

基于 STATCOM 的配电网三相不平衡治理

刘小江¹ 赵莉华² 何宇航¹ 赵茂林² , 李 铭³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610041;

2. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065; 3. 成都亿成科技有限公司 四川 成都 611731)

摘要: 为了降低农村配电网台区的三相不平衡度,提高供电质量,研制了基于 IGBT 的 STATCOM 三相不平衡调节装置。该装置采用 $d-q$ 法检测无功电流,减少了计算时间,提高了计算效率;控制模式为双闭环控制,外环为电压控制,内环为电流控制,引入反馈控制环对补偿电流进行反馈控制,有效地提高了控制系统的精度。并采用 MATLAB 软件建立仿真系统,对 STATCOM 进行了仿真测试,测试结果表明 STATCOM 对三相不平衡具有调节作用。挂网测试结果也表明 STATCOM 装置对配电网三相不平衡有很好的抑制作用。

关键词: STATCOM; 三相不平衡; $d-q$ 法; 双闭环控制

中图分类号: TM727.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)03-0082-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.03.017

Three - phase Unbalance Regulation of Distribution Network Based on STATCOM

Liu Xiaojiang¹ Zhao Lihua² He Yuhang¹ Zhao Maolin² Li Ming³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute ,Chengdu 610041 ,Sichuan ,China;

2. School of Electrical Engineering and Information ,Sichuan University ,Chengdu 610065 ,Sichuan ,China;

3. Yicheng Technology Co. ,Ltd. ,Chengdu 611731 ,Sichuan ,China)

Abstract: In order to reduce the three - phase unbalance factor of rural distribution area and improve the quality of power supply , a STATCOM three - phase unbalanced regulator based on IGBT is developed. The device uses the $d-q$ method to detect the reactive current , which reduces the calculation time and improves the calculation efficiency. The control mode adopts double closed - loop control , that is , the outer loop is voltage control and the inner loop is current control , and the feedback control loop is introduced to feedback the control of compensation current , which improves the accuracy of the control system effectively. The simulation system is established with MATLAB software , and the simulation test of STATCOM shows that STATCOM has a regulating effect on three - phase unbalance. The application results also show that the STATCOM device has a good suppressing effect on three - phase unbalance of distribution network.

Key words: STATCOM; three - phase unbalance; $d-q$ method; double closed - loop control

0 引言

中国农村地区地域宽广,电力系统存在大量的时空不对称单相负荷,造成了很多配电网台区有着不同程度的三相不平衡问题^[1]。三相不平衡使得配电网变压器效率降低,增加了变压器和线路的损耗,导致供电质量严重下降,电路中的零序电流增加,会使得配电网变压器的涡流损耗增加,进而使其运行温度

升高,危及变压器的安全与寿命^[1-3]。因此,有效地降低配电网台区的三相不平衡度,提高台区经济运行水平和供电质量是亟待解决的问题。

目前国内外治理三相不平衡的主要措施有跨接相间电容调整、用户负荷的再分配换相和无功补偿等^[4]。换相器由于整体投入较高、线路改建困难,所以目前应用较少。跨接相间电容调整的优点是设备整体投资费用较低,可滤除一定频率范围内的杂波,缺点为易于给电网造成大量谐波,系统特性容易

漂移。无功补偿装置的优势是极大地提高了线路的功率因数,降低了线损,减少了设计容量,增加了电网有功传输比例,降低了农网低电压出现概率;缺点是冲击电流过大,易产生大量谐波^[5-6]。

常用的无功补偿装置有静止无功补偿装置(static var compensator, SVC)和静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)。SVC因其响应速度快,价格适中,在电力系统中得到了广泛的应用^[7],但是由于它在应用时会向电网注入大量的谐波,需要外加滤波器,且在多台工作时易发生谐振等^[8-10]。而STATCOM在控制中利用PWM技术,能够使其注入电网的电流谐波含量很小,接近正弦波,并且STATCOM具有能够快速平滑地输出感性 and 容性无功功率、调节系统电压、降低线路损耗、校正功率因数等功能^[11-13]。

这里将STATCOM稳态模型引入三相不平衡分析中,研制了基于IGBT的STATCOM无功补偿装置。运用不平衡补偿方法对STATCOM抑制三相不平衡原理进行了分析,并利用d-q法对无功电流进行检测,降低了运算量,减少了运算时间;控制策略采用的是双闭环控制法,提高了控制系统的精度。研究了配电网中应用STATCOM进行三相不平衡抑制的效果,并通过挂网试验与MATLAB仿真测试进行了验证。

1 STATCOM 工作原理分析

STATCOM 静止同步无功补偿器,是利用全控型大功率电力电子器件(IGBT 或 GTO)组成自换相桥式电路^[14],通过控制IGBT开关管的开断,使STATCOM产生相应的补偿电流,从而实现对系统所需的无功的补偿。

1.1 工作原理

图1为STATCOM系统原理图,该系统主要由4个部分组成,即指令电流运算电路、电流跟踪控制电路、驱动电流和主电路,图中 u_s 表示电网侧电压, i_s 表示电网侧输出电流。从图1可以知道,STATCOM首先测量负载侧的电流值 i_L ,然后将测得的数据传输给补偿电流运算单元,由该单元来计算补偿电流,并将计算的结果,即相关指令传输给脉冲信号发生单元;之后由脉冲信号发生单元对传输来的数据信号进行相关处理,并得到相应的控制信号;再将控制

信号经过驱动电路的放大,传输给主电路。

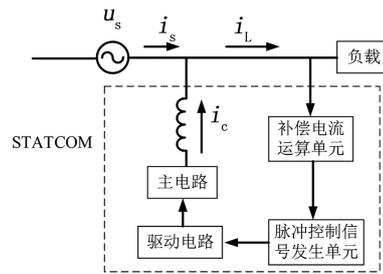


图1 STATCOM系统原理

主电路采用电压型桥式电路,由IGBT、电容器和电抗器组成,直流侧采用的是电容器,可以有效地提高运行效率。放大后的控制信号用来控制IGBT开关管的导通和关断,这样就能在桥式电路上产生相应的补偿电流 i_c 。所以负载侧的电流值 i_L 为系统电流 i_s 与STATCOM补偿电流 i_c 之和,负载电流中含有谐波、零序、负序和无功电流,相应地调整STATCOM的补偿电流值,就能够使系统侧只提供正序基波分量,使得系统电流保持稳定,达到电网综合补偿的目的。

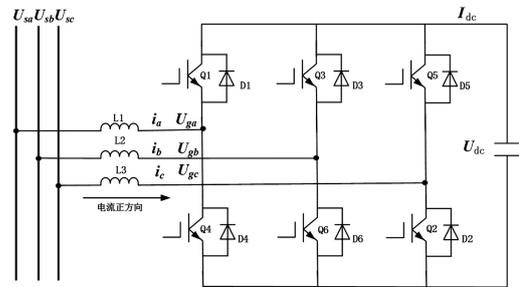


图2 STATCOM主电路

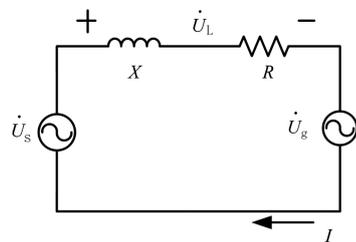


图3 STATCOM等效电路

图2为STATCOM的主电路,图3为其等效电路图,从图3中可以得到:

$$\dot{U}_s = \dot{I}(R + jX) + \dot{U}_g \quad (1)$$

由式(1),在忽略系统的损耗等效电阻值 R 时,可以得到STATCOM对电网注入的复功率为

$$\dot{S} = \dot{U}_s \cdot \dot{I}_c^* = U_s \left[\frac{U_g \sin \delta}{X} + j \frac{U_s - U_g \cos \delta}{X} \right] = P + jQ \quad (2)$$

当 $\delta < 5^\circ$ 时,系统有功功率及无功功率可以简化为

$$P \approx \frac{U_s U_g \delta}{X} \quad (3)$$

$$Q \approx \frac{U_s (U_s - U_g)}{X} \quad (4)$$

式中: U_g 为逆变桥输出电压; I_c 为 STATCOM 补偿器输出的无功电流; R 为系统等效电阻; X 为所接电抗器阻抗; U_s 为电网相电压; δ 为系统电压与补偿器电压之间的相角差。

由式(3)、式(4)可以得到:

- 1) 当 $\delta > 0$ 时, $P > 0$, STATCOM 是从电网中吸收功率;
- 2) 当 $\delta < 0$ 时, $P < 0$, STATCOM 是向电网中释放功率;
- 3) 当 $U_g < U_s$ 时, $Q > 0$, STATCOM 是发出容性无功;
- 4) 当 $U_g > U_s$ 时, $Q < 0$, STATCOM 是吸收感性无功。

1.2 无功电流检测方法分析

现在广泛使用的补偿电流检测方法主要有 $p-q$ 法、 i_p-i_q 法和 $d-q$ 法,它们各有自己的优缺点和使用范围。 $p-q$ 法和 i_p-i_q 法都可以使用在对称系统中,能够很准确地检测出补偿电流值。但在三相四线制系统中,因为 $p-q$ 检测法和 i_p-i_q 检测法中的 $\alpha\beta$ 变换要求三相电流之和为 0,三相四线制系统中三相电流的和并不为 0。而 $d-q$ 检测法是对 $dq0$ 坐标系下的检测法进行简化,并采用电压、电流双矢量投影的方法,所以能够适应于三相电压畸变和三相电压不对称的系统中。

采用优化的 $d-q$ 法对无功电流进行检查,首先对输入的三相电压 u 和三相电流 i 进行 $d-q$ 变换得到 u_d, u_q, i_d, i_q ,然后经过低通滤波器 LPF 得到直流分量 $\bar{u}_d, \bar{u}_q, \bar{i}_d, \bar{i}_q$ 以及基波电压与基波电流之间的相位关系,用于将基波正序电流的无功分量分离出来;再经过 $d-q$ 反变换得到三相电压和三相电流的基波正序分量,从原来的负载电流中减去基波正序电流,就能够得到所需的补偿电流。 $d-q$ 检测法对电流检测的等效程序如图 4 所示。

1.3 STATCOM 控制策略

STATCOM 接入配电网的方式可以通过变压器或者电抗器^[16]实现,因此,对交流侧输出电压和相

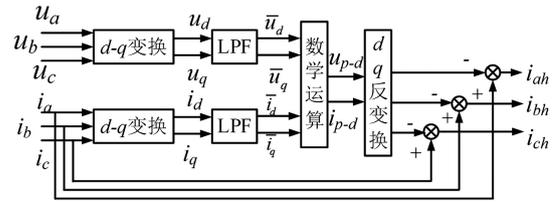


图 4 $d-q$ 算法等效图

角或电流进行控制,能实现对 STATCOM 向电网发出或吸收无功电流的控制。根据产生方式的不同,无功电流的控制方式有两种:直接电流控制和间接电流控制。

直接电流控制方式是将 STATCOM 当作受控电流源,采用跟踪 PWM 控制技术对 STATCOM 的交流侧产生的无功电流进行控制。间接法是将 STATCOM 作为交流电压源来对待,通过对 IGBT 开关管的导通和关断来进行控制,即控制所产生的电压相位和幅值,间接控制 STATCOM 的交流侧电流^[17]。

为了保证设计出的补偿器具有良好的性能,准确快速地对系统无功进行补偿,维持系统电压稳定,所以所设计的控制器采用电流间接控制方式。

STATCOM 从系统中吸收的有功电流和无功电流的有效值的计算公式为^[18]

$$I_p = \frac{U_L \cos(90^\circ - \delta)}{\sqrt{X^2 + R^2}} = \frac{U_s}{2R} (1 - \cos 2\delta) \quad (5)$$

$$I_q = \frac{U_L \sin(90^\circ - \delta)}{\sqrt{X^2 + R^2}} = \frac{U_s}{2R} \sin 2\delta \quad (6)$$

稳态时,当 δ 角的绝对值不是太大时, δ 和 I_q 近似为线性的正比关系。

因此能够通过改变 \dot{U}_g 相对 \dot{U}_s 的超前角 δ 来控制 STATCOM 吸收的无功电流的大小和性质。当改变 δ 时, U_g 就会相应地随之改变,这样就能够得到如图 5 所示的最基本的控制方法。在这种控制中,以无功电流参考值 I_{qref} 乘以一个比例系数后即作为 δ 的指令,从而控制 STATCOM 变流器,使其实际吸收 I_q 的无功电流按照式(6)关系变化。

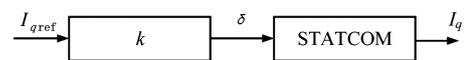


图 5 电流间接控制

为了获得较为稳定的输出电压,在控制系统中引入了一个电压负反馈环,用补偿器的输出电压值减去系统中给定的电压值,根据该差值对补偿器做出有效控制。所设计的 STATCOM 采用的控制方式

为双闭环控制模式,即外环采用电压控制,内环采用电流控制。并引入反馈控制环对补偿电流进行反馈控制,从而有效地提高控制系统的精度。整个控制系统的结构原理图如图6所示。

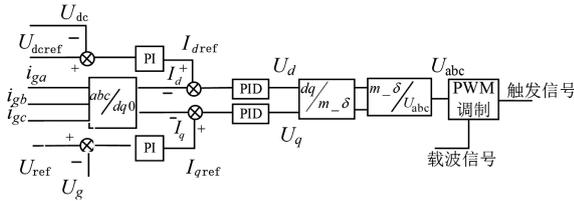


图6 双变量间接控制原理

双闭环控制模式的具体实施步骤如下:

1) 将通过检测得到的补偿器直流侧直流电压 U_{dc} 与系统中所给定的电压参考值 U_{dcref} 作出比较,得到了它们的差值电压,之后使用PI调节器进行相应的调节,输出有功电流的参考值 I_{dref} ;

2) 补偿器输出端的电压 U_g 与电压参考值 U_{ref} 的电压差值也经过PI调节器的调节,就可以得到系统无功电流所需的参考值 I_{qref} ;

3) 将检测获得的补偿器的输出电流作 $d-q$ 坐标系下的坐标变换,获得 d 轴和 q 轴下的电流 I_d 和 I_q , 分别将 I_d 与 I_{dref} 、 I_q 与 I_{qref} 作比较,所得差值再经过PID调节器的调节即可获得 d 轴和 q 轴下的电压。

4) 获得 d 轴和 q 轴下的电压后就能得到系统的控制变量 m 与 δ , 从而获得系统的调制信号参数 U_{abc} 作为PWM调制器的调制信号。并以载波信号为基准进行调制,获得逆变桥开关的触发信号。

2 MATLAB 仿真分析

仿真原理如图7所示,仿真系统是一个电压等级为25 kV的配电网;三相可编程的电压源作为系统电源,为系统提供能量;母线B1和B2之间是一段输电线路,线路长20 km,用 π 型等值电路来进行代替;母线B2上带有3.5 MW、0.25 MVA的负载;母线B2和B3之间有一段输电线路,线路长2.5 km,用电感电路来进行代替;B3母线后接入一个降压变压器,用于降低电压为负载供电;变压器二次侧测接有一个1 MW的固定负载及一个可变负载;STATCOM装置接在B3母线上,其容量为 ± 3.5 MVA。

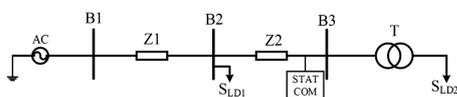


图7 仿真原理

仿真故障设置为:负载对称时,A、B、C三相各带5 kW的负荷;负载不对称时,A、C两相带5 kW负荷,B相带8 kW负荷。仿真结果见图8至图13。

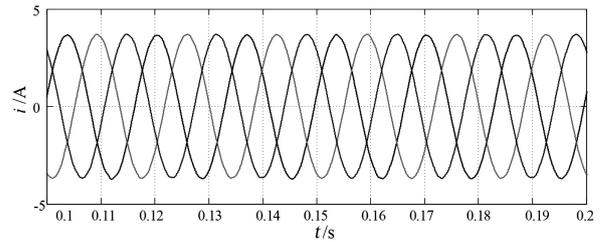


图8 三相电流波形

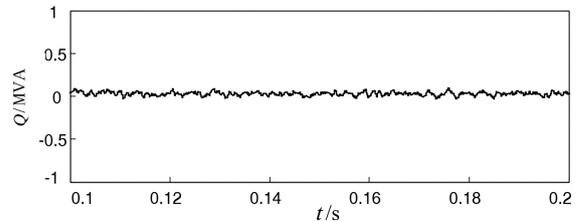


图9 STATCOM 无功输出

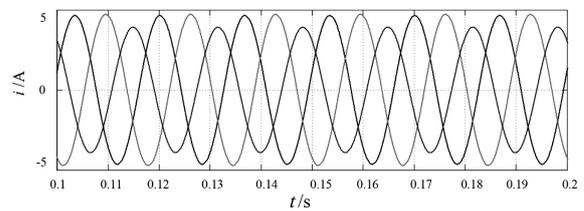


图10 STATCOM 未接入电网时三相电流波形

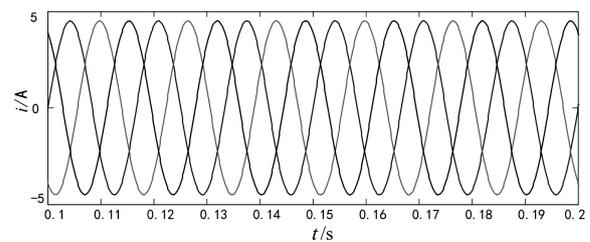


图11 STATCOM 接入电网时三相电流波形

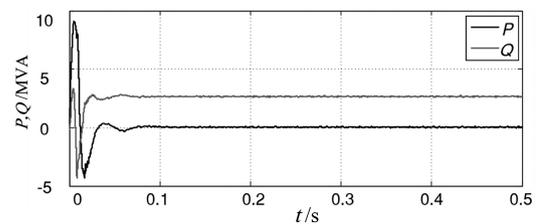


图12 STATCOM 有功与无功输出

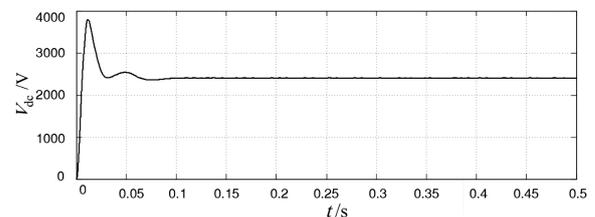


图13 直流侧电压

当A、B、C三相负荷对称时,电流波形如图8所示,STATCOM是不动作的,此时的输出无功为0,如图9所示。当A、B、C三相所带负荷不对称时,A、B、C三相电流波形也发生了变化,电流波形如图10所示,A、B、C三相电流不再对称,此时STATCOM还未接入电网;图11为将STATCOM接入电网后的电流波形,可以发现这时A、B、C三相电流是对称的;STATCOM输出无功和直流侧电压分别如图12和图13所示。仿真结果表明:STATCOM对三相不平衡具有调节作用。

3 实验及挂网运行测试

3.1 实验测试

对STATCOM装置进行实验测试,测试接线图如图14所示,将STATCOM装置并联接在负载和电网之间。

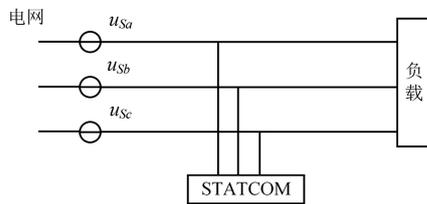


图14 测试接线

STATCOM装置接入电网前后,系统各种参数如表1、表2所示。

从表1和表2可以看出,补偿后系统的电流和电压不平衡度的下降比较明显,说明该装置对三相不平衡有很好的调节作用。

表1 补偿前系统各参数

U_s/V	I_s/A	I_c/A	PF/%	THD _i /%	UF/%
235	44	0	99	9	106
237	11	0	99	11	-44
238	8	0	98	11	-62

表2 补偿后系统各参数表

U_s/V	I_s/A	I_c/A	PF/%	THD _i /%	UF/%
237	26	18	98	0	19
238	16	4	99	0	-26
236	23	16	97	0	6

4.2 挂网运行测试

此次挂网运行的STATCOM无功补偿装置挂网运行点为三相不平衡台区变压器出口处,挂网测试监测了变压器出口处的三相电流和中性线电流。

图15为该台区在安装STATCOM无功补偿装置前的变压器出口三相电流波形图,从图15中可以看出三相电流值差距比较大,图16为STATCOM未接入电网时的三相电流不平衡度,可以看出其电流不平衡度在40%左右,其中最大三相电流不平衡度高达53.6%。

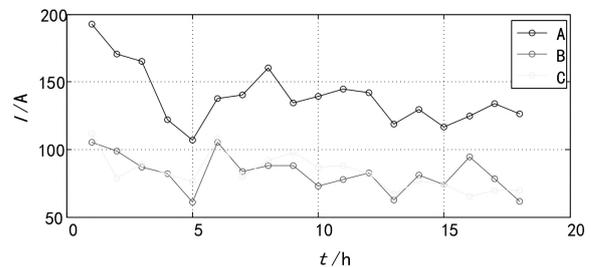


图15 STATCOM未接入电网时的三相电流波形

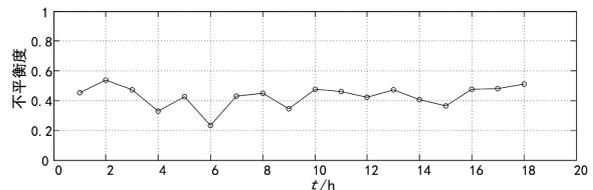


图16 STATCOM未接入电网时的三相电流不平衡度

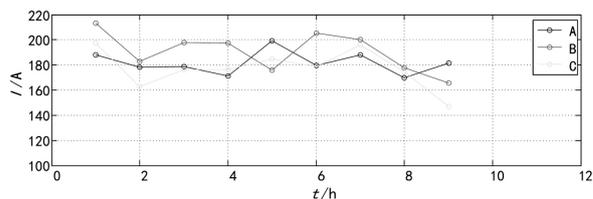


图17 接入STATCOM后三相电流波形

图17为该挂网测试台区安装STATCOM无功补偿装置后,变压器出口三相电流波形图。图18为STATCOM接入电网后三相电流不平衡度,从图中可以看出三相电流不平衡度均小于20%,平均为10%左右,其中最小三相电流不平衡度为4.5%。

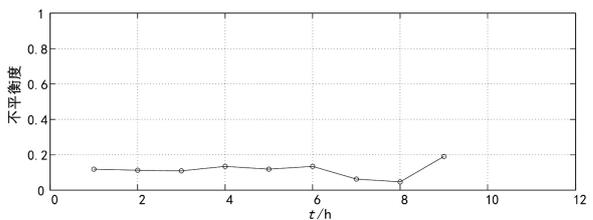


图18 STATCOM接入电网后的三相电流不平衡度

从STATCOM无功补偿装置安装前后的数据对比,可以发现安装补偿装置后该台区的不平衡度下降很明显,说明STATCOM无功补偿装置对三相不平衡有很好的抑制作用。

4 结 语

首先运用不平衡补偿方法对 STATCOM 原理进行了分析,结果表明适当的绕组和变压器的接线,可以使得线路中无零序电流,所以在进行不平衡补偿时,仅需对正序和负序电流进行补偿,以达到抑制三相不平衡的目的。

1) 所设计的 STATCOM 装置采用无功电流检测方法为 $d-q$ 检测法,其能够对谐波电流与无功电流进行较为精确的检测;当对谐波电流进行检测时,只需进行坐标变换,该检测方法提高了计算速度,减少了计算量。

2) 所采用的控制方式为双闭环控制模式,即外环采用电压控制模式,内环采用电流控制模式,这种控制方式提高了对 STATCOM 装置的控制精度。

3) 使用 MATLAB 软件的 Simulink 部分搭建了仿真系统,对 STATCOM 进行仿真分析,仿真结果表明 STATCOM 装置对三相负载不对称有很好的调节作用。

4) 最后基于前面的理论,研制了基于 IGBT 的 STATCOM 三相不平衡调节装置,并且进行了实验测试与挂网测试,通过对比测试结果发现 STATCOM 装置能够有效地降低系统的三相不平衡度,对抑制负载三相不平衡有明显作用。

参考文献

[1] 方恒福,盛万兴,王金丽,等. 配电台区三相负荷不平衡实时在线治理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2185-2193.

[2] 谭树龙,杨耕,耿华. 不平衡工况下链式 STATCOM 的运行极限分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 44-49.

[3] 徐榕,于泳,杨荣峰,等. 基于无源性理论的 H 桥级联 STATCOM 非线性控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 50-57.

[4] Zhang Jiao, Niu Xingyan, Du Mingjun, et al. Research on Control Strategy of Cascade STATCOM under Unbalanced System Voltage[C]. China International Conference on Electricity Distribution, 2012, 8562(5): 1-4.

[5] 梅红明,刘建政. 角接链式 STATCOM 的环流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6398-6406.

[6] 徐榕,于泳,于雁南,等. 基于离散状态观测器的 H 桥

级联 STATCOM 无差拍控制[J]. 电力系统自动化, 2014(21): 58-65.

[7] 朱劲松,李磊. 基于模块化多电平换流器的 STATCOM 分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 113-117.

[8] 李圣清,徐文祥,栗伟周,等. 三相电压不平衡下级联 STATCOM 的控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 105-109.

[9] Yinghong Hu, Jiajia Ren, Jianze Wang, et al. Control Strategy of Transformerless Connected Cascade STATCOM under Unbalance and Asymmetrical Condition[C]. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2012.

[10] Zhang Guangming, Wang Maojun, Gao Qiang, et al. A Research on Control Strategy of STATCOM Based on Particle Swarm Optimization Algorithm[C]. 4th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2015.

[11] 易桂平,胡仁杰,蒋玮,等. 电网电压不平衡对 STATCOM 的影响及抑制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 238-247.

[12] 毛彦辉,夏明超,李晓亮,等. 负载不平衡下 D-STATCOM 控制策略的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013(24): 132-139.

[13] 饶宏,陈俊,许树楷,等. 输电系统用 STATCOM 多电平主回路方案选择[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 83-87.

[14] 黄伟雄,胡广振,王永源,等. 南方电网 35 kV ± 200 Mvar 链式 STATCOM 现场试运行[J]. 电力系统自动化, 2013, 33(19): 122-131.

[15] 黄伟雄,刘锦宁,王永源,等. 35 kV ± 200M var STATCOM 系统总体设计[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 136-142.

[16] 郭春义,张岩坡,赵成勇,等. STATCOM 对双馈入直流系统运行特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 99-106.

[17] 孙毅超,赵剑锋,季振东,等. 基于 $d-q$ 坐标系的单相链式 STATCOM 直流电压平衡控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2500-2506.

[18] 陈新超. D-STATCOM 直流侧电压优化控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.

作者简介:

刘小江(1986),工程师、硕士,主要研究方向为配电网运行分析、过电压及接地技术。

(收稿日期: 2018-01-06)