

# 苏州地区电网电压无功优化系统的应用实践

姜学宝, 江卫中

(江苏省电力公司苏州供电公司, 江苏 苏州 215004)

**摘要:** 介绍了苏州地区变电站电压无功控制的现状以及电压无功优化系统的建设背景,设计了一套基于全局电网范围的电压无功优化系统,详细分析了该系统的硬件构成及网络的安全构成方式,接着分析了该系统的数学模型、最优的算法设计以及软件设计流程,还详细说明了系统的安全闭锁功能设计,最后阐述了该系统实现的功能以及在苏州市区电网的实际应用效果。

**关键词:** 电压质量; 无功优化; 安全闭锁; 应用效果

**中图分类号:** TM714.3      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1003-4897(2006)06-0038-05

## 0 引言

电力系统的无功补偿与无功平衡是保证电压质量的基本条件,有效地控制和合理的无功补偿,不仅能保证电压质量,而且能提高电力系统运行的稳定性和安全性,降低电网电能损耗,提高电网设备输电能力,充分发挥电网运行经济效益。

虽然苏州地区部分变电站已单独实现了电压调节和无功补偿的自动控制,但大部分变电站仍是手动调节控制,只能做到“就地最优”而不能做到“全网最优”,而且投资大,运行维护费用高。另外还存在明显的缺点:(1)增加了运行人员的监视和操作工作量;(2)运行人员不能准确选择最合理的调节方式;(3)运行人员调节不及时。为了提高劳动生产率,减轻运行人员的劳动强度,提高电压质量,降低电网损耗,苏州供电公司开发设计了一套基于无人值班变电站集中监控系统的电压无功优化系统(以下简称电压无功优化系统)。该电压无功优化系统基于 Windows 2000 Server 操作系统平台设计,采用 SQL Server 数据库,软件的开放性、可移植性较强,容易推广应用。

电压无功优化系统通过与市区无人值班变电站计算机集中监控系统<sup>[1]</sup>(以下简称无人值班变电站监控系统)的数据通信接口,采集市区全网各节点运行电压、有功功率、无功功率、变压器运行的档位等实时数据,以各节点电压合格为约束条件,以电网电能损耗最小为目标,利用模糊算法和专家系统进行电网潮流计算分析,得到有载调压变压器运行的最佳档位和电容值,从而形成有载变压器分接开关调节和无功补偿设备投切控制指令,然后利用无人

值班变电站监控系统的“四遥”功能实现市区电网 220 kV 及以下电压等级的电压无功优化的在线闭环控制。

## 1 电压无功优化系统的组成

电压无功优化系统主要由硬件和软件两个部分组成,硬件部分主要由电压无功优化服务器和三台远程工作站组成,软件部分主要包括无功优化数学模型、数据采集、电压及无功优化计算和处理、控制执行等模块。

### 1.1 电压无功优化系统的硬件构成

根据苏州市区无人值班变电站计算机集中监控系统的配置目标和运行管理要求<sup>[1]</sup>,电压无功优化系统同样地采用主站-分站的网络配置方式,形成一台以电压无功优化服务器为核心三台远程电压无功优化工作站(苏园、苏虹及苏新监控中心各设一台)的集中控制模式,系统的网络连接示意图如图 1 所示。

根据国家电力二次系统安全防护的要求,电压无功优化系统的设备和网络全部位于安全区,三台电压无功优化远程工作站通过专用网络通道与电压无功优化服务器进行数据交换,网络接入采用三层网络交换机,使用了交换机的 MAC 地址和 IP 地址绑定功能杜绝了人为非法接入无功优化网络的可能,保证了电压无功优化系统网络运行的安全可靠。为了减轻无人值班变电站监控系统 #1 服务器(szb01-1)的运行负担,电压无功优化系统服务器采用与无人值班变电站监控系统的 #2 服务器(szb02-1)进行数据接口,在这两者中间采用路由器进行物理隔离,通过在路由器上设置详细的访问

控制列表,只允许 szb02 - 1服务器和 TOP3000无功优化服务器的某些特定的端口进行数据通信,减少两者之间可能存在的影响和干扰。

电压无功优化系统的服务器放置在调度通信中心远动机房(即调度自动化系统的主站端),负责从无人值班变电站监控系统的#2服务器(szb02 - 1)采集市区全网各节点的运行电压、有功功率、无功功率等实时运行数据,并采集各远程电压无功优化工作站的设置参数,然后进行无功优化计算、电压优化计算、无功电压综合优化计算后,形成有载调压变压器分接开关调节指令、无功补偿设备投切指令等相关控制信息,然后将控制信息发送至无人值班变电站监控系统执行,同时将执行的结果和告警信息发往各电压无功优化工作站,此后循环往复。

该电压无功优化系统功能的实现无需在变电站独立设置VQC单元(目前苏州市区也只是极少数变电站设置VQC单元,不能采用文献[7]所说的区域电网电压无功优化模式),只需计算出优化后的各变电站的有载变压器的运行档位和电容器的投切信息,由无人值班变电站监控系统完成执行操作任务(可直接对变电站所有无功补偿设备进行遥控操作,不需要通过变电站的独立VQC单元执行)。在各台电压无功优化远程工作站上需要设定各节点电压的上、下值,输入变压器和无功补偿设备的参数信息及相关的控制信息。在电压无功系统或者电网设备出现运行异常时监控中心值班员可以在电压无功优化远程工作站上进行变电站电容器及有载变压器分接开关的封锁和变电站的封锁等操作,保证电压无功优化系统的运行的可靠性和电网运行的安全性。

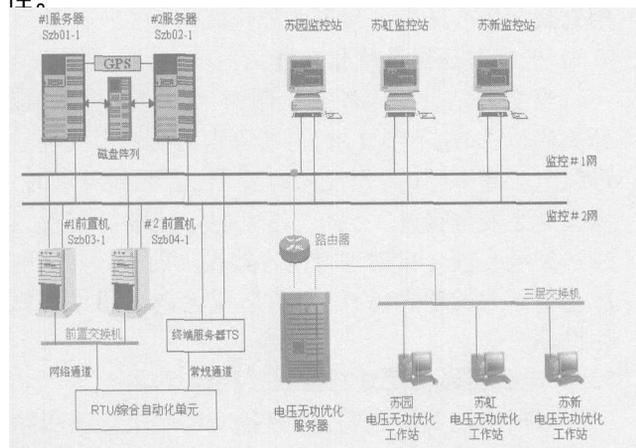


图1 电压无功优化系统的网络连接示意图

Fig 1 Sketch map of network link of optimization and control to voltage/reactive power

## 1.2 电压无功优化系统的软件组成

电压无功优化系统的软件组成主要包括电压无功优化的模型设计、算法选择和设计、综合优化设计等部分构成。

### 1.2.1 电压无功优化的模型设计

我们在设计这套电压无功优化系统时主要考虑以下四个原则:实现市区电网最大范围的电压合格(优先条件),实现市区电网电能损耗尽可能小,实现市区电网设备动作次数尽可能少,所有的遥控操作符合国家电网公司电力安全工作规程(变电站和发电厂电气部分)、变电站现场运行规程、苏州电力系统调度规程。按照这四个原则,我们设计了如下电压无功优化数学模型。目标函数要达到全局电网的电能损耗最小以及设备动作次数最少,同时要满足四个方面的约束条件。

#### 1) 目标函数

全网电能损耗最小的目标函数

$$P = \min \sum_{i=1}^n f_1(U_i, K_i, Q_i),$$

$$\text{其中 } U_i = f_2(K_i \dots K_T, Q_1 \dots Q_i) \quad (1)$$

设备动作次数最少目标函数

$$N = \min \sum_{i=1}^n [f_3(K_i - K_T) + f_4(Q_i - Q_c)] \quad (2)$$

其中: $U_i$ 为变电站母线电压; $K_i$ 为变电站主变分接开关应处档位数; $Q_i$ 为变电站应投无功补偿容量; $K_T$ 为主变当前分接开关档位数; $Q_c$ 为变电站所配电容器容量; $n$ 为变电站个数。

#### 2) 四个约束条件

母线电压不越限

$$U_{\min} \leq |U_i| \leq U_{\max}$$

有载调压开关每天动作次数不越限

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{24} f_3(K_{ij} - K_{Tj}) \leq N_T$$

电容器每天投切次数不越限

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{24} f_4(Q_{ij} - Q_{Cj}) \leq N_C$$

供电电源关口功率因数合格

$$\sum_{i=1}^n Q_i = P [ \text{tg}(\arccos \phi_1) - \text{tg}(\arccos \phi_2) ]$$

### 1.2.2 电压无功优化系统的软件设计

电压无功优化系统首先从无人值班变电站监控系统采集市区全网实时运行数据,然后以全电网电能损耗最小为目标函数,利用潮流计算、专家系统、

数值分析等方法,求解有载主变分接头的最佳档位数、电容器最佳投入容量和电网最优运行电压等。再利用已求最优解,求得电容器投切次数和主变分接开关调节次数。限定全网网损最小数值范围,在最小数值范围内,多次求得次优解,再计算电容器投切次数和主变分接开关调节次数,当动作次数最少时对应的解即为最优解。然后发出控制指令,执行电容器投切与主变分接开关调节操作。软件设计的流程如图 2 所示。这里的电压无功优化计算不是采用常规的电压无功优化“九区法<sup>[5]</sup>”、“十六区法<sup>[3]</sup>”,也没有进行复杂的潮流计算,而是利用由数学模型中的公式(1)和公式(2)预先形成的专家知识库和规则库进行计算,从而形成有载调压变压器档位和电容器投切容量的最优值,然后转化成无人值班变电站监控系统可以识别的指令(通过两者的数据通信接口实现),利用无人值班变电站监控系统的遥控功能实现有载调压变压器的档位调节(我们采用的是档位遥信组合成遥测档位的计算方式)和电容器的投切。例如:主变压器分接头与电容器的电压优化一个操作条件为  $U_1 - BX + U_2$ , 其中  $U_1$  指电容器投入前的电压实际值,  $U_2$  指允许电压上限值,  $U$  指由电容器投入引起的电压升高值,  $B$  为主变分接头调节折算到低压侧每档电压差,常取 0.25 kV 或 0.125 kV,  $X$  为主变分接头操作档数;  $U$  由第一次投入电容器引起的电压升高值的实际测量取得。

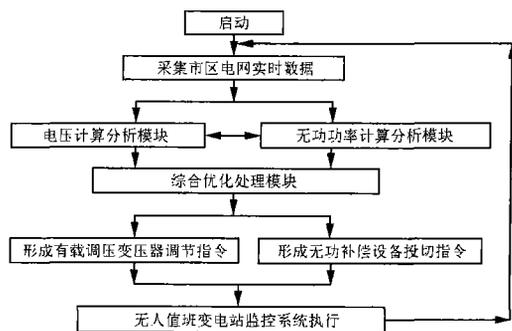


图 2 软件设计流程图

Fig 2 Flow chart of software design

## 2 电压无功优化系统的安全闭锁功能设计

系统的安全可靠运行需要严密周到的安全闭锁功能设计,在系统和设备出现任何异常时均可靠不动作。所以我们主要在以下几个方面进行了详细的考虑和设计。

1) 在遇到主变压器分接头开关、电容器开关、

通信链路及系统中出现各种异常状态不允许执行操作指令时,该系统能自动闭锁,且必须人工解锁。

2) 10 kV 发生单相接地时电容器自动闭锁。

3) 系统数据不刷新自动闭锁。采用“遥测”与“遥信”联判方式,确信“遥信”量的真伪,避免误动作。

4) 在数据传输的接口程序上我们设计了数据“回校”功能,即网络传输数据接受方向必须再向传输方进行一次数据返送校验,以进一步核实数据传输的正确性。

5) 厂、站、点号的调整全部严格保证电压无功优化系统中的数据库与无人值班变电站监控系统数据库的一致性。手动操作时,应首先对电压无功优化系统进行闭锁。

## 3 电压无功优化系统实现的功能

### 3.1 全网无功优化补偿功能

当地区电网内各级变电站电压处在合格范围内,控制本级电网内无功功率流向合理,达到无功功率分层就地平衡,提高受电功率因数。同电压等级不同变电站电容器组根据计算决策谁优先投入;同变电站不同容量电容器组根据计算决策谁优先投入。

### 3.2 全网电压优化调节功能

当无功功率流向合理,变电站母线电压超上限或超下限运行时,分析同电源、同电压等级变电站和上级变电站电压情况,决定是调节本变电站有载主变分接开关还是调节上级电源变电站有载主变分接开关档位。电压合格范围内,实施逆调压;实施有载调压变压器分接开关调节次数优化分配;实现热备用有载调压变压器分接开关档位联调。

### 3.3 无功电压综合优化功能

当变电站母线电压超上限时,先降低主变分接开关档位,如达不到要求,再切除电容器;当变电站母线电压超下限时,先投入电容器,达不到要求时,再提高主变分接开关档位,尽可能保证电容器投入量达到最合理。自动进行电容器投入前后的母线电压是否越限的预先计算,避免造成无功补偿设备投切振荡。

### 3.4 电容器最优配置与在线损耗计算功能

根据电网实际负荷,计算各变电站电容器单组或多组容量最优配置值,为改造或新增电容器数量和容量提供理论依据。能实现电网电能损耗在线计算,并实时报告,为电网实现经济调度提供一定的理

论支持。

### 3.5 多种报警方式及控制信息管理功能

该系统具有多种报警方式,可以选择语音报警、光子牌报警等,用来提示和通知值班人员注意某一变电站的操作执行情况。控制信息管理功能主要记录包括以下五个方面的内容:设备动作记录表,此表记录了无功电压优化运行自动控制系统每一次动作的执行时间、执行内容和执行原因;开关动作次数汇总表,此表记录了主变分接开关、无功补偿设备开关每年每月每日动作次数,为最大限度的发挥设备潜力和设备检修提供了依据;设备动作失败或不正常动作情况表,此表提供了设备“四遥”功能执行情况;电压曲线分析表;有功功率、无功功率、功率因数分析表。

## 4 应用效果

目前苏州市区无人值班变电站监控系统设有苏园、苏虹、苏新三个监控中心,管理9座220 kV变电站、27座110 kV变电站及2座35 kV变电站。电压无功电压优化系统仿照无人值班变电站监控系统的配置情况也同样设置苏园、苏虹、苏新三个电压无功优化控制终端,自2004年7月起已在苏州市区正式投入运行,对苏州市区38座220 kV及以下变电站实时进行全网电压无功优化集中控制,完成变电站有载调压变压器及电容器的集中自动控制,以苏园监控中心(主要监视和控制中国-新加坡苏州工业园区内的220 kV及以下的电网,共计5座220 kV变电站、8座110 kV变电站及1座35 kV变电站)的电压无功优化控制为例,运行实践表明电压无功优化系统设计先进合理,运行稳定可靠,产生的经济效益和社会效益十分可观,归纳起来有以下几个方面。

1)该系统的投入使得苏州市区变压器有载分接开关调节次数由以前平均每天每台10次下降到8次左右,减少了有载调压变压器分接开关动作次数近20%,提高了设备使用寿命,减轻了检修劳动强度,受到了设备主人的支持。

2)据统计,自从系统投入运行后苏州市区220 kV变电站高峰负荷时的力率由原来的0.89提高到0.97,明显提高了地区受电功率因数,增加了输电设备出力。

3)系统成功使用后,苏州市区电网10 kV母线电压合格率与去年同比平均提高了1.08个百分点,市区电网网损与去年同比降低了0.36个百分点,减少电能损耗,取得了明显的降损节能效益,同时提高

了电压质量。

4)本系统由纯计算机软件构成,免除了硬件维护,具有投资少的特点。控制系统安全可靠,自适应功能强,能自动纠错、自动闭锁、自动形成相关动作数据等,不会发出影响电网与主设备安全的操作指令;发出控制命令自动进行校验,若有拒动或者变压器滑档则立即加以闭锁。

5)系统能准确地统计了主变分接开关、电容器开关每年每月每日动作次数,为最大限度的发挥设备潜力和设备检修提供了依据,同时促进了电容器的配制、电容器投切开关的更新、有载变压器覆盖面的扩大及其有载分接开关的性能的提高。

## 5 结束语

苏州地区的电压无功优化系统从全电网角度进行无功电压优化控制,实现了主变分接开关调节次数最少、电容器开关投切次数最少和电压合格率最高,还实现了输电网损率最小,减少了变电站值班人员的劳动强度,避免人为误差,全面改善和提高了电网电压质量,提高了设备出力,进一步提高了电网调度自动化水平。随着苏州地区无人值班变电站改造的完成,苏州地区六个县调都将采用类似苏州市区无人值班监控系统结构模式的调度监控一体化调度自动化系统,因此基于该模式的电压无功优化控制系统必将在苏州地区电网的运行中产生巨大的经济效益和社会效益,对于提高企业的现代化管理水平,实现各变电站的安全运行、优化调度和提高电力输送效率起到较大的推动作用。随着苏州地区电网的快速发展和电网规模的扩大,电压无功优化系统将采取双机热备的运行方式,进一步提高系统运行的可靠性和安全性,同时我们还要依靠科技进步,不断完善和改进苏州地区电压无功优化系统的功能,为实现电网运行安全、经济、优质、高效发挥更大作用。

### 参考文献:

- [1] 赵家庆. 220 kV无人值班变电站远方监控系统建设[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 78-80.  
ZHAO Jia-qing. Computer Centralized SCADA System Construction on Unmanned Substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 78-80.
- [2] 李兴源,刘俊勇,刘晓川. 电网电压无功监控系统的设计[J]. 四川电力技术, 2002, (2): 3-5.  
LIXing-yuan, LU Jun-yong, LU Xiao-chuan. Design of Voltage and Reactive Power Supervisory Control System in Power System

- [J]. Sichuan Power Technology, 2002, (2): 3-5.
- [3] 张新华, 舒乃秋, 薛发明. 基于 SCADA 的无功电压自动控制系统 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (11): 81-85.  
ZHANG Xin-hua, SHU Nai-qiu, XUE Fa-ming. Voltage and Reactive Power Automatic Control System Based on SCADA in Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (11): 81-85.
- [4] 丁晓群, 陈晟, 许杏桃, 等. 全网无功电压优化集中控制系统在泰州电网的应用 [J]. 电网技术, 2000, 24 (11): 21-23.  
DING Xiao-qun, CHEN Cheng, XU Xing-tao, et al. Application of Optimization and Centralized Control System for Reactive Power/Voltage in Taizhou Power Network [J]. Power System Technology, 2000, 24 (12): 21-23.
- [5] 郑爱霞, 张建华, 李铭, 等. 地区电网电压无功优化控制系统设计与运行 [J]. 江苏电机工程, 2004, 23 (1): 32-35.  
ZHENG Ai-xia, ZHANG Jian-hua, LI Ming, et al. Exploitation and Application of Voltage-Var Optimizing Control System of Local Power Net [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2004, 23 (1): 32-35.
- [6] 徐晓燕, 刘小明. 电压无功功率自动控制器动作判据 [J]. 江苏电机工程, 2001, 20 (4): 41-45.  
XU Xiao-yan, LU Xiao-ming. Operation Criteria of Automatic Voltage/Var Controller [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2001, 20 (4): 41-45.
- [7] 吴强. 区域电网电压无功优化控制系统的开发与应用 [J]. 现代电力, 2003, 20 (3, 4): 54-58.  
WU Qiang. Developing and Application of District Power Network Voltage Reactive Power Optimization Control System [J]. Modern Electric Power, 2003, 20 (3, 4): 54-58.

收稿日期: 2005-07-21; 修回日期: 2005-09-06

作者简介:

姜学宝 (1977-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电网调度的技术工作; E-mail: xuebaojiang@sina.com

江卫中 (1964-), 男, 高级工程师, 从事电网无功、线损及电压质量的技术管理工作。

### Application and practice of optimization system for voltage and reactive power in Suzhou district power network

JANG Xue-bao, JANG Wei-zhong

(Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China)

**Abstract:** The status quo of control of voltage and reactive power of substations and construction situation of optimization system for voltage and reactive power in Suzhou district power network are introduced in this paper, and the optimization system based on the whole Suzhou district power network is developed. This paper analyzes its hardware constitution and network security constitution way, then presents mathematics model, arithmetic design, software design flow, and details safety blocking function design. And its practical function and real application effects in Suzhou city power network are illustrated as well in the end.

**Key words:** voltage quality; reactive power optimization; safety blocking; application effect

(上接第 23 页 continued from page 23)

作者简介:

张海 (1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护的新原理新技术; E-mail: zhwp3000@163.com

徐玉琴 (1964-), 女, 硕士, 教授, 从事电力系统继电保护与控制的的教学研究工作;

白嘉 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事继电保护新原理与新技术方面的研究。

### Research on bolted single-phase ground fault in 10 kV distribution network with flexible ground neutral treatment and its ATP simulation

ZHANG Hai, XU Yu-qin, BA I Jia, GAO Feng

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The paper analyses the basic theory of the resonant earthed neutral system to the 10 kV medium-voltage network. Using ATP software, the paper establishes a 10 kV distribution system and makes simulation to compensate process of the resonant earthed neutral with single phase to ground fault. After making simulation to the neutral flexible grounded system proposed in reference 3, which takes the advantages of the resonant grounded neutral treatment and the impedance grounded neutral treatment, this paper points out its problems and does simulation after its improvement. The new neutral point treatment shows its superiority in fault compensation and fault-line selection through the comparison of simulation results.

**Key words:** power system; medium-voltage power distribution system; resonant grounding; neutral flexible grounding; ATP simulation