



国家电网
STATE GRID

辽宁省电力公司

电力系统电压和 无功功率自动控制

● 燕福龙 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

电力系统电压和 无功功率自动控制

◎ 燕福龙 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

近年来,随着我国坚强智能电网建设工作的不断推进,我国已拥有世界上电压等级最高、结构最复杂的电网,大容量远距离输电和大规模互联成为我国电网的重要特征。在此情况下,输电功率的波动将引起电网电压的大幅变化,实现电压和无功功率自动控制(即AVC)已成为重要的技术课题。

本书主要介绍分调、省调和地县调AVC主站的功能特点、设计原则、功能规范、算法策略、工程实践等具体内容。对发电厂AVC子站的功能要求和实现方法以及变电所电压和无功功率的控制策略与方法也作了较详细的论述。风力发电和光伏发电作为绿色能源在我国获得了快速发展,由于其不可预见性和不稳定性给电力系统带来了一系列问题,本书对这方面的问题和解决方法也较全面地做了分析和阐述。这些年来大功率电力电子器件(如IGBT、LTT、IEGT)在电力系统中的应用取得了许多成果,由它们构成的大功率SVC、SVG等新型无功补偿装置获得了成功应用,书中也作了典型介绍。

本书可供从事电力系统电压和无功功率自动控制以及运行、维护工作的技术人员参考,也可供大专院校有关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统电压和无功功率自动控制 / 燕福龙主编
— 北京: 中国水利水电出版社, 2013.5
ISBN 978-7-5170-0902-3

I. ①电… II. ①燕… III. ①电力系统—无功功率—
自动调节—研究 IV. ①TM761

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第109920号

书 名	电力系统电压和无功功率自动控制
作 者	燕福龙 主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市密东印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 26.75印张 635千字
版 次	2013年5月第1版 2013年5月第1次印刷
印 数	0001—5000册
定 价	98.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

《电力系统电压和无功功率自动控制》 编委会名单

主 编：燕福龙

副 主 编：王芝茗 葛维春

编 写 组 长：蒋建民

编写组成员：（按姓氏笔画排序）

于 汀 王春岩 冯志勇 陈 亮 蒲天骄



前 言

电力是国民经济的命脉，近年来随着我国坚强智能电网建设工作的不断推进，我国已拥有世界上电压等级最高、结构最复杂的电网，大容量远距离输电和大规模互联成为我国电网的重要特征。在这种情况下，输电功率的波动将引起电网电压的大幅变化，电压和无功功率的有效管理已成为日益突出的问题。电力系统的无功电源除发电机外，还有电容器组、电抗器组、调相机，以及新型的各类无功补偿装置，如：静止无功补偿器 SVC、静止无功发生器 SVG 等。但是最佳的无功电源依然是同步发电机组，这是因为发电厂建成后就具备了提供无功功率的能力，不需要另外增加投资，并且可连续调节，可控性良好。从宏观角度看，一个装机容量 10000MW 运行中的电力系统，实际上也同时是一个装机容量为 12000~15000Mvar 正在运行的无功功率系统。这个无功系统与有功系统一样，由无功电源、网络、无功负荷组成。电网的有功功率损耗不超过负荷的 10%，而电网的无功功率损耗却占无功负荷的 30%~50%，无功功率总损耗要比有功功率总损耗大 3~5 倍。因此，如何调配好无功功率牵涉到电网的安全性、稳定性和经济性，在日常电网调度运行管理中是十分重要的一个课题。

电压水平是电能质量的重要衡量标准，保证电网电压在合理、平稳的水平运行是电网调度的重要任务。电压水平与无功功率紧密相关，无功功率的平衡与否直接影响着系统的电压质量。合理的无功功率分布，对于提高电能质量、降低电力网络损耗至关重要。

为提高电网运行和管理人员驾驭大电网的能力，实现广域间资源优化配置，单纯依靠人工经验进行电压和无功功率的调节已经难以满足要求。随着电网调度自动化、信息化、互动化水平的显著提高，在各调度控制中心建设自动电压控制 (Automatic Voltage Control, AVC) 系统，实施电压和无功功率的闭环控制已成为当前的重要工作。

作为现代电网调度控制的基本而重要的功能，AVC 是指在正常运行情况下，通过实时监视电网电压/无功功率情况，进行在线分析和计算，分层分区调节和控制电网中的无功电源、变压器分接头和无功补偿设备，实施实时的

最优闭环控制，满足全网安全约束条件下的优化无功潮流运行，达到全网电压优质和网损最小目标。从本质上说，自动电压控制的目标就是通过对电网无功分布的重新调整，保证电网运行在一个更安全、更经济的状态。

我国在 2001 年 9 月中国第 27 届电网调度运行会议上将 AVC 列为现代电网调度重点发展技术。历经多年努力，AVC 获得快速发展，已从原来传统的厂站端的电压无功控制装置（Voltage Quality Control, VQC）发展到整个电网范围内的电压/无功功率自动控制。

编写本书的目的就是总结近些年来国内外在 AVC 工作中取得的成就和经验，全面、系统地介绍 AVC 的内容，以及所涉及的有关知识，书中还编入了作者这些年来取得的科研成果。

第一章介绍了省级电网电压/无功控制特点、AVC 功能原理、AVC 主站设计架构及功能规范、控制模式、模型及算法、实用化技术、多种无功电源间的协调技术、有功与无功的协调技术、各级电网间的协调控制、电压稳定性及控制等内容。第二章介绍了地区电网电压无功控制特点、控制目标及原则、AVC 主站功能规范、安全与闭锁策略、上下级协调控制、控制模式、算法策略、实用化处理、多种设备协调技术、工程化关键技术等内容。对于一个区域或地区电网而言，其 AVC 系统功能强弱、所能取得效果的好坏与这两章所涉及的内容有关。第三章介绍了发电厂 AVC 系统功能要求和实现方法，以及发电机励磁系统的有关知识。在现代大型电力系统中，同步发电机是最主要的有功和无功电源，这类发电机广泛应用在火力发电厂、水电厂和核电厂中，在我国这三大类电厂的装机容量占总装机容量的 90% 以上。还有，发电机组拥有可控性能良好的励磁调节系统，它可以快速、稳定地调节发电机组的励磁功率，以期达到调节无功出力的目的。在研究电力系统电压无功功率控制的时候首先要利用好发电机组的无功功率控制，这是快捷、高效、经济的手段，也是各电力部门首先要实现的功能。因此，研发一套有良好品质的发电厂 AVC 装置至关重要。第四章介绍了变电站 AVC 装置的功能要求和实现方法。变电站是电力系统中的重要节点，不仅担当电压转换、能量传送作用，而且担当着电压和无功功率调节的重要任务。本着无功功率的分层、分区就地平衡的原则，通常各级变电站都配备无功补偿设备，如：并联电容器组、并联电抗器、晶闸管控制电抗器（TCR）、晶闸管投切电容器（TSC）、晶闸管投切电抗器（TSR）、静止同步补偿器（STATCOM）等。通过对有载调压设备的分接开关和无功补偿设备的配合调整，不仅可以做到改善母线电压质量，而且可以降低输入线路和变压器上有功损耗。本章介绍了如何综合、

有效地调控这些无功补偿设备的工程实用方法。第五章介绍了风电场和光伏电站 AVC 装置。近些年来,风力发电在我国取得了突飞猛进的发展,自 2006 年以来我国新增风电装机容量 5000 万 kW,到 2012 年 6 月为止,我国的并网风电已达到 5258 万 kW,超过美国跃居世界第一。太阳能光伏发电在我国也取得了很大的发展。作为绿色能源,风电和光伏发电受到人们的大力关注,并得到国家政策的扶持,今后会得到进一步的发展。但是,风电和光伏发电的不确定性、不稳定性又给电力系统运行带来了一系列新的问题。本章对风电和光伏发电有关的 AVC 功能要求和实现方法做了介绍。第六章介绍了晶闸管、光控晶闸管(LTT)和电子注入增强型绝缘栅极晶体管(IEGT)的工作原理,作为大功率电力电子器件,它们在新型无功功率补偿设备(如 SVC、SVG 等)中得到了广泛的应用。在已往的著作和论文中关于高电压大容量电力电子设备的理论介绍较多,而结构介绍很少。其实,高电压大容量电力电子设备的结构对其性能、成本、生产、安装、维修、寿命和造价都有着重大影响,所以在本书中,就这方面进行了较详细的介绍。第七章介绍了新型无功功率补偿设备(SVC、SVG)在无功功率补偿等方面的工程应用实例。SVC 和 SVG 作为柔性交流输电技术(FACTS)的新一代设备在国内外已经得到了比较广泛的应用,具有响应速度快、调节平滑、控制灵活、运行范围大等优点。SVC 和 SVG 可以改善电力系统的电能质量,并可以在故障恢复期间向系统提供大量的无功功率、提高电压稳定性。

本书可供从事电压和无功功率自动控制研发工作以及运行、维护工作的技术人员参考,也可供大专院校有关专业的师生阅读。

燕福龙、王芝茗、葛维春和蒋建民参与了编写大纲的制定和各章内容的编排工作。第一章和第二章由中国电力科学研究院蒲天骄和于汀编写;第三章由辽宁省电力有限公司蒋建民编写;第四章由沈阳理工大学冯志勇编写;第五章由冯志勇和辽宁电力勘测设计院陈亮编写;第六章和第七章由荣信电力电子股份有限公司王春岩编写。蒋建民校阅了全部书稿。

由于编写人员的水平所限,书中难免有疏漏之处,敬请读者批评指正。

作 者

2013 年 3 月



目 录

前言

第一章 省级电网 AVC 系统主站	1
第一节 概述	1
第二节 电压/无功功率控制意义	2
第三节 AVC 功能原理	6
第四节 控制模式	13
第五节 模型及算法	15
第六节 实用化技术	23
第七节 各级电网间的协调控制	32
第八节 电压稳定性及控制	36
第二章 地区电网 AVC 主站系统	39
第一节 概述	39
第二节 系统功能及目标	39
第三节 控制模式	49
第四节 算法策略	51
第五节 实用化处理	55
第六节 上下级控制	61
第三章 发电厂电压无功功率自动控制装置	65
第一节 概述	65
第二节 AVC 调节策略	65
第三节 AVC 装置的功能设计	70
第四节 电厂端 AVC 功能的实现方案	74
第五节 发电厂 AVC 装置的组屏方式	77
第六节 发电厂 AVC 装置软件流程	78
第七节 调度端 AVC 主站和电厂端 AVC 子站的连接方式	80
第八节 同步发电机励磁系统的构成及功能	82
第九节 整流及逆变电路	87
第十节 自并励半导体励磁系统	121
第十一节 他励半导体励磁系统	127

第十二节 自动励磁调节器	139
第四章 变电站电压无功功率自动控制装置	178
第一节 概述	178
第二节 VQC 的电压无功控制基本原理	179
第三节 VQC 的控制目标及控制模式	189
第四节 电压、无功限值设置	191
第五节 变电站电压无功功率自动控制策略	193
第六节 变电站电压无功功率自动控制系统功能	208
第七节 变电站电压无功功率自动控制系统实现方式	215
第八节 变电站电压无功功率自动控制装置设计实例	217
第五章 风电场与光伏电站电压无功功率自动控制	219
第一节 概述	219
第二节 风电场常用的无功补偿设备	221
第三节 双馈风电机组的无功功率控制原理	226
第四节 直驱型变速恒频发电机的无功功率控制原理	237
第五节 风电场电压无功功率综合控制	245
第六节 风电场侧电压无功功率控制装置设计实例	248
第七节 风电场低电压穿越技术简介	254
第八节 光伏电站电压无功功率控制	264
第六章 电力系统现代无功补偿装置基础	271
第一节 概述	271
第二节 现代无功补偿装置常用的功率器件	274
第三节 功率单元模块化设计	290
第七章 电力系统现代无功补偿装置应用	298
第一节 东鞍山 66kV、70Mvar 无功补偿装置	298
第二节 可移动式 35kV、±200Mvar 链式 STATCOM 双机并联系统	322
第三节 无功补偿装置用于抑制次同步谐振	356
第四节 无功补偿在风电场中的应用	394
参考文献	413

第一章

省级电网 AVC 系统主站

第一节 概 述

电力是国民经济的命脉，近年来随着我国智能电网建设的不断推进，我国电力系统已经成为世界上电压等级最高、规模最大的互联电网，大容量远距离输电和大规模互联成为我国电网的重要特征。在这种情况下，输电功率的波动将引起电网电压的大幅变化，使得电压和无功功率（以下也可简称无功）的有效控制成为日益突出的问题。

为提高电网调度驾驭大电网的能力，实现广域间资源优化配置，单纯依靠人工经验进行电压和无功功率的调节已经难以满足要求。随着电网调度自动化、信息化、互动化水平的显著提高，在各调度控制中心建设自动电压控制（Automatic Voltage Control, AVC）系统，实施电压和无功功率的闭环管理已成共识。

作为现代电网调度控制的基本而重要的功能，AVC 是指在正常运行情况下，通过实时监视电网电压/无功功率情况，进行在线分析和计算，分层分区调节和控制电网中的无功电源、变压器分接头和无功补偿设备，实施实时的最优闭环控制，满足全网安全约束条件下的优化无功潮流运行，达到全网电压优质和网损最小目标。从本质上说，自动电压控制的目标就是通过对电网无功分布的重新调整，保证电网运行在一个更安全、更经济的状态。

国外在 AVC 方面的研究开展较早，1968 年日本电力公司首先在自动发电控制（Automatic Generation Control, AGC）系统的基础上增加了系统电压自动控制功能，这是首次从全局的角度出发进行电压和无功功率控制，从此吸引了世界各国学者对这一领域的关注。德国电力公司的 AVC 系统采用两级控制模式，进行在线实时的最优潮流应用。法国电力公司的三级电压控制模式的研究和实施始于 20 世纪 70 年代，被当时国际上公认为最先进的电压控制系统。意大利、西班牙等国也相继结合自身特点推行了三级电压控制方案。

我国在 2001 年 9 月中国第 27 届电网调度运行会议上将 AVC 列为现代电网调度重点发展技术。历经多年努力，AVC 获得迅猛发展，已从原来传统的厂站端的电压无功控制（Voltage Quality Control, VQC）装置发展到整个电网范围内的自动电压控制。国内最



最早的省级 AVC 由湖南电力公司于 2000 年立项开始实施, 2003 年 4 月投入运行。辽宁电力公司在 2003 年启动 AVC 的研究, 2005 年投入闭环运行。近年来, 各区域电网调度控制分中心和省级电力调度控制中心逐步开展了 AVC 的研究与应用, AVC 已成为了各级调度自动化系统的必备功能。

根据“统一调度、分级管理”原则, 目前我国电力系统已建立了较为完备的五级调度体系: 国家级调度机构(以下简称国调), 区域级调度机构(以下简称分调), 省级调度机构(以下简称省调), 地区级调度机构(以下简称地调), 县级调度机构(以下简称县调)。各级调度机构在电网调度业务中是上下级关系, 实现各级调度机构的调控一体化运作。同时积极推进国调、分调运行业务一体化运作, 省调标准化建设、同质化管理, 地县调一体化、集约化、专业化建设。

电网各级电压的调整、控制和管理, 由国调、分调、省调和各地县调按调度管辖范围分级负责。国调负责管辖各区域间的联网系统、特高压线路、特大型电厂和变电站, 同时负责与各区域电网的电压无功协调; 分调负责管辖省间联络线、500(330) kV 电厂和变电站, 同时负责与各省级电网的电压无功协调; 省调主要负责管辖省内 220kV 环状电力网络(部分省调也负责管辖 500kV 电网), 包括 220kV 变电站和电厂, 同时负责与各地调间的电压无功协调; 地调管辖部分 220kV 变电站和辐射状的 110kV 电力网络, 并与县调实行一体化电压无功管理。

国调由于其位置的特殊性, 目前并没有实施 AVC 闭环管理。AVC 的应用主要集中在分调、省调和地县调层面上。其中分调和省调的网架结构和电源布局相似, 都是 500kV 或 220kV 环状结构, 所以其 AVC 系统的功能也相同。地县调的网架结构是辐射状的, 且不含电厂, 潮流从高电压等级向低电压等级流动。这与省调的网架结构有着本质的区别, 所以地县调的 AVC 系统不同于分调和省调的 AVC 系统。

本章介绍省调 AVC 系统主站的功能、算法策略、工程实践等具体内容。

第二节 电压/无功功率控制意义

电压水平是电能质量的重要衡量标准, 保证电网电压在合理、平稳的水平运行是电网调度的重要任务。电压水平与无功功率紧密相关, 无功功率的平衡与否直接影响着系统的电压质量。合理的无功功率分布, 对于提高电能质量、降低电力网络损耗(以下简称网损)至关重要。

随着我国国民经济发展到一定阶段, 电力电量的增长趋于缓慢, 对于电网公司而言, 降低网损已成为提高效益的重要举措, 因此电力系统无功优化的意义愈显突出。

一、电压与无功的关系

在工业生产和居民生活中, 大多数的用电设备是根据电磁感应原理, 依靠建立交变磁场进行能量的转换和传递的, 为建立交变磁场和感应磁通而需要的电功率就是无功功率。在电网运行中, 无功功率起着至关重要的作用, 大多数元件和负荷都是要消耗无功功率的, 其运行必须要有无功电源的支撑。

电压与无功功率的分布关系密切, 无功功率失衡会引起电压偏差, 影响电压质量。在



国家电网公司的《电能质量供电电压允许偏差》中对允许电压偏差范围的规定是在电网正常运行时保证各节点电压在额定水平上。《电力系统无功和电压电力技术导则》中对不同等级的电压偏差作出了具体规定：

1) 500 (330) kV 母线正常运行时, 最高电压不得超过额定电压的 10%; 最低电压不应影响电力系统同步稳定、电压稳定、厂用电的正常使用及下一级电压调节。

2) 发电厂和 500kV 变电站的 220kV 母线正常运行时, 电压允许偏差为额定电压的 0~10%; 电网事故时为系统额定电压的 -5%~10%。

3) 发电厂和 220 (330) kV 变电站的 35kV 和 110kV 母线正常运行时, 为相应额定电压的 -3%~7%; 事故时为额定电压的 -10%~10%。

对用户侧的电压允许偏差规定如下：

1) 35kV 及以上用户的电压波动幅度应不大于系统额定电压的 10%。

2) 10kV 用户的电压波动幅度为系统额定电压的 -7%~7%。

3) 380V 用户的电压波动幅度为系统额定电压的 -7%~7%。

4) 220V 用户的电压波动幅度为系统额定电压的 -10%~5%。

发电厂和变电站的 10kV 和 6kV 母线依照用户侧中的第 4 条规定执行。

只有电网的中枢节点电压偏差保持在允许偏移范围内, 其余各级电压的质量才能满足要求。电压过高或过低都会影响设备的使用寿命, 严重时甚至会导致电压失稳事故。国内外的大停电事故多是在缺乏必要的无功储备情况下, 由于潮流的大范围转移而导致电压崩溃的发生。

我国《电力系统安全稳定导则》规定电网无功补偿的基本原则应遵循“分层分区、就地平衡”, 实践也证明了这种方法不仅可以有效降低网损、保证无功功率平衡和适当电压水平, 而且还可防止电压崩溃的发生。

功率在输电线路上的传输会引起电压的偏移, 公式表示为：

$$\Delta V = \frac{PR + QX}{V_N} \quad (1-1)$$

式中: ΔV 为电压偏移量; P 和 Q 分别为线路上传输的有功功率和无功功率; R 和 X 为线路的电阻和电抗; V_N 为额定电压。

由式 (1-1) 可知, 在固定线路阻抗参数的情况下, 电压偏移只与有功功率和无功功率有关。由于省调管辖的输电线路电压等级较高, 此时 $R \ll X$, 可见输电线路上的有功功率对电压偏移造成的影响远不及无功功率。所以合理的无功功率分布可以有效减小输电线路的电压损耗, 起到改善电压质量的目的。

二、线损与无功的关系

线路损耗 (以下简称线损) 是网损的主要组成部分, 线损的大小直接影响着网损的高低。线损的计算公式为：

$$\Delta P = \frac{\Delta V^2}{R} \quad (1-2)$$

式中: ΔP 为线路的有功损耗; ΔV 为线路的电压降; R 为线路电阻。



由式 (1-2) 可知, 线损与线路的电压降正相关, 降低线损的方法是减小线路的电压降。而由式 (1-1) 可知, 可以通过合理配置无功补偿容量来减小线路电压降, 所以优化电网的无功潮流分布, 是减小线损和网损的有效方法。

三、常用无功电源

电力系统中常用的无功电源主要有同步发电机、变压器、电容/电抗器、同步调相机、静止无功补偿器、静止无功发生器等。

1. 同步发电机

同步发电机是电力系统最主要的有功功率电源, 同时也是最基本的无功电源, 它既可发出无功功率也可吸收无功功率, 无功功率调节速度快, 且可连续调节。

电力系统大部分的无功功率都是由同步发电机供给的。当发电机端电压大于电网电压时, 发电机发出无功功率, 称为迟相运行; 当机端电压小于电网电压时, 发电机吸收无功功率, 称为进相运行。

2. 变压器

变压器是电力系统中的常用设备, 也是消耗无功功率的主要元件。具有可调分接头的变压器是电力系统调压的重要手段。通过调整变压器分接头, 可以改变变压器两侧绕组的变比, 进而提高或降低电压。但这种调压方式只能改变电网的无功潮流分布, 而不是通过增加或减少无功功率来改变电压的。所以只有当系统无功功率备用充足时, 这种调压方式才有意义。

3. 电容/电抗器

电容/电抗器由于其价格低廉且易于安装维护, 而得到广泛使用。其中电容器可为电网提供无功功率, 电抗器可从电网吸收无功功率, 电容/电抗器提供或吸收的无功功率与其所连节点的电压的平方成正比。电容/电抗器属于离散型无功设备, 其无功功率不能连续可调, 而是一个类似于“0”、“1”的开关量, 即要么以额定容量投入, 要么全部退出。

4. 同步调相机

同步调相机是同步发电机运行于电动机状态, 不带机械负荷也不带原动机, 只向电网提供或吸收无功功率, 用于改善电压水平。当过励磁运行时, 向电网提供无功功率; 在欠励磁运行时, 从电网吸收无功功率。欠励磁的最大容量仅为过励磁容量的 50%~65%。同步调相机是旋转机械, 运行维护复杂, 响应速度慢, 难以满足动态无功补偿的要求, 目前已被静止无功补偿器所取代。

5. 静止无功补偿器

静止无功补偿器 (Static Var Compensator, SVC) 始于 20 世纪 70 年代, 它是由电容器和电抗器并联连接, 再配合一定的调节装置组成的。SVC 现在已经是成熟的技术, 被广泛应用于电力系统的各个领域。由于 SVC 没有旋转部件, 响应速度快, 能够双向连续、平滑调节, 运行维护简单方便, 因此具有很大的优越性。但同时也存在谐波污染、价格昂贵等问题。

6. 静止无功发生器

静止无功发生器 (Static Var Generator, SVG) 产生于 20 世纪 80 年代, 它采用可关断电力电子器件组成自换相桥式电路, 经过电抗器并联上网, 通过调节桥式电路交



流侧输出电压或电流，迅速吸收或发出无功功率，实现动态快速调节的目的。与 SVC 相比，SVG 响应速度更快、可调范围更宽、谐波成分更少，是一种更为先进的无功补偿设备。

四、调压措施及方式

在电力系统各种调压方式中，通常情况下应优先考虑使用发电机进行调压。但当仅依靠发电机无法满足调压目标时，应综合考虑动用其他手段进行调压以满足要求。

（一）常用调压措施

1. 发电机调压

省调管辖范围内主要的电源是发电机，应用机组的无功出力调节电压无需增加额外的成本。在电力系统实际运行过程中，应根据发电机所承担的负荷，以及与主网架的拓扑关系，合理地调节发电机的励磁装置，改变无功出力，在满足调压目标的情况下，尽量满足电网经济运行的要求。通过发电机调压时，在保证无功出力不超过调整限值的基础上，应尽量避免发电机进相运行。

2. 变压器调压

当电力系统无功功率较为充足时，可以通过调整变压器分接头档位的方式来调节电压。一般地，变压器分接头档位上升，变压器低压侧母线电压增大；变压器分接头档位下降，变压器低压侧母线电压减小。这种调压方式本质上是通过改变无功潮流分布来实现的，当系统中无功功率相对缺乏时，此方法效果并不明显，此时某些母线电压的增大是以牺牲其他区域母线电压水平为代价的，系统中总体的无功水平并没有得到改善。

3. 无功补偿装置调压

无功补偿应遵循分层分区和就地平衡的原则，避免无功功率大范围远距离传输以及从低电压等级向高电压等级的倒送。结合负荷变化趋势，确定电网所需要的无功补偿容量，通过调节无功补偿装置来满足电网的无功需求。实际中常用的无功补偿装置主要包括电容电抗器、SVC、SVG 和静止同步无功补偿器（STATic synchronous COMPensator, STATCOM）等。

（二）基本调压方式

电力系统调压的根本目的是使各节点电压均能保持在允许范围内。但由于系统内节点众多，对所有节点的电压水平进行监控是不现实的，通常可以选择一些关键节点进行监控，只要将这些节点的电压控制在合理范围内，其他节点的电压水平也就基本可满足要求。这样的节点称为中枢节点。对于中枢节点的选择通常是装机容量较大的发电厂高压侧母线、枢纽变电站的低压侧母线、大量地方负荷的发电机母线。中枢节点的调压方式一般有恒调压、顺调压和逆调压三种。

中枢节点恒调压方式是指不论负荷趋势如何变化，均保证中枢节点电压水平维持在相对稳定的范围内，通常是线路额定电压的 $102\% \sim 105\%$ 。

中枢节点顺调压方式是指在重负荷时适当降低中枢节点电压，但不得低于额定电压的 102.5% ；在轻负荷时适当提高中枢节点电压，但不得高于额定电压的 107.5% 。

中枢节点逆调压方式是指在重负荷时，适当提高中枢节点电压以补偿电压损耗；在轻



负荷时适当降低中枢节点电压以防止受端电压过高。由于逆调压方式可以有效改善电压质量,所以是目前应用最为普遍的调压方式。

第三节 AVC 功能原理

一、AVC 基本原理

AVC 在正常运行情况下,通过数据采集与监视控制系统 (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) 实时采集电网运行数据,在确保电网安全稳定运行的前提下,以经济性为目标、安全性为约束,根据状态估计结果、从全局角度进行电压无功优化。并根据控制指令,通过远程终端 (Remote Terminal Unit, RTU) 对发电机无功、有载调压变压器分接头、可投切无功补偿装置、SVC、SVG 等电压无功调节设备进行闭环调节,同时通过电力调度数据通信网与上、下级电网进行电压无功协调控制,实现全网无功功率分层分区就地平衡、提高电压质量、降低网损等目的。

完整的 AVC 系统由主站和子站两部分组成。对于省调而言,AVC 主站安装在调度控制中心,周期性地全网优化计算,得出相应的控制指令,并将控制指令下发到各 AVC 子站。AVC 子站安装在电厂和变电站,当其参与省调 AVC 主站的调节时,接收 AVC 主站下发的控制指令,并根据本厂站的实际情况,将指令分解到厂站内相应的无功设备,通过调节无功设备来响应 AVC 主站的指令。当其不参与省调 AVC 主站的调节时,即为就地运行状态,则跟踪运行方式部门事先设定的电压曲线,根据当前电压值与同时段电压曲线值的偏差,调节本厂站内的无功设备,使本厂站的电压值与相应时段的电压曲线值吻合。对于地调而言,此时也可以看做是省调 AVC 主站的一个子站。通过设定省、地关口,选择合适的协调变量,进行省地电压无功协调控制,省调通过电力调度数据通信网向地调下发对各省地关口的无功功率需求,地调将当前关口的无功功率与省调要求的无功功率进行对比,并通过地调自身的 AVC 系统调节相应的无功设备,来补偿两者之间的无功功率偏差。

电力系统电压和无功功率控制的根本目的是提高电压质量、减小网损、保证系统运行的安全稳定裕度。AVC 的作用就在于优化电网无功潮流分布,使电网趋于安全性和经济性最优的运行状态。AVC 系统集成经济性和安全性于一身,符合智能电网的发展趋势,实现了安全约束下的经济控制,减轻了调控人员的工作强度,是目前公认的电压和无功功率控制的最高形式。

二、省级电网电压/无功功率控制特点

我国省级电网的主网架呈环状结构,西北地区各省是以 330kV 电压等级而形成环状电网,有的省份也管辖部分 750kV 环网。除西北地区外的省级电网是以 220kV 电压等级而形成环状电网,有的省份也管辖部分 500kV 环网。由于闭环运行的环状电网运行方式可灵活变化,所以省级电网的潮流方向也并不固定。

省级电网电压无功控制方式同样遵循“分层分区、就地平衡”的原则。其中分层平衡主要是指各电压等级维持自身的无功功率就地平衡,即 500 (750) kV 网络、220 (330)



kV 网络、110kV 及以下网络各自维持无功功率就地平衡。减少无功功率跨电压等级大范围远距离传输，尤其避免无功功率由低电压等级网络流向高电压等级网络。至于分区平衡的概念主要是指全省电网可以划分为若干个区域，这些区域彼此之间呈电气弱耦合状态，无功关联灵敏度较小，彼此之间的无功功率支援能力较低。所以这些区域只需保证本区域内的无功功率平衡即可，这样既能保证全网无功功率的就地平衡，也避免了无功功率的远距离传输。

省调 AVC 系统首先根据相应的数据检测识别机制处理 SCADA 量测信息，过滤坏数据和死数据，然后根据状态估计结果进行全网优化计算并得出控制指令，对控制指令进行校验后下发给电厂、变电站和地调执行。目前，各省调状态估计的遥测合格率指标一般可达到 95% 以上，此时说明状态估计的结果可信，AVC 据此进行优化计算的结果和收敛性也是有保障的。即使如此，状态估计不收敛或估计精度不高的可能性仍然存在，AVC 优化计算不收敛的可能性理论上也是存在的。所以当状态估计结果不可信或是 AVC 优化计算不收敛时，还需有备用的算法以保证控制的实时性。功能框图如图 1-1 所示。

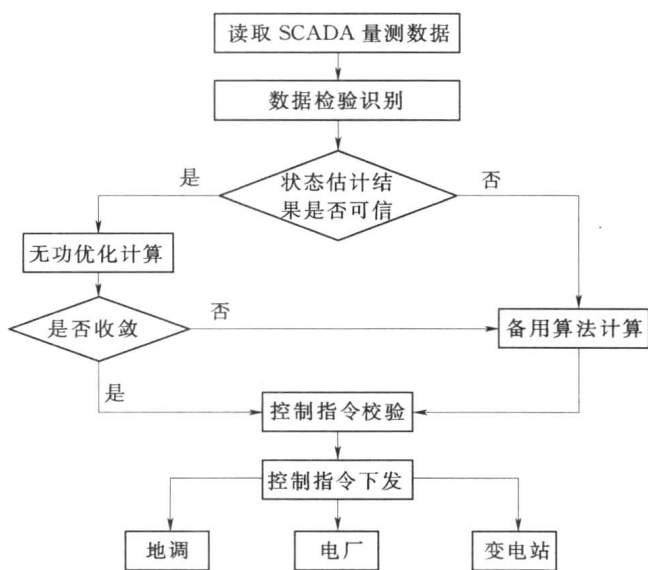


图 1-1 AVC 功能框图

目前常用的备用方法主要有两种：一种是根据运行方式部门事先安排好的各厂站电压曲线进行控制，此时省调 AVC 根据各厂站的实测电压值和同时段电压曲线值的偏差进行无功补偿，使各厂站按既定电压曲线运行；另一种是基于 SCADA 量测数据和无功灵敏度进行电压校正，如果所有母线电压均未越限，且与考核边界间保持有一定的距离，则 AVC 不调节，否则启动校正控制以使各母线电压水平相对靠近考核边界的中间地带，同时监视各厂站的高压侧送出线路的无功功率，维持线路上有较高的功率因数水平，尽量减少无功功率的传输，做到无功功率就地平衡。

可见第一种方法类似于各厂站的就地分散控制模式，只不过是省调将所有厂站的分散控制集中到省调 AVC 系统进行。第二种方法可保证电网电压的安全性，虽然无法保证电网全局的经济性最优，但仍可使局部电网的经济性趋优，作为状态估计或电压无功优化异常的后备控制方法，可有效提高 AVC 系统的整体可靠性。

三、主站设计架构

AVC 主站搭建在省级电网调度自动化系统平台之上。调度自动化系统平台通过系统管理器管理 AVC 相关应用和进程，并为 AVC 应用提供基础平台支持，包括实时库、历史库、数据通道和相关画面等。AVC 系统主站的基本架构如图 1-2 所示。

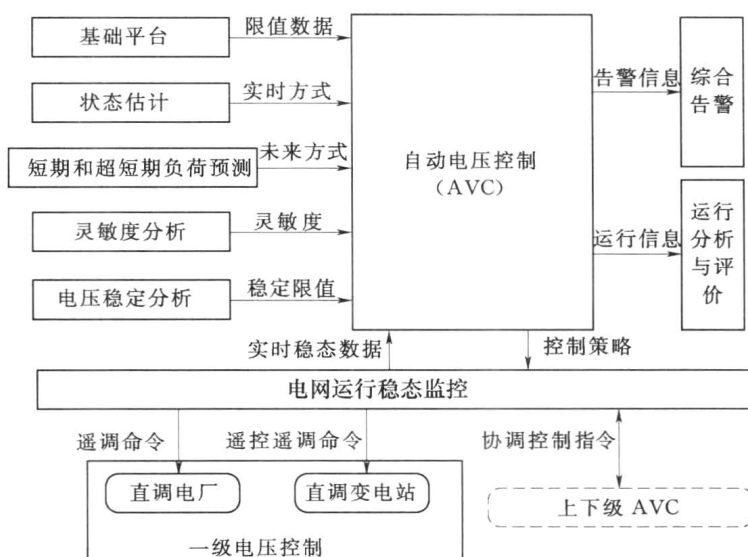


图 1-2 AVC 系统主站的基本架构

(一) 输入数据交互

AVC 应包括以下输入数据：

- 1) 从基础平台获得各种限值数据。
- 2) 从状态估计获得电网实时方式数据。
- 3) 从电网运行稳态监控获得电网实时运行数据，包括：
 - a. 受控电厂的母线电压，受控机组的有功、无功、机端电压、机组运行状态、增减磁闭锁状态，当地 AVC 远投状态；
 - b. 受控变压器运行状态，受控电容器/电抗器的运行状态、检修状态、保护闭锁状态，当地 AVC 远投状态，受控 SVG、SVC 的运行状态；
 - c. 需要 AVC 监视的母线电压和支路无功功率量测；
 - d. 上下级协调控制所需的量测，包括上级 AVC 下发的协调目标、下级 AVC 的投运状态、可调容量、关口电压和无功等。
- 4) 短期和超短期负荷预测所提供的未来负荷数据。
- 5) 电压稳定分析模块提供的电压限值。
- 6) 灵敏度分析模块提供的无功电压的灵敏度。

(二) 输出数据交互

AVC 应包括以下数据输出：

- 1) 向电网运行稳态监控功能输出电厂遥调指令和变电站遥控遥调指令。
- 2) 向综合智能分析与告警功能提供告警信息，包括：
 - a. 实时数据异常告警信息；
 - b. 电网状态异常告警信息；
 - c. 软件运行异常信息；
 - d. 系统、厂站和设备的状态变化信息。