

地区电网无功电压分布式控制策略

赵彩虹¹, 晓群², 马春生³, 吴薛红¹

(1 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042 2 河海大学 电气工程学院, 江苏 南京 210098;
3 南京河海电力软件有限公司, 江苏 南京 210098)

[摘要] 随着电力系统调度模式划分为调度中心与集控站两个层次后, 原有的区域电网无功电压自动控制系统已不适应新的调度模式要求. 针对新模式, 提出了一种能够解决新模式下的电网无功电压分布式控制模式和控制策略. 该控制策略采用分布式技术及混合优化技术, 将传统的集中控制系统扩展为分布式二级控制. 由调度中心对全网的无功电压进行计算, 提出对应的控制策略, 由各个集控站根据调度中心发出的指令, 执行相关的动作, 实现全网无功电压的优化运行.

[关键词] 无功电压, 分布式二级控制, 混合优化, 专家系统

[中图分类号] TM 73 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2008)02-0001-05

Reactive Power and Voltage Distributed Control Strategy in Regional Grid

Zhao Caïhong¹, Ding Xiaoqun², Ma Chunsheng³, Wu Xuehong¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China
2 College of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China
3. Nanjing Hohai Electric Software CO., Ltd. Nanjing 210098, China)

Abstract After the dispatch mode of power system was divided into two layers—dispatching and monitoring—the previous reactive power and voltage automatic control system cannot meet the requirements of new dispatch mode. Aiming at the new mode of dispatching and monitoring, we suggest a reactive power and voltage distributed control strategy in regional grid, which adopts distributed technology and hybrid optimization technology and enlarges traditional centralized control system into distributed secondary control. The reactive power and voltage is calculated by dispatching center, and then the corresponding control strategy is put forward. The correlative action will be carried out by the centralized control stations according to the instructions emitted from dispatching center in order to optimize the reactive power and voltage.

Key words reactive power and voltage, distributed secondary control, hybrid optimization, expert system

随着计算机科学、通信技术的快速发展和电力系统调度自动化系统(SCADA)的实用化, 为电力系统无功电压控制提供了充分的条件和良好的基础. 在无功电压控制的发展过程中, 经历了基于变电站的电压无功控制、基于 SCADA 主站系统的无功电压集中控制. 随着电力系统调度模式划分为调度与监控两个层次后, 原有的集中式无功电压自动控制系统已不适应新的调度模式要求. 尤其在控制执行方式方面, 集中式电压无功控制系统, 指在调度 SCADA 的基础上进行全局的电压无功计算或专家系统推理, 直接确定有载变压器分接头位置和电容器投切量, 然后通过 SCADA 系统的“遥控”、“遥调”功能进行控制. 此种控制方式比较适合于调度与监控一体化的地调及县调. 分布控制方式电压无功控制系统, 指在 SCADA 的基础上由主站 AVC 计算服务器进行全局的电压无功优化计算, 并将优化计算的结果(控制定值或控制动作)发送到分布控制层, 由控制层核算和检查后执行. 本文提出的基于分布式技术及混合优化技术, 采用分布式二级控制策略的 AVC 系统, 扩展了传统的电压无功控制系统集中控制模式, 是适合调度与监控分层模式的有效方法.

1 分布式二级控制系统策略的提出

基于 SCADA 主站系统的无功电压集中控制, 是将无功电压控制系统与 SCADA 系统接驳, 在允许时

收稿日期: 2007-12-25

通讯联系人: 赵彩虹, 教授, 研究方向: 电力系统及其自动化. E-mail: zhao-caihong@njnu.edu.cn

间间隔内接收 SCADA 系统实时数据, 并不再单纯应用基于全网潮流计算的优化算法, 而是基于灵敏度矩阵, 建立符合全网网损尽量小及电压合格的优化及控制判断规则. 在实时控制上完全满足要求, 而又不失全网优化集中控制, 并形成有载调压分接头调节和电容器投切指令, 然后利用 SCADA 的遥控遥调接口将动作方案通过下行命令通道执行^[1, 3]. 这种基于 SCADA 主站系统的无功电压集中控制方案已在全国多个省份得到推广应用. 目前该方案已成为主流的地区电网无功电压控制方式. 这种方案充分利用了 SCADA 的现有数据和所有功能, 避免了设备的重复投资.

对于大中型地调, 原有无功电压集中控制系统在调度中心进行直接控制, 违反了调度主站与监控中心职权分离的管理模式. 特别对于大中型地调的全网无功电压控制和与省网无功电压控制的结合, 基于 SCADA 主站系统的无功电压集中控制方案遇到了困难. 随着无人值班变电站的改造逐步完成, 很多地调采用集控中心对各无人值守变电站进行监控, 一般每个集控中心下辖 10 个变电站左右, 一个中型地调将会有 5 个集控中心左右, 大型地调将会有 10 个以上的集控中心. 集控中心一般是按地域划分而不是按电网结构的耦合程度划分, 各集控中心所控厂站之间有可能紧密结合, 但在电网结构上无法按照行政区域划分来解耦, 甚至同一个变电所的两台主变分属不同监控中心控制, 因此只有全网集中控制已经不能解决调度权与多个监控权之间的组织、优先级、责任归属的问题. 另外, 对于大中型地调来说, 通过集中控制来控制所有无功电压设备, 使得该系统的控制设备成为供电企业控制设备最多的一个系统, 这就要求保证电压控制的可靠性, 原有集中控制系统已无法满足大中型地调对电压控制可靠性的要求.

随着无功电压集中控制的大量使用, 无功电压控制系统作为一个软件系统, 本身也是一种先进的无功电压管理方法的载体, 用户必须要从传统的人对人对无功电压管理转变到对 AVC 的无功电压智能化管理, 而无功电压管理涉及调度人员、监控人员、运行方式管理人员等专业人员, 这些使用人员的工作地点是分散在公司的各个部门, 为了使各个专业人员能够方便使用其需要的功能, 必然对无功电压集中控制的 AVC 系统提出分布式控制的要求. 因此本文提出适合调度与监控分层模式的地区电网无功电压分布式控制策略.

地区电网无功电压分布式控制策略, 指在 SCADA 的基础上由主站 AVC 计算服务器进行全局的电压无功优化计算, 并将优化计算的结果 (控制定值或控制动作) 发送到分布控制层, 由控制层核算和检查后执行, 满足了无功电压分层管理、分级控制的要求. 同时也适应了电力系统调度与监控两层次调度模式.

目前国内地区电网 AVC 系统的主流是基于 SCADA 系统构建 AVC 系统, 该种方案项目实施简单、系统安全可靠, 得到了大多数 SCADA 厂家的支持, 目前已在国家电网公司和南方电网公司的多个地区电网推广使用. 另外有些 VQC 厂家推出了基于 VQC 的 AVC 系统, 主要是出于考虑保留原有 VQC 的投资. 该种方案由于需要在所有变电站装设 VQC 装置, 并且要求与不同 VQC 厂家进行接口, 项目复杂度高, 实施困难. 对上述两种 AVC 系统构建作较详细分析, 可从数据来源、控制手段、控制产生逻辑、控制执行方式等几方面加以考虑, 限于篇幅仅就控制产生逻辑及控制执行加以阐述. 在控制产生逻辑方面, 目前国内存在 3 种形式. 一种是基于灵敏度树的专家规则系统. 专家规则控制逻辑是指系统检测母线电压受到异常干扰后, 从知识库选择适当的知识, 依次选择最有效的控制手段, 并按照选用的对策和系统限制的条件推算控制措施. 另一种是基于优化潮流的方法. 电力系统优化潮流是以多约束的电网数学模型为基础, 采用线性或非线性规划等方法以网损最小为目标函数求解优化潮流, 获得网络的最优运行状态. 第三种是采用混合计算方案, 即常规情况下使用优化潮流进行最优计算, 当计算不收敛时采用专家系统获得次优解. 比如, 当前电网无法进行潮流计算 (无法实现 PAS 应用的部分县局用户或无状态估计数据等) 则用“专家系统规则”来判断执行. 所以采用混合计算方案的控制系统执行效率极高, 不会出现“模糊”的指令.

2 分布式二级控制 AVC 系统

2.1 分布式二级控制 AVC 系统组成

分布式二级控制 AVC 系统由 AVC 主站系统, 包括 AVC 计算服务器、AVC 维护工作站、AVC 分析工作站、AVC 监视工作站及 AVC 监控中心系统, 包括 AVC 监视及控制子系统、查询子系统、区域计算管理子系统组成. 如图 1 所示.

AVC 计算服务器通过调度 SCADA 数据接口收集全网实时数据, 进行无功电压优化计算, 并将计算结

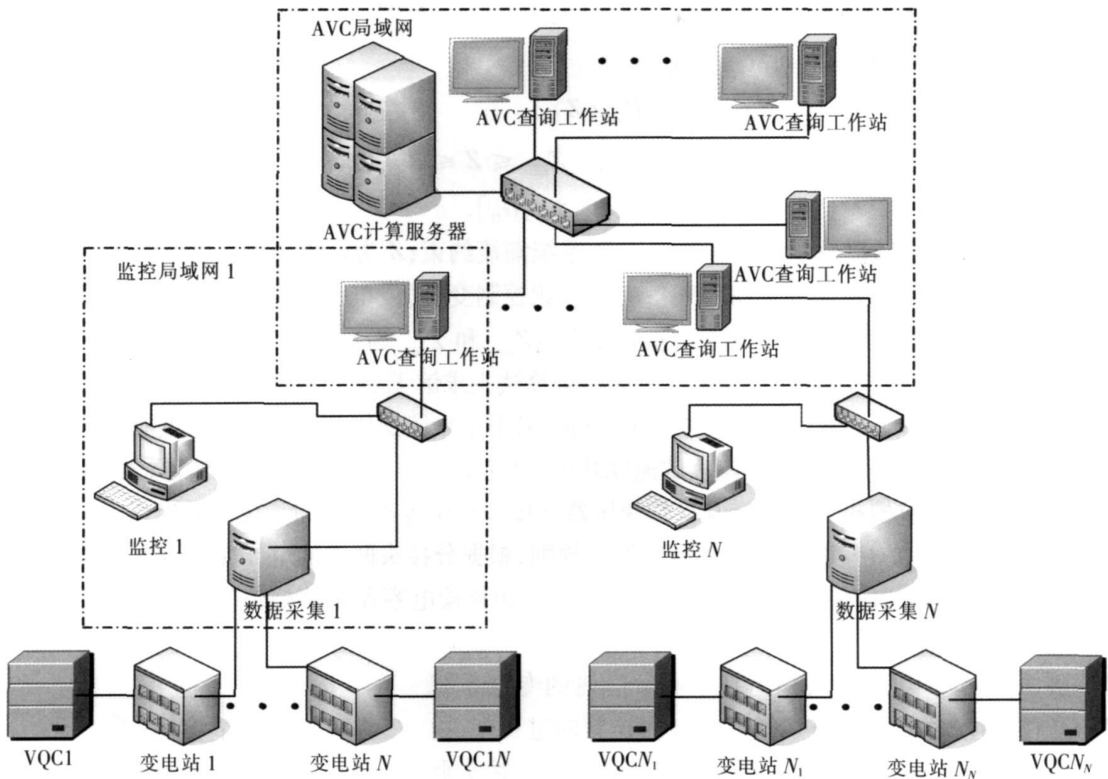


图 1 分布式二级控制 AVC 系统组成的物理结构

Fig.1 The physical structure of distributed secondary control AVC system

果发送到各监控站系统. AVC计算服务器同时也是 AVC系统的数据库及文件服务器, 保存着全网参数、计算结果、历史信息、图形文件等. AVC计算服务器可安装在远动机房. AVC维护工作站配置了 AVC系统维护子系统用户界面, 允许自动化或其它电网参数维护人员对电网参数、AVC系统参数进行远程维护. AVC分析工作站配置了查询子系统用户界面, 用户可以对历史曲线、动作次数、历史命令进行远程查询.

AVC 监视工作站配置了监视及控制子系统用户界面, 允许调度员对电网一次图形及实时数据进行监视, 并可对全网计算方案进行监视. AVC监控站的 AVC监视工作站允许用户对本监控站的控制方案进行监视. AVC控制工作站接收计算服务器的命令并解析本监控站的命令, 将控制命令发送给 SCADA 控制接口. 根据命令反校改变设备控制状态, 然后将设备控制状态传到 AVC 计算服务器.

用户通过 AVC 主站系统的 AVC维护工作站对全网进行建模, 并由 AVC计算服务器收集全网实时数据, 进行计算分析, 对全网电压无功进行优化调整, 形成优化调节指令分别发送至相应的 AVC 集控上, 再由 AVC 集控软件将指令传发至监控 SCADA 工作站上, SCADA 工作站收到指令后利用自身四遥功能对设备进行调节, 从而达到 AVC 系统闭环控制. 考虑网络通讯可能会中断, 为了避免系统瘫痪, 该系统实现了监控站区域计算功能, 相当于一个当地的软件 VQC 分布式二级控制 AVC 系统的主要模块由图 2 表示.

分布式二级控制 AVC 系统与 SCADA 的接驳只借助接口程序从 SCADA 系统读取实时数据, 对设备的控制命令也是由接口程序传送到 SCADA 系统, 再由 SCADA 系统执行操作命令, 并确保能在一段时间内对同一设备只有一个操作命令, 所以系统与 SCADA 系统无内部耦合性, 不会影响 SCADA 系统的内部物理结构和逻辑结构, 因此, 在系统上对设备的闭锁也不会影响到 SCADA 系统对相关设备的控制.

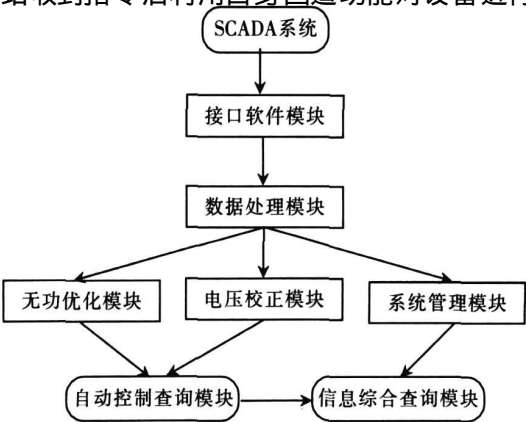


图 2 分布式二级控制 AVC 系统的主要模块

Fig.2 The central module of distributed secondary control AVC system

2.2 无功电压优化计算流程

电力系统无功优化的数学模型可表示为:

$$\begin{cases} \min F = P_{\text{loss}}(Z), \\ \text{s.t. } g(Z) = 0 \quad Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max}, \\ Z = [X, U_c, U_D]. \end{cases} \quad (1)$$
$$Z = [X, U_c, U_D]. \quad (2)$$

式中, F 为系统有功网损最小的目标函数; g 为系统潮流约束; Z 为系统变量, 其中 X 为系统状态变量 (负荷节点电压幅值和发电机注入无功功率); U_c 为连续控制变量 (发电机节点电压); U_D 为离散控制变量 (无功补偿装置的无功补偿容量和可调变压器分接头); Z_{\min} 和 Z_{\max} 为系统变量的运行限制约束^[4 5].

基于非线性原对偶内点法和改进遗传算法的组合算法来求解无功优化问题, 利用非线性原对偶内点法快速寻优、收敛等优点处理模型中的连续变量; 同时采用小生境遗传算法确定离散变量的优化值, 克服了简单遗传算法随计算规模的扩大而使收敛速度减慢、容易落入局部极值的缺陷. 本文采用小生境改进遗传算法求解电容器、电抗器投切组容量及有载变压器分接头档位等离散变量. 在变异操作上, 由专家系统中的 if-then 规则列出关于分接头和补偿电容器的规则, 根据分接头两端的电压是否满足约束条件, 在操作规划表中对应处选出相应值来修改对应变压器分接头和补偿电容器调节档位的值. 利用非线性原对偶内点法处理发电机端电压.

在改进遗传算法不收敛时, 采用基于灵敏度树的专家系统进行优化及校正控制. 使用专家系统进行自动控制的过程中, 由于负荷的波动会造成各变电所电容的投切和有载主变分接头调节振荡或者不必要操作. 为了避免设备不必要的操作, 引入短期和超短期负荷预报的技术, 根据历史数据每天自动划分出高峰、低谷、腰荷时间段, 并确定负荷的变化趋势, 初步实现了全网电压无功的动态优化. 在选择设备时根据负荷所处时段确定设备调节优先级, 在对选中设备进行预算时, 除了要对当前断面进行预算外, 还需根据负荷变化趋势判断该动作是否符合未来负荷的变化. 专家的优化策略是采用逆调压, 在负荷高峰时段及低谷时段程序自动启动逆调压控制策略, 以达到优化的目的. 无功电压优化计算流程如图 3 所示.

2.3 可定义规则专家系统

当前我国电网的自动化、数字化水平再不断提高, 但有些情况下, 有些地方电网特别是大量县局电网的 SCADA 数据不是很好, 优化潮流算法经常可能不收敛. 而专家系统对数据及网络参数要求较少, 在上述情况下采用专家系统可弥补优化算法的不足, 实现无功电压实时控制. 电网运行规则因各电网的情况不同而差别明显, 若将运行规则通过编程语言实现于程序中, 则需要经常修改程序, 增大了系统维护量及不稳定性. 同时用户也无法根据特殊情况对规则进行调整. 使用可自定义规则的专家系统是解决上述问题的理想方法.

产生式系统是历史悠久且使用最多的知识表示系统, 用 if-then 规则形式捕获人类问题的求解特征. 产生式系统由工作存储器、推理机、解释器几个部分组成. 本文所述专家系统使用电网对象模型来作为工作存储器, 以各个对象的属性来保存当前已知的数据, 包括推理过程中形成的中间结论, 规则解释程序用这些状态来激活相应的规则. 每条产生式规则均分为左部与右部两个部分, 左部表示激活该规则的前提条件, 右部表示调用该规则后所做的动作. 工作存储器中的对象名、属性、属性值表示了一个事实, 如存在事实满足了规则的条件, 则相应规则被激活. 一条产生式规则的结论定义了对工作存储器进行增、删、改等操作信息. 推理机针对当前问题的条件或已知信息, 反复匹配知识库中的规则, 获得新的结论, 以得到问题求解结果. 本文采用前向控制策略, 首先对需要检验的状态进行处理, 比如母线电压越限状态、母线电压越限次数同规则的前提进行比较, 如有匹配, 则该规则就选中了; 将控制设备相关的给定事实比如电容器相关

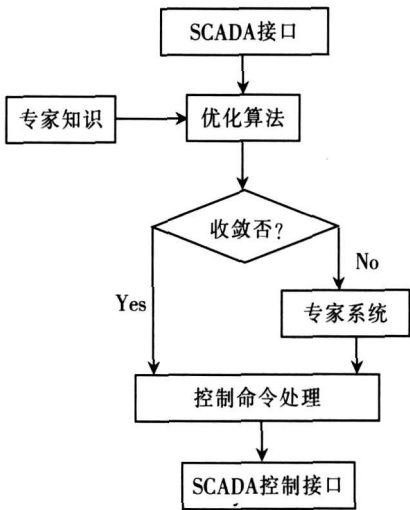


图 3 无功电压优化计算流程

Fig.3 The calculational flow of reactive voltage optimization

的保护信号、电容器运行状态、用户设定控制状态匹配电容器类型规则的前提,如有匹配的规则,执行对应的规则.采用框架结构表示规则,规则库如表 1所示.

2.4 无功功率的全网平衡

无功功率分层分区就地平衡是无功控制的原则,全网无功平衡是降低网损的关键措施^[3 4].分布式二级控制 AVC系统从地区电网范围的角度,以全网网损尽量小、各节点电压合格、有载调压分接头调节次数尽量少和补偿电容器设备动作最合理为目标.以集控中心(调度中心、配调中心)为核心,专家系统、模糊控制为原理,协调控制各变电所有载变压器分接头挡位调节与电容器投切,借助于现有电网的调度自动化系统中的“四遥”功能,实现电压无功闭环控制系统.将变电站内无功功率“就地平衡”转变为“全网平衡”,在不向上一级电网倒送无功的前提下,允许并实现无功功率倒送,实现本级电力网内无功流向合理的目标.

3 结语

分布式二级控制 AVC系统,正常情况下采用集中决策分布式控制的模式.在主站故障或者主站与集控中心通讯异常时,集控中心可启动区域优化计算进行本区域闭环优化控制.在正常状态下,集控中心 AVC除了具备一次接线图实时数据监视、无功调节设备控制状态监视及修改等功能外,是一个控制命令验证及执行的机构.在监控站独立计算模式下,集控中心是一个独立的无功电压优化计算及控制系统,无需人工干预,自动完成该区域的优化计算及闭环控制.通过使用这两种模式,分布式二级控制 AVC系统具备了较高的可靠性.另外主站服务器可采用由两台服务器组成一个集群服务器为 AVC系统提供计算与数据库服务,AVC系统可运行于集群中的任一服务器上,当运行服务器出现故障时,集群服务器将 AVC系统自动迁移到另一台服务器上,从而提供了不间断运行的容错技术.基于分布式技术及混合优化技术的分布式二级控制 AVC系统不仅适合调度与监控分层模式,而且具有很高的运行可靠性.

[参考文献] (References)

[1] 陈远华,秦荃华,杨晓红,等. 基于模糊边界无功调节判据的电压无功综合控制[J]. 中国电力, 2002, 35(10): 50-53
Chen Yuanhua Q in Quanhua Yang Xiaohong et al Voltage and reactive power integrative control based on fuzzy boundary criterion of reactive power[J] Electric Power 2002 35(10): 50-53. (in Chinese)
[2] 吴慧政,赵景水,王峰,等. 基于九区图的变电站 VQC频繁动作的分析和预防[J]. 电力学报, 2007, 22(1): 65-67
W u Huizheng Zhao Jingshui Wang Feng et al Voltage/Reactive power optimal control in a substation based on rate of load change[J]. Journal of Electric Power 2007, 22(1): 65-67. (in Chinese)
[3] 赵彩虹,唐寅生. 我国电网降损节能方面的几个关键问题[J]. 中国电力, 2007, 40(12): 59-62
Zhao Caihong Tang Yinsheng Some key problems of reducing power loss in power grids in China[J]. Electric Power 2007, 40 (12): 59-62 (in Chinese)
[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(12): 21-23
Ding Xiaohun Chen Cheng Xu Xingtao et al Application of optimization and centralized control system for reactive power/voltage in Tai Zhou Power network [J]. Power System Technology 2000, 24(12): 21-23. (in Chinese)
[5] 方朝雄,林玉琳,苏毅. 福建电网自动电压控制系统技术实现探讨[J]. 福建电力与电工, 2002, 22(4): 21-25
Fang Chaoxiong Lin Yulin Su Yi Fu jian power network automatic voltage control system technology carry out discussion [J]. Fujian Electric Power and Electrical Engineering 2002, 22(4): 21-25. (in Chinese)

[责任编辑:刘 健]