

国内图书分类号: TM761
国际图书分类号: 621.3

学校代码: 10079
密级: 公开

专业硕士学位论文

北京京能石景山热电厂 自动电压控制系统的应用研究

硕士研究生: 王晓磊

导师: 姜彤教授

企业导师: 胡冬来高工

申请学位: 工程硕士

专业领域: 电气工程

培养方式: 在职

所在学院: 电气与电子工程学院

答辩日期: 2014 年 6 月

授予学位单位: 华北电力大学



Classified Index: TM761
U.D.C: 621.3

Thesis for the Master Degree

**The Research and Application of Automatic Voltage
Control System in Beijing Jingneng Thermal Power Co.**

Candidate:	Wang Xiaolei
Supervisor:	Prof.Jiang Tong
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	June, 2014
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

华北电力大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《北京京能石景山热电厂自动电压控制系统的应用研究》，是本人在导师指导下，在华北电力大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：王曉磊

日期：2014年6月7日

华北电力大学硕士学位论文使用授权书

《北京京能石景山热电厂自动电压控制系统的应用研究》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版本，同意学校将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，允许论文被查阅和借阅，学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。本人授权华北电力大学，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以上相应方框内打“√”）：

保密□，在 年解密后适用本授权书

不保密□

作者签名：王曉磊

日期：2014年6月7日

导师签名：姜彤

日期：2014年6月7日

摘 要

电压是反应电力系统运行状态和电能质量水平的最重要指标之一。电网侧的电压水平直接关系到电网运行的损耗，而用户侧的电压水平如果高于或者低于正常工作范围，不仅会影响电能设备的使用寿命和工作效率，甚至造成电能设备损坏，威胁用户安全。电网无功功率的控制是有效控制电网电压的手段之一。

本文的研究工作围绕北京京能电力股份有限公司石景山热电厂自动电压控制系统（以下简称“AVC 系统”）的应用研究展开。在学习 AVC 系统基本原理的基础上，结合石景山热电厂的实际和北京市调度中心的要求，从数据采集、闭环控制、安全策略、网络架构、结构设计等方面，设计了电厂 AVC 系统的方案。在 AVC 系统实际应用前，设计并实施了对 AVC 系统的调试，包括本地仿真测试、本地开环测试、功能测试和闭环测试。AVC 系统实际投运后，对其产生的收益进行了分析总结。

本文完整复现了石景山热电厂 AVC 系统从设计方案到调试，再到实际应用的全部过程，实现了采集北京市调度中心实时数据并进行在线分析和计算，达到电压无功自动优化，保证电网安全稳定运行、电能质量高效经济的目的，对于其他将要投运 AVC 系统的电厂有一定的借鉴意义。

关键词：自动电压控制；热电厂；电能质量

Abstract

Voltage is one of the most important indexes of power system operating condition and reaction power quality level. The grid side voltage level is directly related to the loss of power grid operation, and the voltage level of the user side if higher or lower than the normal scope of work, will not only affect the electricity service life of the equipment and the working efficiency, and even make the power equipment damage, threat to user security. Control power wattless power is one of the effective means to control the grid voltage.

The research work of this paper focuses on the Beijing Jingneng power Limited by Share Ltd of Shijingshan cogeneration power plant automatic voltage control system (hereinafter referred to as "AVC system") of the applied research. On the basis of studying the basic principles of AVC system, according to the actual situation of Shijingshan cogeneration power plant and Beijing dispatching center requirement, from the aspects of data acquisition, control, security strategy, network architecture, architecture design, the design of AVC system in power plant project. In the practical application of the AVC system, the design and debugging and Implementation for the AVC system, including the local simulation test, the open loop test, function test and loop test. The actual operation of AVC system, the gains were analyzed and summarized.

From design to debug the AVC system in this paper represent the Shijingshan thermal power plant, and then to the whole process of practical application, the real-time data acquisition control centre of Beijing and on-line analysis and calculation, to achieve voltage wattless automatic optimization, and ensure the safe and stable operation of power quality, efficient economy, have certain reference significance for other AVC system will be put into operation in power plant.

Keywords: automatic voltage control, thermal power plant, power quality

目 录

摘要.....	I
ABSTRACT	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题背景及其意义	1
1.2 国内外研究动态	2
1.2.1 国外自动电压控制系统现状.....	2
1.2.2 国内自动电压控制系统发展.....	3
1.3 本文主要研究内容	3
第 2 章 电厂自动电压控制的原理.....	5
2.1 北京电网的无功电压控制特点	5
2.2 无功功率平衡	6
2.3 无功功率分配原则	7
2.4 本章小结	8
第 3 章 电厂自动电压控制系统设计方案.....	9
3.1 石景山热电厂现状	9
3.1.1 石景山热电厂出线结构.....	9
3.1.2 石景山热电厂自动电压控制系统信息接收模式.....	9
3.2 石景山热电厂自动电压控制系统总体设计原则与方案	9
3.2.1 自动电压控制系统总体设计原则.....	9
3.2.2 自动电压控制子站设计总体方案.....	9
3.3 自动电压控制系统的具体方案	10
3.3.1 自动电压控制系统的数据采集.....	10
3.3.2 双母线接线方式下的自动电压控制系统.....	11
3.3.3 电厂侧自动电压控制子站闭环控制的设备及方式.....	11
3.3.4 电厂自动电压控制子站系统的安全约束逻辑.....	12
3.4 自动电压控制系统结构设计	16
3.5 本章小结	17
第 4 章 石景山热电厂自动电压控制系统的调试.....	18
4.1 石景山热电厂自动电压控制系统选型概述	18
4.2 石景山热电厂自动电压控制系统调试试验	19

4.2.1 石景山热电厂自动电压控制系统定值单.....	19
4.2.2 自动电压控制系统本地仿真运行测试.....	21
4.2.3 自动电压控制系统本地开环测试.....	26
4.2.4 自动电压控制系统功能测试.....	35
4.2.5 自动电压控制系统闭环测试.....	36
4.3 石景山热电厂自动电压控制系统的运行	37
4.4 石景山热电厂投运自动电压控制系统后的收益分析	38
4.5 本章小结	39
第 5 章 总结与展望	40
参考文献	41
攻读硕士学位期间发表的学术论文及其它成果	44
致谢	45
作者简介	46

第 1 章 绪论

1.1 选题背景及其意义

伴随着我国工业化信息化进程的不断深入，我国电网也在不断发展壮大，一方面电网规模日益庞大，电网结构日趋复杂，另一方面电能负荷需求也在急剧增加^[1]。因此，向用户提供高质量的电能产品，有效降低电网损耗，保持电力系统安全稳定、高效经济的运行，成为了现阶段电力工作者努力的方向，越来越受到重视。

电力系统的稳定建立在有功功率 P 和无功功率 Q 平衡的基础之上。有功和无功的不平衡将反映于频率和电压的变化。电压是反应电力系统运行状态和电能质量水平的最重要指标之一。电网侧的电压水平直接关系到电网运行的损耗，而用户侧的电压水平如果高于或者低于正常工作范围，不仅会影响电能设备的使用寿命和工作效率，甚至造成电能设备损坏，威胁用户安全。

电网无功功率的控制是有效控制电网电压的手段之一。目前北京电网对区域内电厂的无功电压的管理方式主要是：由北京市调每季度初向各电厂下发高峰、平峰、低谷各时段的高压母线电压控制范围，见表 1-1：

表 1-1 石景山热电厂 220kV 母线电压控制指标

厂站	母线电压(kV)	低谷范围(kV)	平峰范围(kV)	高峰范围(kV)
石景山电厂	220	223-226	224-228	225-230

低谷指每日 23 时至次日 6 时 30 分，高峰指每日 8 时至 12 时、15 时至 22 时，平峰指每日 6 时 30 分至 8 时、12 时至 15 时、22 时至 23 时。

发电厂运行人员全天候实时在线监控本厂母线电压，以手动增减励磁等方式及时调整，维持目标值在控制范围之内。随着北京电网规模的不断扩大，电网结构日趋复杂，这种分散的电压控制机制难以满足电网安全、优质和经济运行的要求，主要问题有以下几点：

一是每季度的母线电压控制曲线是季度初制定的，各季度之间的曲线并无明显差异，很显然，这种方式不能反应出电网实时的运行状况。

二是传统的电网无功电压调节方式寄托于人工调整，费时费力，也不利于调整的安全性，存在调整错误的可能性。同时，电网潮流的不断变化，人工调整精度很难达到要求。

三是北京电网区域内各发电厂各自调整出线母线电压，缺乏彼此间无功负荷分配的协调，使电网运行缺乏经济性。

因此北京电网及区域内各电厂陆续投入自动电压控制(AVC)系统。这套系统的

基本原理是通过利用计算机技术和网络通信技术,由北京市调度中心采集全网各节点遥测、遥信的实时数据进行在线分析和计算,以各节点电压合格、省网关口功率因数为约束条件,从全网角度进行在线电压无功优化控制,实现无功补偿设备的自动合理投切、自动无功平衡、主变分接开关自动调节,实现对网内所有统调机组、有载调压装置和无功补偿设备的集中监视、集中控制和集中管理,达到全网电压无功自动优化,保证电网安全稳定运行、电能质量高效经济^[2-5]。

北京京能热电股份有限公司石景山热电厂是一家拥有近百年历史传承的老厂,因为历史的原因,石热电厂机组容量小(四台 220MW 燃煤机组),运龄长(四台均在 20-30 年),自动化水平相对较差。电厂机组高压母线出线结构为:1、2、3 号机组连接到 220kV 四、五母线(双母线出线);4 号机组为单元出线,单独与 220kV 石门线相连。

近些年来,面对激烈的电力市场化竞争等新因素,效率和经济性的新要求促使石热电厂的自动化水平必须要有显著提高。在电网自动化方面,继 2008 年投入自动发电量控制(AGC)系统后,石热电厂进一步结合本厂实际情况,也为能建设一个具有高质量电能的电网,于 2012 底至 2013 年度建设并投入电厂侧 AVC 系统。目前处于安装阶段的后期,即将开展系统的全面调试和试运行。本研究选题着眼于制定我厂 AVC 系统电压控制策略、安全约束策略的制定、调试过程中的优化和投入运行后的效果验证来展开。

1.2 国内外研究动态

1.2.1 国外自动电压控制系统现状

电压无功控制系统萌芽于上个世纪 60 年代,在当时德国最大的电力公司莱茵电力公司(RWE)的电压控制系统中,是通过以最小网损为目标的最优潮流(Optimal Power Flow, OPF)计算^[6,7],将优化计算的结果由调度中心直接发送到各电厂来实现的。这种初期的模式结构简单,实现也并不复杂,但是最优潮流计算量大,运算速度较慢,会影响整个电力系统电压控制的调节跟踪速度。同时,电网系统每一环节的异常以及大量离散的无功补偿设备都有可能造成最优潮流计算发散、计算结果不可取或者难以达到最优^[8]。

此后,出现了早期基于 VQC(Voltage Quality Control)的变电站局部电压无功控制。但其本质上只是变电站内部的区域无功优化,不能从全网角度分析和优化全网的无功潮流。伴随着电网的不断发展,电压等级之间的协调控制日趋频繁,特别是伴随着信息时代的来临、网络通信技术的普及,上世纪 90 年代,法国(EDF)率先实现了全网三级电压控制系统,其后在意大利、比利时、西班牙等国的电网中得到较

好地应用^[9]。

1.2.2 国内自动电压控制系统发展

我国从本世纪初叶开始引入国外先进的全网电压控制系统，湖南省网、福建省网、河南省网、安徽省网、江苏省网先后建立了二级或三级 AVC 控制架构^[10-11]。一级控制由厂站侧 AVC 装置构成，根据高压母线电压设定值进行闭环控制，响应速度快。二级控制由地区调度 AVC 子系统构成，用来协调区域内的各一级电压控制。三级控制是省网调度 AVC 主站装置，通过全网的最优潮流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，通过通信网络将优化控制指标下发到二级控制系统，OPF 响应速度约在几十分钟^[12]。

目前，我国已有相当数量的电厂投入了厂站侧 AVC 系统^[13-15]。无论燃煤机组、燃气机组还是水电机组，厂站侧 AVC 系统基本架构完全一致，分为上位机和下位机两部分，均并联在现场总线上。上位机一般采取主、备冗余设计，一台上位机发生故障，可以自动退出并自动切换至另一台上位机运行。上位机与上一级控制系统主站直接联系，反馈当前电厂的运行状态，并接受主站的目标指令，经过综合运算后，将数据通过现场总线发送至下位机。上位机与下位机之间一般通过光缆连接，可有效屏蔽上下位机之间的通信干扰。下位机与发电机励磁自动调节器(AVR)相联系，通过改变发电机励磁电流来实现母线电压的自动控制。

1.3 本文主要研究内容

本文的主要研究工作是以前景山热电厂 1 至 4 号机组及其 220kV 母线为对象，通过学习 AVC 的控制原理、发展现状和实际应用，并根据电厂内现有的运行设备去分析和设计适合于前景山热电厂的 AVC 系统的实现方案。在方案明确后，设计并实施一系列的调试和试验，分析 AVC 方案的实施效果。

第一章是本文的绪论，主要是通过学习总结目前 AVC 控制的发展现状和应用，并分析了前景山热电厂需要投入 AVC 的必要性。

第二章结合北京电网的无功控制特点，学习了无功控制的原理知识，学习了了 AVC 的三级控制原理及 AVC 电厂子站的基本原理，为后面的设计与应用做好基础知识的准备。

第三章是根据前景山热电厂的现场情况，探讨了自动电压控制(AVC)系统的设计方案。分析了前景山热电厂自身的特点，比较了多种方案，并最后给出了能适应现场情况的设计方案。

第四章完整复现了电厂 AVC 投产前的调试和实验过程，并对实际运行进行了

分析和总结。

第五章是全文的总结。

第 2 章 电厂自动电压控制的原理

2.1 北京电网的无功电压控制特点

在北京电网，调度管辖范围大致如下划分^[18,19]：500kV 电网，包括 500kV 电压等级主变压器低压侧的无功设备由网调调度；200kV 电网，包括 220kV 电压等级主变压器低压侧的无功设备由市调调度；110kV 电网由地调调度，见图 2-1。

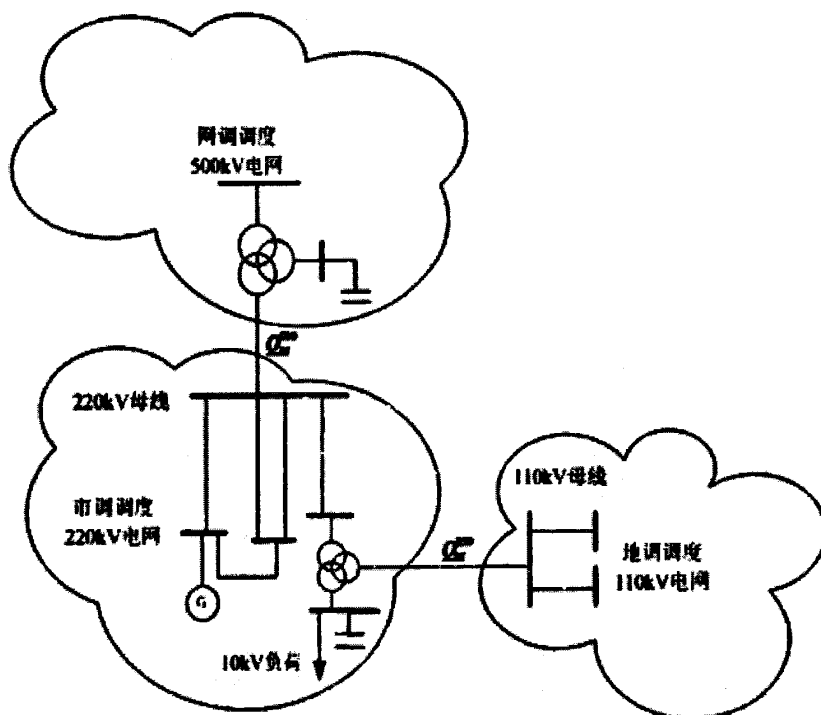


图 2-1 北京电网调度关系示意图

石景山热电厂的出线为 220kV 石宝一、二线，220kV 石上线和 220kV 石门线，因此我厂的总无功功率调度主要归北京市调负责。

北京电网采用目前应用较广泛的三级电压控制^[20]。三级控制是电网全局控制，综合考虑各变电站、电厂的无功分布，全网电压的合格率以及潮流分布，以网损最小作为其控制目标，因此其控制时间常数较长，一般可达到小时级。二级控制主要包括电厂控制和变电站控制。以电厂控制为例，控制目标是根据区域核心母线电压值计算出电厂出线目标母线的电压值，并协调电厂各机组的无功功率，使目标母线电压值或者电厂总无功功率符合三级控制的设定。当控制目标值与实际值有偏差时，可以通过内部控制程序和安全约束条件对机组进行调控，其时间常数一般在秒级。

一级控制是指单元机组励磁调节器（AVR）控制，时间常数一般在毫秒级。电厂有 AVC 系统子站，接收 AVC 主站计算的目标母线电压值，并根据各台机组的运行状态，分别对各机组下达励磁调节的指令，完成对控制目标的闭环控制，见图 2-2。

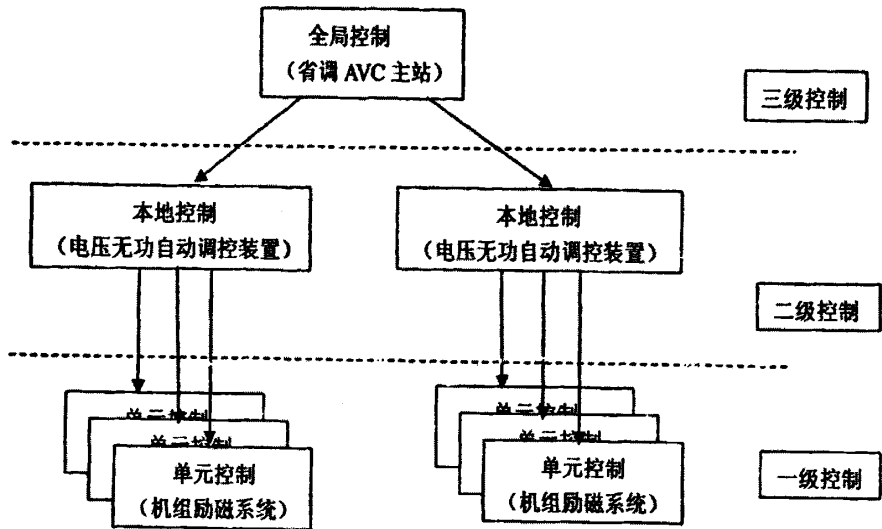


图 2-2 三级电压控制

2.2 无功功率平衡

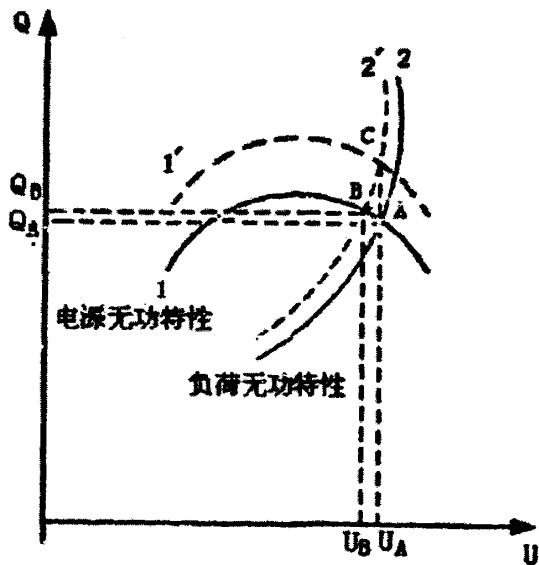


图 2-3 无功电压特性曲线^[21]

如图 2-3 所示，曲线 1 是一条开口向下的抛物线，代表的是电网中电源的无功电压特性曲线；曲线 2 是一条开口向上的抛物线，代表的是电网中负荷的无功电压特性曲线。这两条曲线相交于 A 点。A 点的物理意义在于当电网电压为 U_A 时，电

网处于无功平衡的状态。

当电网中的负荷增加时。曲线 2 就变成了曲线 2'，代表了负荷增加的时候无功电压特性。如果此时电网中电源的无功没有增加，那么无功电源的特性曲线就不发生变化，仍然是曲线 1，但是无功平衡点就从 A 变成了 B，也就是重新处在了一个新的无功平衡点。从图 2-3 可知， $U_B < U_A$ ，这就说明这个新的无功平衡点是一个较低电压下的新的无功平衡点，也就是说，为了电网无功平衡的需要，电网需要降压运行。这时，如果能通过某种调节手段，使得电源特性曲线 1 上移到 1'，那么曲线 1' 和曲线 2' 就会相交于一个新的点，C 点。也就是 C 点是电网又一个无功平衡点。如果 C 点与 A 点相比较，电压 U_C 接近于电压 U_A 或者与 U_A 相等，那么电网就实现了较高电压水平下的无功功率平衡。这里指的调节手段比如增加或减少发变组的无功功率，改变发电厂的电压。

2.3 无功功率分配原则

如本章 2.1 所述，在电网二级控制中，控制目标是根据区域核心母线电压值计算出电厂出线目标母线的电压值，并协调电厂各机组的无功功率，使目标母线电压值或者电厂总无功功率符合三级控制的设定。如今的电厂一般都有两台或者四台机组，甚至更多。那么在一级控制中，如何协调电厂内部各机组之间无功功率是一个无法回避的问题。

一般来讲，机组之间的无功功率分配主要有以下两种原则^[22]：

一是等功率因数法，及各机组之间在保证彼此功率因数均相同的条件下进行无功功率分配。这种分配方式决定了无功分配量与本机组的有功功率相关性很大。同时，无功功率的分配需要考虑各机组无功功率的允许范围。

用公式表达就是：

$$\cos\phi = \frac{\sum P_{\text{可调机组}}}{\sqrt{\sum Q_{\text{target}}^2 + \sum P_{\text{可调机组}}^2}} \quad (2-1)$$

整理上式 (2-1)，可得：

$$Q_{\text{target}} = P_{\text{机组}} \times \frac{\sqrt{1 - \cos^2\phi}}{\cos\phi} \quad (2-2)$$

式 (2-2) 即为等功率因数法计算的各机组的目标无功功率。

另一种无功功率分配的方法是等偏移量法^[23-25]。这种方法可以避免第一种方法分配量与有功功率相关性大的特点。等偏移量法是在无功功率的可调范围内，使各台机组的无功功率都增加或减少相同百分比的无功功率，这样可使各机组具有相同的调节裕度，可以同时达到无功功率调节的上下限。

用公式表达就是：

$$\lambda_{offset} = \frac{\sum Q_{target} - (Q_{adj,max} + Q_{adj,min}) \times 0.5}{(Q_{adj,max} - Q_{adj,min}) \times 0.5} \quad (2-3)$$

整理上式 (2-3)，可得：

$$Q_{target} = (Q_{unit,max} + Q_{unit,min}) \times 0.5 + \lambda_{offset} \times (Q_{unit,max} - Q_{unit,min}) \times 0.5 \quad (2-4)$$

式 (2-4) 即为等偏移量法计算的各机组的目标无功功率。

2.4 本章小结

本章是结合北京电网的实际，对北京电网三级控制策略、无功功率平衡、无功分配原则等无功控制原理的学习。通过学习了解原理，为下一步开展对石景山热电厂 AVC 系统的设计与调试打下坚实的理论基础。

第 3 章 电厂自动电压控制系统设计方案

3.1 石景山热电厂现状

3.1.1 石景山热电厂出线结构

石景山热电厂 1 号、2 号、3 号、4 号机组（4×220MW 机组）加装自动电压控制系统，实现对厂内 4 台发电机组的自动电压控制功能。石景山热电厂机组出线结构为，1 号、2 号、3 号机组连接到升压站 220kV 四母线和 220kV 五母线。4 号机组为单元出线，出线线路为 220kV 石（景山）门（头沟）线。

3.1.2 石景山热电厂自动电压控制系统信息接收模式

北京市调通过现有调度远动通道及通信规约（104 规约）与电厂侧 RTU 实现数据通信，再由 RTU 装置通过 101 规约与 AVC 装置实现数据通信。AVC 设备通过 RTU 转发接收的北京市调 AVC 主站系统下发的 220kV 四、五母线母线电压目标值和 220kV 石门线电压目标值。

3.2 石景山热电厂自动电压控制系统总体设计原则与方案

3.2.1 自动电压控制系统总体设计原则

石景山热电厂自动电压控制系统应从本厂实际出发，综合考虑系统运行的安全性、经济性、有效性。考虑到石景山热电厂建厂时间长，主要设备的运行状态已进入服役末期，同时，受政策影响即将面临机组关停备用。根据以上现实状况，考虑充分利用原有的系统、设备和控制回路（如励磁系统、DCS 系统等），可以降低设备造价，降低安装、调试难度，力争在系统运行的安全性和经济性中达到平衡。

3.2.2 自动电压控制子站设计总体方案

AVC 子站系统架构可选择双网双机、双机单网、单机单网等多种冗余模式。石景山热电厂采用双机双网模式，上位机为双机，可主备无损快速切换。下位机单机。上位机到下位机为双光纤通信，可主备切换。并配置一台 AVC 后台机。AVC 上位机、下位机、后台机可根据现场情况组屏安装。

AVC 上、下位机均采用无风扇、无硬盘嵌入式装置，并配备有显示屏，能显示电压控制目标值和实时数据反馈量及系统告警信息。

AVC 上位机应配备以太网口或 HDLC 口（均要求冗余），用以实现与调度数据

网和 AVC 下位机之间通讯，并根据北京市调下发的 220kV 四、五母线母线电压目标值和 220kV 石门线电压目标值，在充分考虑各种约束条件并经过分析计算后，估测出全厂总无功出力需求，再合理分配给 AVC 下位机。

AVC 下位机具有以太网口或 HDLC 口（均要求冗余），每台机组配置一套系统采集 AVC 所需各机组的电气信息，上送至 AVC 上位机，作为 AVC 调节判断的依据。

AVC 上位机与下位机之间的通讯采用轮询的方式，上位机在设定的时间分别和四台机组的下位机依次进行通讯。

3.3 自动电压控制系统的具体方案

3.3.1 自动电压控制系统的数据采集

首先，须确保 RTU、NCS、AVC 下位机、AVC 上位机等的数据同源并同值。220kV 母线电压、各台机组的有功功率、无功功率、机端电压、定子电流等参数需进行逻辑判断和计算，如不能保证同源和同值，会引起逻辑判断或者计算结果的不一致，给电压监视、控制等带来混乱。

AVC 所需的实时数据获取模式可以考虑从分散控制系统（DCS）、励磁调节装置、AVC 调节装置、RTU 等至少四种设备或系统中取得。下面简单比较一下上述四种方案：

若使用分散控制系统（DCS）获取数据，并使用 DCS 来对机组的无功功率进行闭环控制，可充分利用现有的设备和系统，对外部依赖性较小。但是，结合石景山热电厂的 DCS 特点，四台机组分别使用了不同厂家的控制系统（日立、和利时、国电智深），会加大在 DCS 中控制组态、调试的工作量。同时，根据前文的分析，使用 DCS 采集数据不能实现与北京市调的数据同源，有可能会造成实时数据与市调数据计算结果的不一致，甚至会因此带来市调对石景山热电厂的考核。所以不宜采用此方案。

若使用励磁调节系统获取数据，与从 DCS 系统采集数据一样，可充分利用现有设备和系统，但也同样会造成数据不同源不同值的情况。此外，励磁调节系统采集的母线电压是本机组出线的 220kV 母线电压，具体到石景山热电厂，1 号、3 号机组采集的是 220kV 五母线电压，2 号机组采集的是 220kV 四母线电压，4 号机组采集的是 220kV 石门线电压。四、五母线的测量电压可能会存在微小差别，造成厂内目标母线电压控制不理想。所以不宜采用此方案。

若使用 AVC 调节装置获取数据，首先要确保供货商的 AVC 调节装置本身具有模/数转换能力，同时要在电厂升压站电气系统的电压二次回路、电流二次回路中接

入变送器,至少要将采集到的目标母线电压、发电机无功功率、发电机有功功率、发电机机端电压、发电机定子电压等 5 个数据的实时信息变为直流信号送至 AVC 调节装置中,采集信息量不大,可以保证较快的实时数据刷新频率,有利于目标母线电压的控制。但需要增加变送器,增加改造成本和维护成本,增加施工、调试难度,特别是接入变送器的危险性,也同样会造成数据不同源不同值的情况。

若共享 RTU 装置已采集的实时数据,由于 AVC 调节所需的有功功率、无功功率、机端电压、定子电流等参数 RTU 装置均已采集,可加入一台 AVC 装置,使其既能接收北京市调 AVC 调节指令,又接收 RTU 装置发出的实时数据。这能保证与中调所接收的数据保持一致,有利于电厂高压侧母线的电压控制,同时对电网考核较为有利。省去了 AVC 系统的采样及运算处理等环节,尤其是消除了变送器接入的危险性。但需加装 AVC 装置,增加改造费用,增加施工和维护的工作量。同时实时数据刷新频率不如从 AVC 调节装置获取数据。

综上四种实时数据的采集模式,最终考虑按第四种方案进行。主要是考虑到所采集的数据与中调的数据一致,便于与市调的沟通,对可能的电网考核比较有利。

3.3.2 双母线接线方式下的自动电压控制系统

石景山热电厂 220kV 升压站为双母线接线和单元出线相结合的方式。双母线接线的机组 AVC 系统正常运行时以其中一条 220kV 母线电压为基准进行控制,如发生异常情况,如数据传输问题、PT 等设备问题,使 AVC 系统不能获得当前基准母线的电压值,应可自动接收和跟踪到另一条母线的电压值,并以此为控制基准。这种切换不仅要在极短时间内完成,而且是主站和子站的同步切换,保证电厂子站与主站的同步。同步地切换保证不会因为控制目标不一致而导致错误的计算与控制。切换成功后,重新进行电压控制需要延迟一段时间,因为调度主站和电厂子站都要重新根据新的控制目标进行计算。在目标电压基准母线切换期间,因为两条母线的电压值可能存在一定的差异,所以需要闭锁母线电压波动超限切除 AVC 的控制逻辑,在切换成功后重新开放。

3.3.3 电厂侧自动电压控制子站闭环控制的设备及方式

AVC 可以对发电机组无功功率或高压母线电压进行闭环控制,具体到石景山电厂对哪个模拟量进行闭环控制,需根据市调的要求并与之同步。以下按无功功率的闭环控制进行分析,高压母线电压的闭环控制与之同理。

AVC 系统中的核心环节是对发电机组无功功率(或高压母线电压)的闭环控制,通过接收无功功率指令和采集实际无功功率,并对其进行比较,来调节机组的无功功率,从而使母线电压值符合北京市调的要求。

可以实现上述功能的方式和设备有：励磁调节装置（AVR）、DCS 以及新增一套 AVC 调节装置。前两种方式的好处是充分利用了现有设备，在费用方便相对节省，但其各自都具有一定的局限性。如采用 AVR 进行无功功率的闭环控制，需要修改 AVR 的内部调节程序，要新增加无功功率指令的接收功能，这种方式的实现将极大地增加 AVR 运行安全可靠性的隐患。如采用 DCS 系统进行无功功率的闭环控制，这种方式在水电厂有过应用，京津唐电网火电厂中尚无这种应用。所以，我们选择在增加的 AVC 装置中实现对无功功率的闭环控制，与同网其他电厂的方式相同，方便调试、维护，以及与市调的沟通。

3.3.4 电厂自动电压控制子站系统的安全约束逻辑

子站自动电压控制系统的核心是由上下位机组成。上位机接收北京市调下达的发电厂高压母线电压（或总无功功率）控制目标，在充分考虑各种约束条件并经过分析计算后，估测出全厂总无功出力需求，再进行合理分配给对应于每台机组的下位机。同时配合主站或区域无功系统设备实现对电网的无功优化，显著减少线损，提高电能质量。

下位机作为 AVC 控制输出装置来完成自适应跟踪调整，协调控制每台发电机的无功进而实现对高压母线控制，并输出脉冲信号至发电机组的 DCS 系统或 AVR 系统进行调节。但当上位机装置异常或约束条件满足时，AVC 功能将自动退出，同时输出一对无源接点信号至机组的 DCS 系统或至光字牌，通知值班人员，给出报警信号。

本节主要分析子站的安全约束策略。安全约束条件可以包括目标值约束条件、模拟量约束条件、开关量约束条件、差异比较约束条件。

3.3.4.1 目标值（遥调量）的约束条件

目标值是 AVC 电厂子站获得的市调关于母线电压值的指令。目标值的约束条件包括：新旧目标值的变化幅度不能超过预设的变化范围、新目标母线电压值不能超过或低于母线合理运行电压值的上限或者下限。如果新目标数据不能满足上述要求，则应按错误数据处理，母线目标电压仍为旧值。

3.3.4.2 模拟量（遥测量）的约束条件

AVC 电厂子站涉及的模拟量包括目标母线电压、机组机端电压、定子电流、频率、有功功率、无功功率、厂用电母线电压等。模拟量的约束条件主要包括：

上述模拟量的数据变化超过设定的变化范围，反映出机组系统可能处于不稳定的运行状态；

上述模拟量的值超过机组安全运行允许值的上下限，如超上限一般闭锁增磁，

超下限一般闭锁减磁；

上述模拟量数值因为数据传输、系统故障等原因，导致数据结构无效，作为错误数据舍弃。

在以上约束条件中，主要是针对各机组的运行模拟量，闭锁时是针对各机组的控制，不影响其他机组的 AVC 运行。而上文所述的目标值约束，主要针对子站系统的母线电压，闭锁时需要闭锁所有机组的 AVC 控制。

3.3.4.3 开关量（遥信量）的约束条件

开关量主要包括：AVC 正常信号、限制动作信号、发电机并网信号、通讯信号。AVC 异常时需闭锁出口，停止对无功或电压的控制。发电机如未并网，不参与 AVC 的调节。出现限制动作时，AVC 能自动调整，使警告消失。

3.3.4.4 差异比较约束条件

通过母线电压的目标值与实时值之间比较，如差异较小，在设定的调节死区中，则认为没有差异，不需要调节，如差异较大，超过设定的参数变化范围，则认为数据错误予以丢弃。

综上，AVC 子站主要的运行约束条件归纳至下表 3-1 中：

表 3-1 石景山热电厂自动电压控制系统安全约束条件

序号	安全约束条件	触发事件	保护策略
1	母线电压越上限闭锁保护	实测母线电压超过用户指定的上限闭锁保护值	该段母线暂时退出 AVC 调节，等母线电压小于上限值时，该段母线重新加入到 AVC 调节
2	母线电压越下限闭锁保护	实测母线电压低于用户指定的下限闭锁保护值	该段母线暂时退出 AVC 调节，等母线电压高于下限值时，该段母线重新加入到 AVC 调节
3	母线电压越上限报警	实测母线电压超过用户指定的上限报警值	点亮 AVC 后台母线电压越上限报警光字牌
4	母线电压越下限报警	实测母线电压低于用户指定的下限报警值	点亮 AVC 后台母线电压越下限报警光字牌
5	母线 PT 断线闭锁保护	母线实测电压低于用户指定 PT 断线闭锁保护值	AVC 软件退出调节
6	DCS（或 AVR）就地控制闭锁保护	DCS（或 AVR）就地控制信号为真	受该 DCS（或 AVR）控制的发电机组暂时退出无功控制；等该信号为假时，退出的发电机组自动重新参与无功控制
7	AVR 低励闭锁保护	AVR 低励信号为真	受该 DCS（或 AVR）控制的发电机组暂时退出无功控制；等该信号为假时，退出的发电机组自动重新参与无功控制
8	AVR 过励闭锁保护	AVR 过励信号为真	受该 DCS（或 AVR）控制的发电机组暂时退出无功控制；等该信号为假时，退出的发电机组自动重新参与无功控制

表 3-1 （续表）

序号	安全约束条件	触发事件	保护策略
9	AVR 强励闭锁保护	AVR 强励信号为真	受该 DCS (或 AVR) 控制的发电机组暂时退出无功控制; 等该信号为假时, 退出的发电机组自动重新参与无功控制
10	励磁装置告警闭锁保护	励磁装置告警信号为真	受该 DCS (或 AVR) 控制的发电机组暂时退出无功控制; 等该信号为假时, 退出的发电机组自动重新参与无功控制
11	励磁装置故障闭锁保护	励磁装置故障信号为真	受该 DCS (或 AVR) 控制的发电机组退出无功控制
12	发变组 V/Hz 限制器动作闭锁保护	发变组 V/Hz 限制器动作信号为真	该发电机组暂时退出无功控制; 等该信号为假时, 退出的发电机组自动重新参与无功控制
13	励磁变超温报警闭锁保护	励磁变超温报警信号为真	受该 DCS (或 AVR) 控制的发电机组暂时退出无功控制; 等该信号为假时, 退出的发电机组自动重新参与无功控制
14	整流器过热报警闭锁保护	整流器过热报警信号为真	受该 DCS (或 AVR) 控制的发电机组暂时退出无功控制; 等该信号为假时, 退出的发电机组自动重新参与无功控制
15	单机机端电压越上限闭锁保护	实测机端电压超过用户指定的上限闭锁保护值	该发电机组暂时退出无功控制; 等机端电压小于上限值时, 退出的发电机组自动重新参与无功控制
16	单机机端电压越下限闭锁保护	实测机端电压低于用户指定的下限闭锁保护值	该发电机组暂时退出无功控制; 等机端电压高于下限值时, 退出的发电机组自动重新参与无功控制
17	单机机端电压越上限报警	实测机端电压超过用户指定的上限报警值	点亮 AVC 后台该机组机端电压越上限报警光字牌
18	单机机端电压越下限报警	实测机端电压低于用户指定的下限报警值	点亮 AVC 后台该机组机端电压越下限报警光字牌
19	单机定子电流越上限闭锁保护	实测定子电流超过用户指定的上限闭锁保护值	该发电机组暂时退出无功控制; 等定子电流小于上限值时, 退出的发电机组自动重新参与无功控制
20	单机定子电流越下限闭锁保护	实测定子电流低于用户指定的下限闭锁保护值	该发电机组暂时退出无功控制; 等定子电流高于下限值时, 退出的发电机组自动重新参与无功控制
21	单机定子电流越上限报警	实测定子电流超过用户指定的上限报警值	点亮 AVC 后台该机组定子电流越上限报警光字牌
22	单机定子电流越下限报警	实测定子电流低于用户指定的下限报警值	点亮 AVC 后台该机组定子电流越下限报警光字牌
23	单机有功功率越上限闭锁保护	实测有功功率超过用户指定的上限闭锁保护值	该发电机组暂时退出无功控制; 等有功功率小于上限值时, 退出的发电机组自动重新参与无功控制

表 3-1 （续表）

序号	安全约束条件	触发事件	保护策略
24	单机有功功率越下限闭锁保护	实测有功功率低于用户指定的下限闭锁保护值	该发电机组暂时退出无功控制；等有功功率高于下限时，退出的发电机组自动重新参与无功控制
25	单机有功功率越上限报警	实测有功功率超过用户指定的上限报警值	点亮 AVC 后台该机组有功功率越上限报警光字牌
26	单机有功功率越下限报警	实测有功功率超过用户指定的下限报警值	点亮 AVC 后台该机组有功功率越下限报警光字牌
27	单机无功功率越上限闭锁保护	实测无功功率超过用户指定的上限闭锁保护值	该发电机组暂时退出无功控制；等无功功率小于上限值时，退出的发电机组自动重新参与无功控制
28	单机无功功率越下限闭锁保护	实测无功功率低于用户指定的下限闭锁保护值	该发电机组暂时退出无功控制；等无功功率高于下限时，退出的发电机组自动重新参与无功控制
29	单机无功功率越上限报警	实测无功功率超过用户指定的上限报警值	点亮 AVC 后台该机组无功功率越上限报警光字牌
30	单机无功功率越下限报警	实测无功功率低于用户指定的下限报警值	点亮 AVC 后台该机组无功功率越下限报警光字牌
31	厂用电压越上限闭锁保护	实测厂用电压超过用户指定的上限闭锁保护值	控制该段厂用电的发电机组暂时退出无功控制；等厂用电压小于上限值时，退出的发电机组自动重新参与无功控制
32	厂用电压越下限闭锁保护	实测厂用电压低于用户指定的下限闭锁保护值	控制该段厂用电的发电机组暂时退出无功控制；等厂用电压高于下限时，退出的发电机组自动重新参与无功控制
33	单机转子电流越上限闭锁保护	实测转子电流超过用户指定的上限闭锁保护值	该发电机组暂时退出无功控制；等转子电流小于上限值时，退出的发电机组自动重新参与无功控制
34	单机转子电流越下限闭锁保护	实测转子电流低于用户指定的下限闭锁保护值	该发电机组暂时退出无功控制；等转子电流高于下限时，退出的发电机组自动重新参与无功控制
35	AVC 子站长时间接收不到主站命令闭锁保护	主站下发一次命令后不再下发命令	AVC 子站在超过所设定的时间（1-10 分钟）未收到新的指令，按事先所设定切换到本地曲线或保持上次目标值或闭锁保护。
36	系统低频振荡闭锁保护	机组有功功率持续增减变化且变化率超过所设门槛值	AVC 子站收到交流采样装置发出的低频振荡遥信后闭锁保护。
37	系统大扰动闭锁保护	机组机端电压或定子电流变化率超过所设门槛值	AVC 子站收到交流采样装置发出的系统大扰动遥信后闭锁保护。

3.4 自动电压控制系统结构设计

根据上文对石景山热电厂 AVC 系统的方案分析，数据流程见图 3-1。

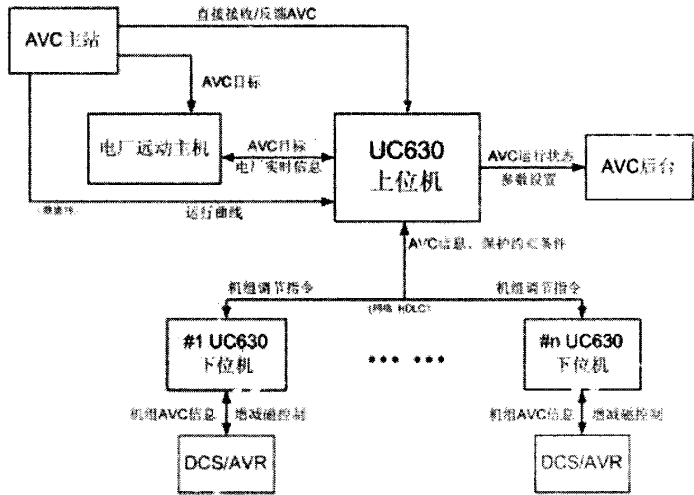


图 3-1 石景山热电厂自动电压控制系统数据流程
自动电压控制流程见图 3-2。

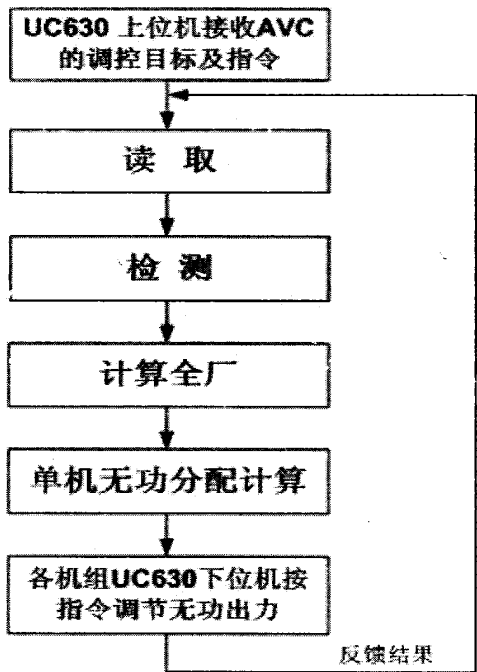


图 3-2 石景山热电厂自动电压控制系统控制流程
自动电压控制系统布置见图 3-3。

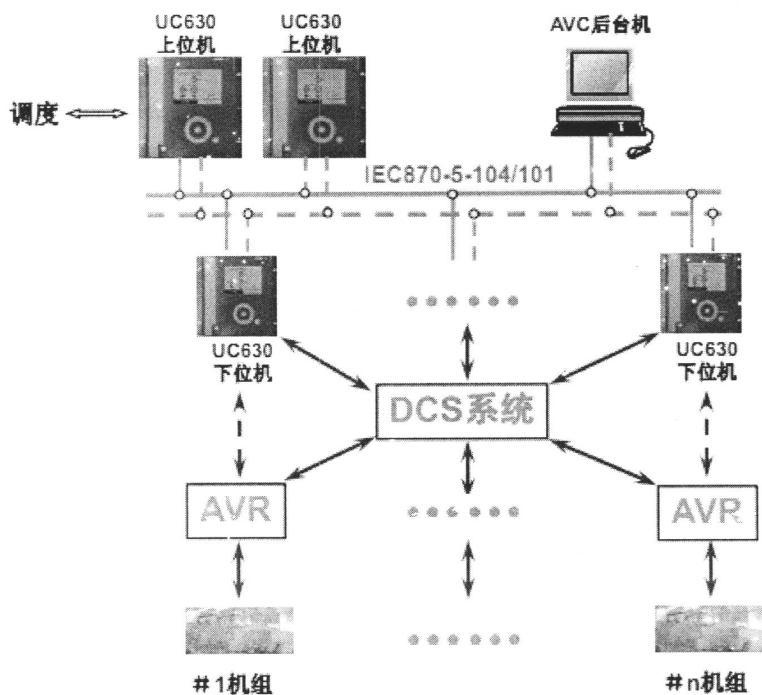


图 3-3 石景山热电厂自动电压控制系统布置图

3.5 本章小结

本章从分析石景山热电厂出线结构和与北京市调信息通讯模式入手，通过分析电厂实际现状，确定了电厂自动电压控制系统的总体设计原则和方案。并选取数据采集、与双母线接线的配合、闭环控制方式、子站安全约束条件这四个角度，也是系统实现中必然会遇到的四个方面的重要问题，进行了详细的设计和叙述，最终确定了石景山热电厂自动电压控制系统的设计方案，并给出系统数据流程、控制流程和系统布置图。

第 4 章 石景山热电厂自动电压控制系统的调试

4.1 石景山热电厂自动电压控制系统选型概述

石景山热电厂自动电压控制 POWER AVC 3000 装置,是安装于发电厂通过调相机组励磁,实现电网电压、无功优化控制的专门装置。在相关约束条件下,根据接受的目标电压指令,调节机组励磁,从而改变电厂高压侧母线电压,达到控制目标。目的是提高电网的可靠性和电网运行的经济性,该装置可实现本地和远方调度控制。

现场性能测试是在装置安装完毕后,测试包括设备投入运行前的全面检查、精度测试、可靠性试验、控制逻辑测试及控制器参数整定,关系到 AVC 装置的正常运行、调节精度与效能、调节速率指标,关系到其在电网无功优化控制中发挥的作用。

POWER AVC 3000 软件根据北京市调调度下发的 220kV 四、五母线电压目标值和石门线电压目标值,分别自动计算得出 1 号、2 号、3 号机组所要承担的总无功出力目标值和 4 号机组无功出力目标值,并根据设定的无功功率分配原则,在充分考虑各种约束条件后,将总无功功率合理分配给每台机组,并通过 AVC 设备发出控制信号到 DCS 控制系统,通过 DCS 控制系统来控制发电机组励磁调节控制系统 AVR,实现 4 台机组的电压无功自动控制。励磁系统调节机组无功功率,最终使全厂母线电压达到北京市调调度所下发的目标值。POWER AVC 3000 系统输出异常或调节控制约束条件成立时,POWER AVC 3000 调节功能会自动退出,并有告警显示功能。

POWER AVC 3000 装置的后台机,主要显示 AVC 运行软件实现历史数据记录、采集信号实时监控、事件追忆、当前状态等功能。

对该系统进行调试前,要保证试验机组励磁调节器告警/保护功能均正常,并已投入在自动运行方式。与 AVC 装置有关的输入信号接入完成,试验机组有关的继电保护投入运行,AVC 装置采集到机组及励磁调节器的当前状态。调节器手动增/减磁操作正常,且装置输出增减励磁信号接入到调节器内。同时,试验必须得到调度方的许可或批准,调试时间在许可或批准时间内。机组带负荷调试前,有关 AVC 装置的其他试验完成,且装置能长时间正常运行。

调试工作主要包括以下试验:AVC 装置的本地仿真运行测试(包括相关保护信号定值整定、遥信号、遥测信号、遥控信号、遥调信号)、AVC 装置本地开环试验、AVC 功能测试和 AVC 装置的闭环测试。

4.2 石景山热电厂自动电压控制系统调试试验

4.2.1 石景山热电厂自动电压控制系统定值单

AVC 系统定值单机组长期稳定运行的经验给予制订，AVC 子站调试将根据制定的保护定值对 AVC 装置进行保护定值设定，并在该定值基础上给予调试与试验。

1-3 号机组（双母线出线）定值单见表 4-1。

表 4-1 1、2、3 号机组自动电压控制系统定值单

参数名称	最终参数值	单位
母线电压高闭锁值（退出）	235	kV
母线电压低闭锁值（退出）	220	kV
母线电压高闭锁值（增磁闭锁）	230	kV
母线电压低闭锁值（减磁闭锁）	222	kV
母线电压高告警值	229.5	kV
母线电压低告警值	222.5	kV
母线电压控制调节死区	0.3	kV
PT 断线(退出)	165	kV
#1 机组厂用电母线 A 段电压高闭锁值（增磁闭锁）	6.6	kV
#1 机组厂用电母线 A 段电压低闭锁值（减磁闭锁）	5.9	kV
#1 机组厂用电母线 B 段电压高闭锁值（增磁闭锁）	6.6	kV
#1 机组厂用电母线 B 段电压低闭锁值（减磁闭锁）	5.9	kV
#1 机机端电压高闭锁值（增磁闭锁）	16.54	kV
#1 机机端电压低闭锁值（减磁闭锁）	15	kV
#1 机无功功率高闭锁值（增磁闭锁）	100	MVar
#1 机无功功率低闭锁值（减磁闭锁）	-20	MVar
#1 机励磁电流高闭锁值（增磁闭锁）	1884	A
#1 机励磁电流低闭锁值（减磁闭锁）	800	A
#1 机机端电流高闭锁值（闭锁）	9487	A
#1 机机端电流低闭锁值（闭锁）	4032	A
#1 机有功功率低闭锁值（退出）	110	MW
#1 机组无功调节死区设定值	3	MVar
#2 机组厂用电母线 A 段电压高闭锁值（增磁闭锁）	6.6	kV
#2 机组厂用电母线 A 段电压低闭锁值（减磁闭锁）	5.9	kV
#2 机组厂用电母线 B 段电压高闭锁值（增磁闭锁）	6.6	kV
#2 机组厂用电母线 B 段电压低闭锁值（减磁闭锁）	5.9	kV
#2 机机端电压高闭锁值（增磁闭锁）	16.54	kV
#2 机机端电压低闭锁值（减磁闭锁）	15	kV
#2 机无功功率高闭锁值（增磁闭锁）	100	MVar

表 4-1 （续表）

参数名称	最终参数值	单位
#2 机无功功率低闭锁值（减磁闭锁）	-20	MVar
#2 机励磁电流高闭锁值（增磁闭锁）	1884	A
#2 机机端电流低闭锁值（闭锁）	4032	A
#2 机有功功率低闭锁值（退出）	110	MW
#2 机组无功调节死区设定值	3	MVar
#3 机组厂用电母线 A 段电压高闭锁值（增磁闭锁）	6.6	kV
#3 机组厂用电母线 A 段电压低闭锁值（减磁闭锁）	5.9	kV
#3 机组厂用电母线 B 段电压高闭锁值（增磁闭锁）	6.6	kV
#3 机组厂用电母线 B 段电压低闭锁值（减磁闭锁）	5.9	kV
#3 机机端电压高闭锁值（增磁闭锁）	16.54	kV
#3 机机端电压低闭锁值（减磁闭锁）	15	kV
#3 机无功功率高闭锁值（增磁闭锁）	100	MVar
#3 机无功功率低闭锁值（减磁闭锁）	-20	MVar
#3 机励磁电流高闭锁值（增磁闭锁）	1883	A
#3 机励磁电流低闭锁值（减磁闭锁）	800	A
#3 机机端电流高闭锁值（闭锁）	9487	A
#3 机机端电流低闭锁值（闭锁）	4032	A
#3 机有功功率低闭锁值（退出）	110	MW
#3 机组无功调节死区设定值	3	MVar

4 号机组（单元出线）自动电压控制系统定值单见表 4-2。

表 4-2 4 号机组自动电压控制系统定值单

参数名称	最终参数值	单位
母线电压高闭锁值（退出）	235	kV
母线电压低闭锁值（退出）	220	kV
母线电压高闭锁值（增磁闭锁）	230	kV
母线电压低闭锁值（减磁闭锁）	222	kV
母线电压高告警值	229.5	kV
母线电压低告警值	222.5	kV
母线电压控制调节死区	0.3	kV
PT 断线（退出）	165	kV
#4 机厂用电母线 A 段电压高闭锁值（增磁闭锁）	6.6	kV
#4 机厂用电母线 A 段电压低闭锁值（减磁闭锁）	5.9	kV
#4 机厂用电母线 B 段电压高闭锁值（增磁闭锁）	6.6	kV
#4 机厂用电母线 B 段电压低闭锁值（减磁闭锁）	5.9	kV
#4 机机端电压高闭锁值（增磁闭锁）	16.54	kV
#4 机机端电压低闭锁值（减磁闭锁）	15	kV

表 4-2 （续表）

参数名称	最终参数值	单位
#4 机无功功率高闭锁值（增磁闭锁）	100	MVar
#4 机无功功率低闭锁值（减磁闭锁）	-20	MVar
#4 机励磁电流高闭锁值（增磁闭锁）	1887	A
#4 机励磁电流低闭锁值（减磁闭锁）	800	A
#4 机机端电流高闭锁值（闭锁）	9487	A
#4 机机端电流低闭锁值（闭锁）	4032	A
#4 机有功功率低闭锁值（退出）	110	MW
#4 机组无功调节死区设定值	3	MVar

4.2.2 自动电压控制系统本地仿真运行测试

在测试前完成了 AVC 软件所需遥信、遥测信号的接入。在 AVC 软件配置完成之后，即进行仿真测试。所谓仿真测试，就是模拟现场 AVC 需要的遥信、遥控、遥测、遥调信号，来对 AVC 软件进行功能测试。

4.2.2.1 遥信信号

试验目的：Power AVC 3000 系统能够正确接收现场接入的遥信信号，并且能够转发至后台机。

试验条件：AVC 系统处于退出状态。断开 AVC 系统上的增、减磁控制输出连片。

试验方法：硬接点信号在对 AVR 设备侧（或 AVC 装置端子排）模拟发出，根据发出的信号核对相关装置采集的遥信在系统库中是否变位并通过后台画面核对装置是否正确接收且把相关信息转发给调度。软接点信号（软件信号）中的保护信号在装置侧模拟相关保护事件发生，此时可通过后台画面核对装置是否正确的产生了相关保护信号并转发。后台系统主接线画面及 AVC 系统监视画面相关刀闸、开关信号直接与当前运行情况核对。试验记录见表 4-3。

表 4-3 遥信信号本地仿真测试

信号名称	信号状态合（1）	信号状态分（0）	试验结果
AVC 上位机投入/退出信号	投入	退出	正常
AVC 上位机远方/就地信号	远方	就地	正常
1#发电机励磁系统异常	异常	正常	正常
1#发电机 DCS 允许 AVC 投入	投入	退出	正常
2#发电机励磁系统异常	异常	正常	正常
2#发电机 DCS 允许 AVC 投入	投入	退出	正常
3#发电机励磁系统异常	异常	正常	正常
3#发电机 DCS 允许 AVC 投入	投入	退出	正常

表 4-3 （续表）

信号名称	信号状态合（1）	信号状态分（0）	试验结果
4#发电机励磁系统异常	异常	正常	正常
4#发电机 DCS 允许 AVC 投入	投入	退出	正常
四母线电压高 AVC 退出	退出	正常	正常
四母线电压低 AVC 退出	退出	正常	正常
五母线电压高 AVC 退出	退出	正常	正常
五母线电压低 AVC 退出	退出	正常	正常
四母线电压高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
四母线电压低闭锁减磁	闭锁	正常	正常
五母线电压高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
五母线电压低闭锁增磁	闭锁	正常	正常
四母线电压高 AVC 告警	告警	正常	正常
四母线电压低 AVC 告警	告警	正常	正常
五母线电压高 AVC 告警	告警	正常	正常
五母线电压低 AVC 告警	告警	正常	正常
1#发电机无功高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
1#发电机无功低闭锁减磁	闭锁	正常	正常
1#发电机机端电压高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
1#发电机机端电压低闭锁减磁	闭锁	正常	正常
厂用 6Kv 一/二段电压高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
厂用 6kV 一/二段电压低闭锁减磁	闭锁	正常	正常
1#发电机定子电流高闭锁	闭锁	正常	正常
1#发电机定子电流低闭锁	闭锁	正常	正常
1#发电机转子电流高闭锁	闭锁	正常	正常
1#发电机转子电流低闭锁	闭锁	正常	正常
1#发电机有功低 AVC 退出	退出	正常	正常
2#发电机无功高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
2#发电机无功低闭锁减磁	闭锁	正常	正常
2#发电机机端电压高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
2#发电机机端电压低闭锁减磁	闭锁	正常	正常
厂用 6Kv 三/四段电压高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
厂用 6kV 三/四段电压低闭锁减磁	闭锁	正常	正常
2#发电机定子电流高闭锁	闭锁	正常	正常
2#发电机定子电流低闭锁	闭锁	正常	正常
2#发电机转子电流高闭锁	闭锁	正常	正常
2#发电机转子电流低闭锁	闭锁	正常	正常
2#发电机有功低 AVC 退出	退出	正常	正常

表 4-3 （续表）

信号名称	信号状态合（1）	信号状态分（0）	试验结果
3#发电机无功高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
3#发电机无功低闭锁减磁	闭锁	正常	正常
3#发电机机端电压高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
3#发电机机端电压低闭锁减磁	闭锁	正常	正常
厂用 6Kv 五/六段电压高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
厂用 6kV 五/六段电压低闭锁减磁	闭锁	正常	正常
3#发电机定子电流高闭锁	闭锁	正常	正常
3#发电机定子电流低闭锁	闭锁	正常	正常
3#发电机转子电流高闭锁	闭锁	正常	正常
3#发电机转子电流低闭锁	闭锁	正常	正常
3#发电机有功低 AVC 退出	退出	正常	正常
石门线电压高 AVC 退出	退出	正常	正常
石门线电压低 AVC 退出	退出	正常	正常
石门线电压高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
石门线电压低闭锁减磁	闭锁	正常	正常
石门线电压高 AVC 告警	告警	正常	正常
石门线电压低 AVC 告警	告警	正常	正常
4#发电机无功高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
4#发电机无功低闭锁减磁	闭锁	正常	正常
4#发电机机端电压高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
4#发电机机端电压低闭锁减磁	闭锁	正常	正常
厂用 6Kv 七/八段电压高闭锁增磁	闭锁	正常	正常
厂用 6kV 七/八段电压低闭锁减磁	闭锁	正常	正常
4#发电机定子电流高闭锁	闭锁	正常	正常
4#发电机定子电流低闭锁	闭锁	正常	正常
4#发电机转子电流高闭锁	闭锁	正常	正常
4#发电机转子电流低闭锁	闭锁	正常	正常
4#发电机有功低 AVC 退出	退出	正常	正常

4.2.2.2 遥测信号

试验目的：AVC 装置能够正确接收现场接入的遥测信号，精度达到设备调节要求，并且能够把采集信息转发至后台机。

试验条件：AVC 装置处于退出状态。断开 AVC 装置上的增、减磁控制输出连片。

试验方法：遥测信号由电厂运行人员根据当前运行实际表盘读取数值，从 AVC 装置读取 AVC 测量值，比较运行值及测量值偏差判断遥测信号是否正确可用。

试验记录见表 4-4。

表 4-4 遥测信号本地仿真测试

信号名称	实际运行值	AVC 后台显示值	测试结果
220kV 四母线电压量测 (kV)	230.16	230.14	可用
	226.42	226.42	
	223.85	223.84	
220kV 五母线电压量测 (kV)	230.16	230.14	可用
	226.42	226.42	
	223.85	223.84	
石门线电压量测 (kV)	229.64	229.64	可用
	226.57	226.56	
	223.15	223.15	
1#发电机无功 (MVar)	49	49	可用
	23	23	
	-3	-3	
1#发电机机端电压 (kV)	15.72	15.73	可用
	15.58	15.58	
	15.23	15.23	
1#发电机机端电流 (kA)	8.8	8.8	可用
	6.2	6.2	
	4.7	4.7	
1#发电机有功 (MW)	210	210	可用
	160	160	
	135	135	
1#机厂用 6kV 段母线电压 (kV)	6.3	6.3	可用
	6.2	6.2	
	6.5	6.5	
4#发电机无功 (MVar)	5.9	5.9	可用
	6.0	6.0	
	49	49	
4#发电机机端电压 (kV)	23	23	可用
	-3	-3	
	15.72	15.73	
4#发电机机端电流 (kA)	15.58	15.58	可用
	15.23	15.23	
	8.8	8.8	
4#发电机有功 (MW)	6.2	6.2	可用
	4.7	4.7	
	210	210	
	160	160	可用
	135	135	

表 4-4 （续表）

信号名称	实际运行值	AVC 后台显示值	测试结果
4#机厂用 6kV 段母线电压（kV）	6.5	6.5	可用
	5.9	5.9	
	6.0	6.0	

4.2.2.3 遥控信号

试验目的：AVC 装置发出的控制信号，能够正确到达对侧 AVR 被控设备。

试验条件：AVC 装置处于退出状态。投入 AVC 装置上的增、减磁控制输出连片。

试验方法：硬接点信号在 AVC 装置中模拟发出相关遥控输出，根据发出的信号核对 DCS 是否能够正确接收或使用万用表电阻档测量开出遥控信号能够正确导通。软接点信号（软件信号）在 AVC 装置模拟发出，此时核对是否正确的产生了相关遥信反馈信号并且正确转发至后台机。

试验记录见表 4-5。

表 4-5 遥控信号本地仿真测试

信号名称	合命令	分命令	试验结果	备注
上位机投入\退出信号	导通	未导通	反馈正常	合.投入 分.退出
上位机就地\远方信号	导通	未导通	反馈正常	合.投入 分.退出
1#发电机 AVC 投入\退出	导通	未导通	反馈正常	合.投入 分.退出
2#发电机 AVC 投入\退出	导通	未导通	反馈正常	合.投入 分.退出
3#发电机 AVC 投入\退出	导通	未导通	反馈正常	合.投入 分.退出
4#发电机 AVC 投入\退出	导通	未导通	反馈正常	合.投入 分.退出
1#机组 AVC 增磁	导通	未导通	反馈正常	合.增磁 分.正常
1#机组 AVC 减磁	导通	未导通	反馈正常	合.减磁 分.正常
2#机组 AVC 增磁	导通	未导通	反馈正常	合.增磁 分.正常
2#机组 AVC 减磁	导通	未导通	反馈正常	合.减磁 分.正常

表 4-5 （续表）

信号名称	合命令	分命令	试验结果	备注
3#机组 AVC 增磁	导通	未导通	反馈正常	合.增磁 分.正常
3#机组 AVC 减磁	导通	未导通	反馈正常	合.减磁 分.正常
4#机组 AVC 增磁	导通	未导通	反馈正常	合.增磁 分.正常
4#机组 AVC 减磁	导通	未导通	反馈正常	合.减磁 分.正常

4.2.2.4 遥调信号

试验目的：UC630 装置能够正确的接收主站下发的控制指令。

试验条件：AVC 装置处于退出状态。打开 AVC 装置上的增、减磁控制输出连片。

试验方法：通过通讯方式模拟 AVC 主站发出控制指令，并根据发出的信号通过后台画面核对 UC630 装置接收指令数据库。

试验记录见表 4-6。

表 4-6 遥调信号本地仿真测试

信号名称	设定值	接收值	结果
220kV 四母线远方电压目标(kV)	228.00	228.00	正常
	225.00	225.00	
	222.00	222.00	
	230.00	230.00	
220kV 五母线远方电压目标(kV)	226.00	226.00	正常
	224.00	224.00	
	228.00	228.00	
石门线远方电压目标(kV)	225.00	225.00	正常
	222.00	222.00	

4.2.2.5 本地仿真试验总结

本试验是测试自动电压控制系统能正确接收需要的遥信、遥控、遥测、遥调信号，这是系统实现功能的基础。从试验结果可以看出，开关量接受完全正常，模拟量的接收误差很小，不会影响到无功的分配计算和目标母线电压值的正确稳定。

4.2.3 自动电压控制系统本地开环测试

开环测试的主要目的是通过测试来合理配置参数，以达到参数合理化的要求。

4.2.3.1 机组 DCS 系统与 AVC 装置控制互锁试验

试验目的：检验 AVC 与 DCS 系统对 AVR 励磁装置控制的唯一性。

试验条件：机组运行正常，励磁系统无故障信号。打开 AVC 装置增、减磁控制输出连片。

试验步骤：投入 #1 机组 AVC 装置，检查 AVC 装置投入正常，此时 DCS 系统增/减磁命令无效。手动退出 #1 机组 AVC 装置，检查 AVC 装置退出运行，此时 DCS 系统增/减磁命令有效。投入 #2 机组 AVC 装置，检查 AVC 装置投入正常，此时 DCS 系统增/减磁命令无效。手动退出 #2 机组 AVC 装置，检查 AVC 装置退出运行，此时 DCS 系统增减磁命令有效。投入 #3 机组 AVC 装置，检查 AVC 装置投入正常，此时 DCS 系统增/减磁命令无效。手动退出 #3 机组 AVC 装置，检查 AVC 装置退出运行，此时 DCS 系统增/减磁命令有效。投入 #4 机组 AVC 装置，检查 AVC 装置投入正常，此时 DCS 系统增/减磁命令无效。手动退出 #4 机组 AVC 装置，检查 AVC 装置退出运行，此时 DCS 系统增减磁命令有效。

试验结果：均正常

4.2.3.2 保护功能测试

试验目的：AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应。

试验条件：机组运行正常，检修人员（运行人员监护）将 AVC 装置投入。AVC 装置增、减磁输出连片打开运行。当前母线电压及机组机端无功运行在正常范围。

励磁系统故障退出测试见表 4-7。

表 4-7 测试记录表

类别	内容
测试步骤	在 AVC 下位机柜处短接励磁系统故障开入量端子
验证方法	1.AVC 软件自动退出运行 2.信号复归后，人工手动重新投入 AVC，AVC 正常运行
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

220kV 母线电压越高限退出测试见表 4-8。

表 4-8 测试记录表

类别	内容
初始条件	1.将四/五母线（或石门线）电压实测值置为贴近母线电压高限的运行值 2.AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	将四/五母线（或石门线）电压实测值置为高于用户设定的母线电压上限值
验证方法	1.四/五母线（或石门线）电压越高限退出光字亮 2.AVC 软件自动退出运行 3.当母线电压复归为正常值，人工手动重新投入，AVC 正常运行
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

220kV 母线电压越低限退出测试见表 4-9。

表 4-9 测试记录表

类别	内容
初始条件	1.将四/五母线（或石门线）电压实测值置为贴近母线电压低限的运行值 2.AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	将四/五母线（或石门线）电压实测值置为低于用户设定的母线电压低限值 1.四/五母线（或石门线）电压越低限退出光字亮
验证方法	2.AVC 软件自动退出运行 3.当母线电压复归为正常值，人工手动重新投入，AVC 正常运行
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

220kV 母线电压越高限闭锁测试见表 4-10。

表 4-10 测试记录表

类别	内容
初始条件	1.将四/五母线（或石门线）电压实测值置为贴近母线电压高限的运行值 2.AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	将四/五母线（或石门线）电压实测值置为高于用户设定的母线电压上限值 1.四/五母线（或石门线）电压越高限闭锁光字亮
验证方法	2.AVC 软件停止调节 3.当母线电压复归为正常值，电压越高限闭锁光字复归，AVC 下位机软件继续调节
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

220kV 母线电压越低限闭锁测试见表 4-11。

表 4-11 测试记录表

类别	内容
初始条件	1.将四/五母线（或石门线）电压实测值置为贴近母线电压低限的运行值 2.AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	将四/五母线（或石门线）电压实测值置为低于用户设定的母线电压低限值 1.四/五母线（或石门线）电压越低限闭锁光字亮
验证方法	2.AVC 软件停止调节 3.当母线电压复归为正常值，电压越低限闭锁光字复归，AVC 下位机软件继续调节
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

220kV 母线电压越高限告警测试见表 4-12。

表 4-12 测试记录表

类别	内容
初始条件	1.将四/五母线（或石门线）电压实测值置为贴近母线电压高限的运行值 2.AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	将四/五母线（或石门线）电压实测值置为高于用户设定的母线电压上限值

表 4-12 （续表）

类别	内容
验证方法	1.四/五母线（或石门线）电压越高限告警光字亮 2.当母线电压复归为正常值，电压越高限告警光字复归
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

220kV 母线电压越低限告警测试见表 4-13。

表 4-13 测试记录表

类别	内容
初始条件	1.将四/五母线（或石门线）电压实测值置为贴近母线电压低限的运行值 2.AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	将四/五母线（或石门线）电压实测值置为低于用户设定的母线电压低限值
验证方法	1.四/五母线（或石门线）电压越低限告警光字亮 2.当母线电压复归为正常值，电压越低限告警光字复归
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

发电机机端电流越高限闭锁测试见表 4-14。

表 4-14 测试记录表

类别	内容
初始条件	AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	将发电机机端电流实测值置为高于用户设定的越高限闭锁值 1.发电机机端电流越高限闭锁光字亮
验证方法	2.AVC 软件下位机停止调节 3.当发电机机端电流实测值复归为正常值，发电机机端电流越高限闭锁光字复归，AVC 下位机软件继续调节
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

发电机机端电流越低限闭锁测试见表 4-15。

表 4-15 测试记录表

类别	内容
初始条件	AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	将发电机机端电流实测值置为低于用户设定的越低限闭锁值 1.发电机机端电流越低限退出光字亮
验证方法	2.AVC 软件下位机停止调节 3.当发电机机端电流实测值复归为正常值，发电机机端电流越低限闭锁光字复归，AVC 下位机软件继续调节
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

发电机转子电流越高限闭锁测试见表 4-16。

表 4-16 测试记录表

类别	内容
初始条件	AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	将发电机转子电流实测值置为高于用户设定的越高限闭锁值
验证方法	1.发电机转子电流越高限闭锁光字亮
	2.AVC 软件下位机停止调节
	3.当发电机转子电流实测值复归为正常值，发电机转子电流越高限闭锁光字复归，AVC 下位机软件继续调节
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

发电机转子电流越低限闭锁测试见表 4-17。

表 4-17 测试记录表

类别	内容
初始条件	AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	将发电机转子电流实测值置为低于用户设定的越低限闭锁值
验证方法	1.发电机转子电流越低限闭锁光字亮；
	2.AVC 软件下位机停止调节；
	3.当发电机转子电流实测值复归为正常值，发电机转子电流越低限闭锁光字复归，AVC 下位机软件继续调节。
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应。

发电机有功越低限退出测试见表 4-18。

表 4-18 测试记录表

类别	内容
初始条件	AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	将发电机有功实测值置为低于用户设定的越低限退出值
验证方法	1.发电机有功越低限退出光字亮
	2.AVC 软件下位机退出运行
	3.当发电机有功实测值复归为正常值，人工手动重新投入，AVC 正常运行
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

发电机机端电压高增磁闭锁测试见表 4-19。

表 4-19 测试记录表

类别	内容
初始条件	AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	将发电机机端电压实测值置为高于用户设定的增磁闭锁高限值

表 4-19 （续表）

类别	内容
验证方法	1.发电机机端电压高闭锁增磁光字亮
	2.下发上调母线的电压目标，AVC 子站上位机不再对发电机进行无功目标分配，发电机执行目标值维持在前一个分配的给定目标值上
	3.下发下调母线的电压目标，AVC 子站上位机将对发电机重新分配无功目标值，发电机能够按照新的执行目标值进行无功调节
	4.当发电机机端电压实测值复归为正常值，发电机机端电压高闭锁增磁光字复归
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

发电机机端电压低减磁闭锁测试见表 4-20。

表 4-20 测试记录表

类别	内容
初始条件	AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	将发电机机端电压实测值置为低于用户设定的减磁闭锁低限值
验证方法	1.发电机机端电压低闭锁减磁光字亮
	2.下发下调母线的电压目标，AVC 子站上位机不再对发电机进行无功目标分配，发电机执行目标值维持在前一个分配的给定目标值上
	3.下发上调母线的电压目标，AVC 子站上位机将对发电机重新分配无功目标值，发电机能够按照新的执行目标值进行无功调节
	4.当发电机机端电压实测值复归为正常值，发电机机端电压低闭锁减磁光字复归
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

发电机无功高增磁闭锁测试见表 4-21。

表 4-21 测试记录表

类别	内容
初始条件	AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	将发电机无功实测值置为高于用户设定的增磁闭锁高限值
验证方法	1.发电机无功高闭锁增磁光字亮
	2.下发上调母线的电压目标，AVC 子站上位机不再对发电机进行无功目标分配，发电机执行目标值维持在前一个分配的给定目标值上
	3.下发下调母线的电压目标，AVC 子站上位机将对发电机重新分配无功目标值，发电机能够按照新的执行目标值进行无功调节
	4.当发电机无功实测值复归为正常值，发电机无功高闭锁增磁光字复归
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

发电机无功低减磁闭锁测试见表 4-22。

表 4-22 测试记录表

类别	内容
初始条件	AVC 软件正常运行在控制模式下

表 4-22 （续表）

类别	内容
测试步骤	将发电机无功实测值置为低于用户设定的减磁闭锁低限值
验证方法	1.发电机无功低闭锁减磁光字亮
	2.下发下调母线的电压目标，AVC 子站上位机不再对发电机进行无功目标分配，发电机执行目标值维持在前一个分配的给定目标值上
	3.下发上调母线的电压目标，AVC 子站上位机将对发电机重新分配无功目标值，发电机能够按照新的执行目标值进行无功调节
	4.当发电机无功实测值复归为正常值，发电机无功低闭锁减磁光字复归
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

厂用电压高增磁闭锁测试见表 4-23。

表 4-23 测试记录表

类别	内容
初始条件	AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	在 AVC 下位机柜处采用保护测试仪对柜内 6kV 电压回路通电（外回路断开），将厂用电压值置为高于用户设定的增磁闭锁高限值
验证方法	1.厂用电压高闭锁增磁光字亮
	2.下发上调母线的电压目标，AVC 子站上位机不再对发电机进行无功目标分配，发电机执行目标值维持在前一个分配的给定目标值上
	3.下发下调母线的电压目标，AVC 子站上位机将对发电机重新分配无功目标值，发电机能够按照新的执行目标值进行电压调节
	4.当厂用电压实测值复归为正常值，厂用电压高闭锁增磁光字复归
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

厂用电压低增磁闭锁测试见表 4-24。

表 4-24 测试记录表

类别	内容
初始条件	AVC 软件正常运行在控制模式下
测试步骤	在 AVC 下位机柜处采用保护测试仪对柜内 6kV 电压回路通电（外回路断开），将厂用电压值置为低于用户设定的增磁闭锁低限值
验证方法	1.厂用电压低闭锁增磁光字亮
	2.下发下调母线的电压目标，AVC 子站上位机不再对发电机进行无功目标分配，发电机执行目标值维持在前一个分配的给定目标值上
	3.下发上调母线的电压目标，AVC 子站上位机将对发电机重新分配无功目标值，发电机能够按照新的执行目标值进行电压调节
	4.当厂用电压实测值复归为正常值，厂用电压低闭锁减磁光字复归
测试结果	AVC 装置能够正确按照设定的 AVC 定值进行响应

4.2.3.3 机组无功调节装置脉冲宽度整定试验 1

试验目的：验证 DCS 装置能收到增、减磁信号。

试验条件：AVC 装置处于退出状态。投入 AVC 装置上的增、减磁控制输出连片。当前机组运行正常。

试验方法：厂家人员手动由短脉冲至长脉冲逐步向机组 DCS 发出增、减磁信号，由热工人员观察 DCS 是否收到增、减磁信号。试验过程调试人员需要注意增、减磁脉冲发出情况，防止继电器结点出现粘连。如出现粘连调试人员需要立刻打开 AVC 增、减磁脉冲输出连片。

试验结论：正常。

4.2.3.4 机组无功调节装置脉冲宽度整定试验 2

试验目的：通过机组无功调节装置脉冲宽度整定试验，设定 AVC 装置“无功输出设置”中机组无功调节范围、信号输出间隔、信号最大宽度、信号最小宽度和斜率等重要参数。

试验条件：检修人员（运行人员监护）将机组 AVC 装置投入。投入 AVC 装置上的增、减磁控制输出连片。当前机组运行正常。

试验方法：由厂家人员手动由短脉冲至长脉冲逐步向机组 AVR 发出增磁信号，按照下表发送所示的机组运行方式，分别试验此脉冲信号对应的机端电压变化幅值和无功出力变化幅值。试验前需要确认增、减磁信号能够正确下发至 DCS 装置。试验过程需要注意增、减磁脉冲发出情况，防止继电器结点出现粘连。如出现粘连需要立刻打开 AVC 增、减磁脉冲输出连片。试验当中如出现机组运行异常，需立刻打开 AVC 增、减磁脉冲输出连片，并通过 AVR 装置手动调节增、减磁至正常。

试验结果见表 4-25、4-26、4-27、4-28。

表 4-25 测试记录表

1#发电机 AVC 输出的脉冲时间（毫秒）		1#发电机无功变化幅值（MVar）
增磁	1.1	2.4
增磁	2.0	4.5
增磁	3.1	6.9
减磁	1.0	2.3
减磁	2.0	4.6
减磁	3.1	6.9

表 4-26 测试记录表

2#发电机 AVC 输出的脉冲时间（毫秒）		2#发电机无功变化幅值（MVar）
增磁	1.5	3.4
增磁	3.0	6.9
增磁	2.0	4.6
减磁	0.5	1.2

表 4-26 （续表）

2#发电机 AVC 输出的脉冲时间（毫秒）		2#发电机无功变化幅值（MVar）
减磁	0.8	1.8
减磁	1.1	2.5

表 4-27 测试记录表

3#发电机 AVC 输出的脉冲时间（毫秒）		3#发电机无功变化幅值（MVar）
增磁	2.0	4.5
增磁	0.3	0.7
增磁	1.6	3.7
减磁	3.1	6.9
减磁	1.0	2.3
减磁	0.8	1.8

表 4-28 测试记录表

4#发电机 AVC 输出的脉冲时间（毫秒）		4#发电机无功变化幅值（MVar）
增磁	1.5	3.4
增磁	3.0	6.9
增磁	2.0	4.6
减磁	3.1	6.9
减磁	1.0	2.3
减磁	0.8	1.8

4.2.3.5 开环单轮调节试验

试验目的：检验 UC630 装置能够根据调节指令，正确的控制母线电压。

试验条件：机组运行正常，检修人员（运行人员监护）将 AVC 装置投入。AVC 装置增、减磁输出连片投入运行。当前母线电压及机组机端无功运行在正常范围。

全厂控制模式 1#发电机投入时测试记录见表 4-29。

表 4-29 测试记录表

实测母线电压 (kV)	母线电压目标 (kV)	机组无功实测 (MVar)	机组无功分配 (MVar)	机组无功调节结果 (MVar)
226.9	229.0	34.2	51.6	51.6
229.1	226.0	51.6	34.1	33.9

全厂控制模式 2#发电机投入时测试记录见表 4-30。

表 4-30 测试记录表

实测母线电压 (kV)	母线电压目标 (kV)	机组无功实测 (MVar)	机组无功分配 (MVar)	机组无功调节结果 (MVar)
224.8	223.0	27.4	15.2	15.3
231.4	226.5	59.7	23.1	23.1

全厂控制模式 3#发电机投入时测试记录见表 4-31。

表 4-31 测试记录表

实测母线电压 (kV)	母线电压目标 (kV)	机组无功实测 (MVar)	机组无功分配 (MVar)	机组无功调节结果 (MVar)
226.0	222.0	31.6	-9.4	-9.2
224.9	230.0	37.6	64.8	63.9

全厂控制模式 4#发电机投入时测试记录见表 4-32。

表 4-32 测试记录表

实测母线电压 (kV)	母线电压目标 (kV)	机组无功实测 (MVar)	机组无功分配 (MVar)	机组无功调节结果 (MVar)
225.4	229.0	31.5	48.9	48.7
229.0	226.0	53.7	34.2	33.9

4.2.3.6 本地开环试验总结

开环试验共设计了 4 种试验，分别是 DCS 与 AVR 互锁试验、保护试验、脉宽整定试验、单轮调节试验。

DCS 与 AVR 的互锁试验验证了第三章设计方案里的控制流程中的核心部分，确保了 AVC（DCS）对 AVR 控制的唯一性。

保护试验的基础是 4.2.1 所列的定值单，试验的目的就是确保 AVC 在运行中能够准确地根据定值单做出及时的响应，确保 AVC 系统和机组能够安全稳定运行。

脉宽试验根据实验结论能够确定 AVC 装置中机组无功调节范围、信号输出间隔、信号最大宽度、信号最小宽度和斜率等重要参数，这些参数是控制装置进行计算和下发指令进行控制的基础。

单轮调节试验是在上述试验的基础上，对 AVC 系统进行一次开环的试验。试验结果表明，AVC 装置的无功计算值符合市调的要求，无功的调节结果与 AVC 装置的计算值基本可以保持一致。当无功实际值达到目标值时，目标母线电压符合市调要求。同时在调节过程中，各参数的变化和波动均在正常范围内。

开环试验的成功为闭环试验的开展打下基础。

4.2.4 自动电压控制系统功能测试

本试验主要是测试 AVC 装置的监视、报警、记录等计算机功能，具体见表 4-33。

表 4-33 测试记录表

AVC 子站功能试验项	试验结果
AVC 子站装置支持闭环（自动分配、自动控制）、开环（整体退出控制）控制模式	通过
AVC 子站装置支持操作权限管理功能	通过
AVC 子站装置计算分析功能。应采用成熟的算法（包括等功率因数、无功功率等比例分配、相似调整裕度等），根据选定的优化策略给出全厂的无功需求，并进行各机组的无功功率分配	通过

表 4-33 （续表）

AVC 子站功能试验项	试验结果
AVC 子站装置具备数据存储功能，可存储采集的数据点并形成历史数据库，用于绘制趋势曲线和形成报表。数据采样周期可用用户自定义	通过
AVC 子站装置具备 SOE 报警功能。当发生事故时，以秒级进行数据存储	通过
AVC 子站装置具备监视功能。能方便地监视 AVC 子站的运行工况，母线电压、发电机机端电压/有功功率/无功功率/电流、开关状态、设备运行状态、与其他设备的通信状态，能对一些关键状态进行监视，包括对应各机组的投入/切除信号、对应各机组的增/减励磁信号、对应各机组的增/减励磁闭锁信号	通过
AVC 子站装置具备报警处理和事件记录功能，AVC 子站运行异常或故障时能自动报警，自动闭锁调控输出，并对 AVC 子站告警、闭锁原因、人员操作等形成事件记录。	通过
AVC 子站装置具备 GPS 对时功能，应具有接收当地 GPS 时间信号的功能，也可以接收 AVC 主站的广播对时信号，保证系统时间统一	通过
AVC 子站装置具备全厂控制模式下，当远方调节时，AVC 子站在规定的主站控制周期内未收到主站命令应报警并自动转为本地控制	通过
AVC 子站装置系统管理和参数设置功能，能够进行各类参数的维护	通过
AVC 子站装置具备计算统计和报表功能，对遥测量进行最大/小值及发生时刻等统计，并形成报表	通过
画面显示与维护功能，可以方便地绘制各类图表	通过
AVC 子站装置具有防止继电器接点粘连的功能	通过
AVC 子站装置具备指令校核功能，子站可对主站下发的控制目标、控制用的基础量测进行校核，并将接收到的控制命令返送主站	通过
AVC 子站装置具有闭锁调节和限制调节功能，参数超出闭锁限值时，则闭锁调节；若参数未超出闭锁值，仅超出控制限值时，到上限时，禁止增输出，开放减输出，超下限时，禁止减输出，开放增输出	通过

4.2.5 自动电压控制系统闭环测试

开环测试完成后，要进行闭环测试。闭环测试时 AVC 系统根据调度下发的电压曲线按照相应的机组无功分配原则调节母线电压。本地闭环测试完成后，进行 72 小时的远方闭环测试，主要内容如下：调度下发远方电压目标值（功能测试，远方控制方式下的通讯及通讯中断保护功能测试。

在完成了上述的调节过程之后，AVC 装置通电长时间运行，检查系统硬件有无异常，后台工控机运行无异常后，即可正式投入运行。

试验条件：四台机 AVC 装置处于投入状态。机组运行正常。投入 AVC 装置上的增、减磁控制输出连片。

检查 AVC 系统无报警信号或闭锁信号产生。检查 DCS 或 AVR 发出的运行正

常信号是否正常。查看当前机组的无功目标与实测值之间的关系，并核对增减磁状态。查看现场 DCS、后台机的无功功率的变化情况。时时观察现场每台发电机组的运行情况，确保机组安全运行。观察母线电压进入死区后，无功功率的变化情况，可根据此时观察的数据来确定无功的死区值。观察母线电压从当前值到目标值的变化过程，以确定调节时的速度控制。在现场运行稳定后，连续运行 48 小时并观察，针对现场的特点，填写母线电压报警参数、闭锁参数和发电机机端电压、厂用电电压的报警、闭锁参数。

4.3 石景山热电厂自动电压控制系统的运行

分别选取有代表性的母线电压高峰、低谷段记录的相关数据予以说明。

(1) 某日高峰时段运行数据和曲线分别见表 4-34、图 4-1。

表 4-34 数据记录表

高峰 时间	系统电压 (kV)	发电机无功 (MVar)	发电机定子电 压 (kV)	6kV 七段电压 (kV)	6kV 八段电压 (kV)
10:20— 12:00	228.7	51.5	15.64	6.3	6.384
15:00— 22:00	228.252	46.218	15.59	6.279	6.358

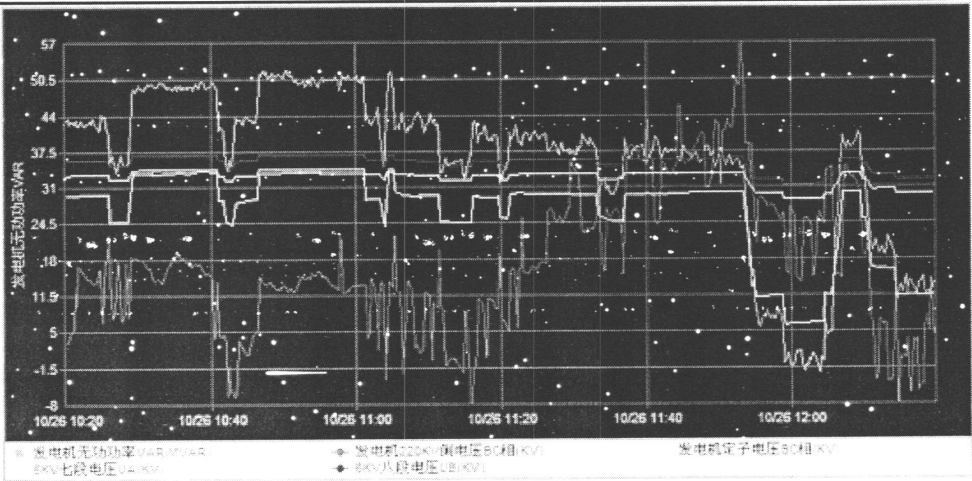


图 4-1 数据曲线图

时间段取自 2013 年 10 月 26 日 10:20-12:20 的区间。10:20-12:00 是母线电压高峰期，12:00-12:20 是母线电压平峰期。

在母线电压高峰期，系统电压目标值的平均值是 228.7kV，可以认为系统电压在围绕这个值上下波动。伴随着这种波动，AVC 通过对 AVR 增减励磁的操作，不断控制无功功率的变化，根据市调要求维持着目标母线电压。

在高峰期过渡到平峰期的过程中，从曲线上可以看到，在 AVC 的控制下，无功功率迅速减小，以跟踪目标母线电压的变化。在这个过程中，从去上上还可以看到，厂用电母线电压一直维持在合理的参数范围，说明这种 AVC 的控制不仅满足了市调的要求，同时也能满足机组厂用电的安全稳定运行。

(2) 某日低谷时段运行数据和曲线分别见表 4-35、图 4-2。

表 4-35 数据记录表

低谷时间	系统电压(kV)	发电机无功(MVar)	发电机定子电压(kV)	6kV 七段电压(kV)	6kV 八段电压(kV)
1:00—1:40	225.7	8.023	15.134	6.182	6.056

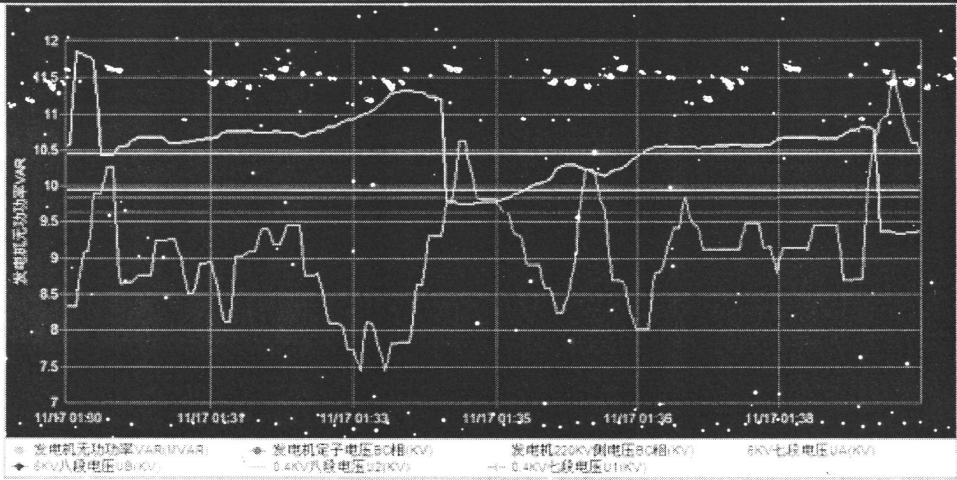


图 4-2 数据曲线图

波谷的无功调节与电压控制在本质上与波峰时是一样的。波谷时的无功调节往往因为目标母线电压低而出现发变组进相运行的情况。对于电压控制来说，此时比较危险的是目标母线电压低带来的厂用电母线电压低。厂用电母线电压过低，会引起电磁接触器失电脱扣，造成 380V 母线上运行的设备跳闸。因此在实际运行中设置了厂用电母线电压低的闭锁。因此，在低谷运行时，需要比高峰运行时更加关注厂用电母线电压值。从图形和数据上可以看出，无功功率的调节以及高低压厂用电母线电压均在正常参数范围。

4.4 石景山热电厂投运自动电压控制系统后的收益分析

从对北京电网的角度来看。石景山热电厂投运 AVC 系统以后，改变了以往市调统一制定电压曲线，将电压调节寄托于人工调整的旧有模式。新的实时的电压控制更能反应出电网的实时运行状态，拥有更高的调节精度，更好的电能质量。同时，可以在投运 AVC 系统的各电厂之间加强无功负荷的分配与协调，增加了电网运行

的经济性。

从对石景山热电厂的角度来看。投运 AVC 系统之后，首先是结束了发电运行人员全天候实时在线监控手动增加励磁调节的旧有模式，降低了运行人员的劳动强度。同时，投运 AVC 系统能够提高了电压合格率。根据北京电网对 AVC 的考核与补偿收益，如表 4-36 所示，1 至 3 月份，石景山热电厂的 AVC 收益均为正收益，说明投入 AVC 系统后，确实提高了电能质量，得到了电网公司的认可。

表 4-36 石景山热电厂 2014 年 1 至 3 月份 AVC 系统收益

发电企业	1 月（万元）	2 月（万元）	3 月（万元）
石景山热电厂	0.557621	1.2407	1.05595

4.5 本章小结

本章首先从第三章的石景山热电厂的设计方案出发，介绍了根据这个方案最后确定的设备选型及其基本介绍。其次，本章的中心内容是对这套系统进行测试，以验证这套 AVC 系统符合电厂 AVC 的设计方案，能够实现对目标无线电压和机组无功功率的控制。

本章完整复现了石景山热电厂 AVC 系统的调试和试验工作。调试从确定 AVC 系统安全约束条件定值单入手，根据定值单从本地仿真、开环测试、功能测试、闭环测试等四个方面对这套系统进行了试验，试验结果是能够满足石景山热电厂自动电压控制的需求，可以投入运行。

本章最后选取投运后的典型曲线，包括高峰期、低谷期以及他们之间的过渡期的参数曲线，对 AVC 系统的控制效果进行了分析。可以看到，AVC 系统能够完成对目标母线电压的跟踪，能够正确计算各机组的无功功率，并能够正确地给各机组 AVR 下发增减磁指令，最终完成对目标电压的闭环控制。

第 5 章 总结与展望

本文的主要研究工作是石景山热电厂自动电压控制系统投运的设计、调试和应用。本项工作的主要成果有以下三点：

一是根据石景山热电厂现场需求，提出了自动电压控制系统的实现方案，从数据采集方式、闭环控制方式、安全约束策略等多个方面对各种可能的选择进行了分析比较，最终提出了一套适合于石景山热电厂的方案。石景山热电厂的设计方案对其他需要进行 AVC 系统设计或改造的电厂，具有很好的借鉴意义。

二是设计了自动电压控制系统的调试方案，并通过调试验证了这套自动电压控制系统能够满足电网和电厂对无功电压调节的需求。调试方案涵盖了仿真测试、功能测试、开环测试、闭环测试等多方面，并完整复现了整个调试的过程，并对各项试验的结果进行了分析，对于其他电厂自动电压控制系统的投运具有普遍的指导或参考意义。

三是通过投运自动电压控制系统，为电网和电厂都带来了收益，提高了电能质量，促进了电网的经济运行，也保证了电厂机组的安全运行，并给电厂创造了经济效益。

在以后的工作中，有些问题还需要进一步完善和研究。主要包括：

一是收集 AVC 系统投入闭环运行后的各项数据，对 AVC 系统闭环控制策略和效果进行深入分析，尤其是对闭环运行期间各项安全策略定值及执行情况的合理性进行论证，提出修改意见。

二是对目前 AVC 系统的闭环控制算法还需要进一步地研究，不断地优化提高母线电压合格率。

三是 AVC 系统是一项复杂的庞大的系统工程，其复杂程度远大于 AGC 系统，在中国刚刚推广十年左右，在之后的运行过程中还需要不断积累经验，总结教训，特别是机组解列等极端情况下对其他机组 AVC 正常运行的影响，还需要进一步地积累数据去分析。

参考文献

- [1] 黄伟.浅谈 AVC 系统及其应用[J].建材与装饰,2012,9:25-26
- [2] F R Graf. Real time application of an optimal power flow algorithm for reactive power allocation of the RWE energy control center. International Practices in Reactive Power Control[J], IEE Colloquium on. 1993,1:265-267
- [3] Francisco Castro, Gabriel Llort, Michele Pescina. Reliability Improvement of the Guri Hydroelectric Power Plant ComputerControl System AGC and AVC[J]. IEEE Trans on Power Sys-Tems,1992,7(3):447-452
- [4] J P Paul, J Y Leost, J M Tesson. Survey of the Secondary voltage Control in France: Present Realization and Investigation[J]. IEEE Transaction on Power System. 1987,2(2):505-512
- [5] J Van Hecke, N Janssens, Deuse J et al. Coordinated Voltage Control Experience in Belgium[C]. Paris: CIGER Session, 2000:526-530
- [6] Shengwei Mei, Bangpeng Xie, Wenyan Che. Hybrid automatic voltage control strategy and its application to Northeast China 500 kV power grid[J]. European transactions on electrical power, 2009,19(3):173-175
- [7] P.Lagonotte, J.C Sabonnadiere, J Y Leost. Structural Analysis of the Electrical System[J] Application to Secondary Voltage Control in France. 1989,6:43-46
- [8] Liu Hongliang. Research on Smart Automatic Voltage Control Smart AVC[J]. European transactions on electrical power, 2012,3:101-102
- [9] A.Stankovic, M.Ilic, D. Maratukulam. Recent Results in Secondary Voltage Control of Power Systems[J]. Journal of Power Flow 1991(1):145-146
- [10] 丛林.1000MW 机组 AVC 运行方式及调试方法探讨[J].科技创新与应用,2012,12:37-38
- [11] 胡伟,李海峰.AVC 应用于江苏电网的初步研究[J],无功/电压学术研讨会论文集[C].北京:中国电力出版社,2003:17-19
- [12] 关国杰.AVC 装置在 390MW 燃气蒸汽联合循环机组中的应用[J], 中国水运(下半月) .2010,10:34-37
- [13] 黄础晓.自动电压控制系统(AVC)在罗定电厂的应用[J].科学时代,2012,(1):67-68
- [14] 王会霞,曾宇,谢秋华.三峡水电站机组无功调节原理及其运行情况分析[J].水力发电,2007,33(12):55-57
- [15] K R Mamandur, R Chenoweth.Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and Real Power Losses Minimization[J].IEEE Transactions on Power Systems, 1981,VL00(7):419-430

- [16] Hano.Real Time Control of System Voltage and Reactive Power[J].IEEE PAS-88,1969(1):267-272
- [17] 吴卫军.火力发电厂自动电压控制(AVC)系统升级改造应用[J].中国科技博览.2012,(1):40-42
- [18] 张淑敏,刘春雷.自动电压控制(AVC)系统在陡河电厂的应用及调试[C].全国火电300MW级机组能效对标及竞赛第四十一届年会论文集.北京:中国电力出版社,2012:142-143
- [19] 李端超,陈实,吴迪.安徽电网自动电压控制(AVC)系统设计与实现[J].电力系统自动化,2004,28(8):11-13
- [20] 郝飞,黄凯,刘吉臻.电厂侧电压无功控制系统的分析研究[C].江苏省电机工程学会2009年电网电能质量控制与监测学术交流会论文集,北京:中国电力出版社,2009:227-229
- [21] 许文超,郭伟,李海峰.AVC应用于江苏电网的初步研究[J].继电器,2003,31(5):23-26
- [22] 郭庆来,张伯明,孙宏斌.电网无功电压控制模式的演化分析[J].清华大学学报(自然科学版),2008(01):36-39
- [23] 殷骏.无功自动调控装置在AVC系统中的应用[J].华东电力,2005,09:51-53
- [24] K Y Lee,J L Ortiz,Y M Park.A United Approach to optimal Real and Reactive Power Dispatch[J].IEEE PAS-104(5),1985(2):1147-1153
- [25] Van Hecke J,Janssens N,Deuse J,et al.Coordinated Voltage Control Experience in Belgium[R].Paris:CIGER Session,2000
- [26] Hughts A,Jee G Hsiang.P-Optimal Reactive Power Planning[J].IEEE PAS-100,1981(5):121-126
- [27] M D Ilie.Seondary voltage control using pilot information[J].IEEE Transaction Power System,1998,V3(2):660-668
- [28] Bridenbaugh,Dimascio,D Aquila.Voltage Control Improvement Through Capacitor and Transformer Tap Optimization[J].IEEE Trans On Power System,1992,V7(1):222-227
- [29] K R Mamandeur,R D Chenoweth.Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and Real Power Losses Minimization[J].IEEE Transactions on Power Systems,1981,VL00(7):419-430
- [30] M Ilic,X Liu.Improved Secondary and New Teriary Voltage Control[J].IEEE Transactions on Power System,1995,V10(4):1851-1862
- [31] S Coils,M Pozzi,C Sabelli,et al.The coordinated automatic voltage control of the Italian transmission d,Part I and Part II[J].IEEE Trans on Power Systems,2004,V19(4):1723-1741
- [32] Lagonotte P,Saboanadiere J C,Leost J Y,et al.Structural Analysis of the Electrical

- System:Application to Secondary Voltage Control in France[J].IEEE Trans on Power Systems,1989,V4(2):479-486
- [33] 李兴源.电网电压无功监测系统的设计[J].四川电力技术,2002,25(2):33-34
- [34] Vu H,Privot P,Launay C.An Improved Voltage Control on Large-scale Power System[M], 1996(3):397-399
- [35] 陆玉军,李澄,李群.电厂侧 AVC 调控的实现方法[J].江苏电机工程,2008,27(2):73-75
- [36] 王治国,刘吉臻,谭文.基于快速性与经济性多目标优化的火电厂厂级负荷分配研究[J].中国电机工程学报,2006,26(19):86-92
- [37] 田丰,余天龙,欧坚.基于经济性和可靠性的机组负荷最优调度[J].电站系统工程,2001,17(1):23-26
- [38] 侯云鹤,鲁丽娟,熊信良.改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用[J].中国电机工程学报,2004,24(7):95-100
- [39] 苏辉,文劲宇,罗春风,等.含有非线性环节的发电机励磁系统参数辨识[J].电力系统自动化,2005,29(6):66-70
- [40] 刘增煌,吴中习.电力系统稳定计算研究用励磁系统数学模型库[J].电网技术,1994,18(3):6-11
- [41] He T,Krishnamurthy S,Luo L,et al.An integrated sensor network system surveillance [J].ACM Transactions on Sensor Networks,2006(1):1-38
- [42] Kemal A,Mohamed Y.A survey on routing protocols for wireless sensor networks[C].In:Ad Hoc Networks,2005:325-349
- [43] 钱康龄,纪红,李芳红,等.分布式电压无功全局优化控制系统的研制与应用[J].现代电力,2004,21(4):29-32
- [44] 程莹,刘明波.含离散控制变量的大规模电力系统无功优化[J].现代电力,2002,19(5):34-38

攻读硕士学位期间发表的学术论文及其它成果

发表的学术论文

[1]王晓磊.锂电池储能技术参与 AGC 调节的应用[J].中国科技纵横,2013,8(下):41-43

致 谢

本文是在姜彤教授和企业导师胡冬来老师的悉心指导下和关怀下完成的。两位老师严谨的治学态度、忘我的工作精神让我受益非浅。在石景山热电厂 AVC 系统从设计到投运，胡冬来老师以他丰富的经验给予我很多悉心的指导和中肯的意见。在论文写作和完成过程中，姜彤教授给予我很多电气理论知识方面的指导，为我提供了很多参考资料，是我的论文得以顺利完成，并从中收获很多。感谢两位老师的帮助。

作者简介

1984 年 08 月 18 日出于北京市。

2002 年 09 月考入清华大学电机系电气工程专业，2007 年 01 月本科毕业并获得工学学士学位。

工作经历：

2006.07-2010.01 中国电力科学研究院

2010.01- 北京京能电力股份有限公司