

安全约束下的全局无功最优控制的仿真研究

孙宏斌 吴文传 张伯明 相年德

(清华大学电机系 100084 北京)

罗承廉 彩 象 戴 飞

(河南电力调度通信局 450052 郑州)

摘 要 安全约束下的全局无功最优控制集安全性和经济性于一体。以实际的电力系统为试验对象,以一套调度员培训仿真系统为研究工具,通过一系列的仿真试验,验证了全局无功最优控制所具有的重大效益,探讨了该控制系统的可行性和控制策略,为进一步在现场实施该控制系统提供了重要依据。

关键词 电力系统 无功 最优控制 仿真

分类号 TM 761 TM 743

0 引言

基于最优潮流(OPF)的实时无功最优控制集安全性和经济性于一体,实现了安全约束下的经济性的闭环控制,被公认为是电力系统调度控制发展的最高阶段^[1,2]。为区别于基于厂站一级的局部控制,本文称之为全局无功最优控制。它就是要在正常运行情况下,通过对全局电力系统的无功可控设备实行实时闭环控制,在满足负荷需求和保证系统安全优质运行的情况下使系统网损最小。

最优潮流的概念早在 60 年代初由法国学者 Carpentier 首次提出^[3],但由于其难度大,工程实施要求的条件苛刻,目前一般只停留在离线计算阶段。在国外,少数著名的电力公司(如德国的 RWE^[4]、美国的 PG&E^[5]、法国的 EDF^[1]和意大利的 ENEL^[6]等)正在或准备进行在线实施全局无功最优控制的研究工作;在国内,有关的理论研究工作也已有 10 多年的历史,实时最优潮流的工程应用已有四五年^[7],所开发的最优潮流软件^[8,9]在算法和功能上有创新和特色,已达到实时应用水平,并已设立了国家重点科技攻关项目,准备在我国的实际电力系统中实现全局无功最优控制^[10]。

本文对全局无功最优控制进行仿真研究,以实际的河南省电力系统为试验对象,以发电机无功出力 and 并联电容器(或并联电抗器)为控制手段,进行了一系列仿真试验,验证了全局无功最优控制系统在提高电力系统安全、优质、经济运行方面的重大效益,探讨了全局无功最优控制系统的可行性和控制

策略,为进一步的现场实施提供了重要依据。

1 仿真系统介绍

本文采用了一套已经在实际电网调度中心应用的调度员培训仿真系统作为研究工具。该系统采用 UNIX 操作系统,基于局域网设计,在硬件上采用了开放性能好的 SUN Sparc 工作站,图 1 给出了该仿真系统的分布式结构图。

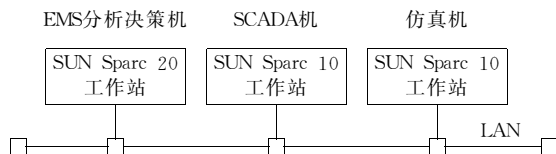


图1 仿真系统的基本结构

Fig. 1 Basic structure of the simulated system

a. 仿真功能:仿真机对电力系统进行仿真。仿真系统启动时,可在仿真工况库中选择所需要的电力系统的运行工况。在正常情形下,电力系统模型的仿真计算每隔 5 s 计算一次,给出电网状态,包括频率、潮流、电压、开关/刀闸状态等。

b. SCADA功能:SCADA 机处理仿真机发送过来的遥测、遥信等数据,完成常规的 SCADA 实时应用功能,同时处理遥调、遥控命令,通过网络通信作用到仿真机的电力系统模型上,实现遥调、遥控功能的仿真。

c. EMS分析决策功能:EMS 分析决策机每隔 30 s 从 SCADA 机申请一个完整的 SCADA 数据断面,并完成一次实时状态估计。各种 EMS 应用功能^[11]均能高效运行,各种控制策略可以通过网络通信发送至 SCADA 机,并由 SCADA 机将控制命令作用到电力系统模型上,实现闭环控制的仿真。

1998-08-25 收稿。

国家重点科技攻关项目(85-720-10-38)和国家自然科学基金资助项目(59677008)。

2 试验系统

试验系统采用实际的河南省电力系统。该系统是一个拥有 500 kV, 220 kV, 110 kV 等多个电压等级的典型的发、输电系统, 总发电量超过 4 000 MW, 系统规模为: 发电厂 12 座, 变电站 42 座, 发电机(包括调相机) 59 台, 支路数 220 条, 节点数 170 个。图 2 给出了本文仿真研究所采用的日负荷曲线, 采样周期是 0.5 h, 该曲线是从实际系统中收集来的典型日负荷曲线, 具有两峰一谷的特征。

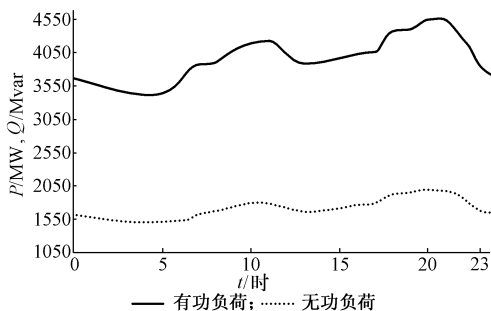


图 2 试验系统日负荷曲线

Fig. 2 The day load curves of the simulated system

3 研究方法

各类无功可控设备的控制能力和特点差异很大, 在实时控制中, 仅利用数学手段来协调上述复杂的实际因素常常是行不通的^[12]。可以通过对无功可控设备特点和调节性能的研究, 规定各种可控设备在控制系统中充当的角色, 进而协调其行为。常见的无功可控设备有: 发电机(或调相机)、并联电容器(或电抗器)、变压器有载调压分接头。针对这些设备的特点, 制订如下的控制策略:

a. 发电机(或调相机)作为系统中主要的无功源, 可以连续调节, 能及时快速响应系统中无功电压的扰动, 因此, 其作为本文唯一的控制手段参与无功优化计算。由于没有离散型控制变量和调节次数约束, 普通的实时无功优化软件即能胜任, 尤其是本文所采用的交叉逼近法最优潮流软件^[8,9], 具有很高的计算可靠性和计算效率。

b. 并联电容器(或电抗器)作为重要的无功补偿设备, 有投切次数约束, 是最优控制主要的协调对象。目的在于通过它们的投切补偿来保证各区域内发电机在较长时间段内有足够的无功裕度, 保持了区域内有足够的快速响应事故和扰动的能力, 提高了电压的安全性。

c. 变压器有载调压分接头作为系统中重要的调压设备, 有调节次数约束。目前, 一般实现就地自动控制。若需要实现全局集中式控制时, 可考虑利用预报的日负荷曲线和离线的无功优化程序来制订日

调度计划, 并按照既定的日调度计划定时地对分接头进行调节控制。因此, 暂不作为本文全局无功最优控制仿真研究的对象。

在仿真研究中, 利用前述的仿真系统, 在 EMS 分析决策机上周期性地运行实时最优潮流(OPF), 将计算出的发电机的机端电压最优设定值作用到电力系统模型上, 以实现全局无功最优控制的仿真。这种最优控制自动实现, 控制周期为 0.5 h。

4 仿真结果与分析

4.1 所有机组参与最优控制

在本小节的仿真研究中, 河南省辖内的 59 台发电机组均参与最优控制。

4.1.1 网损比较

图 3 给出了最优控制前后系统日网损曲线。由图 3 可知, 最优控制后, 系统网损明显下降, 平均下降 4 MW, 图中涨落线部分的面积即是一天中由于降低损耗而节省的电能, 由此可推算, 经无功最优控制后, 河南省电力系统在一年中可节省电能约 3.5×10^7 kW·h, 若以每千瓦小时电能 0.5 元钱计算, 合计每年节省约 1 750 万元人民币, 经济效益十分显著。

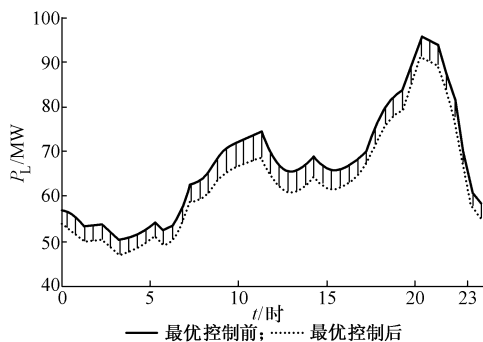


图 3 最优控制前后的系统网损比较

Fig. 3 Comparison of system loss between before and after optimal control

4.1.2 电压安全质量的比较

图 4 给出了最优控制前后重要枢纽母线日电压曲线, 由图可知, 最优控制后, 各枢纽母线电压高而平, 有利于电压的稳定和安全。另外, 由图 5 可知, 在最优控制前, 系统中平均约有 18 个母线电压越限, 而最优控制以后电压越限全部解除。由此可见, 无功最优控制在保证电压质量和预防安全性事故中将起重要作用, 它的实施具有重大的社会效益和经济效益。

4.1.3 发电厂无功出力的比较

图 6 给出了姚孟老厂在最优控制前后日无功出力曲线, 电厂总容量为 600 MVA, 无功出力上下限

分别为 360 Mvar 和 -120 Mvar。由图 6 可知,在最优控制后,发电厂的无功出力曲线与负荷曲线(见图 2)有相似的两峰一谷形状。这一特征是由于无功优化使无功潮流分布得以改善,减少了无功的远距离输送,与“无功就地平衡”原则吻合。因此就某一局部区域而言,无功的供需平衡基本上得到满足,使得优化后的无功出力与区域负荷之间呈现一种明显的对应关系,这有利于在最优控制中协调区域内电容/电抗器的投切控制,该问题在第 4.3 节中将作进一步的讨论。

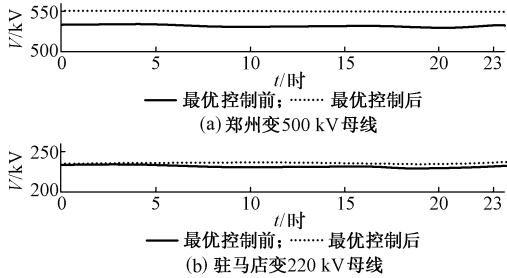


图 4 最优控制前后重要枢纽母线电压比较
Fig. 4 Comparison of pivot bus voltage between before and after optimal control

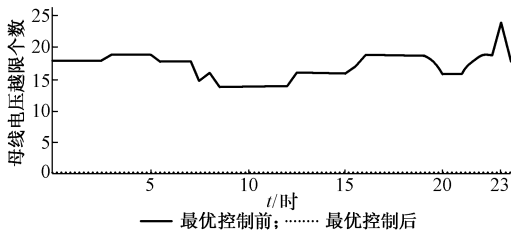


图 5 最优控制前后母线电压越限数比较
Fig. 5 Comparison of voltage violation between before and after optimal control

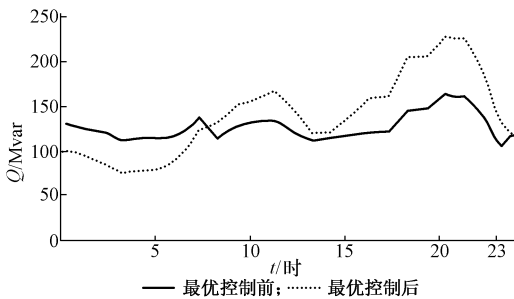


图 6 最优控制前后姚孟老厂无功出力比较
Fig. 6 Comparison of reactive output of Yaomeng plant between before and after optimal control

4.2 部分机组参与最优控制

控制系统在工程实施时,由于发电机数量大、分布范围广,且实际情况复杂,一般只能做到先集中控制一部分,但要允许全局控制的范围由小到大逐步发展。因此,出现了全局控制与局部控制相互并存的

情形。针对这种情况,本文采用了如下解决方案:即在原有的优化潮流数学模型^[9]中增加了局部控制的稳态物理响应的约束,例如:

a. 当发电机装有 AVR(自动电压调节),则增加等式约束 $\Delta V_G = 0$;

b. 当发电机装有 AQR(自动无功出力调节),则增加等式约束 $\Delta Q_G = 0$ 。

在本小节的仿真研究中,河南省所辖的发电机中有 1/3 参与全局优化,而在其余机组中,有 5 台水电机组处于 AQR 局部控制下,35 台火电机组处于 AVR 局部控制下。图 7 和图 8 给出了这种部分机组参与最优控制时的仿真结果。由图可知,部分机组参与下的网损减少的量比所有机组参与下的要少,但在降低网损和提高电压的安全优质运行水平方面仍有很大效益,相比之下,其优势在于:部分机组参与全局最优控制,更符合实际,可行性更好。

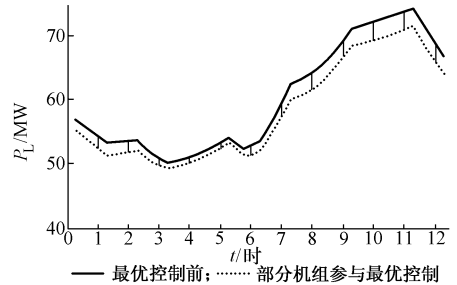


图 7 部分机组参与最优控制前后的系统网损比较
Fig. 7 Comparison of system loss between before and after partial optimal control

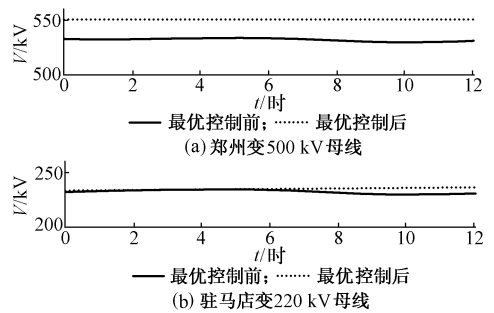


图 8 部分机组参与最优控制前后重要枢纽母线电压比较
Fig. 8 Comparison of pivot bus voltage between before and after partial optimal control

4.3 并联电容器(或并联电抗器)的协调与配合

河南高压输电网中没有可控的并联电容器,以该电网中一个实际并联电抗器的投切为例,讨论有操作次数约束的离散型的并联电抗器在最优控制中的协调问题,电容器投切的策略与之类似。

姚 21 电抗器是挂在姚孟老厂高压母线上的并联电抗器,其容量为 100 Mvar。图 9 中所示的姚 21

电抗器未投运时的优化曲线,即是图 6 中姚孟老厂无功优化出力曲线的峰值部分。

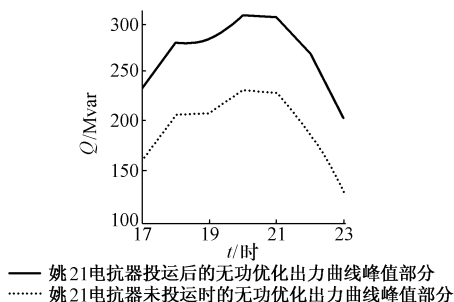


图 9 电抗器投运前后姚孟老厂无功优化出力比较
Fig. 9 Comparison of optimal reactive output of Yaomeng plant between before and after reactor control

比较图 9 中的两条曲线可知,若区域内电抗器退出运行,区域内电厂的无功优化出力水平将会有效地降低,图中降低的幅度约为 68 Mvar,从而使区域内的发电机在峰值时段内保持了足够高的上调无功裕度,有效提高了区域承受事故扰动的能力,提高了安全性。

若不采用最优控制,由于发电厂只基于本地控制,系统中存在不合理的无功流,很难解决好区域性的无功供需矛盾,区域内发电与负荷供需双方一般没有明显的合理的对应关系,因此协调离散型可控设备比较困难。而由图 6 可知,最优控制后,无功出力曲线的两峰一谷与区域内的负荷曲线的两峰一谷有明显的对应关系,因此在实际的协调控制中,可利用在线负荷预报结果,当区域负荷进入低谷时投入区域内的电抗器,而当区域负荷进入峰值区间时退出电抗器,以此作为协调控制的原则,与全局无功最优控制配合,可以将区域内发电厂的无功出力合理地控制在上下限值之间,保持了足够的上调和下调的无功裕度,使系统具有良好的安全性。实际上,在这种协调控制中,电抗器对区域无功需求起到了“削峰填谷”的作用。另外,按典型的两峰一谷的区域负荷曲线,分区域投切电抗器,保证了电抗器投切次数的约束能得到满足,因此,这种协调控制策略可行。

5 结语

本文利用实际的河南省电力系统模型,对安全约束下的全局无功最优控制进行了仿真研究。通过控制前后的对比分析,展示了全局无功最优控制系统在提高电力系统安全、优质、经济运行水平方面的重大效益和在实现上的可行性,并探讨了最优控制与并联电容器(或电抗器)投切控制的配合策略。为下一步在实际电力系统中实施全局无功最优控制准备了条件。

参考文献

- 1 Carpentier J. Towards a Secure and Optimal Automatic Operation of Power Systems. In: Power Industry Computer Applications Conference. Montreal (Canada): 1987. 2~37
- 2 Stott B, Alsac O, Monticelli A J. Security Analysis and Optimization. Proceeding of the IEEE, 1987, 75(12): 1623~1644
- 3 Carpentier J. Optimal Power Flows. Electrical Power & Energy Systems, 1979, 1(1): 3~15
- 4 Denzel D, Edwin K W, Graf F R, et al. Optimal Power Flow and Its Real-Time Application at the RWE Energy Control Centre. In: CIGRE Report 39-19. Paris: 1988
- 5 Papalexopoulos A, Hao S Y, Liu E, et al. Cost/Benefits Analysis of an Optimal Power Flow: the PG&E Experience. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 796~804
- 6 Corsi S, Marannino P, Losignore N, et al. Coordination Between the Reactive Power Scheduling Function and the Hierarchical Voltage Control of the EHV ENEL System. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 686~694
- 7 Zhang B M, Wang S Y, Xiang N D, et al. A Security Analysis and Optimal Power Flow Package with Real Time Implementation in Northeast China Power System. In: IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management. Hong Kong: 1993
- 8 严正. 最优潮流新算法的研究——交叉逼近法的理论与实践. [博士学位论文]. 清华大学, 1991
- 9 Yan Z, Xiang N D, Zhang B M, et al. A Hybrid Decoupled Approach to Optimal Power Flow. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 947~954
- 10 孙宏斌. 电力系统全局无功优化控制的研究. [博士学位论文]. 清华大学, 1996
- 11 Zhang B M, Deng Y M, Sun H B, et al. An Open and Distributed Energy Management System. In: Proceedings of International Conference on Power System Technology. Beijing: 1994. 498~502
- 12 Tinney W F, Bright J M, Denaree K D, et al. Some Deficiencies in Optimal Power Flow. In: Power Industry Computer Applications Conference. Montreal (Canada): 1987. 164~169

孙宏斌,男,1969年生,博士,主要从事EMS和DMS的研究、开发和教学工作,曾获国家教委科技进步二等奖。

吴文传,男,1973年生,硕士研究生,主要从事EMS和DMS的研究和开发工作。

张伯明,男,1948年生,教授,博士生导师,主要从事电力系统运行、分析和控制等方面的科研与教学工作。

(下转第17页)

