

# 地、县两级电网 AVC 系统分层联合协调控制

苏家祥<sup>1</sup>, 廖亨利<sup>2</sup>, 袁文谦<sup>1</sup>, 陈景晖<sup>1</sup>

(1. 泉州电业局, 福建 泉州 362000; 2. 南京六都科技有限公司, 江苏 南京 210061)

**摘要:** 我国地区电网和县级电网的运行和控制分别由地区调度中心和县网调度中心分别管理, 但事实上, 从供电和电压无功控制的角度来看, 两级电网却是垂直紧密耦合的。当两级电网分别安装有 AVC 系统后, 有必要考虑两级 AVC 系统的联合优化控制。该文率先提出了适合国内电网调度运行管理模式的地、县网 AVC 系统联合控制的分层协调控制方案, 建立了地网 AVC 系统优化模型, 提出了联合协调控制的技术原理、技术方案, 分别从功率因数调节和电压分层调压两个方面阐述了控制流程和控制策略。进一步优化了无功潮流, 降低了网损, 减少了由于各自独立运行时调压引起的设备调节振荡, 缓解了地区电网功率因数调节的压力, 减少了地区电网无功补偿设备的投切次数。

**关键词:** 自动电压控制; 分层联合协调控制; 地区电网; 功率因数控制; 调度自动化

## Multilayer united controlling by the region and county's AVC

SU Jia-xiang<sup>1</sup>, LIAO Heng-li<sup>2</sup>, YUAN Wen-qian<sup>1</sup>, CHEN Jing-hui<sup>1</sup>

(1. Quanzhou Electric Power Bureau, Quanzhou 362000, China;  
2. Nanjing Liudu Technology Co., Ltd, Nanjing 210061, China)

**Abstract:** The region and the county electric power network are managed separately by the region and the county dispatching centres in our country. But the two power grades are vertically connected in power supply and voltage reactive controlling. Since the two grade network are installed AVC system. This paper considers combination optimization controlling of the two-grade AVC systems. This paper presents a project of multilayer united power network controlling by the region and county's AVC that is suitable for dispatching management in our country. An optimizing model of region AVC system is set up. The design theories and technical scheme of combination optimization controlling are presented. The control flow and control strategy of power factor adjusting and level layer adjusting are discussed. The project optimizes reactive power flow, lowers power losses, reduces equipment oscillation caused by voltage adjusting, relieves the burden of power factor adjusting, and shortens switch-on times of reactive compensation equipment.

**Key words:** AVC; layered and cooperative control; region power net; power factor control; SCADA

中图分类号: TM734 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)10-0036-04

## 0 引言

随着计算机技术、通讯技术的发展, 电网调度自动化系统的不断完善, 地区电网电压无功控制技术不断提高, 地区电网电压无功控制系统<sup>[1, 2]</sup> (以下简称 AVC 系统) 通过调度自动化 SCADA 系统采集全网各节点遥测、遥信实时数据进行在线分析和计算, 在确保电网与设备安全运行的前提下, 从全网角度进行电压无功优化控制, 优化计算后形成的无功补偿设备投切指令和变压器有载分接头升降的指令通过 SCADA 系统执行。

泉州地区电网从2003年开始就实现了AVC系统闭环控制运行, 长期的运行数据表明, AVC 系统的应用提高了 10 kV 母线电压合格率, 合理地使用了调压设备和无功补偿设备, 降低了输电网损, 大大减轻了调度监控值班人员劳动强度, 完善并提高无人值班变电站自动化水平。

泉州电网包括地区所有 220 kV 及以下变电所, 地调直接调度 220 kV 变电所和部分 110 kV 变电所, 而位于县域的 110 kV 及以下变电所由各县级电网调度机构调度。电网的峰谷负荷变化比较大、无功补偿比较充分, 本区域电网的功率因数有调控的必要。目前泉州地区电网 AVC 系统已经实现了与省中调主

站 AVC 系统的联合协调控制, 每隔 30 min 严格执行了省网 AVC 系统下达的功率因数考核指标。在运行中笔者发现, 个别县网的负荷和电量占整个泉州电网比重很大, 在低谷负荷时, 省网 AVC 系统下达地网关口的功率因数上限考核指标为 0.97, 导致地区电网 220 kV 变电所和地调所辖 110 kV 变电所的电容器大部分都切除, 而县网的功率因数仍然在 0.99 左右, 造成无功潮流不合理, 减少了电网的稳定裕度, 加大了电网网损, 而电网中不管是地区级电网或者县级电网, 任何一节点无功的变化都会影响到功率因数变化, 因此, 必须合理的调节功率因数。另外泉州电网的特点为环网设计、开环运行, 从调压的角度看, 电网呈纵向紧密耦合, 下级电网的电压水平受到上级电网分接头调节的影响比较大, 为避免下级电网调压时的设备调节振荡, 必须考虑合理的上下级电网联合调压的方案。此外, 依据调度管理的分工和责任归属, 也不允许在地区级调度中心的 AVC 系统直接分析和控制地网和县网的所有电压无功补偿设备和主变分接头。

因此, AVC 系统的运行模式必须适用调度运行管理模式。在地区级调度中心安装一套 AVC 系统, 每个县网调度中心各安装一套 AVC 系统, 两级 AVC 系统实现分层协调控制, 合理的控制无功潮流, 确保母线电压合格, 建立合理的地、县两级电网 AVC 系统协调控制策略是很有必要的。

## 1 泉州地、县网 AVC 系统分层协调控制总体设计

不论是地网 AVC 系统和县网 AVC 系统, 都应当在确保电网与设备安全运行的前提下, 从全网角度进行无功电压优化控制, 实现本区域无功补偿设备投入合理和无功分层就地平衡与稳定电压, 实现主变分接开关调节次数最少、电厂无功出力 and 电容器投切最合理、电压合格率最高和输电网损率最小的综合优化目标, 从而进一步提高电网调度自动化水平, 提高电力系统运行的稳定性和安全性, 全面改善和提高电网电压质量, 降低电网损耗, 提高设备出力。

泉州地调直调变电站和晋江、惠安县电网调度自动化 SCADA 系统均已实现“四遥”功能, 地调 AVC 系统和晋江、惠安县调 AVC 系统均已建立。图 1 为地、县网 AVC 系统分层协调控制结构图, 总体的策略目标为如下。

地网 AVC 系统: 从地调 SCADA 系统接收实时数据进行在线分析和计算, 从地网的角度进行区域电网电压无功优化, 并综合县网 AVC 提供的无功调节

能力, 给县网 AVC 系统下发全网功率因数考核指标。

县网 AVC 系统: 从县调 SCADA 系统接收实时数据进行在线分析和计算, 从县网的角度, 将地网 AVC 系统下达的全网功率因数考核指标作为控制目标之一进行电压无功优化; 当本区域内某变电所电压越限而本厂站无调节手段, 可以向地网 AVC 系统申请通过调节上级厂站的方式改善本站电压质量。县网 AVC 系统在线监视本级电网, 计算并给地网 AVC 系统实时上传本区域电网的实际无功调节能力。

## 2 地、县网 AVC 系统分层联合协调控制方案

### 2.1 AVC 系统优化模型

地网 AVC 系统无功优化模型为式 (1)。

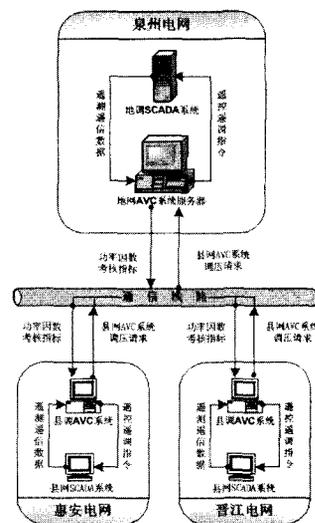


图 1 地、县网 AVC 系统分层协调控制结构图

Fig.1 Layered and united controlling between region and county's AVC system

$$F = P_{\text{Loss}} + \lambda_1 \sum (V_i - V_{i\text{Lim}})^2 + \lambda_2 \sum (Q_j - Q_{j\text{Lim}})^2 + \lambda_3 \sum (Q_k - Q_{k\text{Lim}})^2 \quad (1)$$

其中:  $i$  为母线节点个数,  $j$  为省网关口 (220 kV 母线) 节点个数,  $k$  为地网和县网之间联络线节点个数,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  为罚因子。  $P_{\text{Loss}}$  为有功网损, 第二项为母线电压约束, 第三项为省网关口功率因数考核指标所计算而来的无功约束, 第四项为县网无功调节能力约束。

另外, 式 (1) 中

$$V_{i\text{Lim}} = \begin{cases} V_{i\text{max}} & V_i > V_{i\text{max}} \\ V_i & V_{i\text{min}} < V_i < V_{i\text{max}} \\ V_{i\text{min}} & V_i < V_{i\text{min}} \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $V_{i\text{max}}$ 、 $V_{i\text{min}}$  分别为节点电压上、下限。

同理,  $Q_{jLim}$ 、 $Q_{kLim}$  也可由类似式(2)的式子求出。不过需要注意的是,  $Q_{jmax}$ 和 $Q_{jmin}$ 是由省网AVC系统在线下达的功率因数考核上下限计算而来的(也可以是省中调下达的分时段考核范围值),而 $Q_{kmax}$ 和 $Q_{kmin}$ 是地网AVC系统事先向地网AVC系统询问所得(见图2)。

对于联络线节点K,因为知道了 $Q_{kmax}$ 和 $Q_{kmin}$ ,可以虚拟可调无功补偿设备。地网AVC的优化控制目标就是求取式(1)中F的最小值所对应的包括虚拟设备在内的电压无功设备控制方案,可以采用遗传算法<sup>[4,5]</sup>进行优化计算,从而也求取了地网和县网之间联络线节点的无功潮流值,将此值下达给对应县网AVC系统,即为县网AVC系统的功率因数控制目标。因此,县网AVC系统除了满足本厂站母线电压合格、网损最小的控制目标,同时也要满足地网AVC系统下达的功率因数控制目标。

对于某一电网,总有功网损为:

$$P = \sum_{i=1}^n V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3)$$

由式(3)和潮流方程得节点无功变化对系统网损的灵敏度为:

$$\partial P / \partial Q_i = (\partial P / \partial V) (\partial V / \partial Q_i) + (\partial P / \partial \delta) (\partial \delta / \partial Q_i) \quad (4)$$

式(4)中 $Q_i$ 为节点注入无功, $V$ 为节点电压幅值, $\delta$ 为相角。

式(4)进行变化得:

$$\begin{bmatrix} \partial P / \partial V \\ \partial P / \partial \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P_i / \partial V & \partial Q_i / \partial V \\ \partial P_i / \partial \delta & \partial Q_i / \partial \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial P / \partial P_i \\ \partial P / \partial Q_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

于是可得:

$$\begin{bmatrix} \partial P / \partial P_i \\ \partial P / \partial Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P_i / \partial V & \partial Q_i / \partial V \\ \partial P_i / \partial \delta & \partial Q_i / \partial \delta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \partial P / \partial V \\ \partial P / \partial \delta \end{bmatrix} \quad (6)$$

最后得:

$$\partial P / \partial Q_i = S_{PQ} \begin{bmatrix} \partial P / \partial V \\ \partial P / \partial \delta \end{bmatrix} \quad (7)$$

系统第*i*个节点,有

$$\partial P / \partial V_i = 2 \sum_{j=1}^N V_j G_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (8)$$

$$\partial P / \partial \delta_i = -2 V_i \sum_{j=1}^N V_j G_{ij} \sin \delta_{ij} \quad (9)$$

其中: $S_{PQ}$ 为节点无功变化对系统网损的灵敏度矩阵, $S_{PQ}$ 中的各元素可由牛顿-拉夫逊法潮流计算中

的雅可比矩阵求得。

县级电网厂站较少,且为环网设计、开环运行,每条联络线所带的厂站不多,因此可以依据 $S_{PQ}$ ,在求得各节点的灵敏度系数后,在满足电压合格的前提下,按灵敏度排序依次选取无功补偿设备进行操作,直到功率因数满足或者最接近地网AVC下达值。显然,如果当前联络线功率因数值低于地网AVC系统下达的考核值,则优先选灵敏度高的母线所挂电容器先投入;反之则选择灵敏度低的电容器优先切除。另外,当县调厂站电压不合格而本厂站又无调节手段时,向地网AVC系统申请通过调节上级110 kV厂站的某个设备来改善电压质量。

## 2.2 决策流程

如图2为功率因数分层协调控制流程。地网AVC系统在周期性启动对式(1)进行寻优计算之前,向各个县网AVC系统询问各联络线节点的无功调节能力。根据AVC系统的特点,县网AVC系统进行设备可控性预算:1)无功补偿设备由AVC自动控制;2)该设备的涉及设备安全、保护、检修的信号没有动作;3)计算该设备控制动作后不会引起当地厂站的母线电压越限,或者是电压越限但仍有分接头综合调节不会导致电压实际越限;4)该设备无其它闭锁状态触发。经过以上预算通过的设备才可以计算出有效的无功调节能力 $Q_{kmax}$ 和 $Q_{kmin}$ ,换言之,地网AVC系统通过对式(1)优化后,下达给县网AVC系统的功率因数目标控制值也是合理的。

AVC系统是在线优化控制系统,考虑到降低AVC系统的复杂性和地、县网AVC系统的耦合性,地网AVC系统在每次下达功率因数考核指标后不再严格监视县网AVC系统的指令执行情况。

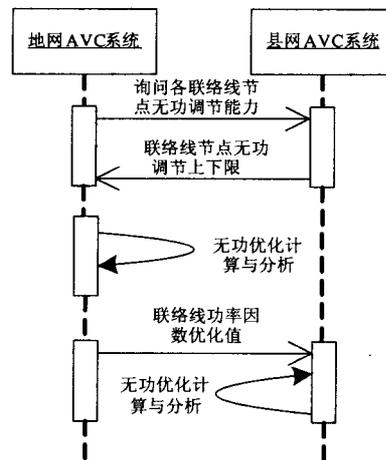


图2 功率因数协调控制时序图

Fig.2 Sequence diagram of power factor cooperative control

如图3为电压分层协调控制时序图。当县网AVC

系统在进行本区域电压校正控制时,发现有母线电压越限且本区域内没有设备可以调节,此时只能向地网 AVC 系统申请调节上级厂站分接头。在电压无功控制系统中,为防止设备投切频繁,分接头调压必须预算上下级变电所母线电压的变化,与单一 AVC 系统预算不同,地网 AVC 系统和县网 AVC 系统只能分析本区域电网,而非本区域电网对其而言是黑箱。但配电网环网设计、开环运行的特点决定地网和县网为垂直耦合,上级电网调压必定会引起下级电网母线电压的变化,而 10 kV 母线 10.0~10.7kV 很窄的调压范围使得不能忽略此电压变化值。那么,两级 AVC 系统通过网络拓扑分析,严格按照时序分别进行预算,图 3 则体现了这个特点。

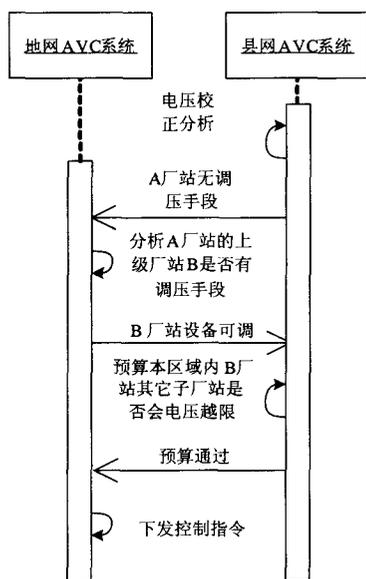


图 3 电压分级协调控制时序图

Fig.3 Sequence diagram of voltage layered control

### 2.3 其它控制策略

县网 AVC 系统应具有对地调下达的指令有效性进行校核;地网 AVC 系统和县网 AVC 系统不互相依赖,各自完全可以独立运行;在通讯协议中设立时间戳,AVC 系统根据时间戳识别控制指标并去掉过时的指令。

## 3 结论

泉州电网自 2006 年 10 月实现了地区网与惠安、晋江电网两级 AVC 系统联合协调控制以来,取得了不错的运行效果,进一步优化了无功潮流,降低了

网损,减少了由于各自独立运行时调压引起的设备调节振荡,缓解了地区电网功率因数调节的压力,减少了地区电网无功补偿设备的投切次数,大大降低了调度运行人员的工作量。

### 参考文献

- [1] 丁晓群,廖亨利.地区电网无功电压实时闭环控制软件[J].电力系统自动化,2001,25(10):66-67.  
DING Xiao-qun,LIAO Heng-li. Reactive Power/Voltage Based Closed Loop Control Software[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25 (10):66-67.
- [2] 丁晓群,唐杰阳,廖亨利,等.基于负荷预报的区域电网电压无功控制[J].中国电力,2004,37(9):46-49.  
DING Xiao-qun,TANG Jie-yang,LIAO Heng-li. Optimal Control of Voltage/reactive Power for Regional Power Network Based on Load Forecast[J]. Electric Power, 2004,37(9):46-49.
- [3] 丁晓群,黄伟,邓勇,等.基于分级递阶的地调/中心站模式无功电压控制系统[J].电力系统自动化,2004,28(5):63-66.  
DING Xiao-qun,HUANG Wei,DENG Yong,et al. A Control System for Reactive Power/Voltage in Main Station/Substation Model Based on Hierarchical Technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(5):63-66.
- [4] 马晋波, Lai L L,杨以涵.遗传算法在电力系统无功优化中的应用[J].中国电机工程学报,1995,15(5):347-353.  
MA Jin-tao, Lai L L, YANG Yi-han. Application of Genetic Algorithms in Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of CSEE,1995,15(5):347-353.
- [5] 顾洁,陈章潮,张林.基于遗传算法的无功优化模型研究[J].电力系统及其自动化学报,2001,13(3):10-12.  
GU Jie, CHEN Zhang-chao, ZHANG Lin. Study on the Model of Reactive Power Optimization Based on Genetic Algorithm in Electric Power Systems[J]. Proceedings of the EPSA, 2001,13(3):10-12.

收稿日期:2007-07-09; 修回日期:2007-12-03

作者简介:

苏家祥(1974-),男,大学本科,高级工程师,研究方向电网调度技术;E-mail:suqzep@163.com

廖亨利(1977-),男,工学硕士,工程师,研究方向电网自动控制;

袁文谦(1973-),男,本科,工程师,研究方向为调度自动化。