

DOI: 10.7500/AEPS20130812001

三相电压不平衡下级联 STATCOM 的控制方法

李圣清¹, 徐文祥^{1,2}, 栗伟周¹, 曾欢悦¹

(1. 湖南工业大学电气与信息工程学院, 湖南省株洲市 412007; 2. 合肥华威自动化有限公司, 安徽省合肥市 231100)

摘要: 针对三相电压不平衡下级联静止同步补偿器 (STATCOM) 的控制问题, 分析了级联 STATCOM 在三相电压不平衡时的工作特性, 指出可以通过让级联 STATCOM 输出负序电压的办法来保证接入点的电压平衡。详细推导了系统在正序和负序环境下的解耦控制方程, 提出一种新的正序-负序解耦脉宽调制的控制方法, 分析了其两种工作模式: 无功功率补偿模式和电压控制模式。级联 STATCOM 上层采用正序-负序解耦控制; 下层采用能量平衡的控制策略保证各模块直流侧电容电压平衡。仿真和实验表明, 该方法可以有效地解决级联 STATCOM 在三相电压不平衡下的安全运行问题, 使得其在抵御一定的不平衡电压的同时具有较快的无功功率补偿特性, 实现其最大化利用。

关键词: 三相电压不平衡; 静止同步补偿器 (STATCOM); 正序-负序解耦; 分层协调控制

0 引言

三相电压不平衡时电能质量调节装置的运行分析一直是近年来研究的热点, 传统的解决方案是采用封锁脉冲让其退出运行, 等到电压平衡以后再投入装置, 这样频繁的投切无疑减少了装置的使用寿命。对于正常性故障或者三相不平衡度较小时, 仍然希望装置可以继续运行。级联静止同步补偿器 (STATCOM)^[1] 由于可模块化、无需接入变压器等诸多优点被广泛关注。同时它具有分相调节能力和可变的调制比, 使得其在无功功率补偿的同时兼具调节电压不平衡的潜力^[2-3]。

目前, 级联 STATCOM 大多数控制策略都是基于三相电压平衡状态下的, 还鲜有文献针对其在三相电压不平衡下的控制作相关研究。文献[4]提出通过 STATCOM 来补偿三相电压不平衡, 表明利用 STATCOM 来维持接入点电压平衡是可行的。文献[5]提出反故障的变压器隔离型链式 STATCOM 的控制方法, 但不适用于无变压器的级联 STATCOM 系统, 应用范围较窄。文献[6]针对星形连接的级联 STATCOM, 提出输出正序、负序和零序电压来维持稳定状态, 该方法不适合三角形连接的级联 STATCOM。文献[7]提出了基于电网电压不平衡程度的 VSC 参数设计方法, 为级联 STATCOM 的参数选择提供了工程实用算法。文

献[8]提出不对称矢量控制也能很好地维持电压的平衡, 但同样牺牲了装置的无功响应速度。文献[9]提出基于逆系统方法的有功功率-无功功率解耦脉宽调制 (PWM) 控制, 使级联 STATCOM 在三相电压平衡状态下具有快速的无功响应速度, 但是没有解决其在三相电压不平衡下的运行问题。文献[10]提出不对称矢量控制、分相控制与有功功率-无功功率解耦控制相结合的控制方法, 提高了装置的无功功率响应速度, 但需要对电压、电流进行傅里叶变换, 计算较为复杂。

本文就三相电压不平衡下的级联 STATCOM 的控制问题, 通过分析其在三相电压不平衡下的工作特性, 提出新的正序-负序解耦控制方法, 使得级联 STATCOM 在三相电压不平衡下, 能快速、有效、安全地发挥最大作用, 最后通过仿真和实验, 证明了所提控制方法是可行的、有效的。

1 三相电压不平衡下的级联 STATCOM 特性分析

级联 STATCOM 的安全运行受到两个因素的制约: 一是其直流侧电容电压; 二是其输出电流。直流侧电容电压幅值 U_c 在装置运行时严格的上限 U_{Cmax} 和下限 U_{Cmin} , 装置安全运行必须满足:

$$U_{Cmin} < U_c < U_{Cmax} \quad (1)$$

输出电流幅值在装置安全运行时也有严格的上限 I_{max} , 为防止装置过流, 必须满足:

$$I < I_{max} \quad (2)$$

所以在不平衡系统下, 为了保证级联

收稿日期: 2013-08-12; 修回日期: 2014-04-30。

湖南省重点建设学科项目(201176); 湖南省高校重点实验室项目(2014249); 湖南省高校科技创新团队项目(2014207)。

STATCOM 正常运行必须满足上述两个因素。由对称分量法原理可知,任何一个不平衡系统都可以将其分成正序、负序和零序 3 个平衡分量来进行分析。对于三相三线制系统,其零序分量为 0,故有:

$$\begin{bmatrix} u_{sab} \\ u_{sbc} \\ u_{sca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s+} \sin(\omega t + \alpha) \\ V_{s+} \sin(\omega t + \alpha - \frac{2}{3}\pi) \\ V_{s+} \sin(\omega t + \alpha + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s-} \sin(\omega t + \beta) \\ V_{s-} \sin(\omega t + \alpha + \frac{2}{3}\pi) \\ V_{s-} \sin(\omega t + \alpha - \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $u_{sab}, u_{sbc}, u_{sca}$ 为系统三相线电压; V_{s+} 为系统电压正序分量的幅值; V_{s-} 为系统电压负序分量的幅值; α 和 β 分别为系统电压正序和负序分量的相位; ω 为角频率。

级联 STATCOM 只输出正序分量 v_{out+} 时的示意图见图 1。可见,当电网电压不平衡时,级联 STATCOM 对系统电压的负序分量 v_{s-} 相当于短路,只有装置和系统之间的连接阻抗起限流作用。因此,较小的系统负序电压将在级联 STATCOM 中产生较大的负序电流,使其极容易不满足式(2),造成级联 STATCOM 过流而退出运行。

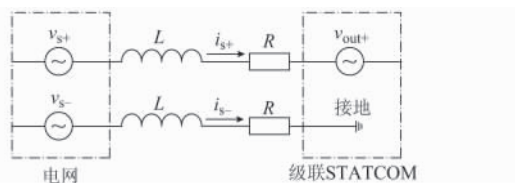


图 1 级联 STATCOM 只输出正序分量示意图
Fig. 1 Diagram of cascade STATCOM only outputs positive sequence component

同时,当负序电流流过级联 STATCOM 时,如果不加任何措施,其直流侧电容电压将产生二倍工频的波动, U_C 由直流量和二倍频交流电压叠加而成,即

$$U_C = U_{dc} + U_{2m} \sin(2\omega t + \varphi) \quad (4)$$

式中: φ 为电网电压初相位。

这样的波动使得其直流侧电容电压极容易不满足式(1)而无法安全运行。

级联 STATCOM 同时输出正序与负序分量时的示意图如图 2 所示。通过控制级联 STATCOM 输出的负序电压 v_{out-} 的大小来抵消接入点电压负序分量 v_{s-} ,使接入点电压负序分量为 0,起到稳定接入点电压的能力,从而保证级联 STATCOM 在系统三相电压不平衡下的安全运行。

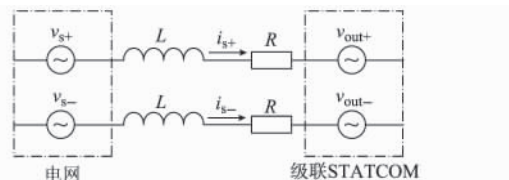


图 2 级联 STATCOM 同时输出正序与负序分量示意图
Fig. 2 Diagram of cascade STATCOM outputs positive and negative sequence components

2 基于正序-负序解耦的级联 STATCOM 控制方法

基于上述级联 STATCOM 在三相电压不平衡下的特性分析可知,需使其发出与系统电压负序分量大小相同的负序电压从而维持接入点的电压平衡,由此对传统有功功率-无功功率解耦进行改进,提出正序-负序解耦控制,具体过程如下。

当系统电压平衡时,其负序分量为 0,所以正序环境下的解耦控制方程可以参照三相电网电压平衡时的有功功率-无功功率解耦 PWM 控制^[11],故正序解耦方程为:

$$\begin{cases} u_{cd+}^* = i_{d+}^* R - i_{q+}^* \omega L + u_{sd+} \\ u_{cq+}^* = i_{q+}^* R + i_{d+}^* \omega L + u_{sq+} \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_{cd+}^* 和 u_{cq+}^* 分别为正序有功和无功电压指令; i_{d+}^* 和 i_{q+}^* 分别为正序有功和无功电流指令; u_{sd+} 和 u_{sq+} 分别为网侧正序有功和无功电压。

在负序环境下,级联 STATCOM 输出的有功和无功率为:

$$\begin{cases} P_{0-} = \frac{3}{2} (u_{cd-}^* i_{d-}^* + u_{cq-}^* i_{q-}^*) \\ Q_{0-} = \frac{3}{2} (u_{cq-}^* i_{d-}^* - u_{cd-}^* i_{q-}^*) \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_{cd-}^* 和 u_{cq-}^* 分别为负序有功和无功电压指令; i_{d-}^* 和 i_{q-}^* 分别为负序有功和无功电流指令。

公共连接点(PCC)处的有功和无功率为:

$$\begin{cases} P_- = \frac{3}{2} (u_{sd-} i_{d-}^* + u_{sq-} i_{q-}^*) \\ Q_- = \frac{3}{2} (u_{sq-} i_{d-}^* - u_{sd-} i_{q-}^*) \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_{sd-} 和 u_{sq-} 分别为网侧负序有功和无功电压。

连接电抗消耗的有功和无功率为:

$$\begin{cases} P_{1-} = \frac{3}{2} (i_{d-}^{*2} + i_{q-}^{*2}) R \\ Q_{1-} = -\frac{3}{2} (i_{d-}^{*2} + i_{q-}^{*2}) \omega L \end{cases} \quad (8)$$

由能量平衡原理可知:

$$\begin{cases} P_{0-} = P_- + P_{1-} \\ Q_{0-} = Q_- + Q_{1-} \end{cases} \quad (9)$$

结合式(6)至式(9)可知,负序解耦 PWM 方程为:

$$\begin{cases} u_{cd-}^* = i_{d-}^* R + i_{q-}^* \omega L + u_{sd-} \\ u_{cq-}^* = i_{q-}^* R - i_{d-}^* \omega L + u_{sq-} \end{cases} \quad (10)$$

由式(5)和式(10)可知,系统正序-负序解耦方程为:

$$\begin{cases} u_{cd}^* = u_{cd+}^* + u_{cd-}^* = (i_{d+}^* + i_{d-}^*)R + (i_{q-}^* - i_{q+}^*)\omega L + u_{sd} \\ u_{cq}^* = u_{cq+}^* + u_{cq-}^* = (i_{q+}^* + i_{q-}^*)R + (i_{d+}^* - i_{d-}^*)\omega L + u_{sq} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $u_{sd} = u_{sd-} + u_{sd+}$; $u_{sq} = u_{sq-} + u_{sq+}$ 。

根据式(11)可得出具体控制图,如图3所示。

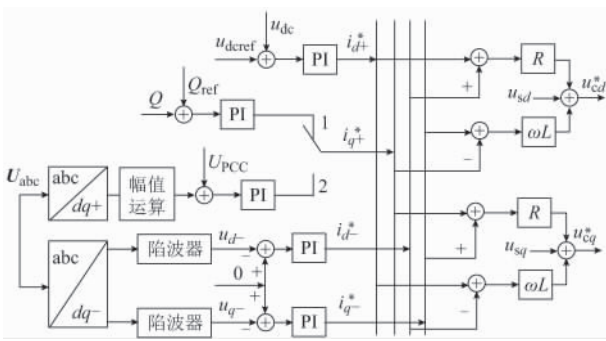


图3 正序-负序解耦控制框图

Fig. 3 Diagram of positive-negative decoupling control

三相静止 abc 坐标系到正序 dq+ 坐标系和负序 dq- 坐标系的变换矩阵分别为:

$$\mathbf{T}_{abc/dq+} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{T}_{abc/dq-} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) & \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (13)$$

直流侧电压给定值 u_{dref} 与实际值 u_{dc} 比较后经过比例-积分 (PI) 调节,得到正序有功指令电流 i_{d+}^* ; U_{abc} 经过 $T_{abc/dq-}$ 变换后,通过陷波器得到负序有功电压 u_{d-} 与负序无功电压 u_{q-} 。当系统电压不平衡时,其三相负序分量均不为 0,则经 abc/dq- 变换后的 d, q 轴电压负序分量也均不为 0。控制目标是希望级联 STATCOM 输出与系统负序电压大小相等、方向相反的负序电压,使得接入点电压的负序分量为 0,即系统电压三相负序分量均为 0,则只要 d, q 轴电压负序分量均为 0 即可。因此利用 u_{d-} 和

u_{q-} 与 0 做差值,通过 PI 调节以后,得到负序有功指令电流 i_{d-}^* 和负序无功指令电流 i_{q-}^* 。

当正序无功指令电流 i_{q+}^* 是通过瞬时无功功率理论检测到的无功功率 Q 与无功功率给定值 Q_{ref} 比较后经过 PI 调节得到的,即图 3 中开关位于 1 位置时,级联 STATCOM 工作在无功功率补偿模式,以补偿系统的无功功率为主。当 U_{abc} 经过 $T_{abc/dq+}$ 坐标变换以后,通过幅值运算得到的正序电压实际值与电网电压给定值 U_{PCC} 比较并经过 PI 调节得到 i_{q+}^* ,即开关位于 2 位置时,级联 STATCOM 工作在电压控制模式,以控制系统电压平衡为主。

系统整体控制框图如图 4 所示,采用分层协调控制,上层采用正序-负序解耦控制实现级联 STATCOM 在不平衡系统下总的有功、无功及负序电压控制;下层采用模块控制器,利用能量均等分配控制各模块直流侧电容电压的平衡。图中: u_{dcl} 和 u_{dcl}^* 分别为模块 1 直流侧电压及其指令值; P_1 是模块 1 交流侧需要吸收的有功功率; P_{S1} 为模块 1 逆变器消耗的功率; ΔP 的大小直接关乎直流侧电容电压的稳定,只要保证每个模块 ΔP 相同,就可以保证各模块直流侧电容电压的平衡^[12]。

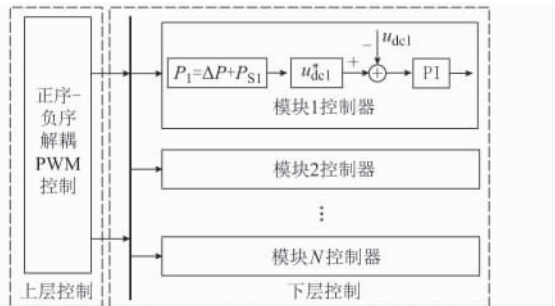


图4 系统整体控制框图

Fig. 4 System overall control block diagram

3 仿真与实验

3.1 仿真分析

本文基于 MATLAB 7.0 对所提控制方法进行了仿真分析,仿真参数如下:系统线电压为 311 V,电网频率为 50 Hz,连接电感为 5.1 mH,直流侧电容为 2 200 μ F,电容电压给定值为 200 V,单相级联模块数为 5 个。

针对不平衡度较小时处于电压控制模式的正序-负序解耦的控制特性,进行了如下仿真:0.1 s 时投入无功负载,得到 A 相电路的功率因数变化情况如图 5 所示。可知,A 相功率因数补偿前为 0.85,补偿后基本稳定在 1 左右。由此可见,工作在无功功率补偿模式的正序-负序解耦控制可以有效地实现系统无功功率的动态补偿。

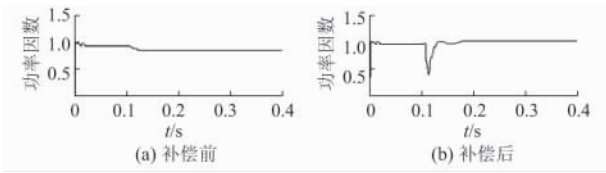


图 5 A 相的功率因数
Fig. 5 Power factor of phase A

针对不平衡度较大时处于电压控制模式的正序-负序解耦的控制特性,做了如下仿真:采用不平衡阻性负载来模拟电压不平衡时级联 STATCOM 的补偿效果。

图 6(a)为投入级联 STATCOM 前接入点电压的波形,由于不平衡阻性负载的影响,三相电压出现了明显的不平衡,不平衡度达到 12.5%。图 6(b)为级联 STATCOM 投入后其电压波形图,对比两图可以明显发现,其三相电压基本趋于一致,波形质量较好,不平衡度降到 0.56%。故采用处于电压控制工作模式的正序-负序解耦控制方法可以有效地解决三相系统电压不平衡的问题。

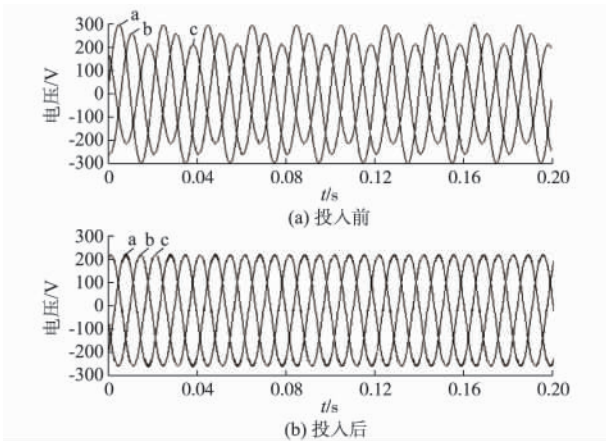


图 6 不平衡阻性负载下接入点电压波形
Fig. 6 Waveforms of access point voltage under unbalanced resistive load

3.2 实验结果

为了验证正序-负序解耦控制方法的有效性,进行了实验研究。参数如下:系统电压为 398 V,连接电抗为 25 mH,频率为 50 Hz,电容为 2 000 μ F,载波频率为 1 000 Hz,器件开关频率为 500 Hz,采样频率为 3 200 Hz,每相由 5 个 H 桥模块串联而成。硬件平台为双数字信号处理器(DSP)+现场可编程门阵列(FPGA)+多复杂可编程逻辑器件(CPLD)的组合系统。DSP 主要实现基波电网电压锁相、指令电流运算、直流侧电压控制、变流器保护等功能;FPGA 用来产生 PWM 驱动信号;CPLD 用来拓展输入/输出(I/O)接口。该系统实验装置图

及主控制板、单元控制板、绝缘栅双极型晶体管驱动板的结构和原理见附录 A。

实验中,负载为带阻感负载的三相整流桥。图 7(a)和(b)分别为级联 STATCOM 投入前与投入后的接入点三相电压波形。投入前,系统三相电压分别为 351, 420, 387 V,不平衡度达到 8.85%。投入后,系统三相电压分别为 397.2, 398.8, 396.5 V,不平衡度降到 0.45%。可见,补偿后 PCC 处电压的不平衡度明显降低,达到了很好的补偿效果。实验证明该方法可以有效地补偿接入点不平衡电压,保证级联 STATCOM 在三相电压不平衡时的正常运行。

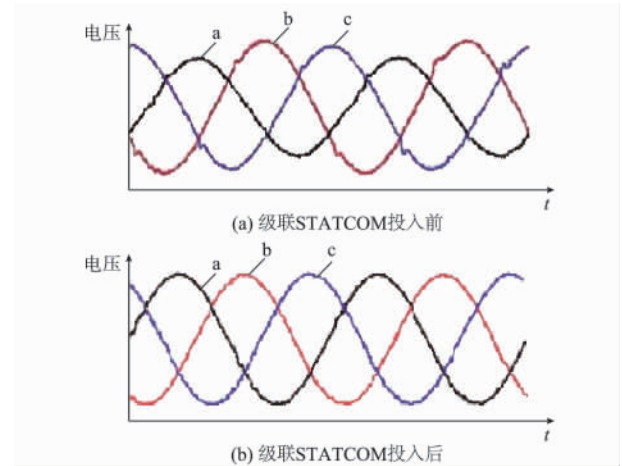


图 7 接入点电压波形
Fig. 7 Waveforms of access point voltage

图 8(a)和(b)分别为级联 STATCOM 投入前与投入后的负载端三相电流波形。

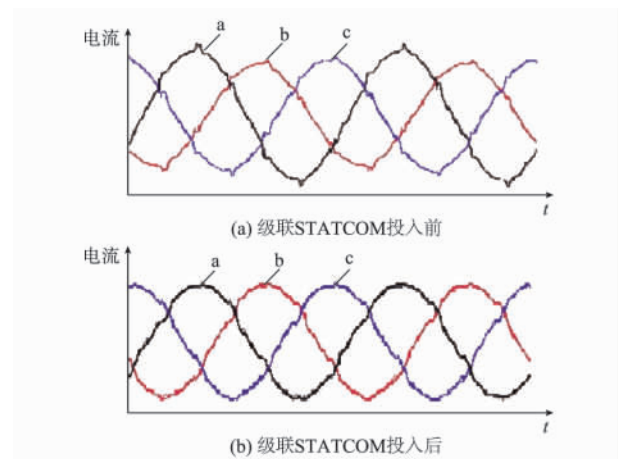


图 8 接入点电流波形
Fig. 8 Waveforms of access point current

可以看出,投入级联 STATCOM 以后,其不平衡度也明显降低。验证了该方法的有效性。

4 结语

本文通过分析级联 STATCOM 在系统电压不平衡工况下的工作特性,提出正序-负序解耦控制的方法来解决级联 STATCOM 在三相电压不平衡时的安全稳定运行问题,并且探讨了在该方法下的两种工作模式:无功功率补偿模式和电压控制模式。系统整体采用分层协调控制,上层采用正序-负序解耦控制,下层采用模块控制实现各模块直流侧电容电压平衡。仿真和实验结果表明,所提控制方法能够有效解决在三相电压不平衡时级联 STATCOM 的正常运行问题。

本文所提方法有望在株洲变流技术国家工程研究中心有限公司进行动模实验,后期是否能够应用于工程实践项目,要视具体情况和结果来定。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 李春华,黄伟雄,袁志昌,等.南方电网±200 Mvar 链式 STATCOM 系统控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(3):116-121.
LI Chunhua, HUANG Weixiong, YUAN Zhichang, et al. Systematic control strategies for ±200 Mvar cascaded STATCOM in China Southern power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 116-121.
- [2] 耿俊成,刘文华,俞旭峰,等.链式 STATCOM 的数学模型[J].中国电机工程学报,2003,23(6):66-70.
GENG Juncheng, LIU Wenhua, YU Xufeng, et al. Modeling of cascade STATCOM [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 66-70.
- [3] 范瑞祥,吴素农,孙旻,等.移动式配电网静止同步补偿器的设计与应用[J].电力系统自动化,2010,34(11):72-76.
FAN Ruixiang, WU Sunong, SUN Min, et al. Design and application of relocatable distribution static synchronous compensator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 72-76.
- [4] 罗安,欧剑波,唐杰,等.补偿配电网电压不平衡的静止同步补偿器控制方法研究[J].中国电机工程学报,2009,29(6):55-60.
LUO An, OU Jianbo, TANG Jie, et al. Research on control method of STATCOM for grid voltage unbalance compensation [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6): 55-60.
- [5] 许树楷,宋强,朱永强,等.用于不平衡补偿的变压器隔离型链式 D-STATCOM 的研究[J].中国电机工程学报,2006,26(9):137-143.
XU Shukai, SONG Qiang, ZHU Yongqiang, et al. Research on

the transformer isolated multilevel H-bridges D-STATCOM for unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 137-143.

- [6] SONG Q, LIU W H. Control of a cascade STATCOM with star configuration under unbalanced conditions[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(1): 45-58.
- [7] 章玮,王伟颖,贺益康.电网电压不平衡时电压源型变换器的参数设计[J].电力系统自动化,2012,36(2):91-95.
ZHANG Wei, WANG Weiyong, HE Yikang. Parameter design of voltage source converter under unbalance grid voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 91-95.
- [8] HOCHGRAF C, LASSETER R H. STATCOM controls for operation with unbalanced voltages[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 13(2): 538-544.
- [9] 魏文辉,刘文华,宋强,等.基于逆系统方法有功-无功解耦 PWM 控制的链式 STATCOM 动态控制策略研究[J].中国电机工程学报,2005,25(3):23-28.
WEI Wenhui, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. Research on fast dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3):23-28.
- [10] 魏文辉,刘文华,滕乐天,等.基于反故障控制的链式 STATCOM 动态控制策略的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(4):19-24.
WEI Wenhui, LIU Wenhua, TENG Letian, et al. Research on anti-fault dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 19-24.
- [11] 廖勇,吴兴旺,刘刃.电网不平衡时双馈感应发电机定子负序和谐波电流抑制方法[J].电力系统自动化,2013,37(19):26-32.
LIAO Yong, WU Xingwang, LIU Ren. Suppression for negative sequence and harmonic current of a doubly-fed induction generator stator in unbalanced grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 26-32.
- [12] 申科,王建隼,班明飞,等.基于零序电压注入的模块化多电平变流器故障容错控制[J].电力系统自动化,2014,38(5):96-102.
SHEN Ke, WANG Jiangze, BAN Mingfei, et al. Fault-tolerant control for modular multilevel converter based on zero-sequence voltage injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 96-102.

李圣清(1961—),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向:电力系统谐波的分析与治理、电能质量调节与控制。E-mail: lsq1961@sohu.com

徐文祥(1989—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电能质量控制技术。E-mail: pb3128@163.com

栗伟周(1988—),男,硕士研究生,主要研究方向:电能质量控制技术。E-mail: liweizhou1988@163.com

(编辑 万志超)

(下转第 119 页 continued on page 119)

