以资源和能源的高投入为代价的。对我国这样一个拥有 13 亿人口的发展中大国,按照这种高碳排放的发展路径去实现现代化和人民生活富裕,不可避免地会受到资源供给的硬约束。同时,随着工业化和城市化加速推进,为环境污染付出的代价越来越大,将直接威胁人民生存条件和经济社会的可持续发展。因此,在我国政府提出的“科学发展”战略中,转变经济增长方式,实现经济增长与人民生活和环境改善相协调成为一个重要内容。我国政府于 2005 年颁布了《可再生能源法》,大力推动了清洁能源和节能减排技术的研发和使用。此后,我国的风电装机连续 4 年保持超过 100% 的增长。而光伏发电领域,我国已成为世界上最大的光伏电池及其组件的生产国。

根据图 7-1 显示的规划预测数据,从 2009 ~ 2020 年,非水电清洁能源的装机将迅速增长。至 2020 年,风电、光伏发电与核电的装机容量占我国发电总装机的将超过 16%。

随着制造商不断提高太阳能和风力发电设备的产量,会使这些技术的成本下降。根据预测,到 2030 年,在我国的能源中,太阳能将占到 8%,而风能将占到 12%,核电在电力所占比例将从 2% 提高到 16%,水力发电将从 16% 提高到 19%,而天然气发电也将从 1% 提高到

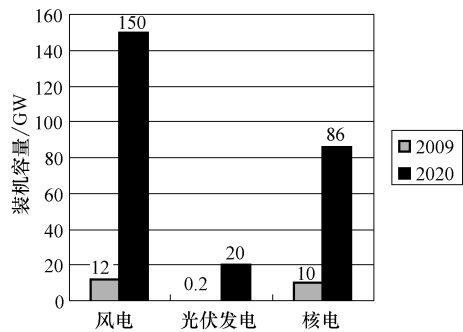


图 7-1 2009 ~ 2020 年中国清洁发电装机预测

8%。在经济保持较快的增长速度,能源消耗总量持续增加的情况下,要实现我国政府承诺的到 2020 年单位 GDP 碳排放比 2005 年下降 40% ~ 45% 的目标,就必须改变传统的能源生产与使用的方式。由于电力仍然是最高效的二次能源,因此在能源生产和使用方式转型中,电力系统仍将继续发挥基础性的作用,而提高可再生能源在能源结构中的比例是实现这一目标的关键。

地球上可持续发电的主要能源途径如图 7-2 所示。太阳能是最容易获得的主要可再生能源,被地球表面接收的平均太阳辐射速率是世界一次能源平均速率的 8000 倍。以

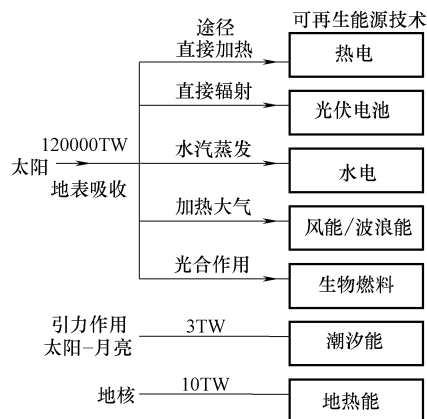


图 7-2 可再生能源的利用途径

目前世界人口计算, 相当于人均拥有 20MW, 这一数字是令人震惊的。

从图 7-2 中可知, 太阳能可通过直接热利用或光伏利用的形式得到应用, 或者间接的以风能、波浪能、水能以及生物燃料的形式获得。另外两种能源, 考虑其可持续的特性常常被称作可再生能源: 一是潮汐能, 由太阳和月亮的引力引起, 可通过潮堰或潮汐流技术开发利用; 二是地热能, 来自地球内部的能量, 可通过温泉、间歇泉或者钻井的方式获得。这些能源的平均功率只占太阳能辐射的一小部分。

大部分可再生能源可以用来发电, 太阳能、地热能及生物质能可用来供热。尽管存在困难和耗费大的难题, 但原则上可再生能源仍可以提供与传统能源类似的能源服务, 如供暖、制冷、发电, 还可转换为运输原料。可再生能源是天然分布式资源, 可以为偏远地区提供电力而无需大量的能量传输系统, 这是可再生能源发电的一个优点。

目前广泛应用于发电的可再生能源还有水电、太阳能光伏与热发电、潮汐与潮流发电、波力发电、生物质发电等。

大型水电的开发利用受地理限制, 但已获得大规模的开发, 根据估算全球已开发 20% ~ 25% 的大规模水利资源, 水电目前约占全球总发电量的 20%。从资源量及供电灵活性角度考虑, 大型水电是目前最理想的可再生能源。但是大型水电的缺点是前期投资巨大, 需要相当长的一段时间才能获得预期收益。水电也会对生态环境造成破坏, 导致大部分地区的淹没和人口的迁移。目前许多优势的水力资源都已经被开发利用了。小型水电站输出的瞬变很小, 当有突发降雨时会在数小时或数天内发生显著变化。而在全年内不同的时间段里输出的电能与河流的流量成正相关的特性, 在北半球, 峰值通常出现在冬季, 低值出现在夏季。

风力发电技术是低碳经济中一种成本较低的发电技术。风力发电是利用风力机把风能(动能)变成机械能, 再通过发电机把机械能转化为电能。并网型风力发电机主要包括恒速恒频风力发电机和变速恒频风力发电机两大类型。目前已安装的风力发电机大部分是笼型异步发电机, 属于恒速恒频风力发电机, 近年来, 随着科学技术的发展, 双馈感应风力发电机逐渐得到广泛应用, 它属于变速恒频风力发电机。由于风力发电机的驱动力是风能, 自然界风是不断变化的, 如风速的年变化、季节变化、天气性变化、日变化和秒变化, 使得风力发电机发出来的电也具有年变化、季节变化、天气性变化、日变化和秒变化, 这些都统称为风电的波动性。由于风电的波动性和风电的高难度预测, 对接入的电网会造成不利的影响。

太阳能发电技术主要采用两种技术: 一种是太阳能光伏发电系统, 另外一种则是太阳能热发电系统。前者是通过光伏电池使太阳能转化成电能, 后者则将太阳能转化成热能, 然后利用热能产生的蒸汽驱动汽轮机发电。太阳能发电是利用光伏电池使用半导体设备将太阳辐射直接转化为电能。尽管实验室组装的光伏电池效率高

于 30%，但典型的商业晶体光伏电池效率仅为 12% ~ 18%。太阳能热发电系统大多数采用太阳能集热器产生的高温，驱动热机进行能量转换。该技术并不适用于多云或阴天的情况下，因为这时的辐射多为漫射，能量不集中。

潮汐是由月亮和太阳的引力场导致的沿岸潮水的自然涨落。潮汐发电的常用形式有：落潮发电、涨潮发电和双向发电。目前大部分方案建议仅采用落潮发电，虽然潮汐坝有很大的双向流动能力，能够快速地蓄水和泄水，以获取全部的潮汐资源，但实际上这很不经济，也没有足够的空间来安装足够多的水轮机以捕获全部潮汐资源。通常仅有 1/3 的潮汐能量能被利用，去掉水轮机和发电机的损失，平均电力输出最多是潮汐能量的 1/4。潮汐发电具有波动性，因而潮汐发电的主要缺点之一是电力输出的脉动性，对电网的功率平衡具有较大的影响，严重时需要其他发电方式进行替代。潮汐发电其他的缺点是需要大量的基础建设投资、对自然环境的影响和海水的强腐蚀性。

在波力发电中，波能向电能转化需要一种装置来拦截波浪并将部分能量转化为机械能，然后再转化为电能。与风能和光伏技术相比，波能转化技术仍处于起步阶段，各种技术正在开发当中。由于资源特性并为了有效转化，每米装置宽度的波及体积需要达到几十立方米。因此装置尺寸较大，还需承受巨浪的袭击而不会被损坏。从实验室波浪水池测试的概念模型到可应用的样机需要相当大的花费，直到最近才有政府和企业的资金投入。

生物质发电是利用生物质所具有的生物质能进行的发电，包括农林废弃物直接燃烧发电、农林废弃物气化发电、垃圾焚烧发电、垃圾填埋气发电、沼气发电等。生物质和其他可再生能源很不相同，它能像化石燃料一样存储，在需要的时候用于发电。但与化石燃料不同的是，生物质常受到燃料能量密度的限制。因而，生物质燃料必须在当地生产和使用，因为长距离运输消耗的能量可能会超过燃料本身的能量。这就意味着生物质发电机组和传统电厂相比相对较小（受限于当地燃料供应），因而具有小型分布式发电的特点。

7.2 可再生能源的接入对 AVC 系统的影响和要求

由上节的介绍可以知道，在可再生能源中，除了大型的水电具有灵活的可调度发电能力外，其他的可再生能源基本上不具备可调度能力。这些可再生能源大多具有发电功率的波动性和随机性，以及发电容量小、能量密度低等特点。同时由于发电容量小，这些可再生能源发电常常接在配电网末端，具有分布式发电的特点。本小节将从可再生能源对电网的影响展开分析，提出可再生能源接纳对 AVC 的要求。

7.2.1 可再生能源接入对电网功率损耗的影响

电网的损耗主要取决于系统的潮流, 可再生能源发电接入使得配电网中各支路的潮流不再是单向流动, 必然会影响电网的损耗, 使之不仅与负荷等因素有关, 同时也与分布式电源及微电网接入的具体位置、容量及负荷的相对大小以及网络的拓扑等因素密切相关。根据损耗公式 $\Delta P = (P^2 + Q^2)R/U^2$ 可知, 当电阻 R 与电压 U 一定时, 线路输送的有功功率和无功功率越小, 电网的网损越小。由于可再生能源一般会接在馈线上, 线路中输送的有功功率 P 和无功功率 Q (可再生能源发电发出无功时) 都会减小, 这样电网的损耗也将会减小。但是, 这只是可再生能源发电的功率比较小时, 有研究认为可再生能源接入配电网容量对配电网网损的影响分三种情况: 第一种是所有负荷节点处可再生能源发电容量小于负荷节点, 这时, 配电网中所有线路的损耗都会减小; 第二种情况是负荷节点处可再生能源发电容量大于负荷节点, 但小于配电网总负荷, 这时, 局部线路网损会有所增加, 但总网损还是减小的; 第三种情况是可再生能源发电容量大于配电网总负荷, 这时, 配电网将会向上级倒送功率, 配电网的网损将会增大。

7.2.2 可再生能源接入对电网功率平衡的影响

电网负荷本来就具有随机性和波动性的特征, 由于电能不能大量存储, 因此, 电网的最主要问题就是确保实时的发电和用电功率平衡。由于传统的电源结构中, 化石能源发电处于支配地位, 而这些电源大都是可调度的, 因而电网调度的主要任务就是调度发电机组跟踪变化的负荷需求。也正是因为这个原因, 传统电网结构和运行方式都是为电能集中生产和集中调度、分配而设计的。

风能、太阳能等可再生能源本身具有间歇性和波动性的特征, 因而可再生能源发电接入电网必然产生相应的功率波动。当可再生能源发电所占比例较小时, 传统电源能够实时补偿这些功率波动。但是, 当大规模可再生能源接入电网, 其产生的功率波动有可能超出传统电源的调节能力极限。这时, 再接入更多的可再生能源就可能导致电网功率平衡不能满足, 使供电可靠性和电网运行稳定性降低。

电力系统稳定需要维持电源与负荷需求之间的实时平衡。而风电、太阳能发电等可再生能源和电网负荷等各种具有波动性的对象, 有的具有互补性, 有点具有同时性, 叠加在一起时, 就增加了电网规划与调度问题的复杂性, 也增加了电网维持功率所付出的成本。

间歇性可再生能源发电的功率波动会导致电网调峰能力不足时难以保证实时功率平衡。目前以风电为代表的可再生能源发电发展迅速, 其主要制约因素是电网接入能力不足。对电网来说, 要做到科学地接纳可再生能源, 首先要掌握接入电网的可再生能源的特性。

1. 风电功率波动

风电输出功率与风速成三次方的关系,而风速具有连续性和随机性。单台风力发电机组、风电场和风电场群的输出功率受风资源限制,具有较大的波动性。而风电场是由几十甚至几百台风力发电机组组成,由于风电场(特别大型风电场)面积很大,同一时刻不同风力发电机组的风况不一致,主要原因有风速分布不同和相邻风电机组间的尾流效应等。由于风电场的这种空间特性,风电场中风电机组的运行工况也各不相同,这使得整个风电场的功率波动特性不同于单台风电机组的功率输出特性。又由于风电场资源的差异性,对一个含多个风电场的电力系统而言,风电场群的输出功率特性也不同于单个风电场的功率输出特性。

2. 光伏发电功率波动

太阳能光伏发电的输出功率与光伏电池接收到的太阳辐射功率相关。由光伏电池获得的太阳辐射能量与安装角度的关系为 $P_{\text{cell}} = P_{\text{sun}} \times \cos\theta$ 。对于任意时刻,给定太阳辐射功率 P_{sun} 和入射角 θ ,就能够确定光伏电池输入的太阳能 P_{cell} 。 θ 值在太阳光直射时为 0° ,平行照射为 90° 。由于不同纬度地区太阳的高度不同,并且随着季节变化而变化,因此要确定光伏组件的仰角以最大化年功率输出。同时随着太阳一天内在天空位置的移动,其入射角也在不断地变化。因此,带双轴太阳能跟踪装置的光伏发电系统能够使光伏电池精准对准太阳,其效率比不带跟踪系统要高 25%,但这也会增加设备成本和维护成本。

7.2.3 可再生能源接入对电网电能质量的影响

由于可再生能源发电电源本身具有的波动性和随机性的特点,以及目前大多数可再生能源发电并网都采用电力电子装置,这些对电网的电能质量带来了很大的影响,主要有以下 4 个方面的影响。

1. 系统的电压闪变

可再生能源发电的启动和停运与用户需求、政策法规、电力市场、气候条件等众多因素有关,其不确定性易造成电网明显的电压闪变。当可再生电源接在配电网时,如果接在配电变压器或者就近时,可再生电源启停对电网电压的闪变影响较小,而如果接在远离配电变压器的馈线上时,可引起接入点馈线周围电压急剧的突变,严重影响供电设备和用户设备的安全性。

2. 引入谐波

可再生电源引入谐波有以下几种可能性:可再生电源本身就是一个谐波源;可再生电源经基于电力电子技术的逆变器接入电网。如太阳能发电发出的电能是直流电,需要经过 DC-AC 转换器才能接入电网;而风力发电虽发出的是交流电,但其频率与电网频率并不相等,除恒速恒频风力发电可以直接接入电网外,大多要经过 AC-DC 逆变器或者 DC-AC 逆变器才能够安全接入电网。这些电力电子装置会产生

严重的谐波污染,严重影响电网的电能质量。

3. 对系统稳态电压的影响

由电压损耗算式 $\Delta U = (PR + QX)/U$ 可知,在电网结构 $R + jX$ 和电压 U 确定的情况下,电压损耗 ΔU 与输送的有功功率 P 和无功功率 Q 成比例关系。可再生能源发电接入电网后,由于馈线上的传输功率减少以及可再生电源输出无功的支持,将使沿馈线的各负荷节点处电压被抬高,严重时导致一些负荷节点的电压偏移超标。其电压被抬高多少与接入分布式发电机 (DG),的位置及总容量大小密切关联。从另外一个方面来说,可再生能源的接入也会拉低电网的电压。例如目前风力发电大部分采用的异步发电机,由于异步发电机建立旋转磁场需要吸收无功功率,而无功功率分布对电压有决定性的影响,当风力异步发电机大量接入电网时,将会大量吸收无功功率,造成线路上电压降增大。所以风电厂会在每台风力发电机或者风力发电厂出口处安装无功补偿设备,避免从电网处吸收无功功率。

4. 对系统电压波动的影响

由与可再生能源发电输出功率具有随机性和波动性,由电压的损耗公式也可以知道,当输送的功率发生波动时,线路上的电压降也会产生波动。可再生能源发电对系统电压波动的影响与其接入位置、容量大小以及控制是否合理具有很大的关系,同时还要看可再生能源与当地负荷是否能协调运行。

7.2.4 可再生能源接入对系统可靠性的影响

可再生能源发电接入配电网,对系统可靠性不仅会带来正面影响,也可能带来一些负面影响,这要视具体情况而定。若将分布式发电作为备用电源接入系统,则可以部分消除电网的过负荷和堵塞,提高电网的输电裕度。在适当的可再生发电配置和电压调节方式下,可以抬高馈电线路电压特别是馈线末端电压,改善系统电压的整体水平。有些可再生能源发电具有低电压穿越能力,在系统发生故障的情况下继续独立运行,这样就可以起到缓解电压骤降的作用,从而提高了系统对电压的调节性能。这些都有利于提高系统的可靠性水平。

但若可再生能源发电配置不当,并网运行时也可能降低系统的安全可靠性。如果可再生能源发电不具备低电压穿越能力,需在系统故障时解列,从电网中切除。当其所接的线路故障重合时,可再生能源发电无法起到对系统电压的支持作用,相反会加剧电压的跌落;且如果可再生能源发电没有及时跳闸脱网,造成的非同期重合可能引起保护误动作、设备受损,线路无法及时恢复运行,反而增加了用户的停电时间。发生系统停电时,有些可再生能源发电的燃料会中断或供给分布式发电装置的辅机电源会失去,可再生电源会同时停运,仍无法提高供电的可靠性。同时,可再生能源发电接入配电网会使继电保护配合变得更为复杂,加大继电保护误动作的可能性,反而使系统的可靠性降低。另外,可再生电源不适当的安装地点、

容量和连接方式都可能降低配电网的可靠性。

7.2.5 可再生能源接入对 AVC 系统的影响与要求

可再生能源发电的输出功率具有波动性和随机性,使得可再生能源发电接入电网时,对电网产生的影响大大超过了常规发电,这对电网提出了更高的要求。下面将从可再生能源发电本身和电网等几个方面进行介绍。

1. 可再生能源发电入网的规划

可再生能源发电虽然具有投资省、损耗低、系统可靠性高、选址容易、效率高、能源种类多样等优点,但是如果不适当的接入位置和接入容量将会对电网的网损、电压质量、功率平衡以及可靠性造成严重的影响。所以在可再生能源发电入网时,必须要考虑这些因素的影响。目前在考虑自然环境因素许可的条件下,对可再生能源入网的规划时,一般把可再生能源当成 PQ 节点,如果可再生能源发电具有无功调节能力时,也可以当成 PV 节点,然后以网损、电压偏移、可靠性、经济性等目标,以接入点和接入容量为可变变量,选择其中的一个做单目标或者多个构成多目标函数,以优化算法对可再生能源发电进行选址和定容的研究。

2. 可再生能源电站配置无功补偿装置

以风力发电中的异步发电机为例,异步发电机发电需要建立旋转磁场,需要从电网吸收无功功率,当电网本身无功功率不足时,将会造成配电网电压急剧的下降甚至崩溃。同时,风力发电的有功功率输出与风速成正相关特性,具有随机性和波动性的特点,这样也会造成风力发电厂接入点电压发生波动,不利于风力发电的控制与使用。通常会在风力发电机或者风力发电厂接入点并联无功补偿装置,以补偿异步发电机吸收的无功功率,抑制并网点电压的波动,同时,这能提高风电场的低电压穿越能力。

风电场无功补偿容量的确定需根据风电场接入系统后造成的影响来确定。如果风电场接入系统后对电网的电压影响较大,此时需根据电网的年运行特性、接入点的短路容量、周边发电厂的特性及风电场的运行特性经系统仿真后确定。这种情况不仅需要配置容性无功功率,还需要配置感性无功功率。此时,供电局对风电场的考核是接入系统侧的电压而不应该是功率因数。如果风电场装机容量小,对电网影响小的风电场只需要考虑风电场内部线路的充电无功功率、变压器消耗的无功功率和风机的无功功率即可。此时供电局对风电场的考核是接入系统侧的功率因数而不是电压。对于电网的电压和功率因数,风电场无功补偿容量配置只能保证其中一项兼顾另外一项。

另外,以小水电为例,水电机组运行方式与水的情况关系密切。在丰水期,小水电满发满供,将大量剩余电力向电网输送;而在枯水期时,小水电发电量少,电网要向下输送功率。这就造成了丰水期和枯水期的年度运行方式变化大,严重影响

了电能质量,造成丰水期电网电压水平偏高,枯水期时,电网电压偏低,使得地区难以维持在合格的电压水平。根据无功与电压之间的关系,可以在小水电站安装电容器和电抗器,在丰水期电压高时,投入电抗器以吸收无功功率;在枯水期电压低时投入电容器以发出无功功率,使得水电站周围电压偏移在合理的范围之内。

3. 电网无功补偿装置容量

自动电压控制指的是通过控制无功电源、有载调压器分接头和无功补偿装置来调节电网的电压,以达到电压质量最好和网损最小。当可再生能源发电接入配电网时,为了应对可再生能源发电具有的输出功率的波动性和随机性,以及可再生能源电站启停作用的影响,需要对接入可再生能源的配电网重新计算并配置无功补偿装置。首先,在可再生能源正常运行时,无功补偿装置容量能够平抑可再生能源发电造成的电压的波动性;其次,在可再生能源发电停运时,也能确保配电网的电压不越下限,始终保持在合理的电压范围内。

4. 动态无功补偿装置的应用

目前,国内的无功补偿装置大多是电容器和电抗器,使用静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)的很少,其原因是相同容量下 SVC 的价格比电容器和电抗器昂贵许多。但是随着国民经济的发展,对电网提出了更高的要求,以及传统的电容器和电抗器只能够分组投切,并且在电网电压下降时,电容器发出的无功功率也下降,不利于电压的稳定性,国内开始逐渐在使用 SVC。SVC 不仅能够发出无功功率和吸收无功功率,而且还具有连续平滑的调节能力。在一些可再生能源电站既要吸收无功功率又要发出无功功率时, SVC 能够很好地满足要求。同时,由于 SVC 具有平滑的调节能力,不会造成电容器投切时电压的闪变,在电网和可再生能源电站安装动态无功补偿装置,能实现 AVC 对电压的精细调节。另外,还可以考虑 SVC 和电容器或电抗器的组合使用,在 SVC 调节范围内时,使用 SVC 进行调节,当 SVC 调节不够时,投入并联电容器或者电抗器,然后无功不足或者过多时,使用 SVC 进行精细调节。这样,既可以发挥 SVC 精细调节的能力,又可以减少无功补偿装置的费用。

5. 有载变压器的应用

目前配电网中变压器大部分使用的是还是无载调压器,由于无载调压器不能在运行的情况下进行分接头档位的切换,使得电压的调整能力受到了限制。在配电网中,如果可再生能源不参与无功调节,或者可再生能源无功调节能力有限,当电网无功补偿装置不足时,需要对变压器档位进行调节,以提高或者降低配电网的电压水平。如果使用的是无载调压器,则不能进行在线调整变压器档位,电压不能得到调整。同时,由于可再生能源的波动性以及可再生能源发电启停的影响,仅仅依靠无功补偿装置有时候是不能把电压调整在合理的范围内的,这时需要有载变压器进行在线的调整档位以应对电压的变化。

6. 可再生能源发电与电网 AVC 的互动

根据目前可再生能源的发展情况来看,还没有实现可再生能源无功调节与电网 AVC 的互动。在可再生能源发电中,风力发电功率较大,并且大部分风电场都安装有无功补偿装置以满足风电功率因素满足入网标准。根据国家电网公司《风电场接入电网技术规定(试行)》做出的规定:仅靠风力发电机组的无功容量不能满足系统电压调节需要,需要考虑在风电场加装无功补偿装置。风电场无功功率应当能够在其容量范围内进行自动调节,使风电场变电站高压侧母线电压正、负偏差的绝对值之和不超过额定电压的 10%,一般应控制在额定电压的-3% ~ 7%。此外,还规定功率因数应控制 $-0.98 \sim +0.98$ 。作为接入配电网的有功电源,风力发电的无功功率不参与电网的无功电压调整,使得电网的电压水平保持在合理的范围内更加困难。同时,小水电也面临着相同的问题,也是在规定的功率因数范围内运行而不参与无功调整。随着配电网 AVC 的发展实施和可再生能源的大规模接入电网,可再生能源发电中具有无功调节能力的机组会逐步纳入电网 AVC 调控的范围内,实现可再生能源发电与电网 AVC 的互动,以确保拥有更好的电压水平和更低的网络损耗。

7. 可再生能源孤岛运行时 AVC 控制能力

孤岛运行是指系统发生扰动以后,如果引起跳闸,有可能使可再生电源带着一部分配电网继续运行,形成孤岛。孤岛运行主要分为两种,即计划孤岛运行和非计划孤岛运行。计划孤岛运行是根据分布式电源容量和本地负荷的大小,确定合理的孤岛区域,与系统断开后,仍能保证小系统的稳定运行。这时孤岛范围内的有功功率和无功功率平衡都需要依靠可再生能源发电和孤岛范围内的无功补偿装置。由于孤岛运行时,可再生能源发电占孤岛运行发电的比例会大大的上升,甚至有功电源仅有可再生能源发电,这时,孤岛运行的无功功率、有功功率将会随着可再生能源发电的波动而波动。这也对孤岛运行的 AVC 控制能力提出更高的要求即连续瞬时调节能力、无功补偿容量、实施监测与控制电压在合理范围内。

7.3 智能 AVC 接入可再生能源发电的研究

近年来,随着能源危机的日益加剧以及人们环保意识的逐渐增强,风力发电和光伏发电日益受到重视,已成为可再生能源中最具有发展前景的发电方式。风力发电作为最具发展潜力的可再生能源发电技术在我国得到了快速发展,并大量接入配电网。由于风能具有随机性和间歇性的特点,风电机组输出功率随风速随机变化,风电场并网后将会干扰原有配电系统的正常运行。因此,风电场并入配电网后的有功功率控制、无功电压调节以及配电网的优化运行等问题受到了广泛的关注。传统的电网无功电压控制是在满足电压质量要求下,通过改变有载调压变压器电压比和

投切电容器组等调压方式,来达到降低网损和改善电压质量的目的,从而提高配电网运行的经济性和安全性。大容量风电场并网运行将会干扰原有配电网电压调节设备的正常运行,甚至导致配电网电压控制功能失效,严重影响电网的优化运行。

并网型风力发电机主要包括笼型异步发电机、双馈感应发电机和永磁同步发电机三种类型。与笼型异步风电机组相比,双馈感应风力发电机组很容易实现次同步转速发电并具有调节无功能力,目前我国新建设的大规模风电场中广泛采用。随着双馈感应风电场在配电网中并网容量的增加,部分研究者提出将调节速度快、能连续调节无功功率的双馈发电机风电场作为无功源参与电网无功电压调节。双馈发电机风电场参与电网无功电压调节可解决传统电网无功调压手段因调节离散化、调节速度慢、难以实现电压连续调节的问题,并能节省安装大容量无功补偿装置产生的费用。因此研究传统电网电压控制手段和双馈电机风电场无功出力间的协调控制,以实现双馈电机风电场并网后电网的无功电压优化控制是需要研究的问题。智能 AVC 系统通过对可再生能源接入特别是风电接入的等效模型入手分析,对不同风机接入系统的等效模型和潮流计算方法进行研究和分析,最后对双馈电机风电场并网后电网的无功电压优化控制进行研究,得到风电接入电网优化的模型和方法。

7.3.1 可再生能源接入系统等效模型研究

1. 风电机组的简化等效模型的研究

风电机组主要由风力机和风力发电机等主要组成。风电机组的模型分为两个部分:一部分为异步发电机模型,另一部分为同步发电机模型。下面就详细地介绍了风电机组的几种模型:风力与风力机模型,同步发电机模型,异步发电机模型。

(1) 风力与风力机模型

风速是风力发电系统的能量来源,具有随机性和间隙性的特点。风力机通过风能驱动叶轮转动,将风能转换为作用在轮毂上的机械转矩传递给发电机,带动发电机转子产生电能。风力机不仅决定了整个风力发电系统的输出功率,而且直接影响机组的安全、稳定、可靠运行,是风力发电系统中的关键部件之一。

由空气动力学知道,通过叶轮旋转面的风能不能全部被叶轮吸收利用,风能利用系数 C_p 反映了风力机吸收风能的效率,它与风力机叶尖速比 λ 、桨距角 β 相关。风力机叶尖速比为风轮的叶尖线速度与风速之比,即

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (7-1)$$

式中, R 为叶轮半径 (m); ω 为风轮旋转角速度 (rad/s); v 为风速 (m/s)。

一般而言,风力发电机组的功率输出的随机性主要取决于风力发电机安装地点的风速随机性。许多学者对风速的统计规律进行了研究,目前一般认为风速 v 服从 Weibull 分布:

$$f_v(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right) \quad (7-2)$$

式中, c 和 k 分别为尺度参数和形状参数, 可以根据现场风速的历史数据采用最小二乘法辨识。

风力机吸收的风能与风速大小、风力机叶片的设计和叶片受风面积等因素有关, 产生的功率表达式为

$$P_r = 0.5 C_p \rho S v^3 \quad (7-3)$$

式中, S 为风机叶片扫过面积 (m^2); ρ 为空气密度 (kg/m^3); v 为风速 (m/s); C_p 是风能的风能利用系数, 表征风力机将风能转换为机械能的效率。

根据贝兹 (Betz) 理论, 其风能利用系数 C_p 在理论上的极限值为 0.593, 而实际上风力机最大风能利用率通常在 0.4 左右。

风能利用系数 C_p 是叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数, 于是风力机的特性可由一族风能利用系数 C_p 的无因次性能曲线来表示, 如图 7-3 所示。

根据式 (7-3) 可知, 风力发电机的有功功率取决于风速的大小, 其相互关系如图 7-4 所示。

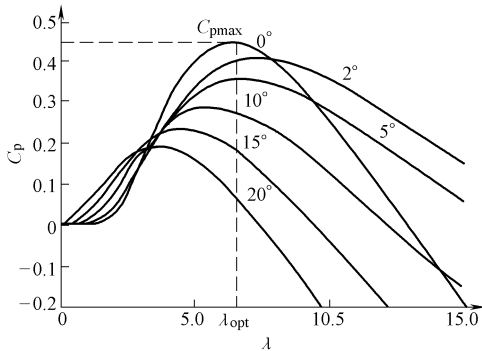


图 7-3 风力发电机 $C_p(\beta, \lambda)$ 曲线

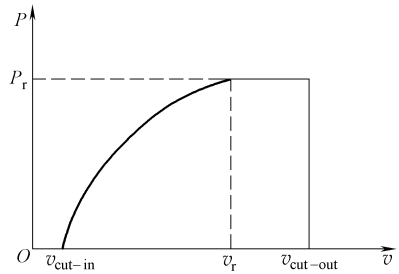


图 7-4 风速与功率的关系

图 7-4 中, $v_{\text{cut-in}}$ 和 $v_{\text{cut-out}}$ 分别表示风机的切入风速和切出风速, v_r 是风力发电机组的额定风速, P_r 是风力发电机组的额定有功输出。一般风力发电机的功率特性曲线由风机制造厂商随风机提供给用户, 也可以通过实测得到。在计算中, 可以近似的由分段函数表示, 见式 (7-4)。

$$P_M = \begin{cases} 0 & v < v_{\text{cut-in}} \\ \frac{v - v_{\text{cut-in}}}{v_r - v_{\text{cut-in}}} P_r & v_{\text{cut-in}} < v < v_r \\ P_r & v_r < v < v_{\text{cut-out}} \\ 0 & v > v_{\text{cut-out}} \end{cases} \quad (7-4)$$

(2) 异步发电机等效模型

目前风力发电机组多为异步发电机，其单机容量从几百千瓦到几千千瓦不等，多台风力发电机组按照一定规则排列构成风电场，风电场的功率为所有风电机组输出功率之和。

图 7-5 所示为异步发电机的功率传递关系以及等效电路图。自然界的风能通过风轮机叶片转化为发电机转子上的机械功率 P ，在等效电路中对应转子回路上可变电阻 $r_2(1-s)/s$ 上的电功率，该功率减去转子铜耗 P_{Cu2} 、铁心损耗 P_{Fe} 以及定子铜耗 P_{Cu1} 即得到注入电网的电功率 P_e 。其中， $r_m + jx_m$ 为励磁阻抗， $r_1 + jx_1$ 为定子阻抗， $r_2 + jx_2$ 为转子阻抗。

自然风吹动风轮机叶片，将风能转化为机械能，由此获得的机械功率扣除掉机械损耗和附加损耗后即为传递到异步发电机转子上的机械功率 P_Ω ，在等效电路中对应转子回路上可变电阻 $r_2(1-s)/s$ ($s < 0$) 上的电功率，扣除转子铜耗 P_{Cu2} 和铁心损耗 P_{Fe} ，得到输入定子绕组的电磁功率 P_m ，再扣除定子铜耗 P_{Cu1} 即得到注入电网的电功率 P_e 。

由于图 7-5 中 r_m 远小于 x_1 ，且定子电阻和铁心的功率损耗与 P_e 相比可忽略，因此，可以将励磁支路移到电路的首段，得到简化的异步发电机等效电路，如图 7-6 所示。

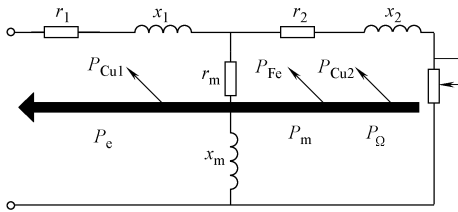


图 7-5 异步发电机功率关系

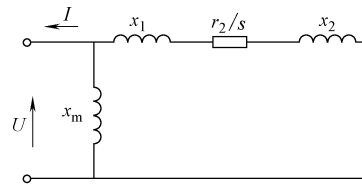


图 7-6 异步发电机简化等效模型电路

在异步发电机简化等效电路中，有电路的关系可以直接求的风电机组无功功率和有功功率的表达式

$$P_e = -\frac{U^2 r_2 / s}{(r_2 / s)^2 + x_k^2} \quad (7-5)$$

$$Z = \frac{x_m^2 r_2 s + j[(x_m + x_k)x_m x_k s^2 + x_m r_2^2]}{r_2^2 + (x_m + x_k)^2 s^2} \quad (7-6)$$

式中， Z 为异步发电机的等效阻抗； $x_k = x_1 + x_2$ ； U 为机端电压。

由图 7-6 的等效电路可得异步发电机的功率因数角与转差率的关系式为

$$\varphi = \arctan \left(\frac{r_2^2 + x_k(x_k + x_m)s^2}{r_2 x_m s} \right) \quad (7-7)$$

则异步发电机吸收的无功功率与有功之间的关系为

$$Q_e = -\frac{r_2^2 + x_k(x_k + x_m)s^2}{r_2 x_k s} P_e \quad (7-8)$$

由式 (7-5) 可以求出电动机转差率的表达式为

$$s = -\frac{U^2 r_2 - \sqrt{U^4 r_2^2 - 4P_e^2 x_k^2 r_2^2}}{2P_e x_k^2} \quad (7-9)$$

消去转差率将 (7-9) 代入到式 (7-8) 可得到无功功率的表达式为

$$Q_e = \frac{2P_e^2 x_k^2}{r_2(-U^2 r_2 + \sqrt{U^4 r_2^2 - 4P_e^2 x_k^2 r_2^2})x_m} \left[-r_2^2 - \frac{(-U^2 r_2 + \sqrt{U^4 r_2^2 - 4P_e^2 x_k^2 r_2^2})^2 (x_k + x_m)}{4P_e^2 x_k^3} \right] \quad (7-10)$$

由式 (7-10) 可以看出, 当异步发电机输出的有功功率 P_e 一定时, 它吸收的无功功率 Q_e 与机端电压 U , 转差率 s 的大小有密切关系。由于风速的不确定性, 导致异步机的转差率、异步发电机发出的有功功率与吸收的无功功率是不确定的。

(3) 同步发电机等效模型

一般说来, 同步发电机通常分为具有励磁调节能力的同步发电机和不具有励磁调节能力的同步发电机两种。具有励磁调节能力的同步发电机的控制方式分为两种, 即电压控制和功率因数控制。对采用电压控制的同步发电机而言, 它在潮流计算中可作为 PV 节点处理, 采用功率因数控制的同步发电机可以作为 PQ 节点处理。但是实际中大多同步发电机缺乏励磁控制能力, 并不能按上述模型处理。下面将对无励磁调节的同步发电机在潮流计算中的处理方法进行讨论。下面首先考虑隐极机(同步电机的转子有两种构造型式, 即凸极式和隐极式。隐极式转子铁心为圆柱形, 在圆柱上铣有槽和齿, 槽和齿的部分约占圆周的 2/3, 把转子绕组(励磁绕组)镶嵌在其中, 无槽部分形成大齿, 即极面(称之为隐极)。凸极式转子先将磁极加工好后, 再装到转子的磁轭上。在实际生产中, 当极数少, 转速高时, 采用隐极式结构。当极数较多时(p 大于等于 3) 时, 通常采用凸极式结构)。

隐极同步发电机的等效电路如图 7-7 所示。

根据等效电路图可得出其功率特性为

$$P = \frac{E_q U}{X_q} \sin \delta \quad (7-11)$$

$$Q = \frac{E_q U}{X_q} \cos \delta - \frac{U^2}{X_q} \quad (7-12)$$

式中, P , Q 分别为有功输出和无功输出; E_q 为同步发电机的空载电动势, 由于是无励磁调节系统, 所以 E_{DGq} 为常数; X_d 为同步发电机的同

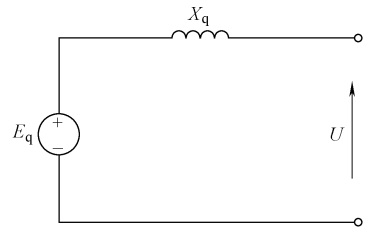


图 7-7 隐极同步发电机等效电路

步电抗 (隐极机 X_d 与 X_q 值相等), U 为机端电压; δ 为功角。一般在潮流计算中可以认为同步发电机的输出有功是已知的, 根据式 (7-11) 和式 (7-12) 可以得到无功功率与机端电压的关系:

$$Q = \sqrt{\left(\frac{E_q U}{X_q}\right)^2 - P^2} - \frac{U^2}{X_q} \quad (7-13)$$

式 (7-13) 和式 (7-10) 有类似的地方, 当同步发电机输出的有功功率一定时, 它发出的无功功率 Q 随机端电压变化而变化, 不同的是异步发电机的 Q 小于零, 表明异步发电机实际上是吸收无功。可见对于采用无励磁调节能力的同步发电机在潮流计算中也可以作为电压静态特性节点处理。

2. 光伏发电等效模型研究

光伏并网发电系统按照系统功能分为两类: ①不可调度式光伏并网发电系统; ②可调度式光伏并网发电系统。两者的主要区别是在两个变换器之间增加了储能装置, 其系统结构如图 7-8 和图 7-9 所示。

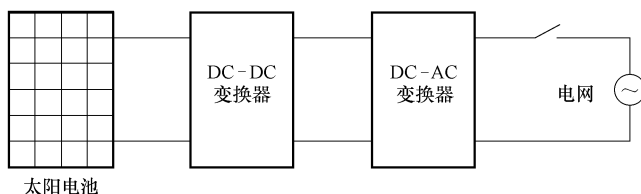


图 7-8 不可调度式光伏并网发电系统

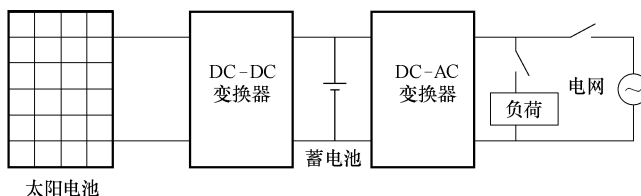


图 7-9 可调度式光伏并网发电系统

在不可调度式光伏并网发电系统中, 并网逆变器将光伏阵列产生的直流电能转化为和电网电压同频、同相的交流电能, 当主电网断电时, 系统自动停止向电网供电。当光伏系统产生的交流电能超过本地负荷所需时, 超过部分馈送给电网; 当本地负荷所需电能大于光伏系统产生的交流电能时, 电网自动向负荷提供补充电能。可调度式光伏并网发电系统和前者相比, 最大的不同处是系统中配有储能环节 (通常采用蓄电池组), 蓄电池组的容量大小按具体需要配置。由于不可调度式光伏并网发电系统具有集成度高、安装和调试相对方便、可靠性高的特点, 目前光伏

并网系统主要以不可调度式系统为主。

光伏并网系统逆变器主要采用电压源电流控制方式，只需控制逆变器输出电流以跟踪电网电压，即可达到并联运行的目的。光伏电池接入电网时可以保持功率因数为 1，为了尽可能多的获得有功功率，在潮流计算中光伏电池可以只考虑有功功率，作为 PQ 节点处理。

由以上分析可得出各种分布式发电并网接口模型和在潮流计算中的节点处理类型，见表 7-1。

表 7-1 分布式发电并网模型

DC 类型	发电机类型	与电网连接方式	节点类型	调节方式
风力	笼型异步发电机	直接连接	静态电压节点 PQ(V)	调节 P 和 Q
	双馈感应发电机	AC-DC 整流器	PQ 节点	调节功率因数
		DC-AC 换流器	PV 节点	调节电压
	永磁同步发电机	AC-DC 整流器	PQ 节点	调节功率因数
		DC-AC 换流器	PV 节点	调节电压
光伏发电		DC-AC 换流器	PQ 节点	
			PV 节点	

7.3.2 基于风电模型的无功优化的研究

1. 双馈感应风力发电机风电场并网方式

目前，国内外新建的风电场主要采用双馈感应风力发电机组。风电场内各台风电机组按一定的顺序排列在不同的位置上，各台风电机组通过一台升压变压器接入风电场，风电场再经升压变压器接入大电网，如图 7-10 所示。

双馈感应风力发电机组一般通过电压源变换器 VSC 接入电网，VSC 可作为无功源对电压进行控制。双馈感应风力发电机组具有恒功率因数控制（PLC）和恒电压控制（LVC）两种电压控制方式。恒功率因数控制通过调节转子绕组外接电源电压的幅值和相角使风电机组终

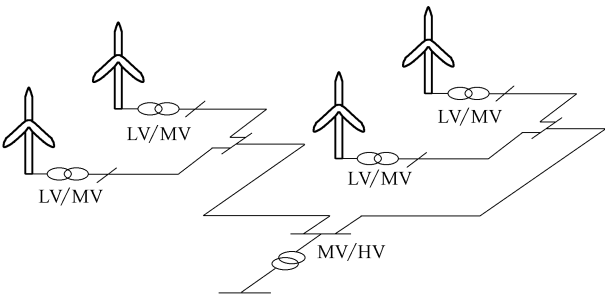


图 7-10 风电场接线图

端功率因素恒定不变，恒电压控制即通过风力发电机向系统提供一定的无功功率，以保持风力发电机组机端电压恒定不变。传统的风电场中每台风力发电机机端都配

有并联电容器, 为风力发电机的正常运行提供所需的无功功率。由于双馈感应风力发电机具有无功电压控制能力, 因此无须在双馈风力发电机机端安装无功补偿设备。为解决风电场并网引起风电场出口母线电压波动和电网电压不稳定等问题, 通常需在风电场出口母线处安装无功补偿装置。图 7-11 双馈感应发电机风电场并网结构图。

2. 风电场的风速功率预测

对风速进行比较准确的预测, 可以有效地减少风电场对电力系统的不良影响。目前对风速预测有很多方法, 如持续法、ARIMA 法、人工神经网络法、卡尔曼滤波法和模糊逻辑法等。

一般情况下, 风速是由平均风速和脉动风速组成的, 即

$$V(t) = U(t) + u(t) \quad (7-14)$$

式中, $U(t)$ 为平均风速; $u(t)$ 为脉动风速。

对于平均风, 其周期远高于一般结构的自振周期, 作用性质可以作为静力。平均风速沿高度的变化可用指数法则公式或对数法则公式计算, 工程上一般使用指数法则公式, 即

$$U = U_1 \left(\frac{h}{h_1} \right)^n \quad (7-15)$$

式中, h 、 h_1 为欲求和已知离地面的高度 (单位为 m); U_1 为已知离地面高度为 h_1 处的风速, (单位为 m/s); U 为欲求的离地面高度为 h 处的风速 (单位为 m/s); 指数 n 与地面的粗糙度以及大气的热稳定度有关, 其值为 $1/8 \sim 1/2$, 在开阔、平坦和稳定度正常的地区一般取 $1/7$ 。

对于脉动风, 它反映了风的随机性和紊乱性, 它在一段时间内在均值附近波动, 可以用其功率谱函数进行时域上的脉动风速模拟。目前主要采用的方法有线性滤波法、谐波叠加法、逆傅里叶变换法、小波分析方法等。

3. 风电场建模

基于目前所提出的双馈感应风力发电机数学模型, 通常采用以下两种风电场建模方式。一种方式是将风电场中所有风力发电机等效为一台风力发电机, 另一种方式是对风电场中每台风力发电机进行详细的建模。

(1) 风电场集总模型

风电场集总模型将风电场中所有风力发电机等效为一台发电机模型。该模型无

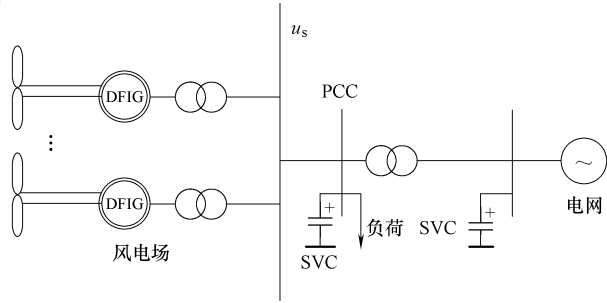


图 7-11 双馈感应电机风电场并网结构

需对每台风力发电机进行建模,大大减少了风电场建模的计算量。假设风电场中所有风力发电机都运行在相同的风速条件下,风速取各台风力发电机处风速的平均值。设风电场由 N 台型号相同的双馈感应风力发电机组成,各台风电机定子端并联,然后接入大电网。此时风电场等效模型参数和单台双馈感应风力发电机模型参数关系如下:

$$\frac{R_{sWF}}{R_s} = \frac{R_{rWF}}{R_r} = \frac{L_{sWF}}{L_s} = \frac{L_{rWF}}{L_r} = \frac{L_{mWF}}{L_m} = \frac{1}{N} \quad (7-16)$$

由式 (7-16) 可得到风电场集总等效模型,并可推断得知流入风电场等效模型电路中的定子、转子电流值是单台双馈风力发电机定子、转子电流的 N 倍。

(2) 风电场详细模型

研究风电场模型时,由于各台风力发电机排列在不同的位置上,所以其所处位置的风速一般也不相同。各台风力发电机在不同风速条件下转速不同,因此其输出功率也不相同。为准确地反映风电场实际情况,可通过对风电场中每台风力发电机进行建模来建立风电场模型。

假定风电场中包含 N 台型号相同的双馈感应风力发电机,其定子并联后连接到无穷大母线。该模型首先应分析风电场中每台风力发电机处的风速条件,由每台风力发电机处的风速计算出每台风力发电机的转速,从而得到每台风力发电机的输出功率,然后将各台发电机输出功率结果累加得到风电场输出功率。但由于风电场中风力发电机数量众多,考虑风电场中每一台风力发电机模型将增加风电场建模的计算负担。

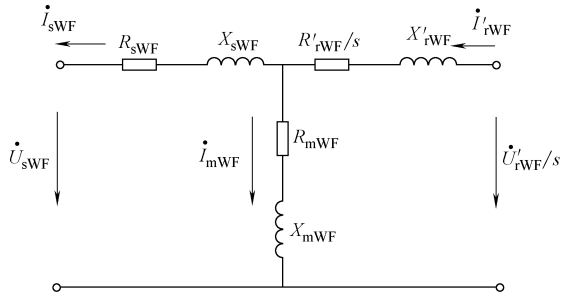


图 7-12 双馈风力发电机风电场集总模型等效电路

4. 风电场输出功率

采用风电场详细模型进行分析时,设风电场包含 N 台双馈感应风力发电机组,其中第 i 台风力发电机组向电网输送的有功功率和无功功率分别为 P_{Ti} 、 Q_{Ti} ,整个风电场的功率为各台风电机组功率累加之和。风电场有功功率和无功功率表示为

$$P_{WF} = \sum_{i=1}^N P_{Ti} \quad (7-17)$$

$$Q_{WF} = \sum_{i=1}^N Q_{Ti} \quad (7-18)$$

由式 (7-17) 和式 (7-18) 可得风电场功率因数为

$$\cos\varphi_{WF} = \frac{|P_{WF}|}{\sqrt{P_{WF}^2 + (Q_{WF})^2}} \quad (7-19)$$

7.4 智能 AVC 处理可再生能源发电中的低电压穿越问题

随着双馈感应异步风力发电机组在电网中所占容量逐年骤增, 电网对并网风力发电机组要求越来越高, 要求其具有一定的低电压穿越能力。在电网出现电压跌落过程中要求其能成功穿越故障, 而不是从电网中直接切除, 如果直接从电网中切除, 将会造成更大的连锁反应, 甚至造成电力系统崩溃。

随着风力发电机组在电网中所占比例逐年增大和新能源产业快速发展, 欧洲一些国家已经提出了风力发电机组低电压穿越能力的一些性能指标, 我国暂时还没有提出类似的指标。这些性能指标就是要求在终端电压跌落过程中, 发电机组不能直接脱离电网, 而是在电网故障期间向电网输送一定的无功分量, 帮助发电机电端电压恢复至正常运行状态。在欧洲一些风力发电技术发达的国家, 已经提出了低电压穿越技术准则, 当电网电压跌落在规定范围之内时, 发电机应该向电网输送一定的无功功率帮助电网电压恢复。由于发电机组容量在逐渐增大, 不允许电网电压在规定范围之内与电网解列, 这样风力发电机组必须具有一定的低电压穿越能力。当电网电压跌落超出其规定范围之内时, 才允许发电机与电网解列。智能 AVC 与智能电网的发展方向一致, 在接纳可再生能源的同时, 必须考虑到提高风力发电机组的低电压穿越能力, 为今后的大规模发展奠定坚实的基础。

目前最实用的是在转子绕组中串入 Crowbar 电路, 在电网电压出现跌落时, 为转子提供旁路电路释放能量, 限制转子过电流和直流母线电容的安全, 其电路如图 7-13 所示。

智能 AVC 需要采用新型故障穿越控制策略来提高风电机组的低电压穿越水平, 新型故障穿越 (Fault Ride-through Technology, FRT) 控制策略能够改善传统的基于旁路电阻 Crowbar 装置的 LVRT 暂态控制性能, 在一定程度上能够解决常规 Crowbar 电路低压穿越技术的不足。

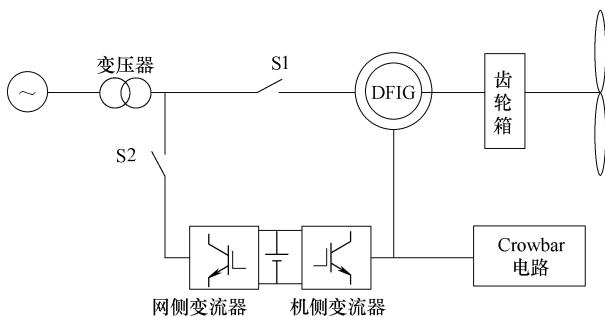


图 7-13 转子 Crowbar 电路双馈风力发电系统拓扑

7.4.1 新型 FRT 控制策略的优点

新型 FRT 控制策略是在基于传统 Crowbar 电路的基础上, 有如下新特点:

①在电网故障和电网电压恢复期间能够根据电网当前的跌落值,实时跟踪检测电网的无功分量调节向电网注入额外的无功电流,满足电网恢复所需的无功需求量。②通过采用重构 RSC 线路,将 RSC 与 GSC 并联后通过滤波器接入电网,通过两个并联逆变器同时向电网注入无功电流。在 GSC 和 RSC 容量相同情况下,向电网注入的最大无功量是常规 LVRT 控制策略的两倍。这在无需增加硬件的前提下,解决了单个变流器向电网注入无功量的不足。③采用重构 RSC 线路策略,实现了转子侧和变流器物理上的脱离,过高的转子侧电压不会通过反向并联的二极管给直流母线电容充电,不会对直流母线电容造成危险。

7.4.2 双 PWM 变频器的暂态控制

当电网电压出现跌落情况下,可采用常规基于 Crowbar 旁路电路控制策略。当旁路电阻 Crowbar 装置投入运行时,封锁转子侧变流器,只通过 GSC 释放直流母线电容过量储能,并且向电网注入无功量帮助电网电压恢复。由于励磁变流器容量有限,其向电网注入的无功量是一定的,不足以帮组电网电压恢复。如果将闲置的 RSC 通过重构线路与 GSC 并联通过滤波器接入电网,可以提高向电网注入的无功量。当 RSC 与 GSC 容量相同,并联逆变器将使 GSC 容量扩大一倍。在不需要增加硬件的前提下,提高了系统向电网注入的无功分量。

图 7-14 为改进常规 Crowbar 技术的 FRT 控制策略框图。在正常工作状态下导通 S1 的 a 侧,封锁 S1 的 b 侧和 S2,封锁旁路 Crowbar 电路。当电网电压出现跌落的情况下,如果转子侧过电流和直流母线电压超过设定的阈值,开关 S2 导通,开关 S1 的 b 侧导通,封锁开关 S1 的 a 侧。这时,转子侧变流器和网侧变流器并联经过滤波电感同时向电网输送无功电流,帮助电网电压恢复。另外,开关 S1 的 a 侧封锁,使转子侧变流器与风力发电机组实现物理上的脱离。过高的 Crowbar 电阻电压不会通过反向并联的二极管给直流母线充电,对直流母线电容不会造成威胁。当风力发电机组终端电压恢复至 0.85p. u. 时,认为风力发电机组成功穿越故障。此时变流器恢复正常工作,旁路电阻被切除,即开关 S1 的 a 侧导通, b 侧封锁

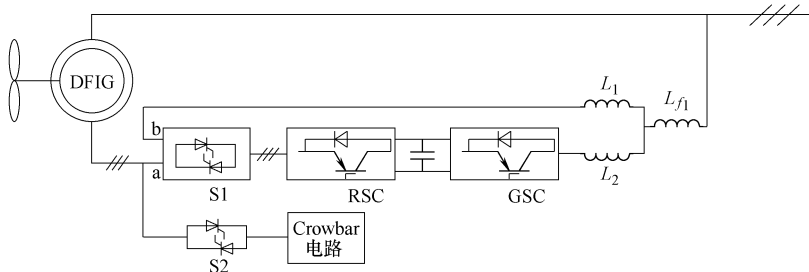


图 7-14 新型故障穿越结构图

锁, 开关 S2 封锁, 电网恢复正常。

7.4.3 两种控制策略优缺点对比

基于传统 Crowbar 旁路电路存在以下三点不足:

- 1) 不能够快速抑制和衰减转子侧过电流和直流母线过电压;
- 2) 当电网电压出现跌落时, 封锁转子侧变流器, 只通过网侧变流器向电网输送无功电流, 基于变流容量的限制, 单个变流器不足以帮助恢复电网电压;
- 3) 当风力发电机组终端电压出现跌落时, 封锁转子侧变流器, 但是其不是真正意义上和风力发电机组脱离, 当 Crowbar 电路电阻上降落电压太高时, 可能通过反向并联的二极管向直流母线电容充电, 造成直流母线电压快速提升。

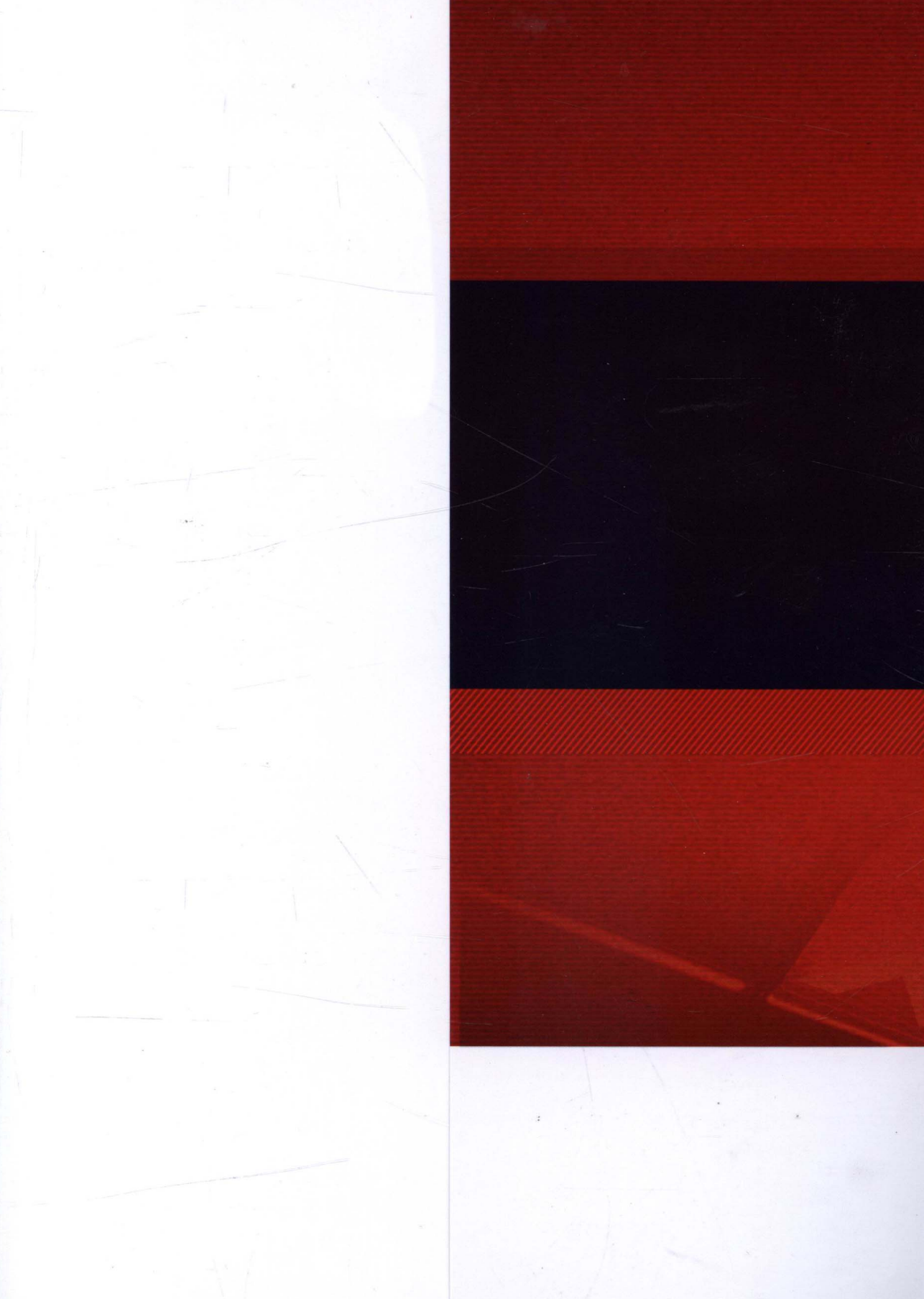
新型故障穿越电路弥补了基于传统 Crowbar 电路的不足, 其具有以下特点:

- 1) 能够快速抑制和衰减转子侧过电流和直流母线电容过电压;
- 2) 当电网电压出现跌落时, 通过导通开关 S1 的 b 侧, 让转子侧变流器和网侧变流器并联, 通过滤波电感同时向电网提供无功电流, 当网侧变流器和转子侧变流器容量相同时, 变流器向电网注入无功电流量是常规的两倍;
- 3) 当电网电压出现跌落时, 封锁开关 S1 的 a 侧, 实现了风力发电机组和转子侧变流器真正意义上的物理脱离, 过高的 Crowbar 电压不会通过反向并联的二极管给直流母线电容充电, 不会对直流母线电容造成威胁。

智能 AVC 系统在接纳可再生能源的同时, 采用了新型故障穿越电路, 在电网故障状态下, 利用转子侧变流器的重构策略使 RSC 和 GSC 并联运行, 同时向电网注入足量的无功电流, 尽快释放母线过储能, 提高 DFIG 风力发电系统的 LVRT 控制性能, 能够有效提高系统的低电压故障穿越能力。

参 考 文 献

- [1] 唐寅生,丁晓群. 智能 AVC 系统的特征和建设研究 [J]. 电网技术, 2010, 34 (10): 10-14.
- [2] Li guanghe, Zhou ling, Liu hongliang, et al. Research on Framework of Smart Automatic Voltage Control (Smart AVC) [C] //Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). 82010 28-31.
- [3] 丁晓群,周玲,陈光宇. 电网自动电压控制 (AVC) 技术及案例分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [4] 胡红琼,张生庭,王宗山,等. 智能 AVC 系统 (S10) 在泸州电网应用研究 [J]. 中国电力, 2012, 45 (02): 12-14.
- [5] Ding Xiaoqun, Lu Peng cheng, Zhao Bo, et al. Research on construction of smart AVC in transitional period [C] // Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT 2011). 2011.
- [6] Ding Xiaoqun, Luo Shanshan, Zhao Pu. On Application of Smart AVC (S10) to Luzhou Power Grid [C] //2011 2nd International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE 2011) .2011.



地址:北京市百万庄大街22号
邮政编码:100037

电话服务

社服务中心:010-88361066

销售一部:010-68326294

销售二部:010-88379649

读者购书热线:010-88379203

网络服务

教材网: <http://www.cmpedu.com>

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

上架指导 工业技术 / 电力技术

ISBN 978-7-111-39210-1

策划编辑◎刘星宁 / 封面设计◎陈沛

ISBN 978-7-111-39210-1



9 787111 392101 >

定价: 45.00元