

# 基于多级注入式电流源变换器的 STATCOM 建模与控制

王海龙, 刘永和, 陈兴华, 白雪垠

(内蒙古工业大学 信息工程学院, 内蒙古自治区 呼和浩特市 010051)

## Modeling and Control of STATCOM Based on Multi-Level Reinjection Current Source Converter

WANG Hai-long, LIU Yong-he, CHEN Xing-hua, BAI Xue-yin

(School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology,  
Hohhot 010051, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**ABSTRACT:** A novel multi-level current reinjection current source converter (MLCR-CSC) is proposed. The proposed MLCR-CSC implements the zero-current switching, which can not only eliminate the switching losses, but also simplify the requirement of the absorbing circuit and the connection of the converter with AC system is simplified and high-capacity AC capacitor at network side during the commutation isn't needed. The mathematical model of static synchronous compensator (STATCOM) based on the proposed MLCR-CSC is built, and the nonlinear model of STATCOM is locally linearized. After the analysis, the framework of control strategy is given and by use of PSCAD/EMTDC the built model is simulated. The feasibility of the proposed control strategy is verified by simulation, and simulation results show that the STATCOM based on the proposed MLCR-CSC possesses good dynamic and steady state characteristics.

**KEY WORDS:** multi-level reinjection; current source converter (CSC); linear model; static synchronous compensator (STATCOM)

**摘要:** 介绍一种新型的多级注入式电流源变换器, 这种变换器主桥实现了零电流切换, 消除开关损耗的同时降低了对吸收回路的要求, 简化了变换器与交流系统的连接, 在换向期间网侧不需要大容量的交流电容。建立了基于多级注入式电流源变换器的 STATCOM 的数学模型, 对 STATCOM 的非线性数学模型进行局部线性化。通过分析给出了控制策略框图, 利用 PSCAD/EMTDC 对所建模型进行仿真, 结果表明, 该结构的 STATCOM 具有良好的动态、稳态特性, 并验证了所提出控制策略的可行性。

**关键词:** 多级注入; 电流源变换器(CSC); 线性化模型; 静

止同步补偿器(STATCOM)

## 0 引言

随着电力系统复杂性的提高以及对可靠、安全、可控、经济和高质量电能需求的不断增长, FACTS装置受到了广泛关注。作为FACTS控制器家族的一个重要成员, 静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)目前已成为研究与关注的重点<sup>[1-5]</sup>。STATCOM是一种并联型无功补偿装置, 能吸收和发出无功, 可以增强功率传输能力, 提高电力系统的稳态稳定极限, 还可用来阻尼系统振荡, 提高电力系统暂态稳定极限。

根据直流侧电压和电流特性的不同, STATCOM可分为电压源(voltage source converter, VSC)型和电流源(current source converter, CSC)型<sup>[6-12]</sup>。在过去的10年中, VSC的研究与应用占主导地位, 对CSC的研究很少。与VSC相比, CSC有如下优点: 1) 变换器输出电流的直接控制; 2) 固有的短路保护能力(直流侧电感的作用); 3) 高可靠性(开关管的单向流通和自身短路保护能力)。由于CSC具有上述优点, 并且随着大功率反向阻断器件以及高温超导储能技术的不断发展, CSC在大功率场合得到了广泛应用。

基于CSC的STATCOM没有实现商业化的一个主要原因是: 为了吸收换流时负载电感中存储的能量, 需要在交流侧设置交流电容器, 这就大大增加了变换器的成本和体积; 而且由于交流电容器的

存在, 还可能与交流电感发生谐振。纹波注入的概念<sup>[13]</sup>最早在 20 世纪 80 年代提出, 其变换拓扑分为 2 大类: 多级注入式电压源变换器(multi-level voltage reinjection voltage source converter, MLVR-VSC)和多级注入式电流源变换器(multi-level current reinjection current source converter, MLCR-CSC)<sup>[13-15]</sup>。MLCR-CSC 实现了软开关与多级变换, 降低了谐波畸变率和开关频率, 特别适合于高压大功率场合。MLCR-CSC 零电流切换的实现, 使得不再需要大容量的电容来吸收换相过程中交流系统的电感储能, 所以, 简化了 MLCR-CSC 与交流系统的连接; 此外, MLCR-CSC 零电流切换的实现以及交流侧高质量的输出电流波形, 使得交流侧不需要滤波电容器, 避免了谐振风险。

本文建立了基于MLCR-CSC的STATCOM的数学模型, 给出了控制策略框图, 利用PSCAD/EMTDC对所建立的模型进行仿真, 结果表明, 该结构的STATCOM具有良好的动态、稳态特性, 并且验证了所提出控制策略的可行性。

### 1 MLCR-CSC 的拓扑结构

图 1 是 5 级注入式电流源变换器结构。将平衡电抗器、注入开关、直流侧平波电抗器  $L_m$  和直流电源  $E_d$  的组合看成是两主变换器的负载, 使用多抽头电抗器为两主桥产生注入电流波形。当  $S_{j1}$  导通而其它注入开关均截止时, 直流电流  $I_{dc}$  完全由 Y 连接桥提供, 仅有很小的励磁电流流过  $\Delta$  连接桥; 当  $S_{j5}$  导通而其它注入开关均截止时, 直流电流  $I_{dc}$  完全由  $\Delta$  连接桥提供, 仅有很小的励磁电流流过 Y 联接桥: 于是主桥近似实现了零电流软开关(zero current switch, ZCS)。图中电抗器的匝数必须满足  $N_1 = N_2 = N_3 = N_4$ , 以保证两主桥直流侧电流波形相同且有  $30^\circ$  的相移。图中:  $I_y$ 、 $I_d$  分别为经 5 个注入开关组合形成的 2 个 6 脉波桥的注入;  $I_{ay}$ 、 $I_{ad}$  分别为电流源变换器交流侧 Y 接桥和  $\Delta$  接桥的 a 相电流。

MLCR-CSC 主桥零电流切换的实现保证了串联开关器件的动静态均压, 允许主桥开关器件直接串联, 为超高压、大功率变换器在输电网中的应用提供了可能。

另外, 对于注入电路开关器件( $S_{j1} \dots S_{j5}$ )并没有实现软开关, 所以注入开关都需要加设吸收电路, 不过每个开关的工作电流均为单向流通, 所以吸收电路可以采用简单的阻容吸收电路。连接变压器是

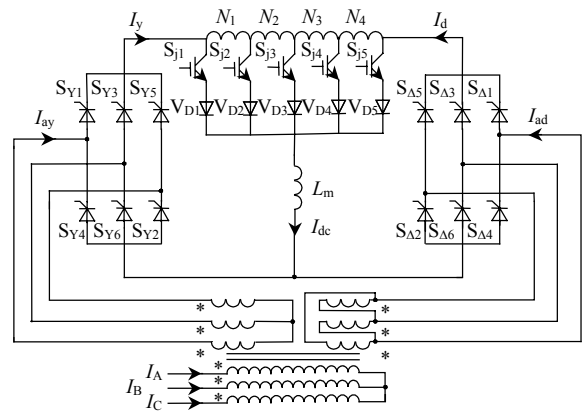


图 1 MLCR-CSC 主电路结构  
Fig. 1 Main circuit of MLCR-CSC

一个三相三绕组变压器, Y/Y 和 Y/ $\Delta$ 连接的匝数之比分别为  $K_n:1$  和  $K_n:\sqrt{3}$ 。

在电源对称状态下运行时, 直流侧电压纹波很小且频率很高, 很小的平波电抗器就能抑制直流侧电流的波动; 在电源非对称状态下运行时, 相对较大的平波电抗器才能抑制直流侧电流的波动。当变换器从感性区域变化到容性区域时, 或在相反的动态变化过程中, 要求一个较大的电感来抑制电流冲击。

### 2 基于 MLCR-CSC 的 STATCOM 的数学模型

图 2 是 STATCOM 与电网总线连接的原理图, 图中的变换器是 MLCR-CSC。图中:  $U_{sa}$ 、 $U_{sb}$ 、 $U_{sc}$  为三相电网电压;  $L_s$  为连接电抗及变压器漏抗;  $R_1$  为变压器铜耗;  $R_2$  为变换器中开关器件漏电流对应的等效电阻;  $L_{dc}$  为平波电抗器;  $R_{dc}$  为变换器开关损耗和通态损耗。

MLCR-CSC 零电流切换的实现, 确保了串联电感无储能, 交流侧不需要大容量的交流电容, 使变换器与交流系统的连接简化。整个电路结构可以看成是一个可控的电流源连接在交流系统上, 这个可控的交流电流源向系统注入一个三相正弦交流电流, 超前或滞后系统电压  $90^\circ$ , 从而达到吸收和发出

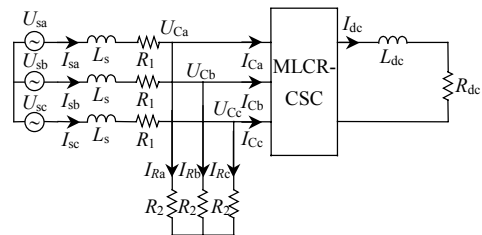


图 2 基于 MLCR-CSC 的 STATCOM 的简化电路  
Fig. 2 Simplified circuit of STATCOM based on MLCR-CSC

无功的目的。但在实际装置中，交流侧电压与电流的夹角要偏离 $90^\circ$ ，这样变换器可以吸收一部分有功功率来补偿系统消耗的功率。

只考虑STATCOM输出电流的基波分量而忽略谐波分量，根据STATCOM装置的等效电路图，可列出STATCOM装置的abc三相数学方程。根据交流侧电压关系，可得

$$L_s \frac{d\mathbf{I}_s}{dt} + R_1 \mathbf{I}_s + R_2 \mathbf{I}_R = \mathbf{U}_s \quad (1)$$

$$\mathbf{I}_R = \mathbf{I}_s - \mathbf{I}_C \quad (2)$$

式中： $\mathbf{I}_s = [I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}]^T$ ， $\mathbf{I}_C = [I_{Ca}, I_{Cb}, I_{Cc}]^T$ ， $\mathbf{I}_R = [I_{Ra}, I_{Rb}, I_{Rc}]^T$ ， $\mathbf{U}_s = [U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}]^T$ 。

忽略变换器开关器件漏电流损耗，根据直流侧和交流侧的能量关系可得

$$I_{dc} L_{dc} \frac{dI_{dc}}{dt} + R_{dc} I_{dc}^2 = U_C^T \mathbf{I}_C \quad (3)$$

$$U_C = U_s - R_1 \mathbf{I}_s \quad (4)$$

式中： $U_C = [U_{Ca}, U_{Cb}, U_{Cc}]^T$ ； $\mathbf{I}_C = [KI_{dc} \cos(\omega t + \theta), KI_{dc} \cos(\omega t + \theta - 2\pi/3), KI_{dc} \cos(\omega t + \theta + 2\pi/3)]^T$ ； $\mathbf{U}_s = [\sqrt{2}U_s \cos(\omega t), \sqrt{2}U_s \cos(\omega t - 2\pi/3), \sqrt{2}U_s \cos(\omega t + 2\pi/3)]^T$ ； $K$ 为比例系数； $\theta$ 为STATCOM输出电流与系统电压的夹角，为可控量。利用电力系统中常用的经典派克变换，将时变微分方程变为常系数微分方程。经典的派克变换矩阵为

$$\mathbf{T} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\mathbf{I}_s}{dt} = \frac{d}{dt} [\mathbf{T}^{-1} \mathbf{I}_{dq0}] = \mathbf{T}^{-1} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{dq0} + \frac{d}{dt} \mathbf{T}^{-1} \mathbf{I}_{dq0}$$

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{I}_{dq0}, \quad \mathbf{U}_s = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{U}_{dq0}, \quad \mathbf{I}_C = \mathbf{T}^{-1} [I_{Ca} \quad I_{Cb} \quad I_{Cc}]^T$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1 + R_2}{L_s} & \omega & 0 \\ \omega & -\frac{R_1 + R_2}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{dc}}{L_{dc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \\ N_3 & N_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $\omega$ 为d-q坐标的旋转角频率，与系统电压的额定角频率相同。

$$N_1 = N_2 = \sqrt{2/3} R_2 KI_{dc} / L_s$$

$$N_3 = \sqrt{2/3} U_d KI_{dc} / L_{dc} - \sqrt{2/3} R_1 KI_{dc} / L_{dc}$$

$$N_4 = \sqrt{2/3} U_q KI_{dc} / L_{dc} - \sqrt{2/3} R_1 KI_{dc} / L_{dc}$$

输入向量 $\mathbf{u}$ 定义为

$$\mathbf{u} = [u_1, u_2]^T = [\cos \theta, \sin \theta]^T$$

### 3 基于MLCR-CSC的STATCOM控制器的设计

PI控制理论基础是线性系统理论。应用非线性系统的局部线性化理论，并且考虑到开关器件的漏电阻 $R_2$ 损耗很小，可以推出系统的近似线性化模型。其中在 $+90^\circ$ 时

$$\frac{\Delta I_{dc}}{\Delta \theta} = \frac{-\sqrt{2} K U_s}{L_{dc} s + R_{dc}}$$

在 $-90^\circ$ 时

$$\frac{\Delta I_{dc}}{\Delta \theta} = \frac{\sqrt{2} K U_s}{L_{dc} s + R_{dc}}$$

在MLCR-CSC模型中，根本的控制量只有1个，就是输出电流与系统电压的夹角 $\theta$ 。当MLCR-CSC用于STATCOM时，采用功率角 $\pm 90^\circ \pm \Delta \theta$ 控制直流电流 $I_{dc}$ ， $\Delta \theta$ 的变化范围很小，在工作点近似线性变化。但是单向直流电流增减的幅度不仅与功率角的变化量 $\Delta \theta$ 有关，还与功率角的正负极性有关。为了控制直流侧电流，在 $\pm 90^\circ$ 附近功率角的增量 $\Delta \theta$ 必须与变换器的工作状态协调产生正确的 $\Delta \theta$ 的变换极性。

图3给出了基于MLCR-CSC的STATCOM的控制框图，给定参考无功电流的绝对值 $I_m^*$ 与实测无功电流的绝对值 $I_m$ 进行比较，经过PI调节器输出触发角的变化量，这里设计其变化量为 $\pm 5\%$ 。图中 $U_{sRMS}$ 为网侧相电压的有效值。

控制策略框图中范围比较器极性判断的作用为：当无功功率的极性改变时，相角变化 $180^\circ$ ，使

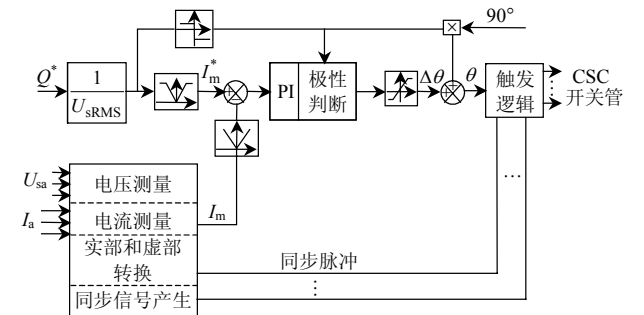


图3 基于MLCR-CSC的STATCOM控制框图

Fig. 3 Control block diagram of STATCOM based on MLCR-CSC

电流源变换器从一个区域平滑过渡到另一个区域。触发角的变化量  $\Delta\theta$  与  $+90^\circ$  或  $-90^\circ$  的和作为触发逻辑的给定角，从而达到控制无功功率的目的。

### 4 仿真结果

仿真电路的主要参数设置如下：对称三相交流电源的线电压有效值为100 kV；电源变压器的额定视在功率为100 MVA，工作频率为50 Hz，漏抗为10%；5抽头电抗器的额定电压为68 kV，额定视在功率为25 MVA，工作频率为300 Hz(6倍电源基波频率)；负载支路电感  $L_d$  为2 H，电阻  $R_{dc}$  为1  $\Omega$ ， $R_1$  为0.2  $\Omega$ 。图4(a)(b)是经5个注入开关组合形成的2个6脉波桥的注入电流  $I_y$ 、 $I_d$ 。注入电路频率是电源基波频率的6倍，当注入开关  $S_{j1}$  打开时  $\Delta$  接桥上的电流为零，当注入开关  $S_{j5}$  打开时 Y 接桥上的电流为零，这就为主桥的换相提供了软开关条件，使变换器与交流系统的连接简化，网侧不需要大容量的交流电容。图4(c)(d)分别显示的是变换器交流侧  $\Delta$  接桥和 Y 接桥的 a 相电流波形  $I_{ay}$ 、 $I_{ad}$ ，经过连接变压器合成后

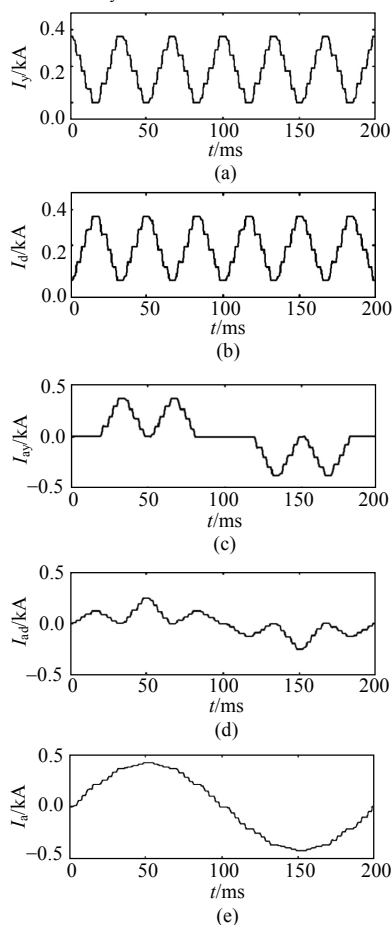


图4 5电平 MLCR-CSC 各点仿真波形  
Fig. 4 The simulated waveforms of the 5-level MLCR-CSC

形成如图4(e)所示的电网侧输出 a 相电流波形，显然近似为正弦波，电网侧不需要滤波器  $I_a$ 。

图5波形反映了基于MLCR-CSC的STATCOM在闭环控制下的稳态和动态特性，这里截取0~3s内一段波形，在0~3s内设定参考无功功率变化3次。实测的无功功率能快速跟随设定值变化且无稳态误差，如图5(a)所示；图5(b)给出了无功功率变化时的直流侧电流变化情况；图5(c)给出了0~3s三相交流电流的波形，在这一阶段，无功功率经历了由容性到感性和感性到容性的变化过程。从图中可以看出，在一个电源周期左右的时间内，STATCOM即可实现负荷从容性到感性或从感性到容性的变化，表明STATCOM具有良好的动态性能。

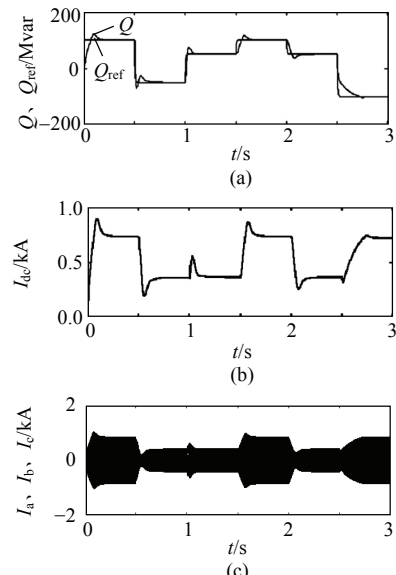


图5 基于MLCR-CSC的STATCOM响应波形  
Fig. 5 The dynamic response waveforms of the STATCOM based on MLCR-CSC

### 5 结论

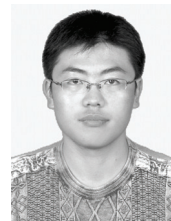
1) MLCR-CSC 实现了零电流切换，不但消除了开关损耗，而且降低了对吸收回路的要求，简化了变换器与交流系统的连接，电网侧不再需要大容量的交流电容，MLCR-CSC 适合在大功率场合应用。

2) 采用本文的控制策略，基于MLCR-CSC的STATCOM能快速跟随设定的无功功率，在感性和容性间从一个区域平滑过渡到另一个区域而无稳态误差，控制器设计正确。

### 参考文献

[1] 丁凯, 邹云屏, 王展, 等. 一种适用于高压大功率的新型混合二极管钳位级联多电平变换器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 62-67.

- Ding Kai, Zou Yunping, Wang Zhan, et al. A novel hybrid diode-clamp cascade multilevel converter for high power application [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 62-67(in Chinese).
- [2] 朱永强, 刘文华, 邱东刚, 等. 基于单相 STATCOM 的不平衡负荷平衡化补偿的仿真研究[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 42-45.  
Zhu Yongqiang, Liu Wenhua, Qiu Donggang, et al. Simulation of balancing compensation of unbalanced load based on single phase STATCOM[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 42-45(in Chinese).
- [3] 伏祥运, 王建斌, 曾繁鹏, 等. 一种改进的混合静止同步补偿器[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 76-80.  
Fu Xiangyun, Wang Jianze, Zeng Fanpeng, et al. An improved hybrid static synchronous compensator[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 76-80(in Chinese).
- [4] Mathur R M, Varma R K. 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 46-57.
- [5] 郭红霞, 吴捷, 刘永强, 等. 基于强化学习算法的静止同步补偿电压控制器[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 9-13.  
Guo Hongxia, Wu Jie, Liu Yongqiang, et al. Application of reinforcement learning to STATCOM controller[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 9-13(in Chinese).
- [6] 魏文辉, 宋强, 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, Song Qiang, 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(in Chinese).
- [7] 刘文华, 宋强, 滕乐天, 等. 基于链式逆变器的 50 MVA 静止同步补偿器的直流电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 145-150.  
Liu Wenhua, Song Qiang, Teng Letian, et al. Balancing control of DC voltages of 50 MVA STATCOM based on cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 145-150(in Chinese).
- [8] 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(in Chinese).
- [9] 栗春, 马晓军, 姜齐荣, 等. STATCOM 提高系统暂态稳定及阻尼的动模实验研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 36-40.  
Li Chun, Ma Xiaojun, Jiang Qirong, et al. Transient stability enhancement and damping improvement by STATCOM-physical experimental study[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 36-40(in Chinese).
- [10] 马晓军, 姜齐荣, 王仲鸿, 等. 静止同步补偿器的分相不对称控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 52-56.  
Ma Xiaojun, Jiang Qirong, Wang Zhonghong, et al. Unbalanced control based on individual phase for static synchronous compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 52-56(in Chinese).
- [11] Ye Y, Kazerani M. Decoupled state-feedback control of CSI-based STATCOM[C]. 32nd Annual North America Power Symposium, Waterloo, Ontario, Canada, 2000.
- [12] Shen Dong, Lehn P W. Modeling, analysis, and control of a current source inverter-based STATCOM[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(1): 248-253.
- [13] Baird J F, Arrillaga J. Harmonic reduction in DC-ripples reinjection [J]. IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution, 1980(127): 294-303.
- [14] Liu Y H, Arrillaga J, Watson N R. A new high-pulse voltage-sourced converter for HVDC transmission[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(4): 1388-1393.
- [15] Liu Y H, Arrillaga J, Watson N R. A new STATCOM configuration using multi-level DC voltage reinjection for high power application [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1828-1834.



王海龙

收稿日期: 2009-05-21。

作者简介:

王海龙(1982—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为谐波抑制与无功补偿, E-mail: hailong327@yahoo.com.cn;

刘永和(1951—), 男, 教授, 博士, 新西兰坎特伯雷大学研究员, 主要研究方向为大功率静止变换装置在高压直流输电与柔性交流输电中的应用;

陈兴华(1981—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为谐波抑制与无功补偿;

白雪垠(1981—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为谐波抑制与无功补偿。

(责任编辑 沈杰)