

电压源型快速动态无功补偿器

单任仲, 尹忠东, 肖湘宁

(电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Rapidly Dynamic Var Compensator Based on Voltage Source Converter

SHAN Ren-zhong, YIN Zhong-dong, XIAO Xiang-ning

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (North China Electric Power University), Ministry of Education, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: This paper proposed a novel strategy to control rapidly dynamic var compensator based on voltage source converter (VSC). The proposed compensator combines the sinusoidal pulse width modulation (SPWM) type inverter to regulate the voltage on the compensating inductor directly, so the continuous output of inductive reactive power is realized, which is suitable for the low and middle voltage distribution system. With this compensator, the harmonic problem of thyristor controlled reactor (TCR) is overcome, and the capacity of the inverter is only 25% of the rating capacity. Combined with thyristor switched capacitor (TSC) to realized bidirectional reactive power regulate, and the capacity of dynamic var could be reduced greatly. The system simulation model based on Matlab/Simulink is given, then the good performance digital controller is designed. Finally, the experimental results show that the proposed control strategy is feasible and efficient.

KEY WORDS: var compensation; power factor; inverter; digital control; sinusoidal pulse width modulation

摘要: 提出一种新颖电压源型连续可调无功功率补偿器的控制策略, 采用正弦脉宽调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)电压源型逆变器(voltage source converter, VSC)直接调节补偿电抗上的电压, 实现补偿器的连续可调感性无功功率输出。该补偿器克服了传统晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)的谐波问题, 并且逆变器的最大工作容量仅为补偿容量的25%。结合晶闸管投切电容器(thyristor switched capacitor, TSC)可大大降低动态无功补偿部分的容量, 并实现无功功率的连续双向调节。建立基于Matlab/Simulink的系统仿真模型, 对控制策略进行仿真研究。最后设计制作高性能数字控制器, 通过实验验证提出的

控制策略是有效可行的。

关键词: 无功补偿; 功率因数; 逆变器; 数字控制; 正弦脉宽调制

0 引言

无功补偿设备是目前广泛应用的电力系统装置, 也是柔性交流输电重要设备之一^[1-5], 另外由于风能、太阳能等可再生能源发电功率的不可预见性和随机性, 其大量接入电网势必对电网的稳定性和可靠性带来新的挑战, 目前多采用无功补偿设备进行稳定控制^[6-10]。针对目前应用最广泛的静止无功补偿器之一TCR, 由于采用相控模式势必产生很大的谐波问题^[11-15], 因此必须增设额外的滤波器兼提供基波容性无功, 但这类无功补偿设备属于恒阻抗元件, 其无功功率输出受系统电压水平影响, 在系统电压降低较多时, 补偿装置的输出容量也将大大降低, 在电网受到干扰或故障情况下, 将不能很好地起到对系统的电压支撑和无功补偿作用。

本文提出电压源控制型快速动态无功补偿器, 并提出一种新颖的调压型调节无功的控制策略, 与传统的TCR相比, 控制策略简单易行, 具有调节速度快、谐波含量低的特点; 与静止同步补偿器静止无功补偿器(static synchronous compensators, STATCOM)相比, 具有逆变器工作容量小, 最大工作容量仅为设计容量的1/4, 并且逆变器承受电压低的特点^[16-17]。另外, 系统电压较低时通过调节逆变器输出反向电压仍能保证额定无功输出, 能很好地对电网故障情况时起电压支撑和无功补偿作用。通过详细的理论分析得出补偿容量的设计及补偿电抗器 L 参数的大小, 并利用瞬时无功理论进行无功检测, 最后设计制作原理样机进行实验

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2007BAA12B03)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China(2007BAA12B03).

分析和验证。

1 工作原理

VSC型快速动态无功补偿器的主电路拓扑如图1所示,由直流母线电容 C_{dc} 、三相四桥臂逆变桥 $S_1\sim S_8$ 、开关纹波滤波器 $L_{a,b,c}$ 、 $C_{a,b,c}$ 、无功补偿电抗器 L 和固定电容器组(fixed capacitor, FC)构成。本电路拓扑的主要特点在于补电抗器 L 连接逆变器输出端,再并联接于补偿节点,通过调节逆变器输出电压的大小调节补偿无功的大小。快速动态无功补偿器用以吸收FC过补的无功功率,FC补偿采用多组TSC实现,可有效降低动态无功补偿器的容量。

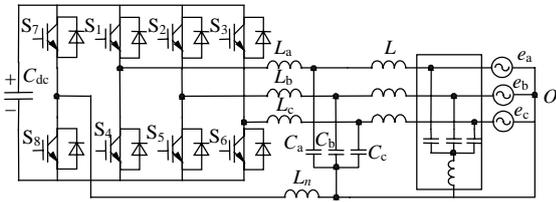


图1 无功补偿器主电路

Fig. 1 Main circuit of static var compensator

2 容量设计

以电抗器额定容量 Q_L 为基准,则补偿器的输出容量 Q_{SVC} 及逆变器的工作容量 Q_{INV} 可表示为

$$\begin{cases} Q_L = \frac{U_L^2}{\omega L} = \frac{(e_{rms} - u_{rms})^2}{\omega L} \\ Q_{INV} = u_{rms} I_L = \frac{u_{rms}(e_{rms} - u_{rms})}{\omega L} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Q_{SVC} = Q_L + Q_{INV} \\ \begin{cases} Q_L^* = (1-a)^2 \\ Q_{INV}^* = a(1-a) \\ Q_{SVC}^* = 1-a \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $a=u_{rms}/e_{rms}$ 为逆变器输出电压标幺值; Q_L 为电抗器工作容量(Q_L^* 为其标幺值);容量 Q_{INV} 为逆变器工作容量(Q_{INV}^* 为其标幺值); Q_{SVC} 为补偿器输出无功容量(Q_{SVC}^* 为其标幺值)。

根据式(2)可得到各部分无功功率与逆与桥输出基波电压的关系,如图2所示。与STATCOM相比,本补偿器具有工作容量小,补偿范围大的特点,如设计逆变器的输出电压变化为[0,0.5],电抗器的补偿无功容量变化为[1,0.25],补偿器的输出无功则为[1,0.5],此时逆变器的最大工作电压为系统母线电压的1/2,而STATCOM所承受的电压则为系统母线电压,另外本补偿器可输出电压反向调节,在

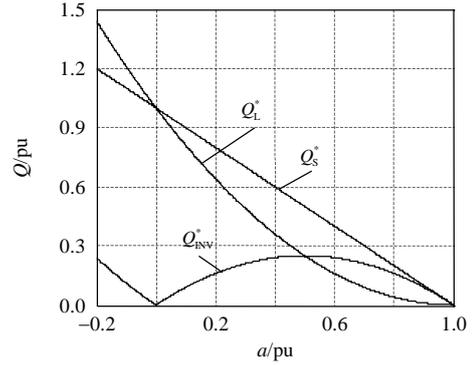


图2 容量与逆变器输出电压的曲线

Fig. 2 Curve of capacity vs inverter output voltage

反向调节区域补偿器具有更大的调节容量,但此时器件的容量也将增大,因此本装置在系统电压低于额定值较多时仍能保证额定无功功率的输出。

3 控制算法及控制器设计

3.1 三相四线制无功检测

本装置采用负荷无功功率闭环控制,必须对负荷无功功率进行检测,由于低压配电系统为三相四线制系统,不能直接采用瞬时无功理论的 i_d 、 i_q 检测法^[18-19],该方法要求三相电流之和为0。解决方法是先求出零序电流分量,将零序分量从各相电流中剔除,三相电流之和为0,再利用三相三线制情况下的检测方法进行检测,得到谐波、基波负序及包括零序在内的补偿电流信号。检测框图如图3所示。

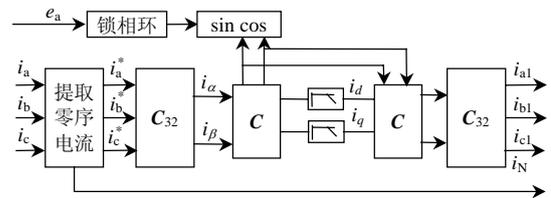


图3 三相四线制电流检测框图

Fig. 3 Block diagram of current measurement for three-phase four-wire system

三相四线制系统中,三相负载电流 i_a 、 i_b 、 i_c 中所包含的零序分量电流为

$$i_z = (i_a + i_b + i_c) / 3 \quad (3)$$

系统中的零线电流为

$$i_N = i_a + i_b + i_c = 3i_z \quad (4)$$

将零序分量 i_z 从三相电流中剔除,则有

$$\begin{cases} i_a^* = i_a - i_z \\ i_b^* = i_b - i_z \\ i_c^* = i_c - i_z \end{cases} \quad (5)$$

$$i_a^* + i_b^* + i_c^* = 0 \quad (6)$$

将 i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^* 进行 dq 变换,再经低通滤波器滤

波, 得到直流分量 i_d 、 i_q , 然后进行 dq 反变换, 得到 i_{a1} 、 i_{b1} 、 i_{c1} 的基波正序分量。本装置则只需要对 i_q 进行反变换得到需要补偿的基波无功电流, 根据基波无功电流可得到负荷需要补偿的无功功率。

3.2 指令电压计算

补偿器投入运行后, 逆变器输出电压 u_a 、 u_b 、 u_c 与母线电压 e_a 、 e_b 、 e_c 相位相同, 补偿器吸收的无功功率 Q_{SVC} 大小为

$$Q_{SVC} = \frac{e_{rms}(e_{rms} - u_{rms})}{\omega L} \quad (7)$$

根据式(7)就可得到逆变器输出电压有效值 u_{rms} 。具体控制过程为:

1) 给定无功功率 Q_{ref} 与装置实际输出无功 Q_{SVC} 的偏差, 将其送入PI调节器中进行运算, 结合式(7)得到逆变器输出电压的指令信号 u_a , 如图 4 控制框图所示。

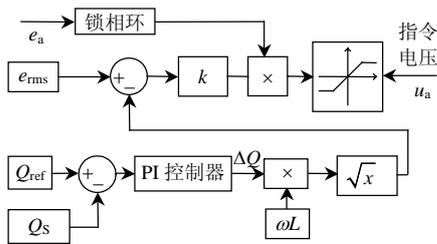


图 4 指令电压产生的控制框图

Fig. 4 Control block diagram of instruction voltage

2) 根据 1) 中得到的指令电压信号, 通过 SPWM 调制得到绝缘栅双极性晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 的触发脉冲信号, 控制逆变器的输出电压, 最终实现系统无功闭环控制。

3.3 TSC 投切时刻设计

TSC 主电路如图 5 所示, 图 5(a)主电路采用 2 个晶闸管反并联, 在投入之间电容器上没有电压, 因此需要启动过程, 投入时刻应在电压正向过零点给 T_2 触发脉冲信号, 必定存在冲击电流; 图 5(b)主电路采用晶闸管和二极管反并联, 由于二极管 D_2 可以保证电容器在投入之前始终保持电容器电压维持在电源电压最大值, 因此只要保证在电源电压

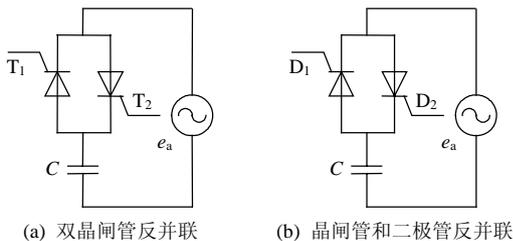


图 5 TSC 主电路

Fig. 5 Main circuit of TSC

正向峰值处触发晶闸管 T_1 , 就可保证电容器投入不会产生冲击电流, 但由于系统电压含有谐波, 且控制系统存在延时, 很难精确控制 90° 触发, 所以提前到 85° 给触发信号。

3.4 基于数字信号处理器/场可编程逻辑门阵列的控制器设计

本补偿器的控制器采用数字信号处理器(digital signal processor, DSP)、场可编程逻辑门阵列(field programmable gates array, FPGA)和复杂可编程逻辑器件(complex programmable logic device, CPLD)芯片构成, 系统控制框图如图 6 所示, 具有很高的可靠性并且能充分发挥各部分的性能, 例如 DSP 的高速运算能力、FPGA 和 CPLD 的高可靠性及逻辑控制能力强等特点, 保证了装置良好的动静态性能。

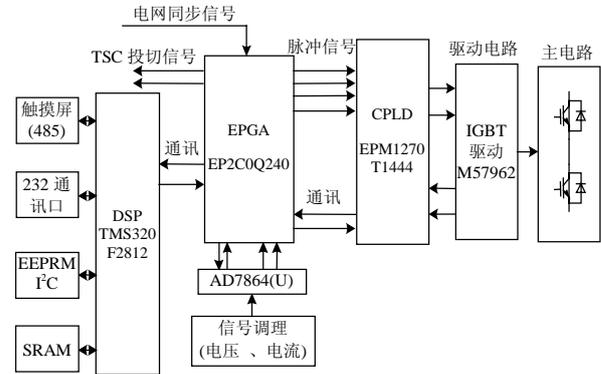


图 6 系统控制框图

Fig. 6 System control block

系统功能大致可分为 3 部分, 分别由 DSP 完成的数据处理并计算出无功、系统状态量显示及人机交互、补偿器各状态之间的转换时序; 由 FPGA 完成的三相系统电压、电流采样, 补偿器输出电流采样并上传数据给 DSP, 产生 SPWM 驱动信号、TSC 投切信号及直流电压稳定控制; 由 CPLD 完成死区时间的产生、温度信号的采集、IGBT 过压过流保护并将温度信号及故障信号通过光线异步通讯上传给 FPGA。

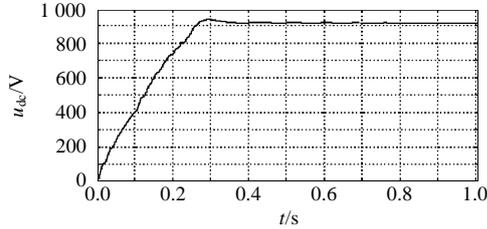
4 仿真分析

基于 Matlab/Simulink 仿真软件对 VSC 型快速动态无功补偿器及控制策略进行了仿真, 主要仿真参数如表 1 所示。给出装置的主要仿真波形如图 7 所示, 其中图 7(a)是逆变器直流侧电压波形 u_{dc} , 为减小装置的体积和直流电容储能电容, 系统采用自取能方式并加直流电压稳定控制, 仿真波形表明装置启动之后进入稳定运行状态之后能很好地稳定

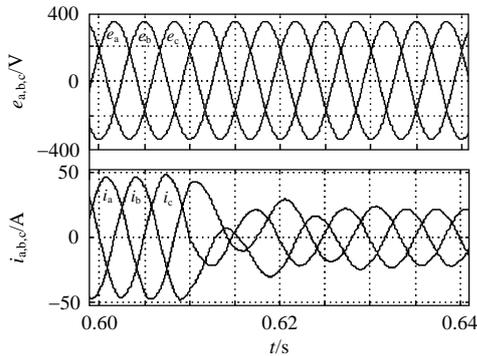
表1 主要仿真参数

Tab. 1 Key simulation parameters

系统电压/V	系统频率/Hz	补偿器额定容量/kvar	开关频率/kHz	补偿电抗器/mH	开关纹波滤波器电感/mH	开关纹波滤波器电容/ μ F
220	50	20	6	23	1	20



(a) 直流电压仿真波形



(b) 装置输出容量阶跃波形

图7 仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms

直流电压, 保证装置输出电压和电流波形良好。图7(b)是装置补偿容量由满载突变到半载时系统电压 e_a 、 e_b 、 e_c 和输出电流波形 i_a 、 i_b 、 i_c , 表明装置在补偿容量突变情况下, 不会对系统引起冲击并具有良好的动态性能, 能跟踪动态负荷的变化。

5 实验分析

为进行实验研究和分析, 设计制作了一套实验样机, 实验样机参数与仿真参数一致, 具体参数如表1所示。图8(a)、(b)为动态无功补偿器工作在满载和半载情况下的波形, 实验波形表明装置输出电流谐波含量小、正弦度好, $\eta_{\text{THD}} \leq 3\%$, 补偿器直流母线电压恒定值需要消耗有功功率, 其次是功率半导体器件及滤波电抗器需要消耗部分有功功率, 所以补偿电流和系统电压之间的相位略小于 90° ; 图8(c)为补偿器桥臂中点电压波形 u_{H} , 本装置采用的是IGBT模块工作频率可相对较高, 使输出电压波形谐波含量低; 图8(d)为系统电压 e_a 和逆变器输出电压 u_a 波形, 稳态工作时逆变器输出电压波形与系统电压完全同频同相, 保证输出电流的波形质量。

图9(a)、(b)给出了动态实验波形, 其中图9(a)

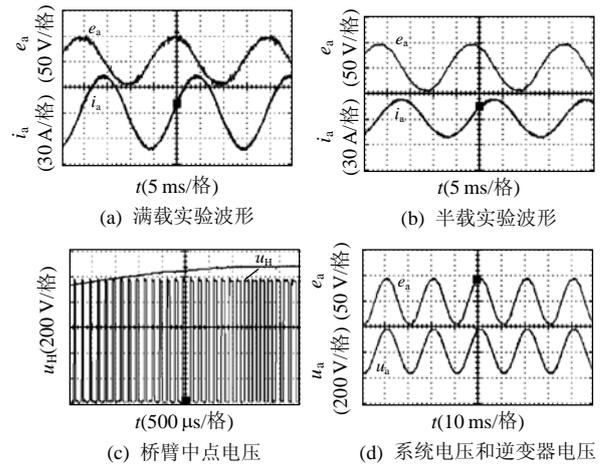


图8 稳态实验波形

Fig. 8 Static experimental waveforms

为输出电流 i_a 从15 A阶跃到30 A的动态过程; 图9(b)为逆变器输出电压 u_a 从110 V阶跃到220 V的动态过程。电压、电流动态响应时间小于10 ms, 实验波形表明补偿器具有良好的动态性能, 能对快速波动的负荷进行有效补偿。图9(c)、(d)是TSC投切实验波形, 电流波形 i_{FC} 表明电容器投入和退出都没有冲击电流, 提高了电容器的使用寿命和系统运行的可靠性。

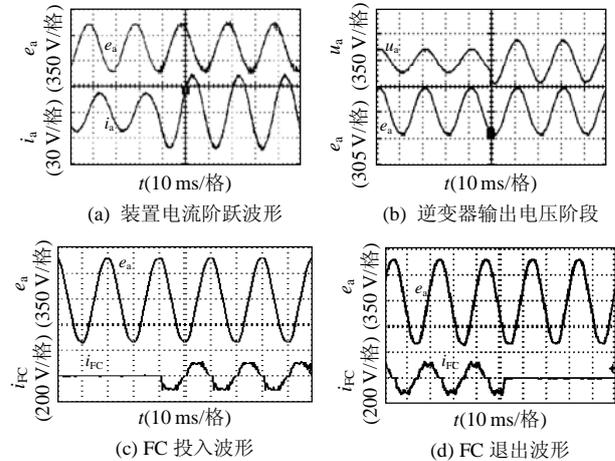


图9 动态实验波形

Fig. 9 Dynamic experimental waveforms

6 结论

本文所提出的VSC型快速动态无功补偿器能输出连续可调感性无功, 配合FC可实现分段双向无功连续可调, 用TSC实现固定电容器能提高装置的有效调节容量, 并大大降低动态无功的补偿容量, 与传统静态无功补偿器(TCR+FC)这种结构相比只需要非常小的开关纹波滤波器, 且谐波含量很低, 与STATCOM相比具有器件承受电压应力小、工作容量小的特点, 该补偿器是电压源工作模式, 因此其

控制策略简单易行, 控制效果明显。在中低压配电系统及风能等可再生能源发电系统中, 该补偿器可广泛用于无功补偿, 提高电压稳定性等。

参考文献

- [1] 马幼捷, 周雪松, 相伟. SVC 综合非线性控制器在交直流混合系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 19-23.
Ma Youjie, Zhou Xuesong, Xiangwei. The application of synthetical nonlinear SVC controller in AC/DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 19-23(in Chinese).
- [2] 余梦泽, 陈柏超, 曹志煌, 等. 110 kV 并联可控电抗器及其应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 3(28): 87-91.
Yu Mengze, Chen Baichao, Cao Zhihuang, et al. A novel 110 kV shunt controllable reactor and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 3(28): 87-91(in Chinese).
- [3] IEEE Special Stability Controls Working Group. Static var compensator models for power flow and dynamic performance simulation[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1994, 9(1): 229-240.
- [4] 马文川, 谭光慧, 王树文, 等. 新型高压动态无功补偿装置的研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(9): 127-132.
Ma Wenchuan, Tan Guanghui, Wang Shuwen, et al. A novel high-voltage dynamic var compensation device[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(9): 127-132(in Chinese).
- [5] 周勤勇, 郭强, 卜广全, 等. 可控电抗器在我国超/特高压电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 1-6.
Zhou Qinyong, Guo Qiang, Bu Guangquan, et al. Application of controllable reactors in China's power grid at extra and ultra voltage level[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 1-6(in Chinese).
- [6] 李旷, 刘进军, 魏标, 等. 静止无功发生器补偿电网电压不平衡的控制及其优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 58-63.
Li Kuang, Liu Jinjun, Wei Biao, et al. Control and optimization of static var generator for grid voltage unbalance mitigation [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 58-63(in Chinese).
- [7] Radunskaya A, Williamson R, Yinger R. A dynamic analysis of the stability of a network of induction generators[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2008, 23(2): 657-663.
- [8] Coughlan Y, Smith P, Mullane A, et al. Wind turbine modelling for power system stability analysis: a system operator perspective [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22(3): 929-936.
- [9] 尹忠东, 张建华, 肖湘宁, 等. 模块化无谐波可控硅控制电抗器的研究[J]. 高压电技术, 2005, 31(12): 52-54.
Yin Zhongdong, Zhang Jianhua, Xiao Xiangning et al. Study on harmonic free module based thyristor controlled reactor structure [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(12): 52-54(in Chinese).
- [10] Alves J E R, Pilotto L A S, Watanabe E H. Thyristor-controlled reactors nonlinear and linear dynamic analytical models[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2008, 23(1): 338-346.
- [11] Fujita H, Tominaga S, Akagi H. Analysis and design of a DC voltage-controlled static var compensator using quad-series voltage-source inverters[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1996, 32(4): 970-978.
- [12] 郑伟杰, 徐文远. TCR 非线性特性的线性耦合导纳矩阵模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 59-64.
Zheng Weijie, Xu Wenyuan. Harmonically coupled linear model for harmonic analysis of TCR[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 59-64(in Chinese).
- [13] Lima L T G, Semlyen A, Iravani M R. Harmonic domain periodic steady state modeling of power electronics apparatus: SVC and TCSC [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(3): 960-967.
- [14] Mayordomo J G, Izzeddine M, Asensi R. Load and voltage balancing in harmonic power flows by means of static var compensators [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(3): 761-769.
- [15] Fujita H, Tominaga S, Akagi H. Analysis and design of a DC voltage-controlled static var compensator using quad-series voltage-source inverters[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1996, 32(4): 970-978.
- [16] Garica-Gonzalez P, Garcia-Cerrada A. Control system for a PWM-based STATCOM[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2000, 15(4): 1252-1257.
- [17] Akagi H, Inoue S, Yoshii T. Control and performance of a transformerless cascade PWM STATCOM with star configuration [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2007, 43(4): 1041-1049.
- [18] 刘永超, 杨振宇, 姚军, 等. 三相四桥臂动态无功补偿器仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(11): 24-27.
Liu Yongchao, Yang Zhenyu, Yao Jun, et al. Simulative research on three-phase four-leg dynamic var compensator[J]. Electrical Power Automation Equipment, 2006, 26(11): 24-27(in Chinese).
- [19] 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于空间矢量的基波正序、负序分量及谐波分量的实时检测[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 1-5.
Zhang Guibin, Xu Zheng, Wang Guangzhu. Study and simulation of real time detecting method for fundamental positive sequence components and harmonic components based on space vector [J]. Proceedings of CSEE, 2001, 21(10): 1-5(in Chinese).



单任仲

收稿日期: 2008-10-29。

作者简介:

单任仲(1982—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术 in 电力系统中的应用、功率变换技术, srz19820521@sohu.com;

尹忠东(1968—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为 FACTS 技术、新能源发电及储能技术;

肖湘宁(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能质量、柔性交流输电。

(责任编辑 谷子)