

电力网电压无功功率 自动控制系统

蒋建民 冯志勇 刘美仪 编著

 辽宁科学技术出版社
LIAONING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

电力网电压无功功率 自动控制系统

蒋建民 冯志勇 刘美仪 编著

辽宁科学技术出版社

沈 阳

© 2010 版权归蒋建民所有，授权辽宁科学技术出版社使用

图书在版编目 (CIP) 数据

电力网电压无功功率自动控制系统 / 蒋建民, 冯志勇, 刘美仪
编著. —沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2010.4

ISBN 978-7-5381-6381-0

I. ①电… II. ①蒋… ②冯… ③刘… III. ①电力系统—自动
控制—无功功率—研究 IV. ①TM761

中国版本图书馆CIP数据核字 (2010) 第051746号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路29号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳新华印刷厂

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 19

字 数: 433千字

印 数: 1~3 000

出版时间: 2010年4月第1版

印刷时间: 2010年4月第1次印刷

责任编辑: 李伟民

封面设计: 嵘 嵘

责任校对: 刘 庶

书 号: ISBN 978-7-5381-6381-0

定 价: 40.00元

联系电话: 024-23284360

邮购热线: 024-23284502

<http://www.lnkj.com.cn>

前 言

随着电力事业的不断发展, 电力网络已逐步形成巨大的互联系统, 网络之间越来越紧密的联系提高了系统的安全性, 但也因此使得对于电力系统电压的调控变得越来越困难, 一方面, 互联系统的巨大使得分析计算的规模变得越来越大和复杂, 因此经常会受到计算机设备容量和计算时间的限制; 另一方面, 随着系统的扩大, 及时、完整和准确地获得整个互联系统的实时运行信息也变得越来越困难。在给定的负荷水平下, 由于网络拓扑和无功补偿元件位置的不同, 根据系统的无功状况, 互联系统的运行状态的差别也很大。因此在这种情况下调度员要准确地掌握系统的各种物理现象, 评估网络的灵敏度, 并做出适宜有效的调压决策就有一定的困难。

电力系统各节点(尤其是各关键节点)电压水平的高低不仅表征系统电能质量的好坏, 还直接影响系统运行的安全性和经济性。对系统的节点电压进行监控, 使其运行在尽可能理想的电压水平, 不仅能提高系统的电能质量, 还能提高系统的安全性, 降低发生电压崩溃的危险, 同时也能够降低系统的有功损耗, 提高系统运行的经济性。

因此, 自动电压控制系统的研究对于提高电网的科学分析和系统的安全经济运行水平, 减轻调度员的劳动强度, 都有着极为重要的实际意义。

1965年以来, 世界上曾发生了21次电网重大停电事故, 每次电力损失都在8 000MW以上, 对社会经济和人民生活造成严重影响。上述的21次大停电事故的起因是多样的, 发展成“连锁跳闸”的过程也是复杂的, 但其中因电压崩溃促成过负荷“连锁跳闸”是一个重要原因。

与自动发电控制系统(Automatic Generation Control, AGC)相比, 自动无功电压控制(Automatic Var-Voltage Control, AVC)有其特殊复杂性, 主要表现在:

(1)需要监控的电压点多, 监控复杂性高, 在一个省级电网中要监控的电压点多达数百个, 尽管目前信息采集系统(SCADA系统)已日趋完善, 但由于信息采集与传输过程中要经过许多环节, 坏数据是常有发生的。而AVC系统必须完成对全电网电压监控和无功优化的要求, 所以其对信息可靠性的依赖度更大, 困难也更多。

(2)无功不应远距离输送, 存在局域性的电压安全和质量问题, 无功功率必须遵守就地平衡原则。

我们知道利用高压电网远距离输送电能就是为了解决一次能源(煤、水等)的分布与各地区经济发展程度不相符的问题, 我国煤炭资源集中分布在“三北”地区, 水力资源在西南地区最丰富, 而我国经济发达地区在东中部。所以必须把一次能源转换成电能后用高压电网输送到我国东中部经济发达地区。

在电能传输过程中不可避免地产生了有功功率和无功功率的损耗, 其中有由有功功率引起的损耗, 也有由无功功率引起的损耗, 前者是无法避免的, 而后者就应当设法尽量减小。这就要求不远距离传输无功功率, 而保持无功功率就地平衡。

(3)在目前电源结构情况下, 发电机(火电的、水电的、风电的各类发电机)是电

力系统中唯一的有功源，并且在常态下，交流电网的所有节点处均有相同的频率，这就使得自动发电控制（AGC）所要采集的信息和控制对象较为简单了。

与此相反，无功电源是多样的，如发电机、调相机、电容器、电抗器、静止无功补偿器，甚至输电线本身也是一种无功源，而且这些无功源又各有特点，例如，发电机与调相机所发出的无功功率可以做到按照要求提供由负值至额定值的无功功率，而电容器、电抗器所提供的无功功率是与电压平方有关系的，随着电压变化，它们的无功出力会有明显不同。又譬如，高压输电线路，提供的无功功率是分布型的，处理不当便会对电网造成危害，如何变“害”为“利”是电网运行人员务必解决的问题。

由于无功电源的多样性，所以如何利用好各类无功电源的特性就变得十分复杂。

(4) 由于目前大型汽轮发电机组均装设了性能良好的计算机分散控制系统和机一炉协调控制系统（Distributed Control System /Coordinative Control System, DCS/CCS），这使得调节汽轮发电机的有功出力变得十分方便，并且安全、可靠。目前为实现对汽轮发电机的有功功率远方调节，上级调度部门可以把控制指令通过运动通道和设备（如RTU）下传到发电厂，由RTU的遥调出口，把该调节指令变为4~20mA的模拟量送入DCS装置中就可以实现有功功率远方调节了。至于水力发电机组，其调速/有功调节的功能比汽轮发电机组更简单可靠，所以实现AGC功能也很方便。而对应AVC系统而言，调节发电机的无功功率仍然是在各种无功调节手段中最有效、最廉价、最安全、最方便的，是目前各省（区域）电力公司首先关注的工作。但是，要调节发电机的无功功率，唯一的方法就是通过发电机励磁调节器（AVR）来改变发电机的励磁电流，而AVR的控制规律是按机端电压偏差来工作的，AVR不具有接收电力系统信息的功能，这就要求在发电厂装设专门设计的AVC子站，对其功能有多方面的要求，对其可靠性的要求也是很高的，这一点是与AGC系统不相同的。

综上所述，自动无功电压控制系统（AVC）对于提高电网的安全性，减少电网损耗，增加经济性都有着极为重要的作用，其复杂程度也要大得多。

为了使读者对AVC系统有深入和全面的了解，本书扼要介绍了发电机运行工况；发电机励磁系统和励磁调节器的原理、结构和参数；变压器并联运行；并联无功补偿器（如并联电容器、SVC、SR、TCR、TSC、TCT）；静止同步补偿器（STATCOM）。本书用较大的篇幅介绍了AVC主站和发电厂及变电所AVC子站的功能要求与实现方案，其中融入了作者多年来从事AVC系统研发的成果。在本书的最后部分还扼要地介绍了常用的通信规约和硬件设备，以备读者参考。

本书由蒋建民教授级高级工程师、沈阳理工大学冯志勇讲师和上海交通大学刘美仪副教授共同编著，其中蒋建民编写了第一章至第四章和第五章的部分内容；冯志勇编写了第五章和第六章；刘美仪编写了第七章和第八章。最后由蒋建民校阅了全部书稿。

本书的出版得到了中国水力发电工程学会电力系统稳定及继电保护与控制学科组文伯瑜秘书长和辽宁省电力有限公司总工程师王芝茗博士的大力支持，于险峰博士也给予了热情帮助，作者在此表示深切的感谢。

由于作者学识水平有限，书中不妥之处恳请读者批评指正。

作者

2010年2月

目 录

第一章	电力网电压和无功功率自动控制系统的作用	001
第一节	概述	001
第二节	电压和无功功率控制的作用与影响	003
第三节	电压和无功功率控制的主要问题	004
第四节	电力系统的无功电源结构	005
第五节	建设AVC系统的必要性及其架构	009
第二章	无功功率电源和无功功率调节设备	012
第一节	同步发电机和同步调相机	012
第二节	发电机励磁系统和励磁调节器	033
第三节	变压器的并联运行	054
第三章	无功功率补偿装置	064
第一节	并联电容器补偿	064
第二节	并联饱和电抗器(SR)补偿	070
第三节	晶闸管控制电抗器(TCR)	071
第四节	晶闸管投切电容器(TSC)	078
第五节	静止无功补偿器(SVC)	084
第六节	SVC的控制策略	092
第七节	静止同步补偿器(STATCOM)	100
第四章	省(区)级电力网电压无功功率自动控制主站	119
第一节	电力系统稳定性及其分类	119
第二节	电压稳定性及控制	125
第三节	调度中心AVC基本功能模块	130
第四节	电压控制模式	132
第五节	AVC主站和AVC子站的连接方式	142

第五章 发电厂电压无功功率自动控制装置	144
第一节 同步电机各种可能工况的简述	144
第二节 励磁系统及其和AVC装置的连接	147
第三节 AVC调节策略	151
第四节 AVC功能设计	161
第五节 系统实现	164
第六章 变电站电压无功功率自动控制装置	182
第一节 概述	182
第二节 VQC的控制目标及控制模式	183
第三节 VQC的电压无功基本控制规律	185
第四节 变电站电压无功功率自动控制策略	197
第五节 电压、无功限值设置	208
第六节 调挡和投切电容器所引起的电压、无功最大变化量的计算	211
第七节 变电站电压无功自动控制系统功能	213
第八节 变电站电压无功功率自动控制系统实现	221
第七章 电压无功功率自动控制装置的通信	228
第一节 数据通信与电力传输规约	228
第二节 循环发送式传输规约(CDT)	235
第三节 IEC 60870-5-101 传输规约	241
第四节 IEC 60870-5-104 传输规约	247
第五节 AVC、VQC子站系统的通信	253
第八章 电压无功功率自动控制装置主要硬件	258
第一节 工业控制计算机	258
第二节 可编程控制器	266
第三节 智能交流采样测量仪表	273
第四节 工业通信网络设备	278

第一章 电力网电压和无功功率自动控制系统的作用

第一节 概述

随着电网结构和电力系统运行条件的发展变化,如何更好地管理关键节点电压和无功功率分布以提高电力系统运行的安全性和经济性是各电力公司越来越关注的问题。

国外对于自动电压控制的研究开展得比较早,法国电力公司(EDF)于20世纪70年代初就开始了这方面的研究,到1985年全法国电网基本实现了二级电压控制,随后又进行了协调二级电压控制的研究和应用;日本的九州电力公司于1968年在AGC控制系统上增加了系统电压控制功能;意大利ENEL电力公司也在全国范围内推广了二级电压控制方案。近年来,国内在省级电力调度控制中心逐步展开自动电压控制的研究,例如福建、江苏、安徽、辽宁、河南是较早开展此项工作的地区,并取得了较好的效果。

随着电力事业的不断发展,电力网络已逐步形成巨大的互联系统,网络之间越来越紧密地联系提高了系统的安全性,但也因此使得对电力系统电压的调控变得越来越困难,一方面,互联系统的巨大使得分析计算的规模变得越来越大和复杂,因此经常会受到计算机设备容量和计算时间的限制;另一方面,随着系统的扩大,及时、完整和准确地获得整个互联系统的实时运行信息也变得越来越困难。在给定的负荷水平下,由于网络拓扑和无功补偿元件位置的不同,根据系统的无功状况,互联系统的运行状态的差别也很大。因此在这种情况下调度员要准确地掌握系统的各种物理现象,评估网络的灵敏度,并做出适宜有效的调压决策就有一定的困难。

电力系统各节点(尤其是各关键节点)电压水平的高低不仅表征系统电能质量的好坏,还直接影响系统运行的安全性和经济性。对系统的节点电压进行监控,使其运行在尽可能理想的电压水平,不仅能提高系统的电能质量,还能提高系统的安全性,降低发生电压崩溃的危险,同时也能够降低系统的有功损耗,提高系统运行的经济性。

因此,自动电压控制系统的研究对于提高电网的科学分析和系统的安全经济运行水平,减轻调度员的劳动强度,都有着极为重要的实际意义。

1965年以来,世界上曾发生了21次电网重大停电事故(见表1-1),每次电力损失都在8000MW以上,对社会经济和人民生活造成严重影响。

21次大停电事故的起因是多样的,发展成“连锁跳闸”的过程也是复杂的,但其中因电压崩溃促成过负荷“连锁跳闸”是一个重要原因。

由于负荷增长或故障时负荷转移,在缺乏无功电压储备(并联电容/发电机无功皆用尽)的情况下,又因缺少低压减载保护,致使电压大幅度下降时线路输出电流必然大增,使判别阻抗($Z=U/I$)的距离保护“连锁跳闸”促成失稳,而造成大停电。

表 1-1 1965 年以来世界重大停电事故

地区	时间	重大停电事故	负荷损失 (MW)
美国	1965-11-09	东北部纽约失稳瓦解大停电	21 000
	1967-06-05	东部 PJM 失稳瓦解大停电	10 000
	1994-12-14	西部 WSCC 失稳瓦解大停电	9 340
	1996-07-02	西部 WSCC 失稳瓦解大停电	10 580
	1996-08-10	西部 WSCC 失稳瓦解大停电	30 500
	2003-08-14	东北部美加失稳瓦解大停电	70 000
欧洲	1978-12-19	法国电网电压崩溃失稳大停电	29 000
	1983-12-27	瑞典电网电压崩溃失稳大停电	11 400
	2003-09-28	意大利电网失稳瓦解大停电	14 210
	2006-11-04	欧洲电网解列西部低频大停电	17 000
加拿大魁北克	1977-09-20	735kV PT 爆炸, 电网失稳大停电	10 000
	1982-12-14	735kV CT 爆炸, 电网失稳大停电	15 470
	1988-04-18	大风雪设备故障电网失稳大停电	18 500
	1989-03-13	地磁暴无功设备跳开全网失稳大停电	9 450
巴西	1984-04-18	电网失稳瓦解大停电	15 760
	1999-03-11	电网失稳瓦解大停电	24 900
	2002-10-21	电网失稳瓦解大停电	23 770
	2009-11-10	伊泰普水电站输出线路故障连锁跳闸	17 000
日本	1987-07-23	东京电网电压崩溃过负荷跳闸	8 170
印度	2002-01-02	北部电网过负荷跳闸失稳瓦解	12 730
中国台湾	1999-07-29	线路故障引起失稳跳闸频率崩溃	15 500

2003 年, 美加大停电也是在接近电压崩溃时引起的, 事故始发 FE 地区缺乏无功储备又无低压减载保护, 在夏天负荷增长时电压严重下降, 先使一台机组过励磁跳闸, 线路电流大增, 使三回线碰树跳闸, 负荷不断转移, 使很多回线保护过负荷先后“连锁跳闸”, 引起失稳振荡, 导致瓦解大停电。

我国《电力系统安全稳定导则》(以下简称《导则》)规定“电网的无功补偿应分层分区就地平衡”, 实践证明这是最经济有效地防止大停电, 同时降低线损的好办法。《导则》提到“330kV 及以上电压线路充电功率应基本予以补偿”, 这样电网的发电机在运行中就可储备大量紧急无功, 防止电压崩溃、失稳、大停电。避免经长距离线路或多级变压器传送无功功率, 每级电网各个节点处, 一直到各用户都应装有自动投切无功补

偿的设备，保持无功就地平衡，这样既保持电压水平，又降低线损。

综上所述，自动电压控制系统（Automatic Voltage Control, AVC）对于提高电网的安全性，减少电网损耗，增加经济性都有着极为重要的作用。

第二节 电压和无功功率控制的作用与影响

电网中电力设备大多是根据电磁感应原理工作的，它们在能量转化过程中建立交变磁场，在一个周期内吸收的功率和释放的功率相等。电源能量在通过纯电感或纯电容电路时并没有能量消耗，仅在用电负荷与电源之间往复交换，由于这种交换功率不对外做功，因此称为无功功率。无功功率反映了内部与外部往返能量交换的情况。

一、无功功率的作用

电网中无功功率的作用很大，电动机需要从电源吸取无功功率来建立和维持旋转磁场以使其正常运转；变压器需要无功功率通过一次绕组建立和维持交变磁场才能在二次绕组感应出电压。因此，电感性用电设备不但需要从电源取得有功功率，还必须从电源取得无功功率才能满足运行的要求。

二、无功功率的影响

如果电网中的无功功率不足，致使用电设备没有足够的无功功率来建立和维持正常的电磁场，就会造成设备的端电压下降，不能保证电力设备在额定的技术参数下工作，从而影响用电设备的正常运行。

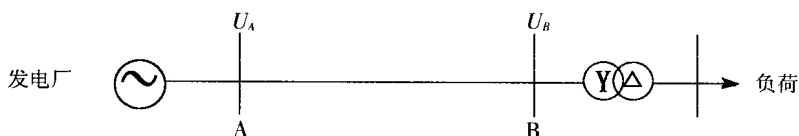


图 1-1 辐射网图例

在图 1-1 的辐射电网中，设线路 A/B 两端电压值分别为 U_A 、 U_B ，线路电阻为 r ，电抗为 X ，线路输送的有功功率为 P ，无功功率为 Q ，线路中的有功损耗为 ΔP_L ，无功损耗为 ΔQ_L ，电压损耗为 ΔU_L ，则有下面的计算公式（标幺值表示形式）：

$$\Delta P_L = \left[\frac{P^2 + Q^2}{U_A^2} \right] \times r \quad (1-1)$$

$$\Delta Q_L = j \left[\frac{P^2 + Q^2}{U_A^2} \right] \times x \quad (1-2)$$

$$\Delta U_L = \frac{Pr + Qx}{U_A} \quad (1-3)$$

由以上三式可以看出：

1. 由于电网电压 U_A 的下降导致 ΔP_L 、 ΔQ_L 及 ΔU_L 均增加,使得负荷侧的电压也降低,接于低压侧的负荷设备(如电动机)的输出功率将降低、工作效率下降,严重时便无法正常工作。

2. 增加了输配电线路中的有功损耗。

我国目前的电网电压控制大多数由分散的当地控制器组成,无法从全局的角度进行协调和优化。随着电力系统规模的日益扩大,这种分散式的电压控制愈来愈难以满足电能质量、安全和经济的高要求,无功电压问题日益突出。

电力系统无功电压优化控制的目的是通过对发电机无功出力和无功补偿设备的出力等控制量进行全局优化,并实施实时闭环控制,在保证电压质量和满足用户无功功率需求的前提下,将电网损耗降到最小,具有十分重大的社会效益和经济效益。

如前所述,自1965年以来,世界范围内发生了多起电压失稳及电压崩溃事故,这些事故的停电时间长,波及范围广,造成了巨大的经济损失和严重的社会影响。如何有效地防止电压崩溃事故的发生以及如何更好地进行无功电压控制,对提高大电网运行的安全性和经济性具有重大意义,引起了许多国家电力部门的重视。

第三节 电压和无功功率控制的主要问题

无功功率不做功,可分为感性无功功率和容性无功功率。它们实际上是线圈电感性磁场储能与电容器电容性电场储能。交流系统的无功功率应保持平衡,由于用户大多是电动机、变压器等电感性负荷,必须用容性功率来平衡电感性无功负载。因此,无功电源必然是调相机、电容器等。

从宏观角度看,一个装机容量10 000MW运行着的电力系统,实际上也同时是一个装置容量为12 000~15 000Mvar正在运行的无功功率系统。这个无功系统正如有功系统一样,由无功电源、网络、无功负荷组成。无功负荷也可以绘制它的年、月、日负荷曲线,进行无功功率平衡;无功电源也有它的冷、热备用容量。对有功功率的一套运算方法,在无功功率的研究中,都是适用的。

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。

研究无功功率的目的,在今天已不再仅仅是为了提高工矿企业中的功率因数,而是有着更广泛的重要意义,概括地讲有以下三个方面。

一、为了解决现代电力系统中与无功功率相关的一系列新的技术问题

1. 无功静态稳定问题。无功电源不足会引起电网电压崩溃,造成严重事故。
2. 无功功率动态平衡问题。当无功功率过剩时,要求发电机进相运行。
3. 由于电容性无功功率引起发电机自励磁问题。
4. 无功功率中的高次谐波公害和闪变问题。
5. 超高压交流输电系统的无功技术问题。
6. 高压直流输电系统整流站及逆变站的无功功率问题。

二、为了保证电能质量，保证电力系统安全运行

交流电的两个最重要指标是频率与电压。有功功率电源与负荷之间有微小不平衡，反映电网频率的上升或下降；无功电源与无功负荷之间有微小不平衡，反映电网电压的上升或下降。电压不稳定或波动影响工矿企业的产品质量，后果比较严重。为此必须采取一系列技术措施，例如：

1. 静止无功补偿（SVC）装置的设计选用。
2. 控制电网电压波动措施。
3. 防止高次谐波危害措施。
4. 变电所投入自动电压无功功率控制系统。

三、通过理论分析和各项技术措施来达到经济运行的目的

研究无功功率是为了节能。电能是二次能源，无功功率在电网中不断循环，造成的二次能源浪费是非常可观的。经济运行的技术措施如下：

1. 限制感应电动机运行的各种控制器。
2. 采取无功功率就地补偿措施。
3. 电网中无功电源合理配置，自动调压。
4. 根据无功日负荷曲线、年负荷曲线，实现无功功率合理平衡调度。

由于篇幅所限，本书仅就目前各省级电网正在进行的电网电压无功功率控制系统（AVC系统）的主要内容，即AVC主站，发电厂电压无功功率自动控制装置（AVC子站）和变电站电压无功功率自动控制装置（VQC装置）作些介绍。为了使从事AVC工作的读者对被控对象有一个较全面地了解，在本书中对发电机运行工况、发电机励磁系统、三相变压器并联运行、并联电容器、SVC、SR、TCR、TSC、TCT、STATCOM等设备，以及通信规约和主要硬件也做了介绍。

第四节 电力系统的无功电源结构

一、无功电源结构

有功电源只有一种，即发电机，而无功电源却包括以下几类：

1. 发电厂的无功出力（包括发电机及调相机）。
2. 变电所和用户安装的调相机。
3. 变电所和用户安装的移相电容器。
4. 输电线路的充电功率。
5. 静止无功补偿装置。

发电厂是整个电力系统中最大的无功电源，根据20世纪后20年国内几个电网的统计资料，无功电源的结构大致如表1-2所示。

近年由于按功率因数调整电费办法的实施，以及静电电容器制造质量提高，因此安

装静电电容器的用户骤增，改变了整个无功电源的结构，目前的无功电源结构已逐步向表1-3水平发展。

表1-2 我国无功电源的结构

无功电源	百分率 (%)
发电厂	60~85
充电功率	5~10
补偿设备	15~22
用户补偿	10~15

表1-3 近年我国无功电源的结构

无功电源	百分率 (%)
发电厂	45~50
充电功率	5~10
补偿设备	18~22
用户补偿	24~29

用户无功功率补偿度的提高，从节能观点看意味着在电网中无功就地平衡与无功环流的减小，降低了电能损耗。国外一些工业发达国家，由于静电电容器的造价低廉、功率损耗小，每千乏静电电容器的有功损耗只有 0.5~0.6W，因此平均每千瓦负载补偿无功 0.8kvar 以上。国外无功电源结构基本上接近于表 1-3，有的电网用户电容器的百分率略低于表 1-3，然而发电厂的无功功率输出仍然占整个无功电源出力的首位。

我国无功电源结构从表 1-2 的状况，逐步过渡到表 1-3 的状况，标志着技术水平的提高与经济管理制度的进步，从而节约了难以估计的大量电能。

由于矿口大型火电厂的开发，大型水力发电站的建设，以及各个区域电网之间的互联，增加了超高压输电线的长度，从而表 1-2 及表 1-3 中充电功率的百分率亦有明显上升，逐步由表中下限趋向上限发展。

调相机的容量亦由于电容器的发展和能够自动调节无功出力的静止无功补偿装置的出现而有降低的趋势。

发电厂的无功出力包括：

1. 运行中的发电机。
2. 作调相运行的发电机。
3. 少量调相机。

与有功负荷一样，无功负荷在运行中也需要有备用容量，一般来说电网中无功功率的备用容量为无功负荷的 7%~8%，这些备用容量一部分放置在运行着的发电机中，一部分放置在调相运行的发电机及不满载的调相机中。

根据国外统计资料，整个系统的无功功率出力必须大于有功功率出力的 120%~150% 时，系统才能维持正常运行，我国目前几个主要电网中，无功功率出力为有功功

率出力的130%~140%。

二、无功需要系数

在电力系统实际运行中,有功出力与无功出力之间有一定比例关系。如果不能达到这一关系,电网就不能正常运行。无功出力 Q 与有功出力 P 之比称为无功需要系数 K 。这个系数不是固定不变的,它是随电压变化而变化,随负荷的结构变化而变化的。对电网调度管理人员及无功功率研究者而言,这个系数 K 非常重要,实际工作中通常采用全网最大无功出力及此时相应有功出力之比 K_{\max} 。此时无功电源总的出力包括以下几个部分:

1. 发电厂的无功出力 Q_G 。
2. 外部系统输入的无功功率 Q_T 。
3. 架空线及电缆的充电功率 Q_L 。
4. 调相机的出力 Q_{CO} 。
5. 移相电容器出力 Q_{CA} 。

全网最大无功出力为

$$Q_{\max} = Q_G + Q_T + Q_L + Q_{CO} + Q_{CA} \quad (1-4)$$

此时有功出力为

$$P = P_G + P_T \quad (1-5)$$

式中 P_G ——发电厂有功出力;

P_T ——外部系统输入有功功率。

无功需要系数

$$K = \frac{Q_{\max}}{P} \quad (1-6)$$

$$K = \frac{Q_G + Q_T + Q_L + Q_{CO} + Q_{CA}}{P} \quad (1-7)$$

在式(1-6)及式(1-7)中, P 不一定是最大负荷。如果最大负荷出现在白天,则 Q_{\max} 出现时往往 P 也是最大值 P_{\max} ;但如果最大负荷出现在晚上高峰负荷时,则 Q_{\max} 对应的 P 不是最大值 P_{\max} 。对我国几个主要电网调查中,发现大多数 P_{\max} 及 Q_{\max} 出现在同一时间,对少数不在同一时间出现时,对应最大无功出力 Q_{\max} 的 P 与 P_{\max} 相差不大。

在电网电压正常的情况下,无功功率的需求是平衡的,所以 K 值也可以看做全网最大负荷时,全网负荷(包括网损功率)自然功率因数的一种表达形式。自然功率因数是指负荷未经补偿时的功率因数,即

$$\cos \varphi = \cos (\tan^{-1} K) \quad (1-8)$$

因此对每个电网来说,可以采用 K 值及有功负荷需求,计算出无功功率的需要量。根据式(1-6)有

$$Q_{\max} = P_{\max} \times K$$

代入式(1-4)并移行得

$$K = \frac{Q_G}{P_{\max}} + \frac{Q_T}{P_{\max}} + \frac{Q_L}{P_{\max}} + \frac{Q_{CO}}{P_{\max}} + \frac{Q_{CA}}{P_{\max}}$$

$$K = K_G + K_T + K_L + K_{CO} + K_{CA} \quad (1-9)$$

根据我国电网统计,参考国外资料,用电负荷综合自然功率因数 $\cos\varphi=0.7$ 左右,相应 $P=Q$ (此时 $\tan\varphi=1$),电网输变电设备无功损耗为有功负荷的30%。

K 值大小与负荷构成、电网结构、运行电压水平有关。根据我国各电力系统分析资料,在电力系统电压正常的情况下, K 值最大可取1.3~1.4。

地区电力系统的 K 值,受负荷构成的影响较大,一般为1~1.3。当无实测值时,可参考表1-4和表1-5的数值。

表1-4 220kV及以下电网的 K 值

变压级数	电网电压 (kV)				
	220	110	63	35	10
	K				
220/110/35/10	1.25 ~ 1.4	1.1 ~ 1.25	—	1.0 ~ 1.15	0.9 ~ 1.05
220/110/10	1.15 ~ 1.3	1.0 ~ 1.15	—	—	0.9 ~ 1.05
220/63/10	1.15 ~ 1.3	—	1.0 ~ 1.15	—	0.9 ~ 1.05

表1-5 不同用电构成的电网的 K 值表

行业 类型 代表 比重 (%) 地区	一、机械工业		二、钢铁工业		三、化工、黑色、有色金属工业		四、大型综合性工业			五、化工、轻工		七、中小型综合性工业		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
一、农业	14	9	3.5	3.5	3.5	1	2.7	5	6	9.5	40.8	35.7	17	11
二、工业	62	74	91	91	94	96	83	87	83	77.5	53.4	58	76	79
1. 煤炭	6	0	—	13	2	19	0	—	1	0	0	—	0	—
2. 石油	0	0	0	—	2	9	2	3	5	1	—	0	0	0
3. 黑色金属	2	—	85	53	29	10	20.7	15	17	6.6	5	11.3	4	8
4. 有色金属	0	12	—	5	3	51	1	—	1	—	0.9	—	27	14
5. 机械加工	35	34	3	3	3	—	9.7	14	10	12.4	7.6	11.3	6	6
6. 化工	4	8	—	7	40	3	24	40	31	27.2	15.9	13.3	9	24
7. 建材	3	5	1	7	2	1	1.7	6	9	3.4	5.3	4.4	2	2
8. 纺织	3	3	—	—	—	—	9	4	3	16	11.7	11.3	7	5
9. 造纸	0	—	—	—	4	—	6.6	—	—	2.2	1.6	0.9	12	15
10. 食品	3	5	—	—	—	—	6.6	—	2	4.5	3.3	2	—	—
11. 其他	6	7	2	3	9	3	8.3	5	4	4.2	2.1	3.5	9	5
三、交通运输	9	1	2.5	0.2	0.2	0.1	0.3	1	1	0.9	0.4	0.2	1	1
四、市政生活	15	16	3	5.3	2.3	2.9	14	7	10	12.1	5.4	6.1	6	9
K	1.25		1.10		1.0		1.20			1.20	1.30		1.25	

第五节 建设AVC系统的必要性及其架构

一、建设AVC系统的必要性

与有功功率（频率）自动控制系统（AGC）相比，电压无功功率自动控制（AVC）有其特殊困难，主要困难有：

1. 需要监控的电压点多，监控复杂性高，在一个省级电网中要监控的电压点多达数百个，尽管目前信息采集系统（SCADA系统）已日趋完善，但由于信息采集与传输过程中要经过许多环节，坏数据是经常发生的。而AVC系统必须完成对全电网电压监控和无功优化的要求，所以其对信息可靠性的依赖度更大，困难也更多。

2. 无功不能远距离输送，存在区域性的电压安全和质量问题，无功功率必须遵守就地平衡原则。

我们知道利用高压电网远距离输送电能就是为了解决一次能源（煤、水等）的分布与各地经济发展程度不相符的问题，我国煤炭资源集中分布在“三北”地区，水力资源在西南地区最丰富，而我国经济发达地区在东中部。

在电能传输过程中不可避免地产生了有功功率和无功功率的损耗，其中有由有功功率引起的损耗，也有由无功功率引起的损耗，前者是无法避免的，而后者就应当设法尽量减小。这就要求不远距离传输无功功率，而保持无功功率就地平衡。

3. 在目前电源结构情况下，发电机（火电的、水电的、风电的各类发电机）是电力系统中唯一的有功源，并且在常态下，交流电网的所有节点处均只有相同的频率，这就使得AGC的控制较为简单了。

与此相反，无功电源是多样的，如发电机、调相机、电容器、电抗器、静止无功补偿器，甚至输电线本身也是一种无功源，而且这些无功源又各有特点，例如，发电机与调相机所发出的无功功率可以做到按照要求提供由负值至额定值的无功功率，而电容器、电抗器所提供的无功功率是与电压平方有关系的，随着电压变化，它们的无功出力会有明显不同，我们可以说前者是主动型无功电源，而后者是被动型无功电源。又譬如，高压输电线路，提供的无功功率是分布型的，处理不当便会对电网造成危害，如何变“害”为“利”是电网运行人员务必解决的问题。

4. 由于目前大型火力发电机组均装设了性能良好的计算机监控系统和机—炉协调系统（Distributed Control System/Coordinative Control System, DCS/CCS），这使得调节火力发电机的有功出力变得十分方便，并且安全、可靠。目前为实现对发电机的有功功率远方调节，上级调度部门可以把控制指令通过运动通道和设备（如RTU）下载到发电厂，由RTU的遥调出口，把该调节指令变为4~20mA的模拟量送入DCS装置中就可以实现有功功率远方调节了。至于水力发电机组，其调速/有功调节的功能比火力发电机组更简单可靠，所以实现AGC功能也很方便。而对应AVC系统而言，调节发电机的无功功率仍然是在各种无功调节手段中最有效、最廉价、最安全、最方便的，是目前各省（区域）电力公司首先关注的工作。但是，要调节发电机的无功出力，唯一的方法就

是通过发电机励磁调节器（AVR）来改变发电机的励磁电流，而AVR的控制规律是按机端电压偏差来工作的，AVR不具有接收电力系统信息的功能，这就要求在发电厂装设专门设计的AVC子站，对其功能有多方面的要求，对其可靠性的要求也是很高的，这一点是与AGC系统不相同的，这部分内容将在后面的章节中加以叙述。

二、AVC系统的构架

（一）三级电压控制模式的结构（见图1-2）

1. 三级电压控制模式中各级电压控制的功能

（1）第三级电压控制。第三级电压控制处于最高层，是对全系统的控制，由系统控制中心执行，其响应时间为15分钟到1小时，也可定时启动，由用户设置。主要控制作用为电压稳定的监视与控制，除安全监视外，经济问题是该控制层主要考虑的问题，经济调度是这一控制层的日常工作，通过无功优化给出各个分区中枢母线电压和重要联络线无功的设定值，输出给第二级电压控制使用。这类控制主要是协调各第二级控制系统，指导调度人员的干预。

（2）第二级电压控制。第二级电压控制处于中间层，是对某个地区的控制，由各地区控制中心执行，时间常数为1分钟到5分钟，可由用户设置。控制的主要目的是保证中枢母线电压等于设定值，保证分区内母线电压合格和足够的无功储备。若中枢母线的电压幅值产生偏差，第二级电压控制器则按照预定的控制规律改变第一级电压控制器的设定参考值。

（3）第一级电压控制。第一级电压控制处于最底层，设置在发电厂、用户和各供电点，通常是快速反应的闭环控制以控制本地电压，响应时间一般在1秒至几秒内。控制设备通过保持输出变量尽可能地接近设定值来补偿电压的快速的和随机的变化。

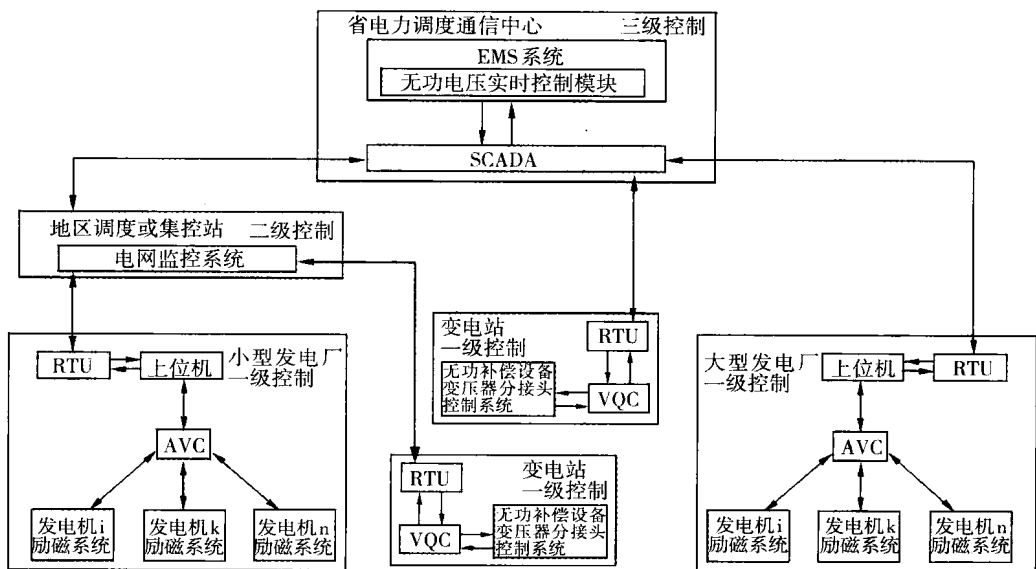


图1-2 三级无功电压控制模式