

电压无功全局优化分散控制系统的研究开发

牛焕娜,杨明皓,耿光飞,刘宝英
(中国农业大学信息与电气工程学院,北京 100083)

摘要: 针对地区电网各变电站 VQC分散控制造成潮流分布不尽合理,站间调节震荡的不足,介绍了所研制的立足于全网角度合理设置 VQC限值,进行全局电压无功优化、各站分散协调控制的系统结构和软件功能。该系统主站基于已有的调度自动化系统,在未来一天的预测负荷基础上,利用基于专家知识的遗传算法求解该无功优化模型,并根据求出的电压无功最优曲线结合负荷实际情况整定出 VQC控制范围,下发至各站 VQC设备,完成闭环控制。该系统已应用于甘肃金昌电网,经过实验室闭环仿真运行证明效果良好。

关键词: 全局优化; 分散控制; 负荷预测; 专家知识; VQC限值参数

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)09-0021-05

0 引言

电力系统电压和无功有密切的关系,通过电压无功控制,不仅能改善电压质量,提高系统稳定性,还能降低有功损耗,节约能源,因此,在电力系统中实现电压无功控制有着广泛的经济效益和社会效益。目前,国内常见的电网电压无功控制属于变电站级电压无功就地控制(VQC)。这种控制装置大多数是基于“井”字九区图原理,以本变电站为中心,通过控制站内电压无功调节设备,维持受控母线电压和注入电网的无功功率在规定的范围内。VQC装置技术比较成熟,能够相对快速地根据站内电压负荷的变动情况作出相应的控制反应。但是,由于VQC装置是按分散控制、就地补偿的原理工作的,不能实现区域电网系统的最优控制,使各变电站已投入的电压无功设备和容量不能得到充分利用;同时各变电站各自为政的分散控制可能导致电网潮流分布不合理、站间调节震荡和频繁操作;另外,VQC装置的调节控制是基于给定的电压无功上下限值,这些参数的确定依赖于维护人员的经验,缺少一套有效的计算方法,如果上下限值给定不合理,控制的结果也不会合理。

鉴于以上缺陷,本文提出了电网电压无功全局优化、各站 VQC分散协调控制的系统模式。该系统立足于区域全网角度合理设置各站 VQC未来时段内的限值,再由 VQC根据全局优化得到的分时段限值曲线实时按九区图原理控制本站内电压无功调节设备,从而达到使各节点电压维持在合理范围内,网络损耗最小的目的。系统既利用了 VQC装置简

单、控制反应快速的特点,又弥补了其缺陷;同时,与传统意义上的全局集中控制方式^[1]相比,由于技术上已成熟的 VQC的存在,在通信中断或电网出现异常时,VQC将自动切换到本地电压无功限值控制模式,减小了电压无功控制设备对主站优化软件的过分依赖,增强了系统的可靠性,对于区域网经济、安全稳定运行,提高电网电压无功控制水平具有重要的现实意义。

甘肃金昌供电局所辖各主要变电站都安装了 VQC装置,该类 VQC装置除能完成传统的站内电压无功控制外,兼具地区电网无功优化系统智能终端的作用,带有串行通信接口,可进行远程通信,以实现数据共享和远程限值参数设置,这为实现全局最优控制奠定了基础。同时,已经实用化的金昌地区调度自动化系统为本系统提供了历史数据和实时数据接口,使在调度中心完成全网电压无功优化计算成为可能。

1 系统总体设计

本系统硬件结构示意图如图 1 所示。

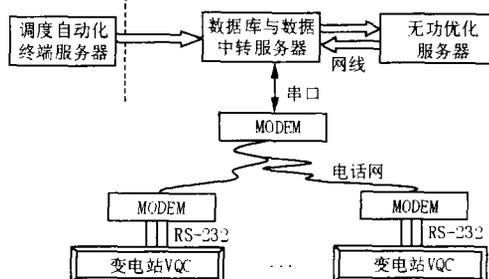


图 1 系统硬件结构

Fig 1 Hardware structure

系统的总体设计思路是:以已有的调度自动化系统为基础,本系统的数据中转服务器与调度自动化系统终端服务器接驳,采集实时遥测、遥信数据经过状态估计等模块后形成历史数据库;负荷预测软件根据历史数据资料进行负荷预报形成未来一天的母线负荷曲线,作为无功优化数据源;无功优化服务器通过网络访问无功优化数据库中的预测负荷等各类数据信息,以控制全网有功网损最小为优化目标且使各节点电压在允许范围内,优化计算出未来一天各站低压母线电压和高压无功功率的最佳变化曲线,并以此为基础整定出各站 VQC 装置的电压、无功限值参数,传送给数据中转服务器,由其负责以 MODEM 拨号方式下发到各变电站 VQC 装置;各变电站 VQC 根据各时段的电压、无功限值实时按九区控制原理进行电容器(电抗器)投切、变压器分头调节等自动控制,实现全网电压无功最优分布,完成系统闭环控制功能。

系统的优化计算默认为周期启动方式,即在每日 23 点一天结束时启动优化模块来计算次日 24 h 的电压无功限值曲线并下发。同时,在当日运行时检测到预测负荷与实际负荷发生严重偏离时重新进行剩余时段的负荷预测后,也要利用新的预测负荷对本日剩余时段重新进行优化计算并下发新限值。也可由用户在任意时刻手动启动剩余时段预测优化过程,并根据推出的优化结果判断决定是否下发。

2 软件体系模块功能

软件体系结构如图 2 所示。

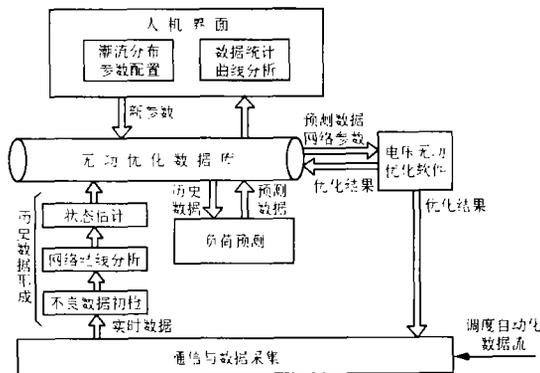


图 2 软件体系结构

Fig 2 Software structure

2.1 历史数据资料的形成

准确的历史数据资料是保证负荷预测精度进而保证优化计算准确性的基础。通信与数据采集模块把调度自动化系统实时采集到的电网遥测、遥信数

据引入本无功优化系统,但这些实时数据不可避免包含一些不良数据,如 0 数据或奇异数据等,从而影响了历史数据的准确性。因此,编制了不良数据初检和状态估计两个模块分别对实时生数据进行初步辨识估计和精细估计。不良数据的初步检测与估计采用人工检测辨识的原理设计算法;状态估计采用估计质量高的加权最小二乘法,两种算法原理详细参考文献 [2]。

由调度端采集到的实时负荷数据是连续变化的,不能直接应用于优化计算。因此,作为未来预测的基准的历史负荷资料在形成时期就需要把连续变化的负荷分时段静态化为阶梯状分布的曲线,认为各时段内负荷保持不变,分段越多,最终求得的解越接近实际最优解。本文以小时为单位存储历史负荷资料,负荷值取该小时区间内实际负荷的均值(负荷采样点取 15 min 间隔采样一般就可保证精度)。

另外,网络接线分析模块通过电网建模,把电网的拓扑结构转化为潮流计算可识别的节点-支路关联矩阵,为后续的状态估计和潮流计算准备。

2.2 负荷预测

本文短期负荷预测的目标是根据历史数据资料预测未来一天的各母线有功和无功负荷曲线,以此作为无功优化计算的依据。由于系统负荷预测精度一般较高,因此在进行各母线负荷预测时可以充分利用系统负荷预测的结果来校正母线预测负荷。本文中对每个母线负荷分别预测后求和所得的总负荷与直接的系统负荷预测的结果大致平衡后,即认为保证了母线负荷的预测精度。

母线负荷是由许多用户负荷组成的,也具有系统负荷所具有的规律性,可以看做是个小型系统,因此可以采用系统负荷预测的方法,这对量测配置比较完善的电网是可以实现的。根据本系统的试点金昌电网的量测情况来看,该系统的量测配置比较完善,各站变压器中低压侧都有功率量测,补偿装置的出力也有量测,从而可以形成比较准确的母线有功、无功历史负荷数据资料。考虑到减少众多母线短期负荷预测的计算时间,以及当地实际负荷特性,本文采用了指数平滑法^[4],按照星期一、星期二~星期四、星期五、星期六、星期日分别对系统负荷和各母线负荷建模。再利用系统负荷预测的结果来校正各母线预测负荷,如下式:

$$L_F(i) = L_{FP}(i) * \frac{L_{Fsys}}{\sum_{i=1}^n L_{FP}(i)} \quad (1)$$

式中: $L_F(i)$ 为 i 母线最终负荷预测值, $L_{Fp}(i)$ 为用指数平滑法初步预测的 i 母线负荷值, L_{Fsys} 为用指数平滑法预测的系统负荷值。上式同时适用于有功负荷和无功负荷。

为了保证预测数据的精确性,在本系统中,还需要监视当日实际负荷的变化情况,在预测负荷与实际负荷发生严重偏离的情况下(如上午 10 点),及时完成该日剩余时段(11 点到 23 点)负荷的重新预测和修正,并利用修正后的预测负荷值重新进行无功优化计算。修正预测启动的判断条件是各母线有功或无功负荷的综合相对误差大于经验阈值:

$$Ep_{sum} = \sum_{i=1}^n \frac{|r_{pi}|}{\sum_{i=1}^n |r_{pi}|} * \left| \frac{fp_i - r_{pi}}{r_{pi}} \right| > P_{imit} \quad (2)$$

式中: Ep_{sum} 为某时刻各母线节点有功负荷综合误差(无功为 Eq_{sum}), r_{pi} 为该时刻第 i 母线节点实际有功负荷(无功为 r_{qi}), fp_i 为该时刻第 i 母线节点预测有功负荷(无功为 f_{qi}), P_{imit} 为有功误差实验经验阈值(无功为 Q_{imit})。

修正预测过程要充分利用当日已经发生的负荷变化模式,作为当日未知负荷变化规律的参考,根据“近大远小”的原理预测出当日剩余时间点的负荷大小。即:

$$Y_F(t_0 + h) = (h) * \{ Y(t_0) + [L_F(t_0 + h, N + 1) - L_F(t_0, N + 1)] \} + [1 - (h)] * L_F(t_0 + h, N + 1) \quad (3)$$

式中: $Y_F(t_0 + h)$ 为当日 $t_0 + h$ 点的负荷预测值; $Y(t_0)$ 为发生较大误差的当前时刻 t_0 的实际负荷值; (h) 为与 t_0 时刻距离 h (取 $1 \sim 23 - t_0$ 范围的整数)点的修正权重系数,随 i 的增加而成等比数列的由 1 减至 0 (如 $(1) = 1$, $(2) = 0.5, \dots$, 甚至比例更大); $L_F(t_0, N + 1)$ 、 $L_F(t_0 + h, N + 1)$ 分别为利用(1)式得到的当日 t_0 时刻和 $t_0 + h$ 时刻的预测负荷。修正预测时,也是对系统负荷和各母线负荷分别用式(3)修正后,再利用式(1)重新校正各母线负荷。

另外,在进行优化计算时需要进行潮流计算,也就需要知道未来一天内平衡母线的电压,对地区电网,上级调度部门制定了这个平衡母线电压的运行曲线范围(可在线修订),本系统就近似取这个范围的中值作为平衡母线电压的“预测值”;应用表明,这样取值能满足优化计算的准确性。

3 电压无功优化

3.1 优化数学模型

本文以全天 24 h 的系统网损之和(能量损耗)最小为目标函数,以变压器分接头位置和无功补偿量为控制变量,建立动态无功优化数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{t=0}^{23} P_{loss}(Q_t, T_t) \\ s.t. & \begin{cases} V_{min} & V_t & V_{max}, t = 0, 1, \dots, 23 \\ Q_{min} & Q_t & Q_{max}, t = 0, 1, \dots, 23 \\ T_{min} & T_t & T_{max}, T, N, t = 0, 1, \dots, 23 \\ f_i(Q_t, T_t) = 0, t = 0, 1, \dots, 23 \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

式中: V_t 、 V_{max} 、 V_{min} 分别表示 t 时刻 n 个节点的电压幅值向量、电压上限向量和电压下限向量; Q_t 、 Q_{max} 、 Q_{min} 分别表示 t 时刻 m 个补偿节点的无功补偿向量、无功上限向量和无功下限向量; T_t 、 T_{max} 、 T_{min} 分别表示 t 时刻 l 个变压器分接头位置向量、分接头位置上限向量和分接头位置下限向量; $f_i(Q_t, T_t) = 0$ 表示 t 时刻的功率平衡方程式组。

由于本系统是以 VQC 装置为媒介对全网电压无功调节设备进行间接调控的,优化软件只需要提前计算出未来一天(或当日剩余时段)每小时内各站 VQC 的无功上、下限值及低压侧电压上、下限值即可。因此,虽然(4)式建立的是动态优化模型,但由于电网在各时段的最优运行方案只与当前的状态有关,因而各个时段的优化是分别独立的,完全可以将动态优化按负荷的分段转化为分时段的静态优化,大大缩减了优化计算的时间和难度。本系统以小时为单位分为 24 段,连续负荷的分时段静态化在 2.1 节中已经阐述。

3.2 优化计算

1) 结合专家知识的遗传算法的应用

电压无功优化是一个大规模的非线性混合整数规划问题,优化控制的目标首要应是消除节点电压越限,然后才是在系统没有越限存在即系统存在可行解时对系统进行网络损耗最小的优化计算。鉴于以上特点,优化软件采用了基于专家知识的遗传算法进行目标寻优工作。数据库中存储有网络拓扑关系等信息,利用其能快速搜寻到与电压越限节点有拓扑联系的节点所包含的控制变量,参照文献[5]中提出的专家规则控制策略表对控制变量进行变异操作,可快速消除或减弱电压越限情况。遗传算法中初始群体近乎全是不满足节点电压约束的不可行解,因此利用专家知识对每个个体进行消除电压越限的操作,能加快可行解的获取速度,从而加快遗传算法的收敛速度。应用表明,本算法能比较可靠的

收敛到全局最优解。

2)不可行问题的处理

由于地区电网规模较大,在某些运行方式下,优化数学模型中的节点电压约束条件最容易导致出现不可行解,此时只能退而求其次,尽可能找到靠近原约束域的合理解。当出现这种问题时分情况处理如下:a 当电压越限节点为非负荷侧母线时,如果这些节点的约束越限量未超过门槛值(可设),可忽略不计,相当于适当放宽了这些节点的电压约束,以保证负荷侧节点电压在限值范围内;b 当电压越限节点包含负荷节点时,根据负荷节点的越限类型,相应的适当改变上一级非负荷关键节点的电压限值,在新的约束空间上重新优化获取可行解;c 如果经过 b 的处理仍存在越限节点,则要求能获得最小二乘意义上的解。

3.3 VQC控制范围整定计算

1)电压限值

$$\begin{cases} V_{LLimit} = V_{opt} - \alpha V \\ V_{HLimit} = V_{opt} + (1 - \alpha) V \end{cases} \quad (5)$$

上式: V_{HLimit} 、 V_{LLimit} 为变压器低压侧母线电压上、下限值; V_{opt} 为优化计算出的最优值; V 为此变压器分接头调节一个档位所产生的电压变化量; α 为带宽系数; β 为限值分配系数, $0 < \beta < 1$ 。

a 带宽整定:电压控制带宽为 β 倍的主抽头级差电压(变压器分接头调节 1 档低压侧母线所产生的电压变化量), β 值可根据实际需要人工设定。在无功负荷发生较大趋势性变化的时段,适当放大值到 3~4,使电压控制由投切电容器来完成,减少了分头不必要的动作。在负荷变化平稳阶段默认值为 1.5~2,既使整定曲线较好的跟踪了电压最优曲线,又使控制范围存在一定调节裕量,防止调节震荡,减少分头动作次数。

b 限值整定:考虑到逆调压要求,在电压合格范围内,高峰负荷时电压偏上限运行,低谷负荷时电压偏下限运行。因此,在带宽按 a 中整定原则确定的情况下,在高峰负荷时,将电压下限值适当上调,可取 β 值为 0.4;在低谷负荷时,将电压上限值下调,可取 β 值为 0.6。

2)无功限值

$$\begin{cases} Q_{LLimit} = Q_{opt} - 1.3 Q \\ Q_{HLimit} = Q_{opt} + 1.3(1 - \beta) Q \end{cases} \quad (6)$$

上式: Q_{HLimit} 、 Q_{LLimit} 为变压器高压侧无功功率上、下限值(指变压器从系统吸收的无功功率); Q_{opt} 为优化计算出的无功最优值; Q 为此变压器所接电容

器的最大单组容量; β 为限值分配系数, $0 < \beta < 1$ 。

a 带宽整定:考虑到预防电容器投切震荡, VQC无功控制带宽要有一定裕量,选择经验值——1.3 倍的所配电容器(电抗器)最大单组容量。

b 限值整定:配合逆调压要求,由于在高峰负荷时,电容器容易全部投入,因此为避免无电容可投的情况,应将无功上限值适当上调,可取 β 值为 0.3;在低谷负荷时,类似的,将无功下限值下调,可取 β 值为 0.7。

4 仿真运行情况

本系统软件已在 Win2000 操作系统上用 Delphi3.0(数据中转软件)和 C++Builder6.0(无功优化软件)开发平台实现,并利用现场收集到的金昌电网 3 个月的历史数据进行了实验室闭环仿真运行。金昌电网包括 1 个 330 kV 变电站(金昌站), 1 个 220 kV 变电站, 7 个 110 kV 变电站, 2 个发电厂, 由于篇幅关系接线图省略。通过优化计算明显消除或减弱了电压越限情况,同时大大降低了有功网损。以 2004 年 6 月 15 日 10 点电网数据为例,优化前有有功网损为 7.6078 MW,电压越限节点有 13 个,主要是各变电站的负荷母线节点电压越下限;经过优化计算后网损降低到 6.3137 MW,负荷母线节点电压全部合格。

为了增强系统的鲁棒性,考虑到现场运行时可能会出现由于各种原因导致优化软件不能得出优化结果的情况,在无功优化数据库中,手工设定多条典型负荷曲线下的各站电压无功限值参数经验值曲线,以备不能得出优化结果时,自动或人工根据负荷情况从默认设定曲线中取出一条下发,从而降低系统对优化计算收敛性的过分依赖。

5 结束语

本文介绍了自主开发的电压无功全局优化分散控制系统,该系统立足于全网角度合理设置 VQC 限值,以弥补 VQC 就地控制的不足。实验室闭环仿真运行证明,该系统运行稳定,时效性高,运行方式灵活,能满足在线闭环运行的需要。

参考文献:

- [1] 丁晓群,陈晟,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): 21-24.
DNG Xiao-qun, CHEN Sheng, et al Application of Optimization and Centralized Control System for Reactive Pow-

- er/voltage in Taizhou Power Network [J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 21-24.
- [2] 于尔铿. 电力系统状态估计 [M]. 北京:水利电力出版社, 1985.
YU Er-keng Power System State Estimation[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.
- [3] 于尔铿,刘广一,周京阳,等. 能量管理系统 [M]. 北京:科学出版社, 1998.
YU Er-keng, LIU Guang-yi, ZHOU Jing-yang, et al Energy Management System [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [4] 丁怡,卢建刚,等. 一种实用的超短期负荷预测曲线外推方法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 83-85.
DING Yi, LU Jian-gang, et al A Practical Method for Ultra-short Term Load Forecasting [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 83-85.
- [5] 李亚男,张粒子,等. 结合专家知识的遗传算法在无功规划优化中的应用 [J]. 电网技术, 2001, 25(7): 14-17.
LI Ya-nan, ZHANG Li-zi, et al Application of Expert Knowledge Adopted Genetic Algorithm to Optimization of Reactive Power Planning [J]. Power System Technology, 2001, 25(7): 14-17.
- [6] 朱春明,刘明波,等. 变电站电压无功控制范围的整定计算方法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 70-74.
ZHU Chun-ming, LIU Ming-bo, et al Setting Method for Control Range of Voltage and Reactive Power in Substations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 70-74.

收稿日期: 2005-09-13; 修回日期: 2005-12-02

作者简介:

牛焕娜 (1976-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统电压无功优化控制; E-mail: niuhuanna@sohu.com

杨明皓 (1955-),女,教授,博导,研究方向为电力系统运行与控制、配网自动化、电能质量与谐波等;

耿光飞 (1971-),男,讲师,博士,研究方向为电网无功优化与稳定运行。

Research and development of voltage-reactive power global optimization distributed control system

NIU Huan-na, YANG Ming-hao, GENG Guang-fei, LIU Bao-ying

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To compensate the shortage that power flow distribution and oscillation regulating between stations are unreasonable caused by VQC controlling, this paper introduces the structure and software function of global voltage-reactive power optimal, distributed control system which set limitation parameter of VQC stand by the whole net. This system bases on the power dispatching automation system. On the forecasted load of the next day, it uses Genetic Algorithm (GA) combined with expert knowledge to solve this model, then obtains the control bound of every VQC through the voltage and reactive power optimization curve combined with the running load, finally sends the control bound to corresponding VQC to finish closing-ring control. Simulation running on Jinchang Power System of Gansu Power Grid are carried out and the result is satisfactory.

Key words: global optimization; distributed control; load forecast; expert knowledge; limitation parameter of VQC

许继电气技术中心入围首批“国家认定企业技术中心”

日前,记者从省科技厅获悉,科技部会同国家发改委、财政部、海关总署和国家税务总局,2006年初对北方方正集团有限公司等118家企业的技术研究开发中心进行了认定,其中河南省有6家企业名列其中,它们分别是:中钢集团洛阳耐火材料研究院、许继电气股份有限公司、郑州宇通客车股份有限公司、南阳防爆集团有限公司、河南天方药业股份有限公司、河南大用实业有限公司。

据介绍,企业技术中心经国家认定后,将按照《国家认定企业技术中心管理办法》进行规范化管理,并获得有关部门的大力支持。其中,科技部将重点支持企业开展自主研发活动,承担科研计划;国家发改委将重点支持企业技术中心的创新能力基础设施建设,搭建基础条件平台。此外,依据《行政许可法》的规定,“国家认定企业技术中心”经五部委联合公告后,还可享受相关优惠政策。