

基于控制设备动作状态诊断的区域电网电压无功控制方法

魏小淤, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 提出一种设备动作状态诊断法来改进变电站电压无功控制以防止变压器分接头和电容器开关频繁动作。该诊断法由惰性因子和加速因子构成, 判定设备处于可动作或不可动作状态, 并结合“十三区图”控制策略形成一种改进的电压无功控制方法。改进方法无需对负荷进行预测, 直接利用电压、负荷实时数据对变电站进行在线控制。针对辐射型配电网络, 建立区域电网电压无功协调控制新模型, 计及设备动作对区域内各电压等级的影响, 采用上述改进方法, 实施电压无功综合调节。实例表明, 新模型在保证电压无功质量的同时, 有效地限制了设备动作次数, 具有很好的实用性和实时性。

关键词: 变电站; 动作状态诊断; “十三区图”; 区域电网; 电压无功协调控制

A new strategy for area voltage/VAR control based on operation-state-diagnosing method

WEI Xiao-yu, YANG Hong-geng

(School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A method for improving substation voltage/VAR control based on operation-state-diagnosing of control devices is proposed to limit operating times of transformer and capacitor in this paper. This method determines whether a device can operate or not through a diagnosing function which is constituted by an inertia factor and an accelerating factor, and combined with “13 zone” theory to develop a modified strategy for substation voltage/VAR control. The strategy directly employs real time data of voltage and loads to control without load forecasting. A new model has also been built to harmonize voltage/VAR control in an area. It takes the operation effects to different voltage levels into account. Cases prove that the proposed model effectively limits operating times of devices and guarantees the high voltage/VAR quality at the same time.

Key words: substation; operation-state-diagnosing; “13 zone” theory; area power grid; harmony control with voltage/VAR

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)24-0046-05

0 引言

电压是衡量电能质量的重要指标, 合理的无功分布可以保证电压质量并降低电网有功损耗。目前针对变电站及区域电网电压无功优化控制的方法较多, 且调度自动化系统的推广与完善^[1], 为各算法后台软件式开发提供了良好的远端控制平台。经典的“九区图”^[2,3]及其系列改进^[4-7], 已广泛应用于实际控制, 其中“十三区图”法^[5]对变电站运行进行了详细的划分, 调节较为合理。这类方法在电压变化平缓且负荷波动小的电网中可以取得较好的控制效果, 但设备容易频繁动作。为合理地分配设备动作次数, 对负荷曲线分类分段^[8-12], 然后根据负荷变化趋势实现对设备动作的控制, 这样能很好解决设备频繁动作问题, 但其实现需要准确的负荷预测甚至高压侧电压预测。负荷预测的方法^[13]尽管很多, 但预测精度仍是研究人员关注的问题。

为了防止变压器分接头和电容器开关频繁动作, 提出一种设备动作状态诊断法来改进变电站电压无功控制。该方法首先将控制设备动作状态定义为可动作和不可动作两种, 根据其连续动作时间间隔、电压无功越界持续时间分别提出惰性因子和加速因子, 构成诊断函数判定设备所处状态; 然后结合“十三区图”^[4]控制策略, 形成改进的电压无功控制方法。该方法无需对负荷进行预测, 直接利用电压、负荷实时数据对变电站实施在线控制。针对辐射型配电网络, 结合上述改进方法建立区域电网电压无功协调控制新模型。新模型利用网络结构特点, 首先根据实测数据分析区域电网运行状态, 进行电压协调控制, 然后根据子站电容器投切造成无功的改变量进行无功协调控制。利用调度自动化系统, 将本文区域协调控制方法以后台软件形式对设备实施远端自动控制, 无需额外装置, 经济可靠。

1 控制设备动作状态诊断

将设备分为可动作和不可动作两种状态, 并由诊断函数判定其所处状态。该函数包含惰性因子和加速因子。

1.1 惰性因子

为了防止设备动作太频繁而过早失去调控能力, 提出惰性因子 μ_1 , 其由均分环节 R_{avg} 和滤波环节 R_{flt} 构成。

将设备最大允许日动作次数 N_{max} 在一天内等距分配的间隔时间 T_{avg} 作为设备动作是否频繁的参考量, 若设备连续动作间隔时间小于 T_{avg} , 减缓设备动作, 这样就构成惰性因子的均分环节 R_{avg} , 其数学表达如下:

$$R_{\text{avg}} = \begin{cases} 0 & (t_{\text{diff}} \leq T_{\text{min}}) \\ \frac{1}{T_{\text{avg}} - T_{\text{min}}} (t_{\text{diff}} - T_{\text{min}}) & (T_{\text{min}} < t_{\text{diff}} < T_{\text{avg}}) \\ 1 & (t_{\text{diff}} \geq T_{\text{avg}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T_{\text{avg}} = (1440/N_{\text{max}})$ 分钟; T_{min} 为设备重复动作最短允许间隔时间, 由设备运行要求决定, 是常数; 变量 t_{diff} 为本次计算时刻与设备最近一次动作时刻的差值。

实时运行中的电网存在大量扰动, 需要滤除这些干扰以避免设备不必要动作。首先对实时采集数据进行简单的滑动平均处理, 以平均后的值作为电网运行状态的参考, 其方式如下:

$$X'_k = \frac{(m-1)X'_{k-1} + X_k}{m} \quad (2)$$

式中: X_k 为本次采样数据实时值; X'_k 为本次采样滑动平均值; X'_{k-1} 为上次采样滑动平均值; m 为平滑次数, 若采样周期为 6 s, 取 1 min 平滑, 则 $m=10$ 。其次, 根据 IEEE 关于电磁现象和电能质量的分类^[14], 短时电压变动范围为 3 s~1 min, 忽略分接头的调节对无功的影响, 当电压越界持续时间小于 60 s 时, 变压器分接头暂不动作; 当电压和无功越界持续时间都小于 60 s 时, 电容器暂不动作。这样构成惰性因子的滤波环节 R_{flt} 。针对分接头和电容器, R_{flt} 的数学表达分别如下:

$$R_{\text{flt_tap}} = \begin{cases} 0 & (t_v \leq 60 \text{ s}) \\ 1 & (t_v > 60 \text{ s}) \end{cases} \quad (3)$$

$$R_{\text{flt_cap}} = \begin{cases} 0 & (t_v \leq 60 \text{ s} \text{ 且 } t_Q \leq 60 \text{ s}) \\ 1 & (t_v > 60 \text{ s} \text{ 或 } t_Q > 60 \text{ s}) \end{cases} \quad (4)$$

式(3)、(4)下标中 tap、cap 分别代表分接头和电容器; t_v 为电压越界持续时间; t_Q 为无功越界持续时间。

由式(1)、(3)、(4), 惰性因子 μ_1 数学表达为:

$$\mu_1 = R_{\text{avg}} \cdot R_{\text{flt}} \quad (5)$$

1.2 加速因子

为提高控制的响应速度, 避免由于惰性因子的作用导致电压无功长时越界后设备无动作, 提出加速因子 μ_2 。当电压、无功持续越界时, 逐步减小惰性因子的延迟动作作用, 以保证供电质量, 同时, 越界幅度越大, 延时越短。忽略分接头对无功变化的影响, 针对分接头和电容器, μ_2 的数学表达分别如下:

$$\mu_{2_tap} = \alpha \cdot t_v \quad (6)$$

$$\mu_{2_cap} = \max(\alpha \cdot t_v, \beta \cdot t_Q) \quad (7)$$

式(6)、(7)下标中 tap、cap 分别代表分接头和电容器; α 、 β 为加速系数, 这里与惰性因子一致, 在 t_v 或 $t_Q > 60$ s 后实施加速, 因此取 $\alpha = (1/60 + |V_e|)$, $\beta = (1/60 + |Q_e|)$, 其中 $|V_e|$ 、 $|Q_e|$ 分别表示电压越界幅度与无功越界幅度。

1.3 诊断函数

上述两个因子的乘积构成诊断函数 F , 数学表达如下:

$$F = \mu_1 \cdot \mu_2 \quad (8)$$

$F \geq 1$ 时, 设备可动作; $F < 1$ 时, 设备不动作。

假定某变压器分接头一天最大允许动作次数为 12, 最小动作间隔时间为 15 min, 最近动作时刻为 8 时 0 分 0 秒, 分别计算各个时刻再次发生幅值同为 0.01 p.u 越界时, 设备延迟动作时间, 见表 1。由表可知, 设备最长有 609 s 启动延迟时间, 发生在其刚物理解锁(动作间隔大于 15 min) 同时再次电压越界时, 若再次发生越界的时刻提前, 物理解锁后延迟时间将小于 484 s; 当设备连续动作大于等于均值 1.75 h 后, 设备延迟时间最短, 为 60 s。

表 1 电压越界后分接头延时启动时间($N_{\text{max}}=12$)

Fig.1 The startup time of tap changer after voltage off-normal ($N_{\text{max}}=12$)

时刻	8:15	8:30	8:45	9:00	9:15	9:30	9:45	10:00
时延	484 s	250 s	148 s	103 s	78 s	63 s	61 s	61 s

1.4 变电站电压无功控制的改进

控制设备动作状态诊断函数用于判断设备可否动作, 并将可以动作的设备作为“十三区图”^[4]控制策略的调节对象, 形成改进的变电站电压无功控制方法。

2 区域电网电压无功协调控制

对于辐射型配电网, 电能从高压等级向低压等级传递, 控制设备的动作在各个电压等级间

存在着复杂的影响,为简化控制,本文忽略较小的影响量,仅考虑高压等级电压的变化对低压等级电压的作用以及电容器的投切对区域无功的影响。为描述简单,将高压等级变电站(即电源点变电站)作为主站,其它视为其子站,建立区域电压无功协调控制新模型。

该模型分别考虑电压协调和无功协调。首先根据实测数据分析区域电网运行状态,进行电压协调控制,然后根据子站电容器投切造成无功的改变量进行无功协调控制,如下:

步骤1:电压协调。指当全网电压靠边界运行且部分子站有调压要求时,提高主站设备响应速度以避免子站大规模动作。假定全网电压靠下限运行(即区域负荷开始上升),适当提升主站电压下边界,加速其调节以抬高区域电压水平。主站设备动作后,子站运行点的变化如图1所示。

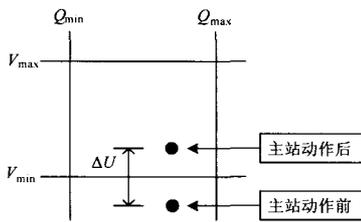


图1 子站运行点变化示意图

Fig.1 Movement of the operating point at the sub station

图1中子站运行点上移至正常区域,不需进一步调节,当多个子站处于此状态时,可以避免大量的设备动作; ΔU 为主站动作引起子站电压的变化量,计算公式如下:

$$\Delta U = \lambda(\Delta U_u + \Delta U_q) \quad (9)$$

其中: ΔU_u 为主站分节头调节档位引起的电压变化量; ΔU_q 为主站投切电容器引起的电压变化量; λ 用于对子站电压改变量与主站电压变化不一致的修正。一般计及网络传递的衰减,不要求精确的情况下,可取 $\lambda=0.95$ 。

步骤2:无功协调。子站电容器投切所发无功净增(减)量 ΔQ 较大时,其对主站运行点的影响不容忽视。以子站电容器大量投入为例,主站运行点的变化见图2。

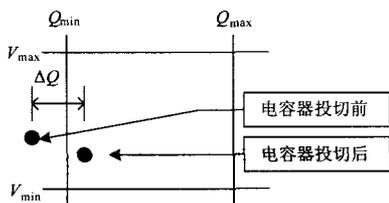


图2 主站运行点变化示意图

Fig.2 Movement of the operating point at the host station

图2中子站电容器投切后造成主站下网无功越下界,这时主站可以通过切电容使其运行正常,若电压协调时主站有投电容命令,这里正好抵消其动作,从而减少了电容器动作次数; ΔQ 计算公式如下:

$$\Delta Q = \eta \left(\sum_{i=1}^{k_1} \Delta Q_i - \sum_{j=1}^{k_2} \Delta Q_j \right) \quad (10)$$

其中: k_1 为子站新投入电容器的组数; ΔQ_i 为各台新投运电容器发出的无功值; k_2 为子站电容器切除组数; ΔQ_j 为各台新切除电容器停运前发出的无功值; η 用于对子站投切电容造成无功总量的变化在主站反映不一致的修正。一般计及网络传递的衰减,不要求精确的情况下,可取 $\eta=0.95$ 。

3 算例分析

采用本文区域电网电压无功控制方法对某市多个县级电网进行了实时控制计算,因篇幅所限仅列出其中一个县级电网的控制情况,该电网如图3所示。

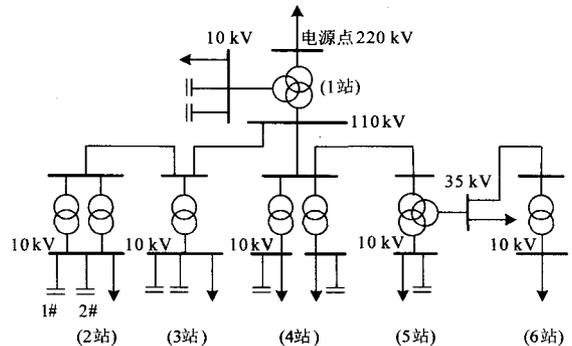


图3 某县级电网正常运行方式接线图

Fig.3 Connection diagram of a county-level network in normal operation

图3中:规定一天内各变压器分接头最大动作次数为12、最短连续动作时间间隔为15 min,每台电容器开关最大投切次数为6、最短连续动作时间间隔为30 min。

图4为主站变压器档位控制曲线。图中(a)、(b)为连续两天分别采用传统“十三区图”变电站电压无功控制方法和区域协调控制方法,主变档位的动作情况。可以看出,在早上8点至12点,区域协调方法控制主变3次升降分接头,较“十三区图”法多2次。根据该区域典型日负荷曲线(图5),可知早上8点以后,区域负荷开始进入一天的峰段,全网电压开始靠下界运行,电压协调机制启动,主站于8点20分上调分接头,抬高全网电压,避免各子站设备不

久后大量动作, 9至11时负荷持续大幅增加, 协调机制继续上调主站分接头。而传统“十三区图”法严格根据主站电压无功进行调节, 于8点40分升档, 此时, 各子站由于电压越界已进行了大量的调节。

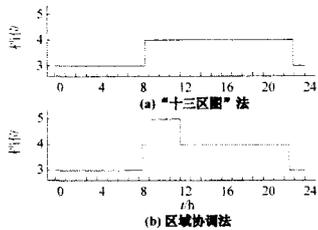


图4 主站变压器档位控制曲线

Fig.4 Operating curve of tap-changer at the host substation

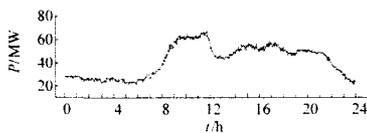


图5 区域日负荷典型曲线

Fig.5 Typical curve of daily load of the area

表2列出了负荷变化较大的两个时段设备总动作次数及电网电压无功合格率, 可以看出, 区域协调控制方法大大减少了设备动作次数且获得了更高的电压无功合格率。

表2 区域控制计算数据对比

Tab.2 Contrast of controls using different strategies

时段	设备	“十三区图”法动作次数	区域协调法动作次数
6~12 h	变压器	19	11
	电容器	16	6
18~24 h	变压器	15	10
	电容器	13	6
全网电压合格率		97.32%	98.73%
全网无功合格率		82.25%	91.98%

限于篇幅, 无功协调分析不予详述。协调方法符合区域负荷变化趋势, 整体上提高了电压无功合格率, 减少了设备动作次数, 而对于某站设备具体动作, 则通过设备动作状态诊断法来指导分配。现以2号站为例说明设备此方法在控制中具体作用。2号站两台变压器变比为 $110 \times (\pm 8 \times 1.25\%) \text{ kV} / 10.5 \text{ kV}$, 电容器容量均为4 Mvar, 一钢厂接于此, 负荷呈冲击性, 波动频繁。其典型无功负荷曲线及低压侧电压曲线见图6。

图7、8分别为传统“十三区图”法和引入设备动作状态诊断的区域协调法设备控制曲线。可知, 由于负荷剧烈波动造成电压瞬时跳变, 传统“十三区图”法初始一小时内连续3次升、降档, 两台电容器在5 h内投、切12次, 且半日内耗尽了所有设备一

天规定的动作量, 而改进方法通过惯性因子, 对动作次数进行调节, 避免设备过早失去调控能力; 观察图8, 分接头连续两次动作时间间隔有的小于其均值2 h, 电容器连续两次动作时间间隔有的小于其均值4 h, 这是由于电压无功越界后, 加速因子调节设备响应速度, 防止了控制严重滞后。

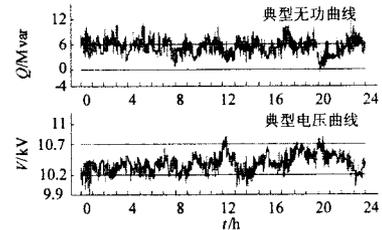


图6 2号站电压无功典型曲线

Fig.6 Typical curve of daily load and voltage of the No.2 substation

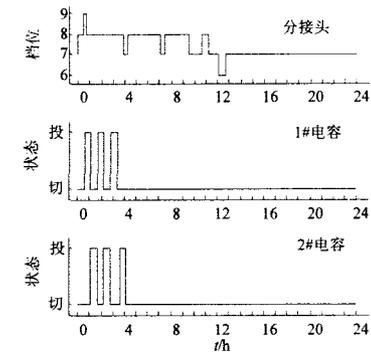


图7 “十三区图”法设备动作曲线

Fig.7 Operating curve of devices by “13-zone” strategy

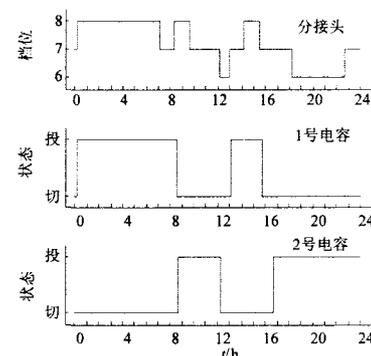


图8 区域协调法设备动作曲线

Fig.8 Operating curve of devices by harmony strategy

表3列出了区域协调方法与“十三区图”法对算例变电站控制计算的数据对比。可以看出, 改进方法以较少的设备动作获得了更高的电压无功合格率, 因此在保证电压无功合格、减少设备动作次数方面较传统方法更具优势。

表3 变电站控制计算数据对比

Tab.3 Contrast of substation controls using different strategies

项目	电压	无功	变压器	1#电容器	2#电容器
	合格率	合格率	动作次数	动作次数	动作次数
13区	92.71%	72.43%	12	6	6
改进	95.32%	84.87%	10	4	3

4 结论

(1) 本文针对电压无功控制中设备频繁动作问题, 提出用设备动作状态诊断法来改进变电站电压无功控制; 改进方法不需负荷预测, 直接利用实测数据进行优化计算, 具有良好的实时性;

(2) 针对辐射型区域电网, 建立电压无功协调控制新模型, 考虑了控制设备动作的关联影响, 得到了更佳控制效果。实例表明, 该模型以较少的设备动作次数达到了更大的电压无功合格率, 具有良好的实用性。

参考文献

[1] 孙宏斌,郭庆来,等. 面向网省级电网的自动电压控制模式[J]. 电网技术,2006,30(1):13-18.
SUN Hong-bin, GUO Qing-lai, et al. Automatic Voltage Scheme for Large-scale Power Networks[J]. Power System Technology, 2006, 30(1) :13-18.

[2] 庄侃沁, 李兴源. 变电站电压无功控制策略和实现方式[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15) : 47-50.
ZHUANG Kan-qin, LI Xing-yuan. Strategy and Implementation modes of Voltage and Reactive Power Control for Substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 47-50.

[3] 严浩军. 变电站电压无功综合控制策略的改进[J]. 电网技术, 1997, 21(10) : 47-49.
YAN Hao-jun. Improvement of Integrated Control Strategies for Voltage and Reactive Power in Substation[J]. Power System Technology, 1997, 21(10): 47-49.

[4] 赵登福, 司喆,等. 新型变电站电压无功综合控制装置的研制[J]. 电网技术, 2000, 24(6) : 14-17.
ZHAO Deng-fu, SI Zhe, et al. Research of a New Integrated Control Set for Voltage and Reactive Power in Power in Substation[J]. Power System Technology, 2000, 24(6) : 14-17.

[5] 沈曙明. 变电站电压无功综合自动控制的实现与探讨[J]. 继电器, 2000, 28(11) : 60-62.
SHEN Shu-ming. Discussion and Implementation of Voltage-reactive Control in Substation[J]. Relay, 2000, 28(11) : 60-62.

[6] 阎振坤, 厉吉文, 等. 基于模糊边界和双九区图的变电站电压无功控制策略研究[J].继电器, 2005, 33 (10) : 36-40.

YAN Zhen-kun, LI Ji-wen, et al. Study og Voltage and Reactive Power Integrative Control Strategy Based on Fuzzy Boundary and Double Nine-area Control Method[J]. Relay, 2005, 33(10) :36-40.

[7] 蔡凯. 电压无功综合控制装置控制原理的新讨论——由“九区图”到“五区图”[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19) : 91-95.
CAI Kai. New Discussion on Synthetical Control of Voltage and Reactive Power from Nine-zone Theory to Five-zone Theory[J].Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19) : 91-95

[8] Bie Z H, Song Y H, et al. Integration of Algorithmic and Heuristic Techniques for Transition-optimised Voltage and Reactive Power Control[J]. IEE Proc Gener, Transm, and Distrib, 2006, 153(2) : 548-554.

[9] Hu Z, Wang X, Chen Hetal. Volt/var Control in Distribution Systems Using a Time-interval Based Approach[J]. IEE Proc Gener, Transm, and Distrib, 2003, 150(5) : 548-554.

[10] 李林川, 周崇泉, 张全. 基于功率和电压组合分段的变电站无功控制[J]. 高电压技术, 2007, 33(1) : 57-60.
LI Lin-chuan, ZHOU Chong-quan, ZHANG Quan. Substation Voltage & Reactive Power Control Based on Combined Sections of Power and Voltage[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1) : 57-60.

[11] 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.

[12] 王秀丽, 李正文, 等. 高压配电网无功/电压的日分段综合优化控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 5-9.
WANG Xiu-li, LI Zheng-wen, et al. Time-interval Based Comprehensive Control Strategy for Daily Voltage/VAR Optimization in Distribution Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7) : 5-9.

[13] 康重庆, 夏清, 张伯明. 电力系统负荷预测研究综述预发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17) : 1-11.
KANG Chong-qing, XIA Qing,ZHANG Bo-ming. Review of Power System Load Forecasting and Its Development[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 1-11.

收稿日期: 2008-12-17; 修回日期: 2009-02-23
作者简介:

魏小淤(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压无功优化控制, E-mail: weixiaoyu5460@163.com
杨洪耕(1949-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电能质量及其控制技术的教学和研究。