

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

阎振坤, 厉吉文, 李晓华

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 介绍了变电站电压无功综合控制的基本原理, 为提高变电站的控制性能, 在高压侧电压正常时引入了模糊边界的无功调节判据, 在建立数学模型的基础上得出了基于模糊边界无功判据的控制策略, 通过对九区细分图和模糊边界无功判据的研究, 分析了基于模糊边界无功判据的控制策略特点; 在高压侧电压越限时采用双九区图控制策略, 它能提高系统电压稳定性, 保证变电站安全稳定运行。这种分高压侧电压正常和越限两种情况的综合控制策略更符合人的判别思维, 能减少分接头调节和电压波动的次数。与传统的九区图控制相比较, 这种综合控制策略能提高变压器分接头使用寿命而不降低电压无功的控制效果。

关键词: 高压变电站; 电压无功综合控制; 模糊边界; 九区细分图; 双九区图

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)10-0036-05

0 引言

提高电网系统供电的电能质量, 降低网损率, 实现电网调度经济运行是供电部门的目标。通过调度中心实施电压无功综合在线控制是达到上述目标的最佳方法, 但由于电网结构不太合理及各厂站自动化水平参差不齐, 全系统的电压无功控制一时难以实现。当前以变电站为单位的就地调压无功补偿方案以其原理简单、实现可靠的优点得到广泛应用。

各级变电站的调压和无功补偿设备一般是有载调压变压器、电容器或电抗器的无功电源组。有载调压变压器可以通过调节电压在允许范围内来达到提高电能质量的目的; 电容器、电抗器等无功电源的投切可以实现无功就地平衡以达到降低网损的目的。

目前, 国内许多公司、厂家和科研院所已推出了电压无功综合控制装置或在变电站综合自动化系统中内嵌 VQC 功能。其控制原理大多采用传统九区图进行运行状态的划分和控制策略的确定。但在实际运行中, 当变电站在某些运行区域时, 若采用传统九区图的控制方案, 则会增加变压器分接头和电容器的动作次数^[1], 提高检修频率, 影响电气设备的使用寿命。另外其控制原理没有考虑并联电容器的电压特性和高压侧电压越限的情况, 使控制的准确性受到影响。

据此, 本文依照“保证电压合格, 无功基本平衡, 尽量减少调节次数”的基本原则, 通过对高压侧电压正常和越限情况的研究, 提出了高压侧电压正常时的基于模糊边界的无功调节判据及九区细分图控制策略和高压侧电压越限时

的双九区图控制策略。

1 电压无功综合控制基本原理

本文电压无功综合控制的基本原理是实时采集系统侧(高压侧)电压、无功和低压侧母线电压, 然后根据控制策略得出控制方法, 改变无功分布并调节电压, 保证电压合格和无功基本平衡。其中电压 U_2 取值于主变压器低压侧对应母线的线电压, 实时无功功率 Q 则取值于主变压器系统侧输入的无功。

主变压器分接头上调, 电压 U_2 增大, 负载消耗无功增加; 主变压器分接头下调, 电压 U_2 减小, 负载消耗无功减少。投入电容器, 就地无功得到补偿, 同时电压 U_2 增大; 切除电容器, 电压 U_2 减小。

2 高压侧电压正常时的模糊边界无功调节判据及九区细分图控制策略

2.1 无功判据模糊边界的引入

电压无功控制常采用的调节判据是根据传统九区图(图1)得到的。电压无功的整定是互不相关的。

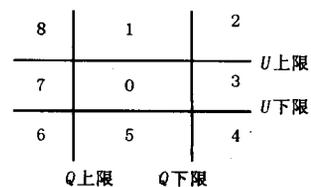


图1 传统电压无功控制九区图

Fig 1 Traditional nine-area diagram of voltage and reactive power control

无功功率的变化会对电压产生影响。设变电站

的短路容量为 P_s ,则无功功率的变化对低压侧电压的影响近似计算为^[3]:

$$U_2 = - Q \frac{U_2}{P_s} \quad (1)$$

由无功功率变化引起的电压变化量 U_2 与无功变化量 Q 成线性关系。根据电压无功控制的基本原则,电压调节边界应是相对固定的(不同负荷时段可有差异),而无功调节边界应是一个受电压状态影响并服务于电压调节的模糊边界。

2.2 数学模型与无功判据边界的建立

由此可建立电容投切动作的数学模型^[4]:

$$Q_{CP} = 1 \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} + 2 \frac{Q}{Q_{CO}} \quad (2)$$

式中: Q_{CO} 为单组电容器无功容量,正值。

假设在 $Q_{CP} = 1$ 时电容投入,在 $Q_{CP} = -1$ 时电容切除。由式(2)可分别算得无功调节的上下限模糊边界,其斜率可根据具体情况进行调整^[3,4]。

为了防止电压较低时电容过补偿和电压较高时电容欠补偿,可再增设电容投切辅助判据 $Q_{CP} = Q_{CO}$ 和 $Q_{CP} = 0$ ^[4]。

对于有电抗器的情况,电抗器的投切判据对应于电容器投切判据作相应调整即可。

2.3 控制策略

图 2 为基于模糊无功边界的九区细分图。

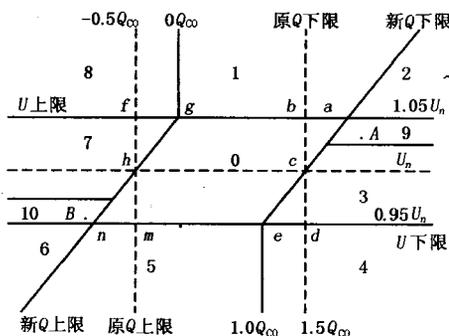


图 2 基于模糊无功边界的九区细分图

Fig 2 Nine-subdivision diagram based on fuzzy boundary criterion of reactive power

控制策略为^[3]:

- 0区: 此区为稳定工作区。
- 1区: 首先降压,若不能降压,则强切电容器。
- 2区: 首先降压,若不能降压,则强切电容器。
- 3区: 投电容器。
- 4区: 投电容器,若无电容可投,则升压。
- 5区: 首先升压,若不能升压,则强投电容器。
- 6区: 首先升压,若不能升压,则强投电容器。

7区: 切电容器。

8区: 切电容器,若无电容可切,则降压。

分析图 2 中 3 区的 A 点和 7 区的 B 点的无功调节过程发现,在接近电压上下限处投切电容器会由于无功的变化而使得电压越限引起有载分接头动作。为避免此类情况的发生,根据九区细分图的划分原则对 3、7 区做了细分,把 3 区中靠近电压上限、7 区中靠近电压下限的运行点划分出来,作为 2 个单独的区域,如图 2 所示的 9、10 区。通过分析,9、10 区的控制策略是:

9区: 降压,若不能降压,也不能投电容器。

10区: 升压,若不能升压,也不能切电容器。

2.4 控制策略特点分析

将图 1、2 比较发现,2 个图的控制区域面积一样大。在三角形 abc 内,按图 1 应投电容器,但电压升高可能超越上限,引起一次不必要的电压调节和电压波动;但在图 2 中按新 Q 下限,在电压较高时无功上限较大,无功不是太缺,因此无需投电容器,从而避免由于投入电容器引起的电压升高和可能导致的电压调节和电压波动。同理在三角形 cde 内,按新 Q 下限投电容器,无功减小,电压升高,使电压远离下限靠近标准值,避免了可能由于负荷或系统波动引起电压下降而造成一次电压调节和电压波动^[4]。

图 2 中无功动作面积 abc 等于无功不动作面积 cde,因此在电压合格时,图 2 无功的动作面积与图 1 是相等的,图 2 的无功补偿效果和无功调节次数与图 1 也是相同的。对三角形 fgh 和 lmn 进行分析可以得出同样的结论,即采用模糊边界无功判据来调节无功,可在保持无功调节效果不变和不增加无功调节次数的情况下,减少变压器分接头调节次数和电压波动,使电压更接近于标准电压^[4]。

3 高压侧电压越限时的控制策略

要研究高压侧电压越限时的控制策略,得首先搞清楚有载分接头调整和电容器投切对高压侧电压的影响。

3.1 有载分接头调整和电容器投切对高压侧电压的影响



图 3 系统等值图

Fig 3 Diagram of system equivalence

假设远方大系统电源电压不变,有载调压变压器低压侧用户负荷需从远方大系统吸取一定无功(在现场情况中大多数情况如此)。

1) 当有载调压变压器低压侧电压低于下限时,分接头上调,低压侧电压上升,低压侧所带用户负荷所需无功增加,从远方大系统经输电线路和有载调压变压器输送到用户负荷的无功增加,相应输电线路上的无功电流变大,则在输电线路上的电压损耗会上升,相应有载调压变压器高压侧电压会下降。

反之,当下调有载调压变压器分接头,低压侧电压下降,低压侧所带用户负荷所需无功减少,则从远方大系统获取无功减少,相应输电线路上的无功电流变小,其电压损耗下降,故有载调压变压器高压侧电压会相应上升。

2) 当有载调压变压器低压侧出现无功缺额时,投入电容器,低压侧电压上升,但从远方大系统经输电线路和有载调压变压器输送到用户负荷的无功减少,相应输电线路上的无功电流变小,则在输电线路上的电压损耗会下降,有载调压变压器高压侧电压会上升。这正好印证了有载调压变压器低压侧投入电容器,低压侧电压上升,因变比没有改变,高压侧电压也相应上升的现象。

反之,当有载调压变压器低压侧切除电容器时,低压侧电压下降,但用户负荷从远方大系统吸取无功增加,输电线路上的无功电流变大,其相应电压损耗上升,则有载调压变压器高压侧电压会下降。这也印证了切除电容器,有载调压变压器低压侧电压下降,因变比没变,高压侧电压也相应下降的现象。

在电网某些运行方式下,有载调压变压器有时也会起不良作用。例如,当低压侧由于系统故障发生无功功率缺额时,低压侧电压下降,若没采用有载调压变压器,则将由于负荷的自调节效应,使其吸收的无功功率随电压下降而减少,系统可能在较低的电压水平下运行,以维持整个系统运行电压的稳定性。但采用有载调压变压器时,变压器将调整抽头位置,提高变压器的输出电压,其结果是负荷电压的恢复和负荷吸收无功功率的增加,可能导致高压电网电压的低落,最终造成系统稳定破坏和低压侧电压崩溃。有载调压变压器的这种不良作用,在几次著名的电压崩溃事件中已得到了证实。对于有载调压变压器在调整电压中的重要作用和某些运行方式下的这种不良作用,需要进一步研究。总的来说,推广和普及有载调压变压器是大势所趋。但大量应用这种装置也是有条件的,即电网的无功电源比较充

裕,不缺无功,而且系统还要留有足够事故情况下能够快速投入的备用无功电源。

3.2 控制策略

一般的终端变电站,电压无功综合控制是以低压侧母线电压和系统侧(高压侧)无功功率及功率因数为主要控制条件按传统九区图^[1]或十七区图^[2]方案进行调节控制的。但是对于重要的高压枢纽变电站来说,就不能单纯地只考虑上述的九区细分图调整控制方式,而要兼顾到高压侧系统是否正常。如果高压侧系统电压已经严重越限,则在调压时就要考虑到电压无功的调整控制对高压侧母线电压(即系统电压)的影响。例如:如果系统电压已经越了上限,则不能再投入电容器而更加恶化系统电压;如果系统电压已经越了下限,则不能再切掉电容器而进一步造成系统电压的崩溃现象。所以此时可以通过强行的电容器投切来适应高压侧母线电压越限的状态。

在重要的高压枢纽变电站中,考虑到高压侧母线电压的边界限制条件,加上低压侧母线电压的上下限边界,则可以形成如下的双九区图控制方案,如图4所示。当高压侧电压正常时,电压无功控制按照上述的九区细分图控制策略进行控制;当高压侧电压不正常时,按照如下的双九区逻辑进行控制。

1) 高压侧电压越上限

a 低压侧电压越上限,则不考虑无功优化问题,强行切除电容器,这样由于切除电容器低压侧电压下降,而且低压侧用户负荷从远方大系统吸取无功增加,有载调压变压器高压侧电压也相应下降。

b 低压侧电压正常,如果切除电容器后功率因数不越下限,则切除电容器,若切除电容器则可使低压侧电压下降,且变比不变也可使有载调压变压器高压侧电压相应下降。



图4 双九区图

Fig 4 Diagram of double nine-area control method

c 低压侧电压越(下限 + U_q),则上调分接

头,低压侧电压上升,其所带用户负荷所需无功增加,从远方大系统吸取无功增加,相应载调压变压器高压侧电压会下降(U_q 为投切电容对低压侧电压的影响,具体计算参见文献[8])。

2) 高压侧电压越下限

a 低压侧电压越(上限 - U_q),则下调分接头,低压侧电压下降,其所带用户负荷所需无功减少,从远方大系统吸取无功减少,相应载调压变压器高压侧电压会上升。

b 低压侧电压正常,如果投入电容器后功率因数不越上限,则投入电容器,若投入电容器则可使低压侧电压上升,且变比未变也可使有载调压变压器高压侧电压相应上升。

c 低压侧电压越下限,则不考虑无功优化问题,强行投入电容器,这样由于投入电容器低压侧电压上升,而且低压侧用户负荷从远方大系统吸取无功减少,有载调压变压器高压侧电压也相应上升。

由于采用了双九区图的动作方案,为了避免和常规的控制方式交替重复而造成震荡动作,所在高压侧的上下限边界增加了一个返回值,当高压侧越上限后电压无功控制按照上面的双九区图动作,而只有当高压侧电压返回到比上限值小 U 后,才按照正常的上述九区细分图动作;同样,高压侧越下限后,只有当高压侧电压返回到比上限值大 U 后,电压无功控制才按照正常的上述九区细分图动作。

U 的取值为:分接头的电压调整率和电容器的电压调整率二者中的较大值。

4 结论

对于高压变电站电压无功的综合自动调节,本文提出了高压侧电压正常时基于模糊边界的无功调节判据及九区细分图控制策略和高压侧电压越限时的双九区图控制策略。高压侧电压正常时基于模糊边界的无功调节判据及九区细分图控制策略,同目前在变电所电压无功自动综合调节装置中所采用的“#”字型无功调节判据相比,不但能够在保持无功调节次数和无功补偿效果不变的情况下,更有效地保持电压稳定和减少有载分接开关的调节次数,而且增加了两个防振区,有效地避免了电容器和有载分接头频繁动作情况的发生。在高压降压变电站中,尤其是在枢纽高压降压变电站中,在高压侧电压越限时采用先进的双九区图控制策略,不仅保证了变电站安全稳定运行,而且在保证电压合格的前提下大大减少了调节次数,提高了设备的可靠性,使变

电站无功与母线电压在保证满足系统要求的同时,有效地保障电网的安全性和运行的稳定性。与传统的九区图控制策略相比较,这种分高压侧电压正常和越限两种情况的综合控制策略能提高变压器分接头使用寿命而不降低电压无功的控制效果;它更加贴近人的思维判别模式,更加符合“保持电压合格,实现无功基本平衡,尽量减少调节次数”的变电站电压和无功调节原则。该综合控制策略的采用将有助于高压变电站电压和无功自动综合调节技术在现场的推广应用。

参考文献:

- [1] 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. Strategies and Implementation Modes of Voltage and Reactive Power Control for Substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 47-50.
- [2] 吴皓,周浩. 基于站级监控系统的电压无功控制系统的应用与改进[J]. 继电器, 2004, 32(8): 69-72.
WU Hao, ZHOU Hao. Application and Improvement on Voltage and Reactive Power Control System Based on Substation Supervision System[J]. Relay, 2004, 32(8): 69-72.
- [3] 陈远华,秦荃华,杨晓红,等. 基于模糊边界无功调节判据的电压无功综合控制[J]. 中国电力, 2002, 35(10): 50-53.
CHEN Yuan-hua, QIN Qian-hua, YANG Xiao-hong, et al. Voltage and Reactive Power Integrative Control Based Fuzzy Boundary Criterion of Reactive Power[J]. Electric Power, 2002, 35(10): 50-53.
- [4] 厉吉文,李红梅,宁文怡,等. 变电所电压和无功自动调节判据的研究[J]. 中国电力, 1995, 28(7): 12-15.
LI Ji-wen, LI Hong-mei, NING Wen-yi, et al. Study and Analysis on Substation Voltage and Reactive Power Automatic Regulating Criteria[J]. Electric Power, 1995, 28(7): 12-15.
- [5] 王函韵. 新型自动电压无功调节控制系统在 220 kV 变电站的实际运用[J]. 继电器, 2003, 31(1): 68-69.
WANG Han-yun. Application of a Automatic Voltage and Reactive Power Control System in 220 kV Substation[J]. Relay, 2003, 31(1): 68-69.
- [6] 苏文博,于洲春,徐志恒,等. 变电站 10 kV 系统电压无功综合控制装置的研制[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 72-74.
SU Wen-bo, YU Zhou-chun, XU Zhi-heng, et al. Development of Voltage-reactive Power Integrative Control E-

- quipment for 10 kV Power System in Substation[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 72-74.
- [7] 赵登福, 司喆, 杨靖, 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, YANG Jing, et al Research of a New Integrated Control Set for Voltage and Reactive Power in Substation [J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 14-17.
- [8] 苏建元, 王柏林, 洪佩孙. 变电站电压无功优化控制器[J]. 河海大学学报, 1998, 26(4): 107-110.
SU Jian-yuan, WANG Bo-lin, HONG Pei-sun Substation s V-Q Optimal Control Equipment[J]. Journal of Ho-

hai University, 1998, 26(4): 107-110.

收稿日期: 2004-09-15; 修回日期: 2004-10-31

作者简介:

阎振坤(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压无功优化和无功补偿; E-mail: yanzhenkun@yahoo.com.cn

厉吉文(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统电压无功优化和无功补偿的研究;

李晓华(1974-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压无功优化和无功补偿。

Study of voltage and reactive power integrative control strategy based on fuzzy boundary and double nine-area control method

YAN Zhen-kun, LI Ji-wen, LI Xiao-hua

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The basic principle of system voltage and reactive power integrative control is introduced. To improve the control capability of substation when high voltage is normal, the fuzzy boundary criterion of reactive power is adopted, and the control strategy based on the established mathematical model is obtained. By comparing with nine-subdivision criterion, the paper analyzes the characteristics of control strategy based on fuzzy boundary criterion of reactive power. When high voltage is abnormal, the strategy of double nine-area control can enhance stability of system voltage and safety of substation. The proposed integrative control strategy can reduce the time of tap-change control and voltage ripple. Compared with the result of traditional nine-area control, this integrative control strategy can increase the service life of tap changer, without reducing the efficiency of voltage and reactive power control.

Key words: high-voltage substation; voltage and reactive power integrative control; fuzzy boundary; nine-subdivision control method; double nine-area control method

(上接第 11 页 continued from page 11)

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Extra-high Voltage Corporation of Hebei Province, Shijiazhuang 050500, China)

Abstract: Traditional power network planning is to minimize the cost of the power network based on certain reliability. The purpose of the planning is to ensure power system reliability, so the benefit derived from the expansion of power network is ignored, thus the optimized social benefit can not be acquired. Through the introduction of outage cost combining the reliability and economy, a new mathematical model and cost-benefit analysis method of power network planning is presented in this paper. The method takes the outage cost as a part of the total cost and quantifies the reliability benefits by the outage cost, and the costs and benefits about power network reliability planning can be evaluated based on a consistence of economy. Through the analysis and evaluation of a planning for a concrete power system, the application of cost-benefit analysis in power network planning is further improved. The efficiency of this method is validated in some test examples.

Key words: power network planning; outage cost; reliability; economy

(上接第 24 页 continued from page 24)

3. Shanghai Cable Co., Shanghai 200070, China)

Abstract: A new method for accurate fault location is introduced, which uses fault record data from both terminals of the EHV cable line. Based on the characteristics of big distributed capacity at EHV cable line, the voltage and current distributions of EHV cable line are simulated with iterative calculation to improve the precision. Simulation results show that the method does not require data to be synchronized at both terminals of the line, or affect by system resistance or transient resistance and has no false-root identification problem, so it is easily to be realized. The simulation results show that this method has a higher precision and practical value.

Key words: EHV cable line; fault location; non-synchronization of two terminals