

配电网自动无功补偿装置研制

钟 庆¹, 张 尧¹, 芮冬阳²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;
2. 广州智光电气有限公司, 广东 广州 510640)

摘要: 为使配电网的无功补偿更加方便灵活, 对高短路阻抗变压器型的新型可控电抗器与固定电容器组合作为配电网的自动无功补偿装置进行了研究。通过调节高短路阻抗变压器二次侧的晶闸管触发角, 可以实现配电网中无功功率的动态自动无级补偿。根据变电站参数, 合理选取电容器组和可控电抗器的容量, 能实现变电站低压侧母线无功功率的自动跟踪和无级补偿。通过备用电容器投切的滞环控制律的设计, 以减少电容器组的投切次数。对某一实际系统进行仿真测试的结果表明该装置能够实现无功的动态无级补偿, 并具有良好的动态响应性能, 对提高配电网的功率因数和抑制配电网的电压波动有明显效果。

关键词: 配电网; 动态无功补偿; 可控电抗器; 滞环控制

中图分类号: TM 714.3 文献标识码: A 文章编号: 1006-6047(2007)02-0071-04

0 引言

电压质量是电网电能质量的重要指标之一, 目前我国电压质量的控制还存在许多问题^[1]。电网电压与系统中的无功功率有着密切的关系, 系统中无功过剩将导致电压过高, 而无功不足会使电压过低, 因此采用无功补偿是解决电压质量问题的一个关键手段^[2]。

配电网现有的无功补偿手段主要是采用并联补偿电容器实现^[3]。但是, 补偿电容器补偿容量固定, 一般按照定时投切的工作方式进行补偿, 容易造成负荷高峰时欠补偿, 而在负荷低谷时过补偿, 出现无功返送^[4]。另外, 电容器组不能频繁投切, 频繁的投切动作将严重影响开关设备的使用寿命和增加运行人员的维护工作。随着电力电子技术的发展, 传统静态无功补偿器的提出, 可以实现无功的连续调节, 并具有性能好、响应快等特点, 能够解决无功补偿中的大部分问题和提高系统运行的稳定性^[5-7]。

针对配电网的无功补偿问题, 采用新型的可控电抗器和变电站中现有的补偿电容器组构成了经济实用的新型配电网动态无功自动补偿装置, 解决现有配电网中无功补偿装置技术单一、补偿性能较差的缺点, 实现电网电压、无功的平滑调节, 提高配电网的运行水平。

1 系统设计

该系统主要由可控电抗器、固定电容器组及控制器构成, 其结构如图 1 所示。

1.1 可控电抗器

可控电抗器 (TCR) 是无功补偿装置中无功功率

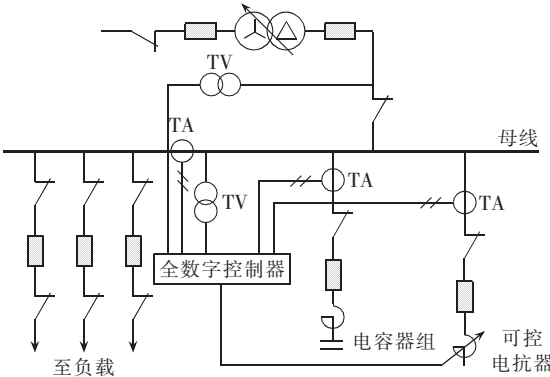


图 1 系统的基本配置图

Fig.1 Basic configuration of system

的主要调节器件。传统 TCR 需要采用多硅串联技术, 并需设计其分压、均脉冲和冷却等问题, 而且仅当 TCR 较大容量时, 单位容量的成本才能降低。但是, 由于配电变电站中需要补偿的无功量不大, 所以采用传统 TCR 的方式造价过高。

采用高短路阻抗变压器方式, 通过对其二次侧的调节达到电抗器调整的目的, 从而可避免多硅的串联或者并联问题, 并能满足配电变电站补偿容量的需要。晶闸管控制高短路阻抗变压器原理图及等效电路图如图 2 所示。

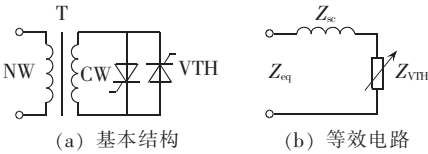


图 2 可控电抗器的结构原理图及等效电路图

Fig.2 Principle structure and equivalent circuit of controllable reactor

变压器的一次绕组作为工作绕组 (NW) 接入电网中, 二次绕组作为控制绕组 (CW) 由 2 个反向并接

的晶闸管(VTH)连接,晶闸管的导通角由触发控制器控制。该变压器的短路阻抗高达 100 %。调节晶闸管的触发角 α 在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间变化,使晶闸管的等效阻抗 Z_{VTH} 在无穷大至零之间变化,则 NW 两端的等效阻抗 Z_{eq} 就在无穷大至变压器的短路阻抗 Z_{sc} 之间变化,输出的补偿电流就可在零至额定值之间得到连续无级调节。由于晶闸管工作于与电感串联的无电容电路中,其工况既无反峰电压的威胁又无电流突变的冲击,因此可靠性得到保障^[8]。经过试验测试获得可控电抗器电流与触发角之间的关系如图 3 所示,横坐标为触发角 α ,纵坐标为可控电抗器输出电流与电抗器额定电流的比值 ε 。

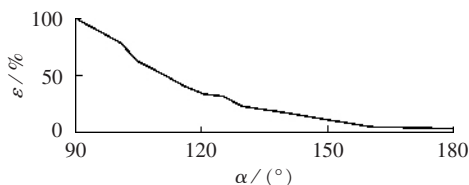


图 3 可控电抗器电流特性

Fig.3 Relationship between current and firing angle of controllable reactor

1.2 控制器系统

控制器采用高性能的 DSP 加以数字实现,通过控制器的检测、运算和调节作用,使变电站的无功功率达到设定的目标,从而实现对电压的控制^[9]。控制器的结构框图如图 4 所示。

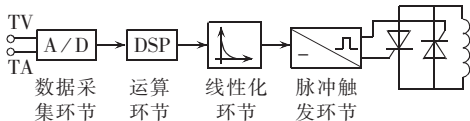


图 4 控制结构框图

Fig.4 Block diagram of controller

作为系统的逻辑控制中心,控制器在对晶闸管触发角度进行控制的同时,还需给出电容器的投切控制信号和变压器抽头的调节信号,以免在晶闸管完全导通或关断时,电压质量仍无法满足质量标准,只有依靠投切电容器或变压器中间抽头来确保电压质量。同时,控制器还具有检测、记录、报警和通信等功能。

1.3 变电站无功补偿参数选取

现有变电站多采用并联补偿电容器组的无功补偿方式,补偿电容器组的容量一般按照变压器容量的 15 %~20 % 选取,如一般 35 kV 变电站的 20 MV·A 主变压器一般需要配有 3.6 Mvar 的电容器,而现有的配置方式一般将其分为 2 组 1.8 Mvar 的电容,使无功补偿级间跳变较大,无法满足真正的需要。

根据变电站负荷的具体情况,针对不同的变电站配置不同容量的基本电容器组,基本电容器组一般一直投入电网运行。除基本组之外,变电站中配置有一定容量的备用电容器组,在负荷高峰时投入。可控电抗器容量按照基本电容器组容量 70 %~80 % 选取。通过可控电抗器和电容器组的组合,可以实现无功的无级自动补偿。

以上无功补偿参数配置方式有以下优点:

a. 由可控电抗器、基本组和备用组组合进行无功补偿,能实现大范围内的无功连续无级调节;

b. 结合不同变电站的实际负荷情况配置基本电容器组的容量,而且基本组一般一直投入系统中,不需要投切;

c. 根据基本组的容量选取可控电抗器的容量,可以在满足无功调节范围的基础上适当地减小可控电抗器的容量,从而减少系统的成本;

d. 由于可控电抗器的存在,使备用组的投切属于一个有较大滞环的开关控制^[10],能够明显地减小备用电容器组的投切开关次数。

2 测试结果

对 10 kV 母线上的无功补偿效果进行了仿真计算,对系统的无功功率、电流和电压的变化进行了动态分析。在 100 ms 时刻负载无功功率有 -100 kvar (此处负号表示容性无功) 的增量,投入电容器组,加入可控电抗器前、后的无功补偿情况见图 5(1 为补偿前,2 为补偿后)。系统的响应时间在一个周期之内,具有良好的动态性能。补偿前、后的电流见图 6(1 为补偿前,2 为补偿后),使补偿后电流中的无功分量明显减少,功率因数接近于 1。

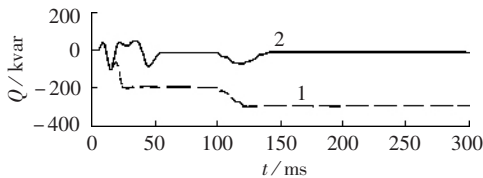


图 5 无功变化波形

Fig.5 Reactive power waves with and without compensation

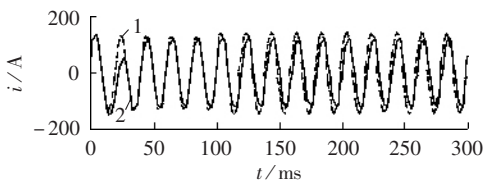


图 6 电流波形

Fig.6 Current waves with and without compensation

由于 100 ms 时刻系统的总无功功率发生变化,所以系统的电压也会受到影响发生波动,在未加补偿装置前系统的电压变化波形如图 7 所示,电压有约 50 V 的变化。在加装无功补偿装置之后,系统的电压波形见图 8,装置对电压波动有明显的抑制作用。

某市一座 35 kV 变电站中一台主变压器的容量为 20 MV·A,并联有一组 1200 kvar 的补偿电容器组,电容器的投切方式为凌晨 1 点切除,上午 8 点投入。其日无功负荷曲线如图 9 所示。

由日无功曲线可以看出,该变电站在电容器尚未切除,而负荷较低的情况时,会发生无功倒送的情况(如在上午 8 点和晚上 11 点到 12 点时),所以该无功补偿方式不合理。

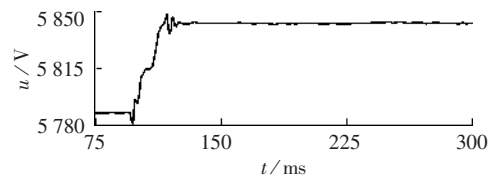


图 7 补偿前的电压波形

Fig.7 Voltage wave without compensation

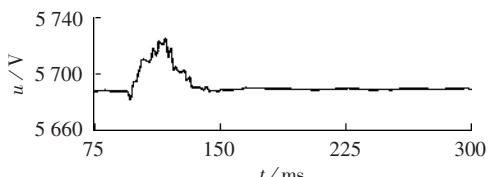


图 8 补偿后的电压波形

Fig.8 Voltage wave with compensation

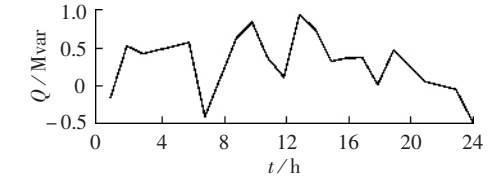


图 9 无补偿的日无功负荷曲线

Fig.9 Daily reactive power load curve without compensator

该变电站配置一台补偿容量为 945 kvar 的可控电抗器,则无功补偿装置的调节范围为 +945kvar~0 (此处正号表示感性无功),-255~-1 200 kvar 为连续可调。加入电抗器后,补偿电容器组 24 h 都投入,不需要切除,补偿后的日无功曲线如图 10 所示。通过加装可控电抗器可以消除无功倒送的现象,并可以不用对电容器进行投切。

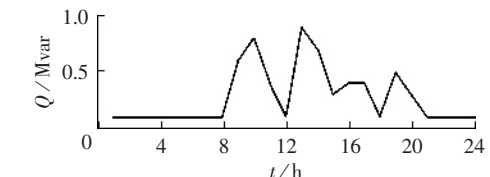


图 10 补偿后的日无功曲线(1 200 kvar 电容器)

Fig.10 Daily reactive power load curve with compensator(1 200 kvar capacitor)

由于在负荷高峰时,容性无功略显不足,而且随着电力用户的增加,负荷必然会不断增长,所以在 1 200 kvar 基本组的基础上加装 600 kvar 的电容器组作为备用组。通过可控电抗器和电容器组的配置,无功补偿的范围为:+945kvar~0,-255~-1 800 kvar 连续可调,在不增加电抗器容量的基础上扩大了调节范围。而备用组的投切在系统无功 $Q > 1 200$ kvar 时投入,在 $Q < 855$ kvar 时切除,所以具有一个滞环区域,如图 11 所示(图中纵坐标 A 为备用组投切状态,

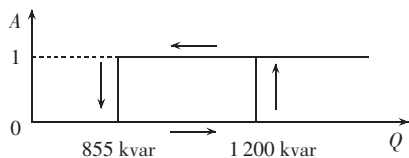


图 11 备用组投入的滞环控制

Fig.11 Hysteresis control of standby capacitor switching

1 投入、0 切除),能够有效减少电容器的投切次数,只需要在上午 10 点投入,晚上 24 点退出就可以实现无功的平滑调节。补偿后的日无功曲线如图 12 所示。

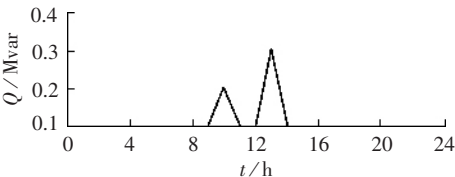


图 12 补偿后的日无功曲线(有备用组)

Fig.12 Daily reactive power load curve with compensator(with standby capacitors)

3 结论

利用新型的可控电抗器和变电站中已安装的固定电容器构成配电网中的自动无功补偿装置,能实现无功功率的动态自动无级调节。通过引入可控电抗器,能实现无功的自动无级调节,动态响应性能好,并对变电站电压波动有明显抑制作用,同时能减少变电站中电容器和变压器中间抽头的投切动作次数,从而减轻了运行调度人员的调节和维护工作。

通过合理配置无功补偿装置的参数,利用“基本组”和“备用组”相结合的概念,在调节范围改变不大的情况下,能减小可控电抗器的容量,实现装置成本的优化,使无功补偿装置的成本符合配电网现有的投资情况,有很大的推广利用价值。

参考文献:

[1] 靳龙章,丁毓山. 电网无功补偿实用技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.

[2] JOHN E M. Reactive compensation tutorial [C]// IEEE Power Engineering Society Winter Meeting,2002. Toronto,Canada:IEEE, 2002:515-519.

[3] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1999.

[4] 闫国琦,杭乃善,李如琦,等. 一种新型的无功补偿装置[J]. 电力自动化设备,2004,24(6):38-41.

YAN Guo-qi,HANG Nai-shan,LI Ru-qi,et al. A new type reactive power compensation equipment[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(6):38-41.

[5] 任丕德,刘友发,周胜军. 动态无功补偿技术的应用现状[J]. 电网技术,2004,28(23):82-84.

REN Pi-de,LIU You-fa,ZHOU Sheng-jun. Review on the dynamic reactive power compensation[J]. Power System Technology,2004,28(23):82-84.

[6] KEMERER R S,BERKEBILE L E. Directly connected static var compensation in distribution system applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1999,35(1):176-182.

[7] BALDWIN T L,HOGANS T Jr,HENRY S D. Reactive - power compensation for voltage control at resistance welders [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2005,41(6):1485-1492.

[8] 陆国庆,姜新宇,欧阳旭东,等. 高短路阻抗变压器式自动快速消弧系统——配电网中性点新型接地方式的实现[J]. 电网技术,2000,24(7):25-28.

LU Guo-qing,JIANG Xin-yu,OUYANG Xu-dong,et al. An automatic rapid arc suppression system based on transformer with high short circuit impedance — implementation of a new ap -

proach of neutral grounding for distribution network[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 25-28.

[9] 王雷, 厉吉文, 丁学真, 等. 一种新型低压无功补偿装置的研制[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(12): 32-33.

WANG Lei, LI Ji-wen, DING Xue-zhen, et al. Research of new LV reactive power compensation device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(12): 32-33.

[10] 陈劲操. 就地无功补偿策略研究及实现[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(9): 63-65.

CHEN Jin-cai. Research and realization of field var compensation tactics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002,

22(9): 63-65.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

钟 庆(1978-), 男, 江西龙南人, 博士, 主要研究方向为电力系统及其自动化、电力电子技术在电力系统中的应用及其控制技术(E-mail: epqzhong@scut.edu.cn);

张 尧(1948-), 男, 广东廉江人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统运行与稳定、电力市场、电网规划(E-mail: epyzhang@scut.edu.cn)。

Automatic reactive power compensator in distribution system

ZHONG Qing¹, ZHANG Yao¹, RUI Dong-yang²

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Zhiguang Electric Ltd., Guangzhou 510640, China)

Abstract: To make the compensation more flexible, an automatic reactive power compensator of distribution networks is developed, which combines high impedance TCT (Thyristor Control Transformer) with FC (Fixed Capacitors). The dynamic stepless compensation of reactive power in distribution networks is realized by changing the firing angle of thyristor at the secondary side of transformer with S/C high impedance. The number of capacitor group and the capability of controllable reactor are properly chosen according to substation parameters for its low-voltage busbar automatic stepless reactive power compensation. Hysteresis control is designed for standby capacitor to reduce its switching times. A practical system is simulated and results show that, the device can compensate the reactive power with better dynamic performance, which helps to restrain the voltage fluctuation and improve the power factor of distribution network.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50337010).

Key words: distribution network; dynamic reactive power compensation; controllable reactor; hysteresis control