

考虑电压稳定的自动电压闭环控制

王宽, 郑勇, 陈佑健

(福州电业局, 福建 福州 350009)

摘要: 结合福建实际电网, 提出了考虑电压稳定的自动电压优化控制方法, 特定义了电压稳定约束电压下限和发电机动态无功储备的概念, 将这两个量作为约束发送给 AVC 系统, 在保证一定电压稳定裕度的情况下实现对全网的自动电压控制, 即实现电压稳定分析和 AVC 系统的闭环控制。通过实际应用表明, 所提出的方法较好地平衡了系统的经济性和安全性, 实用化处理后控制设备动作合理, 能够在保证一定的电压稳定裕度的基础上有效地降低系统网损, 提高电压质量, 在福建省网中取得了成功的应用。

关键词: 电压稳定; AVC 系统; 电压下限; 无功储备; 福建电网

Automatic voltage close-loop control with voltage stability

WANG Kuan, ZHENG Yong, CHEN You-jian

(Fuzhou Electric Power Bureau, Fuzhou 350009, China)

Abstract: An approach of automatic voltage optimization control considering voltage stability is presented in this paper associated with Fujian power system. It defines dynamic reactive power repertory of generator and voltage lower limit constrained by voltage stability, which are considered as the constraints of automatic voltage control. It implements the close-loop control of online voltage stability monitoring system and AVC system and also ensures voltage stability. Factual application indicates that the proposed approach balances the economy and security of the system better, controls the devices in reason, reduces the loss of the system efficiently, and improves the quality of voltage, which is applied in Fujian power system successfully.

Key words: voltage stability; automatic voltage control; lower limit of voltage; reactive power repertory; Fujian power system

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)12-0031-04

0 引言

随着高电压等级、大容量和跨区电网的迅速发展, 电力市场化程度的深化, 为保证电网安全、优质和经济运行, 对电压的质量和稳定性提出了更高标准。2004 年福建电网“集中决策多级协调的电网自动电压控制系统^[1~3]”已经投入实际运行。但福建电网存在着“头重脚轻”的问题, 500 kV 网架还比较薄弱, 500 kV/220 kV 电磁环网运行, 南部负荷中心严重缺乏电源支撑, 西北部地区网架比较薄弱, 多重事故情况下存在负荷大范围转移导致的电压崩溃等问题。因此, 根据福建电网的发展现状和特点, 借鉴国外大电网在运行实践中的经验和教训, 加强对电压稳定的理解和认识, 开发了福建电网在线电压稳定监视与控制系统, 并实现了与 AVC 系统的协调控制。

现有 AVC 系统和电压稳定分析两者的协调思路主要有两种。第一种是紧耦合方式^[4,5], 将电压稳定的指标加入电压优化的目标函数中, 或者放到约束条件里, 在优化计算中统一考虑。第二种是各自解决自己的问题^[6,7], 以事件为驱动。当系统电压越限或者网损偏高时, 由 AVC 系统控制; 当系统电压稳定指标越限时, 由电压稳定分析系统控制。第一种方式下, 指标权重的选取仍是个问题, 选取的过大和过小都会走向极端; 第二种方式太分散, 不便于管理。

本文在总结前人成果的基础上, 提出了电压稳定分析和 AVC 系统协调控制的新思路, 定义了电压稳定约束的自动电压控制电压下限及动态无功储备的概念, 计算出保证电网电压稳定的关键母线节点电压下限和机组动态无功备用率, 提供给 AVC 系统, 作为电压控制计算的约束条件, 利用已有 AVC

系统的控制手段, 实现了两者的协调, 从而保证系统电压稳定性的同时具有较高电压质量。

1 电压稳定约束电压下限和动态无功储备

1.1 电压稳定约束电压下限

传统的电压控制目标是保证节点的电压水平在合理的范围之内, 从电压稳定分析的角度来看, 这种方法是不严格的, 需要注意的是系统具有电压稳定性并不一定能够保证节点的电压水平, 有可能在很低的电压水平下系统仍然能够维持稳定; 同样, 较高的电压水平也不一定代表系统具有电压稳定性, 系统有可能在较高的电压水平下发生电压失稳甚至崩溃^[7]。因此, 本文给出系统具有期望电压稳定裕度的电压控制的电压下限值 $U'_{i\min}$, 力求在保证系统电压稳定性的同时具有良好的电压水平。

从图 1 可以看出, 只有当电压高于 U_{cr} 即 PV 曲线的上半支才是电压稳定的; 如果低于 U_{cr} , 该节点的电压将会出现不可逆转的持续下降甚至发生电压崩溃。本文电压下限值 $U'_{i\min}$ 取 PV 曲线临界点电压的 110%。采用连续潮流法^[8]进行电压稳定性分析, 可以得到各厂站母线的 PV 曲线, 清晰地看到电压随负荷的变化曲线, 使得对全网电压稳定裕度和电压稳定性有了一个全面、具体的了解。

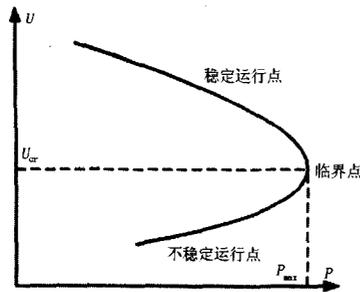


图 1 节点 PV 曲线示意图

Fig.1 PV node curve

1.2 动态无功储备

相对于并联补偿的电容/电抗器, 发电机的动态无功具有响应快速, 调节平滑等优势。国际上已发生的电压失稳事故表明, 发电机无功储备耗尽导致的发电机过励磁保护动作, 引起的机端或高压母线电压失控, 是故障后系统电压失稳形成、扩散, 乃至发生系统电压崩溃的重要因素之一。故而保留足够的发电机动态无功储备是遏制系统故障后电压崩溃事故突发的有效措施之一。然而保留过多的发电机动态无功储备, 不充分利用已有的发电机无功容量显然是不经济的, 其对策是通过电压稳定分析, 给出满足期望电压稳定裕度的最小发电机动态无功

储备。

故定义了无功储备率 μ_{Gi} 。

$$\mu_{Gi} = \frac{Q_{Gi\max} - Q_{Gi}}{Q_{Gi\max}} \geq \mu_{Gi}^s \quad (1)$$

式(1)中: Q_{Gi} 为第 i 个发电机正常运行时的无功出力; $Q_{Gi\max}$ 为第 i 个发电机的无功出力上限; μ_{Gi}^s 为第 i 个发电机无功储备的下限。

一般来说, 发电机无功出力增大(无功储备减少), 将使电压稳定裕度减少。故障后, 如果并联电容不能及时投入, 则发电机动态无功储备将决定电压稳定的程度。在电网的实际运行中, 发电机动态无功储备可分为两部分, 一部分是为保证电网的安全运行而预留的必需的无功储备, 另一部分则可能是由于电网的当前实际无功需求不足而多出来的不必要的无功储备。在计算发电机最小动态无功储备时应剔除不必要的无功储备。根据这一思想, 可在发电机机端添加虚拟的无功负荷, 以吸收多余的无功储备, 并保证在正常运行方式或故障条件下, 仅依靠发电机的动态无功储备, 就能满足期望的电压稳定裕度。

根据上述分析, 预想故障下的动态无功储备下限计算的数学模型可简要描述如下:

$$\min \sum_{i \in S_N} (V_i^\lambda - V_i^0)^2 \quad (2)$$

s.t.

$$\begin{cases} P_{Gi}^\lambda - (1 + \lambda)P_{Li}^0 - \sum_{j \in i} P_{ij}^\lambda (V^\lambda, \theta^\lambda) = 0 & i \in S_N \\ Q_{Gi}^\lambda - (1 + \lambda)Q_{Li}^0 - Q_{Si} - \sum_{j \in i} Q_{ij}^\lambda (V^\lambda, \theta^\lambda) = 0 & i \in S_N \\ P_{Gi\min} < P_{Gi}^\lambda < P_{Gi\max} & i \in S_G \\ Q_{Gi\min} < Q_{Gi}^\lambda < Q_{Gi\max} & i \in S_G \\ 0 < Q_{Si} < Q_{Gi\max} & i \in S_G \\ V_{i\min} < V_i^\lambda < V_{i\max} & i \in S_N \end{cases} \quad (3)$$

式(2)为目标函数, 旨在保证预想故障条件的期望电压稳定裕度 λ 下的电压 V_i^λ 与初始运行点的电压 V_i^0 相近; 式(3)为预想故障条件的期望电压稳定裕度 λ 下的约束条件, 等式约束为潮流平衡方程约束, 4 组不等式约束分别为节点有功出力、节点无功出力、虚拟无功负荷和节点电压幅值的上下限约束; P_{Gi}^λ 、 Q_{Gi}^λ 分别为预想故障条件的期望电压稳定裕度 λ 下节点 i 的有功和无功出力; P_{Li}^0 、 Q_{Li}^0 分别为初始工况时节点 i 的有功和无功负荷; V^λ 、 θ^λ 分

别为预想故障条件的期望电压稳定裕度 λ 下节点电压幅值向量和节点电压相位向量; Q_{Si} 表示拓扑点 i 的虚拟无功负荷; S_G 为发电机节点的集合; S_N 为负荷节点的集合。

预想故障集一般包括正常运行方式, 发电机、线路、变压器等元件 $N-1$ 开断和自定义多重元件的组合开断 ($N-n, n \geq 2$)。

采用上述的数学模型, 计算出的可调无功就为期望裕度 λ 下的最小动态无功储备, 即:

$$\mu_{Gi}^s = \frac{Q_{Gi}^\lambda - Q_{Gi}^0}{Q_{Gi\max}} \quad (4)$$

当所有控制点的电压都高于所给电压下限, 各机组实际无功储备均大于动态无功储备下限时, 可保证系统在正常和故障条件下均具有期望的电压稳定裕度。

2 考虑电压稳定的自动电压闭环控制

2.1 控制的模型

以系统有功网损最小为目标函数, 控制变量包括发电机无功出力、无功补偿设备、有载调压变压器档位等, 因此, 模型可以描述如下: 即:

$$\min \left(f(x) = \sum_{i=1}^n V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \right) \quad (5)$$

式(5)中: $x = [V_1, V_2, \dots, V_N / \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]$, 分别为节点电压和相角。

等式约束即为潮流方程约束, 不等式约束包括电网的运行约束和控制变量的约束, 与传统的电压优化控制约束(节点电压幅值, 变压器档位, 电容/电抗器组数, 发电机出力)不同, 本文中特别引入了电压稳定约束电压下限和发电机动态无功储备约束。因此, 考虑电压稳定的自动电压闭环控制的不等式约束为:

$$\begin{cases} P_{Gi\min} < P_{Gi} < P_{Gi\max} \\ Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi} \leq (1 - \mu_{Gi}^s) Q_{Gi\max} \\ Q_{Ci\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci\max} \\ U'_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \\ K_{i\min} \leq K_i \leq K_{i\max} \\ P_{ij\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij\max} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 结构示意图

基于省调 iES-500EMS/SCADA 构架, 结合 AVC

系统, 有效地利用了现有资源, 如图 2 所示, 主要包括软件体系结构、软件模块、各子系统及软件模块之间的数据交换、与 SCADA/EMS 系统之间数据接口及数据共享等, 最终形成福建省调 AVC 主站与子系统之间的闭环控制。

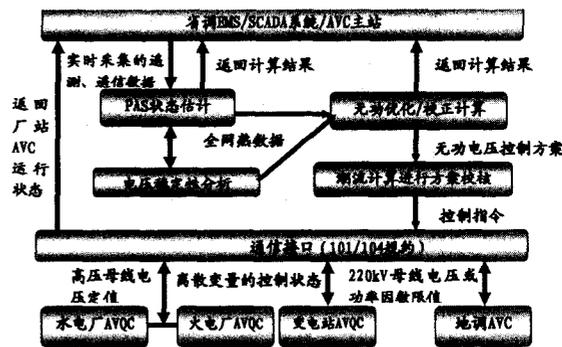


图 2 闭环控制系统结构示意图

Fig.2 Structure of closed-loop control system

3 应用实例与结果分析

福建省网以 500 kV 线路为输电干线, 覆盖全省的双回路 220 kV 网架, 二回 500 kV 联络线与华东电网互联, 内部 500 kV 和 220 kV 输电线路暂以电磁环网运行。该系统共 173 个节点, 251 条支路。

图 3 列举了某日电压稳定分析的结果, 负荷保持原功率因数按当前比例增长, 发电机按当前剩余的容量大小等比例分摊。考虑发电机容量的限制, 即满发后从 PV 节点转化为 PQ 节点。

图 3 中, 左上图为各行政区的电压稳定裕度, 即系统当前运行状态与极限运行点之间的相对距离, 右上图为全网预想故障下电压稳定裕度曲线, 左下图为某一断面下系统裕度的具体值, 右下图为系统运行信息。

为了说明本文提出方法的有效性, 分别列举了某日凌晨 03:03 分低谷负荷、早晨 7:02 分平谷负荷和某日上午 11:25 高峰负荷三种情况下的断面数据进行了计算, 结果见表 3。

结果分析: 福建电网原来是独立的网络, 现 500 kV 双回线与华东电网互联, 电压稳定裕度比较高, 考虑电压稳定的自动电压闭环控制后电压稳定裕度略有上升。系统的有功网损也有所下降, 在重负荷时, 降损效果比较明显, 大约在 1 MW 左右; 在凌晨轻负荷时, 网损降低比较少。电压质量也进一步提高, 取得了很好的效果。

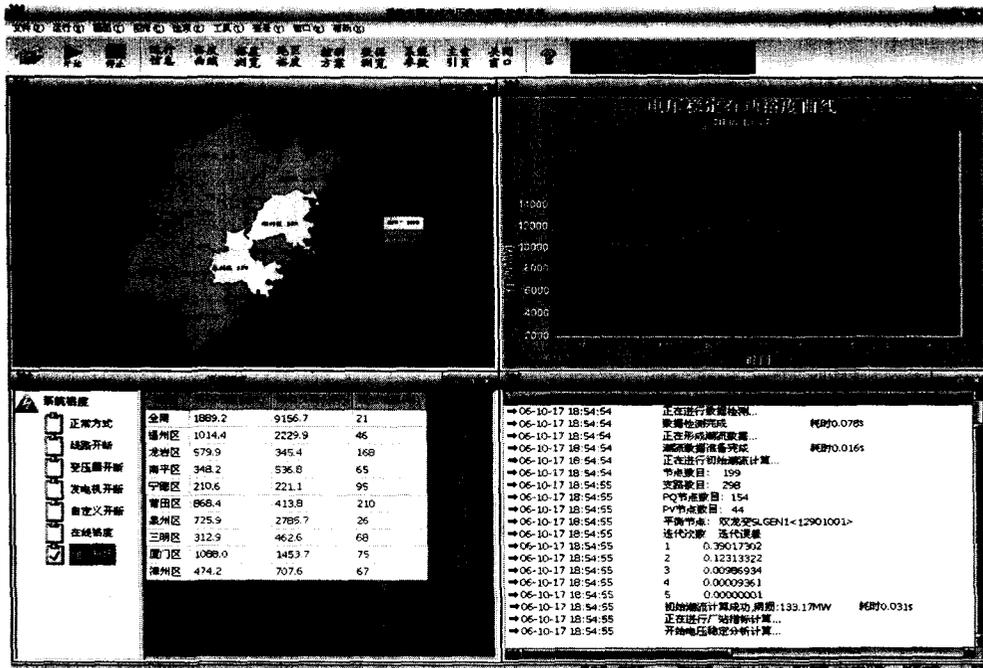


图 3 电压稳定监视与控制系统结果浏览图

Fig.3 Results of voltage stability monitoring and control system

表 1 福建省网系统优化计算结果

Tab.1 Optimum solutions of Fujian power grid

数据断面	当前负荷/MW	电压稳定裕度		有功网损/MW		最低电压	
		优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
4: 03 低谷负荷	4970.00	98.1%	100.3%	92.61	92.50	0.9492	0.9596
7: 06 平谷负荷	5688.07	78.2%	78.9%	93.18	92.89	0.8820	0.9081
11:25 高峰负荷	6966.77	55.6%	60.1%	138.41	137.36	0.8742	0.8867

4 结论

本文提出了电压稳定与 AVC 系统协调控制的新思路,电压稳定分析得出 AVC 运行的下限,保证电压不失稳;预留了期望电压稳定裕度下的最小动态无功储备,保证预想故障下的电压稳定控制的需要。AVC 系统在经压缩后的可行域空间内搜索控制策略并下发,在福建省网 173 节点系统中取得了成功的应用。

实际运行表明,本文的方法在保证系统电压稳定性的同时,提高了电压质量,降低了系统网损,找到了安全性和经济性的平衡点,取得了很好的效果。

参考文献

[1] 丁晓群,邓勇,黄伟,等.基于遗传算法的无功优化在福建电网的实用化改进[J].电网技术,2004,28(16):44-47.
DING Xiao-qun,DENG Yong,HUANG Wei, et al.

Practical Improvement of Reactive Power Optimization Based on Genetic Algorithm in Fujian Power System[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 44-47.

[2] 丁晓群,黄伟,邓勇,等.基于分级递阶的地调/中心站模式无功电压控制系统[J].电力系统自动化,2004,28(5):68-71.
DING Xiao-qun, HUANG Wei, DENG Yong, et al. A Control System for Reactive Power/voltage in Main Station/substation Model Based on Hierarchical Technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 68-71.

[3] 马春生.省网 AVC 控制策略的研究(硕士学位论文)[D].南京:河海大学,2003.

[4] 李晨.考虑电压稳定的无功优化(硕士学位论文)[D].南京:河海大学,2005.

[5] 哈比比,余贻鑫,孙刚.基于安全域的电力系统有功及无功优化[J].中国电机工程学报,2006,26(12):1-10.

(下转第 43 页 continued on page 43)

- Design and Implementation of an On-Line Pre-Decision Based System Protection Scheme for the Shaoguan Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002,26 (24): 45-47.
- [3] 薛禹胜. EEAC 和 FASTEST[J]. 电力系统自动化, 1998. XUE Yu-sheng. EEAC and FASTEST[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998.
- [4] 鲍颜红, 方勇杰, 薛禹胜, 等. 在线预决策紧急控制系统中的若干问题[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (24): 1-2, 16. BAO Yan-hong, FANG Yong-jie, XUE Yu-sheng, et al. Practical Considerations on the On-Line Pre-Decision Emergency Control Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (24): 1-2, 16.
- [5] 周良松, 彭波, 等. 一个实用的电力系统分层决策稳定控制系统[J]. 继电器, 2000, 28. ZHOU Liang-song, PENG Bo, et al. Study on New Transient Stability Control Pattern with On-line Hierarchical Decision-making and Control[J]. Relay, 2000, 28.

收稿日期: 2007-10-15; 修回日期: 2008-01-09

作者简介:

王珂(1979-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统运行分析、控制及策划等工作; E-mail: wangke777@126.com

吴烈鑫(1965-), 男, 副总工, 从事电力系统运行管理工作。

(上接第 34 页 continued from page 34)

- Alhabib BINKOU, YU Yi-xin, SUN Gang. Security Region Based Real and Reactive Power Optimization of Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (12): 1-10.
- [6] 胡伟, 卢强. 混成电力控制系统及其应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20 (2): 11-16. HU Wei, LU Qiang. Hybrid Power Control System and Its Application[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2005, 20 (2): 11-16.
- [7] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [8] 赵晋泉, 张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (11): 91-97. ZHAO Jin-quan, ZHANG Bo-ming. Summarization of Continuation Power Flow and Its Applications in Static Stability Analysis of Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (11): 91-97.

收稿日期: 2007-10-31; 修回日期: 2007-12-18

作者简介:

王宽(1981-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: wangkuan81@163.com

郑勇(1973-), 男, 工程师, 主要从事电力系统继电保护、变电站综合自动化以及电气设备故障诊断等领域的研究和管理工作的;

陈佑健(1976-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护、变电站综合自动化以及电气设备诊断等领域的研究和维护工作。

(上接第 38 页 continued from page 38)

- [9] 马晋弢, Lai L L, 杨以涵. 遗传算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(5): 347-353. MA Jin-tao, Lai L L, YANG Yi-han. Application of Genetic Algorithms in Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(5): 347-353.
- [10] CUI Zhi-hua, ZENG Jian-chao, CAI Xing-juan. A New Stochastic Particle Swarm Optimizer[J]. Evolutionary Computation, 2004, (1): 316-319.
- [11] 丁玉凤, 文劲宇. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化研究[J]. 继电器, 2005, 33(6): 22. DING Yu-feng, WEN Jin-yu. Advanced PSO Algorithm of Reactive Power Optimization in Power System[J]. Relay, 2005, 33(6): 22.
- [12] 方鸽飞, 王惠祥, 黄晓烁. 改进遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(4): 17-20. FANG Ge-fei, WANG Hui-xiang, HUANG Xiao-shuo. Application of Improved Genetic Algorithm in Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(4): 17-20.

收稿日期: 2007-10-17; 修回日期: 2007-12-09

作者简介:

张登科(1979-), 男, 硕士, 从事电气试验技术的应用研究, 群体智能在电力系统中的应用研究工作; E-mail: zhangdenko@tom.com

黄肇雄(1960-), 男, 博士, 教授, 研究领域为非线性系统建模与控制, 智能和优化控制理论及应用, 电力系统控制理论及应用等。