

高压配电网无功优化集中控制系统研究

耿光飞, 杨仁刚

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 设计了无功优化控制系统的软件体系结构, 建立了动态无功优化数学模型。提出的地区电网无功优化控制基于现有地调自动化系统, 在母线负荷预测的基础上, 利用遗传算法求解整个电网的无功优化问题, 得到的优化结果为各个变电站 VQC 的合理限值。该方法将全局优化与 VQC 分散控制的优点结合起来, 克服了各变电站无功、电压就地最优控制的弊端, 节电效益显著。在某地区电网的应用中验证了该系统和方法的有效性, 经过优化计算, 在满足电压约束和控制设备投切次数限制的条件下, 降低了电能损耗, 有功损耗比优化前下降约 3 个百分点。

关键词: 电力系统; 无功优化; 遗传算法

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)24-0045-04

0 引言

目前, 无功电压综合自动控制装置 (以下简称 VQC) 已在许多变电站中投入使用, 但是, 由于 VQC 装置仅仅采集一个变电站的运行参数, 不能实现对地区电网内各变电站的电容器和有载调压变压器分接头档位进行协调控制, 所以单纯用 VQC 进行电压无功控制难以使各变电站已投入的电压无功设备和容量得到充分利用, 同时, 各节点分散控制还可能导致电网无功潮流分布不合理和节点被控对象频繁操作^[1]。

因此, 为实现全局最优控制, 研究如何合理设置 VQC 限值, 对全网无功调压设备进行统一协调控制, 对于电网经济运行、改善电能质量具有现实意义。

对于动态无功优化计算, 目前国内外通常采用的方法是将动作次数限制作为约束变量或目标函数中的惩罚项^[2], 这使各时段的优化相互关联, 增加了优化计算的复杂度, 导致求解时间很长且难以得到全局最优解。

本文采用的方法是, 根据对次日 24 h 的母线负荷预测^[3], 计算出次日全网的最优无功潮流分布和最优无功补偿量, 由此算出各变电站的最优无功限值和电压限值, 再根据负荷曲线的变化趋势以及补偿调压装置动作次数的限制, 对最优无功电压限值曲线进行分段, 并对分段后的限值做校验计算。这样, 各变电站的无功调压设备根据设定的最优限值曲线按照九区图的原理动作, 既保证全网潮流最优,

又使投切次数合理分配。

1 控制系统结构与实现方案

该无功优化系统由两台计算机组成, 其中一台为通信前置机, 承担数据库、网络拓扑、负荷预测、状态估计、控制命令转发等任务, 另一台负责潮流计算、无功优化、限值计算与分段等工作。

无功优化控制系统的软件体系结构见图 1, 底层的数据采集与通信模块从调度自动化系统采集电网运行数据, 并且将控制方案通过专用通道下发至各变电站 VQC 装置。

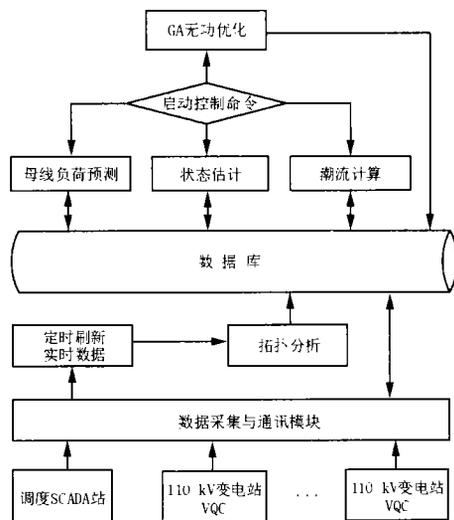


图 1 无功优化软件结构

Fig 1 Structure of reactive power optimization software

控制系统每隔一小时刷新一次实时数据并经过拓扑分析后存入无功优化数据库。拓扑分析模块可

通过界面人工输入网络节点支路关联配置表和开关变量序号配置表;定时检测开关遥信量,当发现有变位信号时启动结线分析,并存储到数据库中供其它模块使用。

母线负荷预测模块从数据库中获得各变电站负荷的历史数据并根据控制命令启动预测计算或修正计算,然后将预测出的各母线负荷存入数据库。

在整点时刻当系统存储完初检数据后(可设在半点时刻),状态估计模块查询数据库并进行状态估计,把修正后的满足潮流平衡的运行数据存储到数据库中。在负荷预测完毕并存入数据库后,状态估计模块对这些预测数据进行修正并存储结果到数据库中。

电压无功优化模块根据未来的负荷曲线以及各变电站无功补偿容量配置求出未来各时段、各变电站母线电压以及无功功率的最佳分布,并计算出各变电站最佳无功限值曲线和最佳电压限值曲线,然后由通信模块发送到各变电站的VQC中。

无功优化控制系统的启动可由用户指定或在每天的固定时刻进行(可设在晚上23点)。由启动控制命令模块协调其它各个模块的工作时序。在每日整点时刻启动潮流计算程序计算电网实际的有功损耗。实时监测当前实际负荷与预测负荷的误差,当其中最大误差大于设定阈值时启动负荷预测修正计算过程,负荷预测修正计算结束后,启动无功优化计算程序对修正后的预测负荷值进行无功优化修正计算,并将修正计算得到的电压限值和无功限值发送给各变电站VQC。

该系统目前具备的主要功能有:未来24小时系统及母线负荷预测;负荷特性分析;潮流计算与网损计算;优化计算;参数修改;优化控制系统运行效益分析;VQC限值曲线查询与修改。

2 动态无功优化数学模型

设电网有 n 个节点,以24h的电能损耗为目标函数,以变压器分接头位置和无功补偿量为控制变量,动态无功优化数学模型如式(1)。

$$\min \sum_{t=1}^{24} P_{\text{loss}}(Q_t, T_t) \cdot t$$

$$s.t. \begin{cases} V_{\min} & V_t & V_{\max}, t = 1, 2, \dots, 24 \\ Q_{\min} & Q_t & Q_{\max}, t = 1, 2, \dots, 24 \\ T_{\min} & T_t & T_{\max}, T & N, t = 1, 2, \dots, 24 \\ f_i(Q_t, T_t) = 0, t = 1, 2, \dots, 24 \\ S_i & S_{\max}, i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_t 、 V_{\max} 、 V_{\min} 分别为 t 时刻 n 个节点的电压幅值向量和电压上、下限向量; Q_t 、 Q_{\max} 、 Q_{\min} 分别为 t 时刻各补偿节点的无功补偿向量和无功上、下限向量; T_t 、 T_{\max} 、 T_{\min} 分别为 t 时刻各变压器分接头位置向量和分接头位置上、下限向量; S_i 、 S_{\max} 分别为第 i 个变电站的VQC限值分段数和最大允许分段数; t 为负荷近似保持不变的一段时间,这里取 $t=1$ h; $f_i(Q_t, T_t) = 0$ 表示 t 时段的功率平衡方程式组。

3 计算方法

由于本文的无功优化系统控制变量多达20个左右,搜索空间很大,必须采用高效的优化搜索技术。本文采用笔者在文献[4]中所述的十进制编码定向变异遗传算法求解动态无功优化模型,在每一个整点时刻的静态优化计算中采用的目标函数如式(2)所示。

$$\min F = P_{\text{loss}} + a \max_i V_i^2 + b \max_{G_i} Q_{G_i}^2 + c \cdot N \quad (2)$$

式中: P_{loss} 表示网损; N 为各控制变量与上一整点相比需要改变的个数;参变量 a 、 b 和 c 为罚函数的权重因子,它随着迭代次数的增大而增大。式(2)中将所有节点中越限量最大的值计入罚函数。这是因为电压约束与无功约束在一定范围内可看作软约束,对于电压越限来说,往往在消除最严重越限的同时,其它节点的越限也自动被消除了。而且本文的系统不是直接控制各变电站的无功设备,而是优化各变电站的VQC限值。这样做比采用越限值平方和计入罚函数的效果要好一些。

此外,本文在以下几个方面改善了优化算法的计算效率:

1) 提高潮流计算效率

在用遗传算法求解无功优化问题的计算中,根据本文软件编程的实践,潮流计算占用的时间约占整个优化计算时间的85%以上。因此,为了减少计算时间,除了采用快速的潮流计算方法之外,采取以下措施:在迭代计算的初期,适当降低潮流计算的精度,而在迭代计算的后期,适当提高潮流计算的精度。在遗传算法每一代的群体当中,对每一个个体都进行适应度计算显然计算量很大。由于以概率大小对个体进行选择,群体当中不可避免地存在着一定比例相同或相似的个体,在计算适应度之前先作一比较检查,确定将要计算的个体与已经计算过的个体有无相同或相似。本文对于相似的判断

是,在 20 个左右的基因中,若只有 3 个基因不同,且相差等于 1 或 1 个步长,这个可根据计算经验进行调整。对于相同的个体,只需作一次潮流计算;对于相似的个体,可以将其中一个个体的潮流计算结果作为其它个体潮流计算的初始值,从而加快收敛速度。

2) 利用专家知识指导变异位置与方向

在寻优过程中,首先应保证得到可行解,即消除电压无功越限,其次得到最优解。电压状况可分为 3 类:越下限、合格、越上限。由于无功功率不宜远距离传输,因此电力系统中的无功平衡和电压调整具有很强的区域性,应尽量调节本地的无功补偿设备和有载调压变压器进行电压、无功的调整及平衡。如果本节点没有调节手段,则调节离本节点电气距离最近的控制变量。

本文利用专家知识进行辅助变异主要是消除电压的越限,对每一代最优个体进行单独变异,采用专家知识确定优先变异的基因位置和变异方向,并在其邻域进行搜索,这样做有助于减少寻优的盲目性,增强算法的局部搜索能力,提高了收敛速度。

3) 优化编码方法

在编码中对于并列运行的变压器变比作为一个控制变量处理,这样可以减少染色体长度。用几个数组存放变比及电容器补偿容量,数组的下标即是相应的整数编码,这样避免了变比和档位的换算,查找也方便。另外,采用映射法来设计适应度函数,该方法在迭代初期和后期都能较好地地区分同代个体间的优劣。在编程计算中使罚系数随着迭代次数的增大而加大惩罚力度,使搜索尽快进入可行域。

4 VQC 限值的计算

在计算出各变电站高压侧无功功率和低压侧母线电压的最优值曲线之后,以此最优曲线为基准计算出电压无功整定值曲线。一般来说,升降 1 档分接头产生的电压变化量约为 120 V,投一组电容器产生的电压变化量约为 300 V。VQC 九区图中电压和无功限值间的宽度一般按照式 (3) 设定。

$$\begin{cases} V_{\max} - V_{\min} = V_W \\ Q_{\max} - Q_{\min} = \cdot C_{\text{var}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_{\max} 、 V_{\min} 分别表示九区图中的电压上限和下限,单位为 kV; V_W 表示电压限值的宽度,一般为 0.5 kV; Q_{\max} 、 Q_{\min} 分别表示九区图中的无功上限和下限;

C_{var} 表示电容器单组补偿容量,系数一般取 1.3。

计算出各个变电站的最优无功补偿量与变压器分接头档位之后,按式 (4) 计算 VQC 最佳的无功、电压上下限。

$$\begin{cases} V_{\max} = V_{\text{opt}} + \cdot 1 \cdot V_W \\ V_{\min} = V_{\text{opt}} - \cdot 2 \cdot V_W \\ Q_{\max} = Q_{\text{opt}} + \cdot 3 \cdot C_{\text{var}} \\ Q_{\min} = Q_{\text{opt}} - \cdot 4 \cdot C_{\text{var}} \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 中的系数 $\cdot 1, \cdot 2, \cdot 3, \cdot 4$ 一般取值为 0.5, 实际中可根据不同时段的特点在 0.3 ~ 0.7 之间调整。最后,将全天的限值曲线按照各变电站控制调节次数及 VQC 限值设定的要求进行分段处理,下送至各变电站。

5 应用实例

该无功优化控制系统采用 Win2000 操作系统, SQL Server7.0 数据库,用 C++Builder6.0 开发环境实现,已应用于某地级市电网。所用服务器 CPU 主频 2.8 GHz,内存 1 024 M。

该电网有 330 kV 变电站 1 座,220 kV 变电站 1 座,110 kV 变电站 7 座。330 kV 变电站内有一台 60 Mvar 的调相机。市内 2 座发电厂归省电力局调度。等值处理后,该电网共有 42 个节点,36 条线路,14 台三绕组变压器,3 台二绕组变压器,18 个负荷,9 个无功补偿节点,2 个发电厂,1 台调相机。

采用改进的遗传算法对该系统进行优化计算,仅以 2004 年夏季大运行方式为例。优化前系统有 3 个节点的电压值低于下限,全网有功损耗为 6 881 MW;若不做任何补偿时,11 个节点的电压值低于下限,全网有功损耗为 7 414 MW。经过优化计算,各节点电压得到较大提高,有功功率损耗降为 6 540 MW,比优化前和无补偿分别下降 4.96% 和 11.78%。3 个月的试运行结果表明,本文中提出的方法能够满足在线优化计算的要求,平均降低网损约 3 个百分点。

6 结论

本文面向地区电网,开发了无功优化控制系统,并在甘肃省某市电网中得到应用。该软件实现全网无功优化计算后,克服了变电站局限于无功、电压就地最优控制,而不能达到全网最优的弊端。从优化与控制的角度使局部优化、分散控制变为全局

优化、集中控制与分散控制相结合,提高了系统电压的合格率、降低了系统的总线损。对提高电网管理水平、实现各变电站的安全、优化调度和提高电力输送效率将起到较大的推动作用。

参考文献:

- [1] 任晓娟,邓佑满,赵长城,等. 高中压配电网动态无功优化算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 31-36
REN Xiao-juan, DENG You-man, ZHAO Chang-cheng, et al Study on the Algorithm for Dynamic Reactive Power Optimization of Distribution Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 31-36
- [2] 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 86-89.
YU Er-keng, LU Guang-yi, ZHOU Jing-yang, et al Energy Management System [M]. Beijing: Science Press, 1998 86-89.
- [3] 王锡凡,方万良,杜正春,等. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社, 2003.
WANG Xi-fan, FANG Wan-liang, DU Zheng-chun, et al Analysis of Modern Power System [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [4] 耿光飞,杨仁刚. 基于定向变异遗传算法的地区电网无功优化[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 42-44, 54.
GENG Guang-fei, YANG Ren-gang Reactive Power Optimization of Regional Power Network by Directed Mutation Based Genetic Algorithm [J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 42-44, 54.
- [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] 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]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 54-60.
CHENG Ying, LU Ming-bo Reactive Power Optimization of Large-scale Power Systems with Discrete Control Variables [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 54-60.
- [7] 熊小伏,王志勇. 引入负荷预测的变电站电压无功控制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(13): 58-60.
XIONG Xiao-fu, WANG Zhi-yong Control of Voltage and Reactive Power of Substation with Load Forecasting [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(13): 58-60.
- [8] 钱康龄,纪红,等. 分布式电压无功全局优化控制系统的研究与应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 96-99.
QIAN Kang-ling, JI Hong, et al Development and Application of Distributed Global Voltage and Reactive Power Optimization Control System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 96-99.
- [9] 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, LU Ming-bo, et al Setting Method of Control Range of Voltage and Reactive Power in Substations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 70-74.

收稿日期: 2005-04-27; 修回日期: 2005-07-23

作者简介:

耿光飞(1970-),男,博士,讲师,研究方向为电力系统无功优化; E-mail: guangfei@cau.edu.cn

杨仁刚(1953-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统无功优化控制、配电自动化系统。

Research on reactive power optimization control system in high voltage distribution power network

GENG Guang-fei, YANG Ren-gang

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

Abstract: The software structure of the reactive power control system is designed. Dynamic reactive power optimization model is established. Genetic algorithm has been used to complete the reactive power optimization. This paper studies how to build appropriate VQ limits according to the calculation of reactive power optimization. When deciding VQ limits of VQC, the range of reactive control is calculated. The reactive power optimization program has been validated in a local power system. The power loss has dropped by 3% after optimization in that power system.

Key words: power system; reactive power optimization; genetic algorithm