

地区电网无功优化实时控制系统的研究与开发

郭庆来¹, 吴 越², 张伯明¹, 孙宏斌¹, 潘哲龙¹, 陈 星³

(1. 清华大学电机系, 北京市 100084; 2. 九江供电局, 江西省九江市 332000)

(3. 南昌大学电机系, 江西省南昌市 330000)

摘要:无功的优化与控制关系到电力企业自身的经济效益。提出的地区电网无功优化实时控制系统基于现有地调主站的调度自动化系统(SCADA/EMS), SCADA 将实时的数据断面发送给 EMS, EMS 利用遗传算法求解整个电网的无功优化问题, 并根据优化解给出控制方案, 再通过 SCADA 系统的下行命令通道执行优化控制方案, 完成闭环控制。文中重点论述了遗传算法应用于实时控制系统的优势, 并且解决了一些在实时控制过程中遇到的技术问题。现场应用表明, 该系统可以方便灵活地满足实时控制所提出的各种要求, 具有较好的实时性和鲁棒性。

关键词:无功优化; 实时控制; 遗传算法; 能量管理系统

中图分类号: TM761.1

0 引言

随着地区电网的不断发展, 电网结构日趋复杂, 用户对于电能质量的要求也日益提高。随着电力市场机制的引入, 采取有效手段降低网损、改善系统电压水平, 已经成为直接关系电力企业自身经济效益的课题。电力系统电压和无功功率控制是一个关系到保证供电质量、满足用户无功功率需求和系统电压稳定的问题, 同时也是减少线损、提高电网运行经济性的十分有效的措施, 因此一直得到电力系统运行人员和研究人员的重视^[1,2]。

我国目前大多数地区电网采用分散调整的方式实施无功电压控制, 即在各变电站内利用本身所具有的无功资源实施对变电站电压/无功控制。比较常用的方法是根据系统当前的运行状态在九区域图上所处的位置来决定相应的控制方案, 调节变压器的分接头挡位或者投切电容器, 从而保证一定的电压合格率和功率因数^[3]。这种方法相对简单, 但是难以完全实现全范围的无功电压最优控制。就单个站而言, 提高了电压合格率和电容器利用率, 但是在二级有载调压电网会出现电压频繁调整, 容易造成电压调节不合理现象。

随着城网改造的进行, 越来越多的电网中的有载调压分接开关和电容器补偿装置投入使用。为了充分发挥此类设备的作用, 必须从当前的人工调节方式转变为利用专家决策系统进行自动调节的方式。随着调度自动化系统(SCADA/EMS)的日益普

及, 如能在此基础上进行功能的再扩充, 发展电网闭环无功控制系统, 不但可以提高系统的电压合格率, 降低系统网损, 而且可以使 SCADA/EMS 的效益变得更加明显、直观。

1 系统结构

本文研究和开发的地区电网无功优化及实时控制系统基于 EMS 的状态估计和在线潮流功能。SCADA 将实时的数据断面发送给 EMS, 在状态估计和在线潮流运行之后, EMS 利用遗传算法求解整个电网的无功优化问题, 并根据优化解给出控制方案, 再通过 SCADA 系统的下行命令通道执行优化控制方案, 完成闭环控制。系统结构的示意图如图 1 所示。

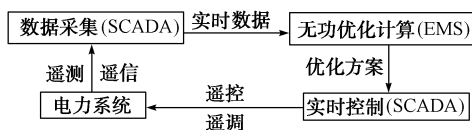


图 1 地区电网无功优化及闭环实时控制系统结构示意图

Fig. 1 Structure of real-time control system for reactive power optimization

在本系统中, 最关键的有以下两部分: ①无功优化的核心算法, 用来给出一个优化控制方案; ②实时控制部分, 用来解决如何执行优化算法所给出的控制方案的问题。在系统的设计上, 一方面利用 SCADA 的“四遥”功能, 来完成数据的采集和控制方案的执行; 另一方面利用 EMS 的状态估计和在线潮流功能, 来进行全网的潮流分析, 在此基础上,

完成以降低网损和减少越限为目标的无功优化计算。这样,综合了这两套系统各自的优势,可以更加充分地发挥现有调度自动化系统的功能。这套系统可以存在开环控制和闭环控制两种运行方式。在开环控制情况下,系统给出优化方案,供调度人员参考。调度人员可以根据自己的经验,在优化方案基础上手工进行无功电压控制,整个过程需要调度员的人工干预。经过一段时间的磨合,在整个系统开环工作正确的前提下,系统可以转入闭环控制,即给出方案后直接下达 SCADA 执行,整个过程不需要调度人员进行干预。

2 无功优化算法

无功优化是通过对无功潮流的分布进行调整,来改善电压质量和减少网络的有功损耗。

本文无功优化的数学模型如下。

目标函数:

$$\min P_L = \sum_{(i,j) \in N_b} g_{ij}(V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (1)$$

等式约束:

$$\begin{cases} P_{Gi} = P_{Di} + V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} = Q_{Di} + V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

不等式约束:

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (\text{对于母线 } i) \quad (3)$$

$$S_{\min} \leq S_i \leq S_{\max} \quad (\text{对于支路 } i) \quad (4)$$

$$T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} \quad (\text{对于有载调压变压器 } i) \quad (5)$$

可见,无功优化本质上是一个混合整数的、具有等式和不等式约束的非线性规划问题。而在实时控制系统中,首先要完成的就是对这样一个优化问题进行求解,并给出一个控制方案。这要求优化算法能够满足如下几个条件:

a. 足够的鲁棒性。由于系统是在线运行的,可能遇到各种情况,因此要求算法在绝大多数情况下都能够计算收敛并给出控制方案,使电网在控制后达到一个比当前更优的状态。

b. 足够的灵活性。为了满足不同的控制目标,用户可能需要修改优化目标;针对当前设备的实际状态,用户可能需要设定某个设备是否参与控制;针对不同的需要,用户可能需要改变约束条件。算法应当支持用户方便地进行这些修改。

c. 能有效地处理控制变量不连续的情况。本系统针对地区电网,其无功优化的控制手段是电容器

的投切和变压器分接头挡位的调节,这些控制变量都是离散量,要求算法能可靠地处理离散控制变量的情况。

对于无功优化问题,已经有一些传统的非线性优化算法得到了应用,例如 Newton 法、共轭梯度法、变尺度法、二次规划法等。但这些方法无法满足上述几个条件。尤其是传统算法只能处理连续变量,较难处理离散的控制变量,而且传统算法容易局部收敛,难以求得全局最优解。

近几年来,随着人工智能技术的发展,一些基于人工智能思想的新算法已在优化领域得到广泛应用。作为演化算法的代表之一,遗传算法已被引入到无功优化的领域之中^[4]。本文涉及的基于遗传算法的无功优化具体实现已经在文献[5]中有了详细阐述,在此不再赘述。以下仅简要说明为什么遗传算法可以符合无功优化及实时闭环控制系统的要求。

a. 遗传算法适用于解决混合整数优化问题,本身没有对控制变量的连续性假设的限制,可以方便地处理离散控制变量。

b. 遗传算法可以方便地处理多目标函数,在处理控制变量和约束条件上也比较灵活,用户可以根据需要进行定制。而且,用户可以在优化过程中随时暂停、继续或停止计算,相当灵活。

c. 遗传算法编码方式灵活,而本系统采用的混合编码方案更加符合问题的自然描述,所以可以方便地考虑对控制变量的约束,方便地引入启发式的搜索。

d. 由于本系统采用了保留本代最优解的简单遗传算法(SGA),从数学上可以证明这种遗传算法可以以概率收敛到全局最优解^[6]。而且,由于保留了当前最优解,优化目标值在演化过程中一直单调下降,至少不会上升,这就保证了算法至少能够给出一个比当前状态更优的解,从而保证了系统的鲁棒性。

e. 由于遗传算法可以从多个初始值开始搜索,所以能够以较大的概率收敛到全局最优解。

3 实时控制

本文介绍的无功电压实时控制系统的目标是:在地调中心利用 EMS 应用软件对变电站中的变压器分接头和电容器组进行远方控制,实现地区电网的安全经济运行。其控制流程如图 2 所示。

作为一个实时控制系统,不仅要保证得到足够好的优化解,同时也要保证优化解所对应的控制方案的可执行性。因此,除了要解决理论和算法的问题,还要解决工程实施中的大量技术问题,其中包括约束条件的处理、启动方式、动作死区处理、安全考

虑和方案执行等。

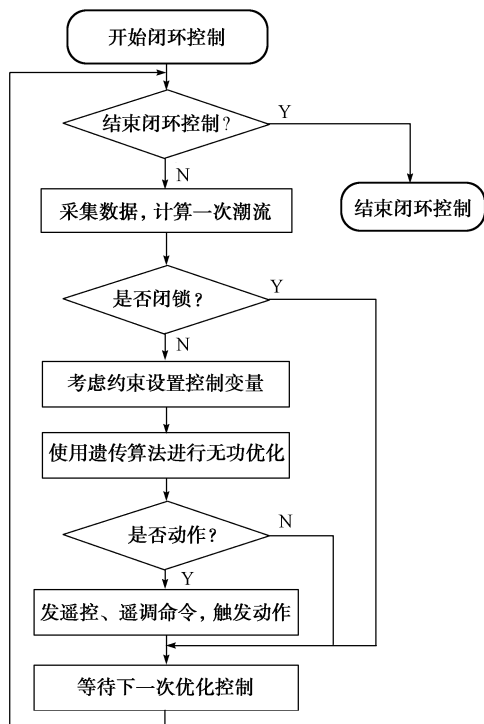


图2 无功实时控制流程

Fig. 2 Flow chart of real-time control for reactive power

3.1 约束条件的处理

在上面提到的优化算法中,已经考虑了无功优化模型中提到的等式约束和不等式约束,但是,如果要把优化的结果应用于实时控制,就必须额外考虑一些其他的约束和要求。这些约束是从延长现场设备的寿命和保证电网运行的安全稳定角度提出的,主要包括以下约束:

- 变压器分接头开关连续调整范围应该在3挡以内;
- 每日每台变压器分接头调节次数应不超过4次;
- 为防止电容器频繁投退,应设立电容器投退时间间隔;
- 并列变压器应该同步调节,避免环流;
- 控制方案中涉及的元件不宜过多;
- 对负荷侧电压采用逆调压方式。

由于遗传算法相对简单灵活,本文可以方便地处理这些新的约束条件。对于约束a,在变异算子中加以处理,使分接头的变化控制在3挡以内。对于约束b和c,只需在控制过程中保存动作的记录,如果当前时间和电容器的上次动作时间没有达到应有的间隔,或者分接头调节次数超过4次,那么在本次计算中该设备将不参与优化控制。对于约束d,在染色

体编码时把并列的变压器映射成染色体中的同一个基因位,这样,控制方案中并列变压器的最终挡位必定是相同的。对于约束e,把动作元件数目看成一种代价,作为多目标优化的一个组成部分参与优化,并可以指定这个代价在整个目标函数中的权重,这样,优化计算的本身就体现了减少动作元件数的趋势。对于约束f,本文采用了动态确定母线电压上下限的办法,用户可以指定某个时段是高负荷期还是低负荷期。在高负荷时段,将母线电压下限上移,以保证母线电压偏上限运行;同理,在低负荷时段,将母线电压上限下移,以保证母线电压偏下限运行。

3.2 启动方式

本文介绍的无功电压实时控制系统的启动方式分成以下两种:

a. 周期方式,即每隔一定的时间启动一次优化控制。一般时间间隔不宜太短。这样做虽然比较简单,但容易造成的后果是在前几次控制中都对某个设备进行了控制,使得该设备达到了当天的最大动作次数,导致该设备无法参与后面的优化计算。

b. 定点方式,即在每天的固定时刻进行优化控制。当前启动时刻由用户来指定,需要依靠用户的经验来决定每天最佳的控制时间。更加智能化的方法是:一方面,利用历史负荷曲线和负荷预测提供的未来曲线,在负荷峰点和谷点以及负荷变化最剧烈的时刻启动优化计算,以期望收到最好的效果;另一方面,利用历史上记录下的优化动作时刻及控制后的效益情况等信息,从中提炼出最佳的控制时刻。

本文采用了定点启动的控制方式。

3.3 动作死区处理

从保护现场设备的角度,当无功优化程序运行的优化效益并不明显时,应当避免发遥控、遥调命令,防止电容器和变压器分接头开关无谓动作,因此引入了动作死区条件。本文的死区条件是根据优化效益来决定的,包括越限减少量和网损减少量两部分。只有当有足够的越限减少量或者网损减少量时,才允许实时控制。

3.4 安全考虑

无功优化和实时控制应在电力系统相对稳定的情况下进行。如果电力系统发生了电气事故,或者现场情况不宜进行无功优化或实时控制,都要对本系统进行闭锁。一般说来,闭锁条件包括以下几种:

- 电网事故闭锁:当枢纽站频率超过 $50 \text{ Hz} \pm 0.2 \text{ Hz}$ 时,闭锁整个系统。
- 当受控站内保护或自动装置动作时,受控站闭锁。
- 变压器保护动作:闭锁该变压器及其并列变

压器。

d. 电容器保护动作:闭锁该电容器。

e. 量测不准确、状态估计程序不收敛或者残差太大,以及在线潮流程序计算有问题时,都应闭锁系统。

3.5 方案执行

控制方案给出以后,通过与 SCADA 系统之间的协议,利用 SCADA 系统的遥控、遥调功能,将控制方案下达执行。在系统运行的最初阶段,考虑到安全因素,系统可以设置成开环运行,先把控制方案显示给调度员,最终的控制方案要在调度员确认后才能通过 SCADA 执行,在确认的同时,允许调度员对控制方案进行修改。系统的最终目标是实现闭环控制,即从数据的采集到最后方案的执行完全不需要人工干预,由程序自动执行。

4 现场情况

该系统于 2001 年上半年开始在九江地调进行调试和试运行,并于同年 11 月通过江西省电力公司组织的科技鉴定。在鉴定组的测试过程中,对九江地调 2001 年 11 月 26 日 22 时 10 分的实时电网运行情况进行了优化计算,达到降损 128.898 kW,降低网损率为 0.043%。

参考文献

- 1 孙宏斌,吴文传,张伯明(Sun Hongbin, Wu Wenchuan, Zhang Boming). 安全约束下的全局无功最优控制的仿真研究(Study on

Simulation of Security Constrained Global Reactive Optimal Control). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1999,23(5):4~8

- 2 孙宏斌(Sun Hongbin). 电力系统全局无功优化控制的研究:[博士学位论文](A Study on Global Reactive Optimal Control, Doctoral Dissertation). 北京:清华大学(Beijing: Tsinghua University),1996
- 3 沈曙明(Shen Shuming). 变电站电压及无功综合自动控制的实现与探讨(The Realizaion and Discussion of Integrated Control for Voltage and Reactive Power in Substations). 华东电力(East China Electric Power),2000,28(10):35~36
- 4 周双喜,杨 彬(Zhou Shuangxi, Yang Bin). 实现无功优化的新算法——遗传算法(A New Algorithm for Reactive Power Optimization). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1995,19(11):19~23
- 5 潘哲龙,张伯明,孙宏斌(Pan Zhelong, Zhang Boming, Sun Hongbin). 分布计算的遗传算法在无功优化中的应用(A Distributed Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2001,25(12):37~41
- 6 潘正军,康立山,陈毓屏(Pan Zhengjun, Kang Lishan, Chen Yuping). 演化计算(Evolutionary Computation). 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press),1998

郭庆来(1979—),男,博士研究生,研究方向为调度自动化和无功优化与闭环控制。E-mail: guoqinglai00@mails.tsinghua.edu.cn

吴 越(1965—),男,高级工程师,总工程师,主要从事电力系统生产、技术管理工作。

张伯明(1948—),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统运行、分析和控制的研究与教学工作。

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF REAL-TIME CONTROL SYSTEM FOR REACTIVE POWER OPTIMIZATION

Guo Qinglai¹, Wu Yue², Zhang Boming¹, Sun Hongbin¹, Pan Zhelong¹, Chen Ken³

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Jiujiang Electric Power Bureau, Jiujiang 332000, China)

(3. Nanchang University, Nanchang 330000, China)

Abstract: A reactive power optimization and control system is becoming more and more important for electric power companies. The reactive power optimization and real-time control system presented is based on the SCADA/EMS framework. EMS gets real-time data of power system from SCADA to run state estimate (SE) function and online load flow (OLF) function. Then genetic algorithm (GA) has been used to complete the reactive power optimization and the remote control and remote regulating function of SCADA to operate the control scheme. Moreover, the advantages of genetic algorithm to be used in a real-time control system and the solution of some engineering problems are analyzed. Field applications show that the system is convenient and flexible to satisfy the requirement of real-time control.

Key words: reactive power optimization; real-time control; genetic algorithms; EMS