

# 基于预测模型的 STATCOM 功率控制策略建模与仿真

郭三明<sup>1</sup>, 孙鹏荆<sup>1</sup>, 敬树仁<sup>2</sup>, 王志方<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000; 2. 西平县电业公司, 河南 驻马店 463900)

**摘要:** 将基于预测模型的功率控制策略(Predictive power control, PPC)应用于静止同步补偿器(Static synchronous compensator, STATCOM)中, 来解决传统直接功率控制策略中存在的功率脉动过大、开关频率不固定等问题。在分析 STATCOM 基本结构的基础上, 结合实际数字处理系统离散运行的特点, 推导出 STATCOM 系统的功率预测方程, 构建一个使  $k+1$  采样点功率跟踪误差最小为目标的占空比求取函数, 然后利用 SVPWM 技术调制出波形控制(Voltage source inverter, VSI), 以达到系统的稳定运行。最后, 使用 Matlab 搭建了 STATCOM 系统仿真模型, 仿真结果表明所提 PPC 策略有效地抑制了系统的功率脉动、恒定系统的开关频率, 同时其保留了传统 DPC 策略高动态响应的优异特性。

**关键词:** 瞬时功率理论; 预测模型; SVPWM; 功率控制

## Research on modeling and simulation of power control method for STATCOM based on predictive model

GUO Sanming<sup>1</sup>, SUN Pengjing<sup>1</sup>, JING Shuren<sup>2</sup>, WANG Zhifang<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Xiping Electric Power Bureau, Zhumadian 463900, China)

**Abstract:** A predictive power control method based on predictive models (PPC) is used in static synchronous compensator (STATCOM) to solve the larger power ripple and inconstant switching frequency in traditional direct power control (DPC). First of all, this paper analyzes the basic structure of STATCOM. Considering the actual discreteness of digital processing system, the power predictive function of STATCOM is derived, and a duty ratio calculating function is constructed to minimize the power tracking error at  $k+1$  sampling time, in order to achieve stable operation of the system, SVPWM technology modulate waveform is used to control VSI. Finally, the simulation model of STATCOM is carried out based on Matlab, the results of simulation show that the proposed PPC method can suppress the power ripple effectively and get a constant switching frequency, as well as keep a high dynamic response performance of traditional DPC.

**Key words:** instantaneous power theory; predictive model; SVPWM; power control

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0088-05

## 0 引言

电力系统中对无功功率的控制有着极其重要的作用, 可以稳定电网电压, 改善供电质量。伴随着现代电力电子的飞速发展, 针对用户对电能质量提出的高要求, 作为柔性交流输电系统中极为重要的组成部分, 同时作为新世纪智能电网的关键性设备——静止同步补偿器(STATCOM)从 20 世纪 80 年代以来在全球范围内得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。其通过控制功率开关器件的开关动作从电力系统中吸入或发出无功功率, 从而提升电网的实际运行功率, 大大提高了电网的稳定性、安全性和可靠性。

目前世界范围内关于对 STATCOM 的控制策略

的研究主要集中在电压空间矢量控制<sup>[3-4]</sup>(Voltage Space Vector Control)和直接功率控制<sup>[5-6]</sup>(DPC)。文献[3-4]基于解耦调节, 将电压矢量置于空间坐标系内, 通过对电压矢量的控制来调节功率开关器件, 调节电网有功和无功功率。文献[5-6]基于瞬时功率理论将瞬时功率经过滞环比较器和 PI 调节, 通过查找开关表来调节功率开关。这两种控制方法都可以高效地实现对电网有功和无功功率的调节, 然而其在控制方法实现机理上却存在较大的差异性, 其中电压空间矢量控制方案优在稳态功率跟踪精度高、开关动作频率固定等方面, 但却需要进行复杂的坐标变化以及解耦分析, 使得算法复杂程度显著增加<sup>[7-8]</sup>; DPC 控制方案则具有很高的动态响应性以

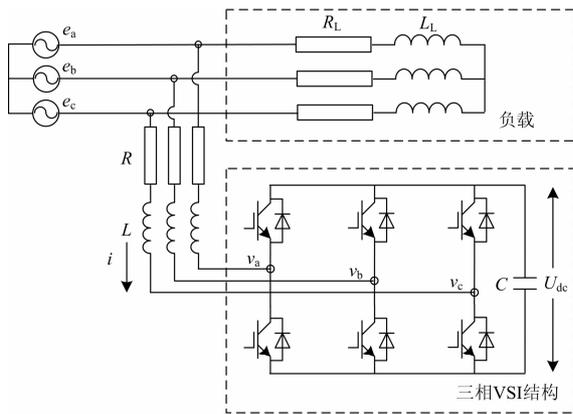
及算法结构清晰的优点, 但传统的使用开关表的方案却存在较大的功率脉动现象, 此外其开关频率不固定的特性给滤波装置的选型与设计带来难点<sup>[9-10]</sup>。

本文将采用 SVPWM 技术来代替滞环比较器和开关表<sup>[11-13]</sup>, 首先在结构复杂程度上优于传统 DPC 方案; 其次具有开关频率恒定的优点。同时基于瞬时无功功率理论构建一个  $k+1$  采样点功率跟踪误差最小为目标的预测模型<sup>[14-16]</sup>, 通过控制瞬时功率来调节功率开关器件, 以用来解决传统的 DPC 控制方案中存在的功率脉动过大的问题。最后通过 Matlab/Simulink 验证, 结果表明所提方案在保留了 DPC 高动态响应特性的基础上, 有效地提升了系统功率的稳态跟踪精度。

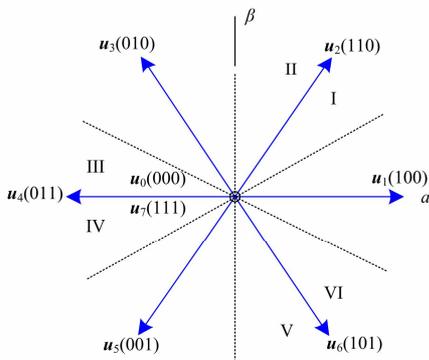
## 1 STATCOM 系统概述

### 1.1 系统基本结构

图 1 中给出了静止同步补偿器(STATCOM)简要概述图, 其中图 1(a)为 STATCOM 主电路原理图, 其中逆变器部分采用的是三相电压源型结构(VSI), 电网负载为等效阻感  $R_L$  和  $L_L$ ; 图 1(b)为逆变器电压空间矢量等效分布图, 通过合理地控制开关器件开



(a) STATCOM 主电路结构图



(b) 电压空间矢量图

图 1 STATCOM 系统简要概述图

Fig. 1 Brief schematic diagram of STATCOM

通与关断, 逆变器可提供  $2^3=8$  种电压空间矢量, 其中包括 6 个有效电压矢量  $u_1 \sim u_6$  和 2 个零电压矢量  $u_0$ 、 $u_7$ 。

### 1.2 系统数学模型

根据基尔霍夫定理构建 STATCOM 系统的等效矢量模型为

$$e = L \frac{di}{dt} + Ri + v \quad (1)$$

式中:  $e$  为 STATCOM 公共接入点电压矢量;  $i$  为 STATCOM 吸收电流矢量;  $v$  为三相 VSI 交流侧端口电压矢量;  $L$ 、 $R$  为三相 VSI 交流侧滤波电抗器及其等效电阻。

其中式(1)中各变量矢量均由三相静止 abc 坐标系经过坐标变换求得, 具体如下:

$$x = \frac{2}{3} (x_a + x_b e^{j2\pi/3} + x_c e^{-j2\pi/3}) \quad (2)$$

式中,  $x$  为 STATCOM 系统的接入点电压、吸收电流以及交流侧端口电压。

在三相理想电网条件下, 可将电网电压描述为

$$e = |e| e^{j\omega t} \quad (3)$$

$$\frac{de}{dt} = j\omega |e| e^{j\omega t} = j\omega e$$

## 2 直接功率控制策略

### 2.1 瞬时有功和无功功率求取

自 20 世纪 80 年代由赤木泰文提出三相电路瞬时无功功率理论以来, 国内外学者开始对无功功率理论进行深入研究。直接功率控制策略就是以瞬时无功功率理论为基础, 对瞬时无功和有功进行动态实时检测, 该方法是现如今广泛应用的控制策略。

根据瞬时无功功率理论可知, 在三相平衡理想条件下, STATCOM 系统瞬时功率在两相静止坐标系  $\alpha\beta$  坐标系下可表示为

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ e_\beta & -e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $p$ 、 $q$  为系统有功功率和无功功率;  $e_{\alpha\beta}$ 、 $i_{\alpha\beta}$  分别为  $\alpha\beta$  坐标系下网侧交流电压和电流分量。

### 2.2 瞬时功率预测模型

假设有功和无功功率在采样周期为  $T$  的时间内变化, 则对式(4)在  $k$  时刻进行离散化, 得到  $k$  时刻的瞬时功率为

$$\begin{bmatrix} p(k) \\ q(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha(k) & e_\beta(k) \\ e_\beta(k) & -e_\alpha(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(k) \\ i_\beta(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可得在周期  $T$  内的功率变化量为

$$\begin{aligned} \Delta p &= p(k+1) - p(k) \\ \Delta q &= q(k+1) - q(k) \end{aligned} \quad (6)$$

即采样周期  $T$  内的功率变化为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} e_\alpha(k+1) & e_\beta(k+1) \\ e_\beta(k+1) & -e_\alpha(k+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) \\ i_\beta(k+1) \end{bmatrix} - \\ &\begin{bmatrix} e_\alpha(k) & e_\beta(k) \\ e_\beta(k) & -e_\alpha(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(k) \\ i_\beta(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

由于周期  $T$  远远小于电网周期的  $0.02 \text{ s}$ , 因此可以将  $k$  时刻,  $k+1$  时刻的网侧电压近似相等, 则功率变化量可变化为

$$\begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha(k) & e_\beta(k) \\ e_\beta(k) & -e_\alpha(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) - i_\alpha(k) \\ i_\beta(k+1) - i_\beta(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于本文验证的是低压系统, 因此忽略系统电阻  $R$  的影响, 将系统模型式(1)进行前向欧拉公式离散化可得到

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) - i_\alpha(k) \\ i_\beta(k+1) - i_\beta(k) \end{bmatrix} = \frac{T}{L} \begin{bmatrix} e_\alpha(k) & e_\beta(k) \\ e_\beta(k) & -e_\alpha(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha(k) \\ v_\beta(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)经过整理可得表达式

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_\alpha(k) \\ v_\beta(k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} e_\alpha(k) \\ e_\beta(k) \end{bmatrix} - \frac{L}{T |e_{\alpha\beta}|^2} \times \\ &\begin{bmatrix} e_\alpha(k) & e_\beta(k) \\ e_\beta(k) & -e_\alpha(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(k+1) - p(k) \\ q(k+1) - q(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $e_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}$ ;  $|e_{\alpha\beta}|^2 = \sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2}$ 。

根据式(10)可以看出, 由上述可知将系统网侧电压当作常量, 如果知道功率的变化量后, 此时只需要控制 STATCOM 系统中的可控变量(VSI 交流侧端口电压矢量  $v$ ), 即可以实现系统有功、无功功率的增减控制。

### 2.3 基于功率预测模型直接功率控制系统

设在  $k$  时刻系统给定一个功率期望值, 则存在瞬时功率误差为

$$\begin{bmatrix} \delta p(k) \\ \delta q(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p^*(k) - p(k) \\ q^*(k) - q(k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中,  $p^*(k)$ 、 $q^*(k)$  分别为  $k$  时刻开始时系统无功和有功给定值。

系统采用直接功率控制方案, 目标即是满足在  $k+1$  时刻误差为零, 即

$$\begin{bmatrix} \delta p(k+1) \\ \delta q(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据式(12)所示, 则在一个控制周期内功率变化量也可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta p(k) \\ \Delta q(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p^*(k+1) - p^*(k) + \delta p(k) \\ q^*(k+1) - q^*(k) + \delta p(k) \end{bmatrix} \quad (13)$$

系统给定功率期望值在一个采样周期内不变, 即  $k+1$  时刻和  $k$  时刻的给定值相等不变, 因此式(13)可变为

$$\begin{bmatrix} \Delta p(k) \\ \Delta q(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta p(k) \\ \delta p(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p^*(k) - p(k) \\ q^*(k) - q(k) \end{bmatrix} \quad (14)$$

将式(14)、式(10)整理后, 即可进一步消除一组变量  $p(k+1)$ 、 $q(k+1)$ , 即可求出 VSI 交流侧端口电压矢量  $v$ 。且在直接功率控制方案中, 为保证单位功率因数运行, 直接将无功功率给定为  $0$ , 有功功率给定通过电压外环整定得到。

传统直接功率控制策略通常包括: 滞环比较、扇区判断以及开关表查询三个步骤。通过这三步进行对系统的控制, 但使用传统的开关表将大大地增加采样频率, 因此本文中采用 SVPWM 调制代替滞环控制器和开关表来对功率开关器件进行控制, 从而达到恒定的开关频率, 以弥补传统功率控制的不足。在 Matlab 中搭建 SVPWM 模块如图 2 所示。

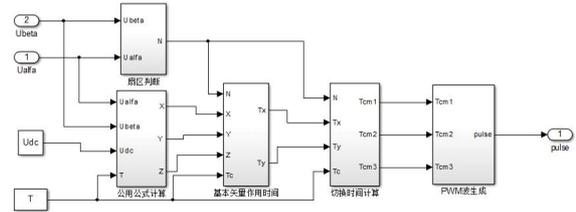


图 2 SVPWM 模块仿真图

Fig. 2 Module simulation diagram of SVPWM

## 3 仿真验证及分析

### 3.1 仿真模型说明

为了验证所提预测功率控制的控制效果, 基于 Matlab 搭建了如图 3 所示的 STATCOM 系统模型, 模型具体参数如下: 电网电压  $380 \text{ V}$ , 频率  $50 \text{ Hz}$ ; 滤波电抗器  $1.5 \text{ mH}$ , 等效电阻  $0.02 \Omega$ ; 直流母线电容为  $4700 \mu\text{F}$ ; 系统控制频率为  $10 \text{ kHz}$ 。

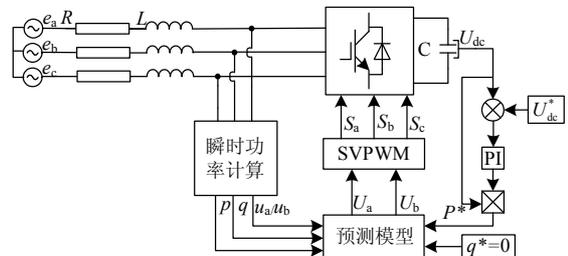


图 3 基于预测模型的直接功率控制系统图

Fig. 3 System diagram of DPC based on prediction model

### 3.2 仿真结果及分析

图 4 为 STATCOM 系统动、稳态实验波形, 由图 4(a)可知, 由于感性负载的存在, 系统补偿之前电网 a 相电流  $i_a$  滞后于电网电压  $e_a$ ; STATCOM 系统投入使用之后, 电网 a 相电流  $i_{a\_comp}$  与电压  $e_a$  为同相位关系, 有效地实现了无功补偿的功能; 图 4(b)为无功负载突变时系统动态响应波形, 可以看出在 0.04 s 和 0.1 s 时, 当电网发生无功负载投切后, STATCOM 对应输出的补偿无功也随之增减, 整个过程过渡平稳且响应迅速。

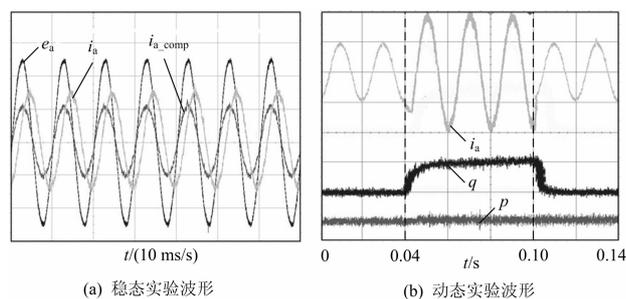


图 4 STATCOM 系统动、稳态实验波形

Fig. 4 Waveform of dynamic and steady state test of STATCOM

图 5 为直接功率控制策略(DPC)和基于预测模型功率控制策略(PPC)的对比分析结果, 与DPC相比在相同的控制周期(10 kHz)下, 系统的功率跟踪精度得到了有效改善, 显著地提升了STATCOM系统的稳态控制效果, 与此同时从网侧电流频谱分析图中可以看出, PPC电流谐波集中分布在系统控制频率(10 kHz)及其边带附近, 更加易于滤波装置的选择与设计。

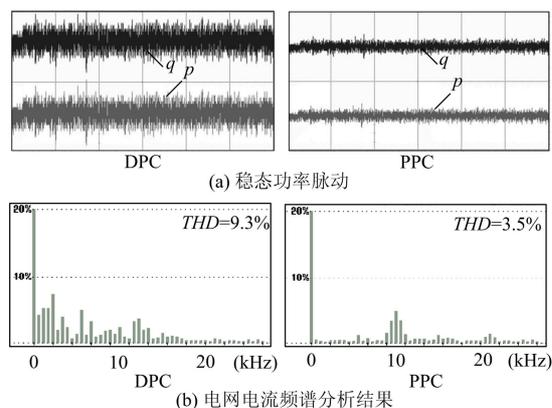


图 5 DPC与PPC对比分析结果

Fig. 5 Result of comparative analysis between DPC and PPC

## 4 结语

本文针对 STATCOM 系统直接功率控制(DPC)

系统存在的功率脉动过大、开关频率不固定等问题, 提出一种基于预测模型的功率控制(PPC)策略。通过预测模型计算得出 SVPWM 的调节电压, 然后通过 SVPWM 技术调制出波形控制功率开关, 实现了控制周期内的系统功率脉动最小控制。使用 Matlab 搭建了 STATCOM 系统进行仿真, 仿真结果表明: PPC 方法在保留 DPC 高动态响应优异特性的基础上, 有效地提升了系统稳态跟踪精度, 此外系统有开关频率固定、谐波分布集中等诸多优势, 使得 PPC 在 STATCOM 系统控制中更具应用价值。

### 参考文献

- [1] 詹厚剑, 吴杰康, 康海兵. 静止同步补偿器的开关建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 66-70.  
ZHAN Houjian, WU Jiekang, KANG Haibing. Modeling and simulation for STATCOM using switching function[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 66-70.
- [2] 常伟, 史丽萍, 王思捷, 等. 空间矢量调制技术在 6 kV 级联静止同步补偿器中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 23(12): 95-99.  
CHANG Wei, SHI Liping, WANG Sijie, et al. Application of space vector modulation in 6 kV cascade STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2012, 23(12): 95-99.
- [3] 肖海峰, 刘海龙, 贺昱曜, 等. 基于电压空间矢量控制 PMSM 系统新型死区补偿方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 114-119.  
XIAO Haifeng, LIU Hailong, HE Yuyao, et al. Study of a dead-time compensation method for PMSM drive based on voltage space vector control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 114-119.
- [4] 谭国俊, 吴轩钦, 李浩, 等. Back-to-Back 双三电平电励磁同步电机矢量控制系统[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 36-43.  
TAN Guojun, WU Xuanqin, LI Hao, et al. Vector control system of electrically excited synchronous motor fed by back-to-back dual three-level converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 36-43.
- [5] NOGUCHI T, TOMIKI H, KONDO S. Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(3): 473-479.
- [6] 陈伟, 邹旭东, 唐健, 等. 三相电压型 PWM 整流器直接功率控制调制机制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 35-41.

- CHEN Wei, ZOU Xudong, TANG Jian, et al. DPC modulation mechanism of three-phase voltage source PWM rectifiers[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 35-41.
- [7] 裘锦勇, 宋文祥, 韩杨, 等. 基于电压空间矢量的三电平 PWM 整流器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 58-62.
- QIU Jinyong, SONG Wenxiang, HAN Yang, et al. Study on three-level PWM rectifier based on space vector pulse-width-modulation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 58-62.
- [8] 张先进, 王步根. 电压空间矢量控制三相 PWM 整流器研制[J]. 电力电子技术, 2013, 47(4): 90-92.
- ZHANG Xianjin, WANG Bugen. Research on three-phase PWM rectifier based on voltage space vector[J]. Power Electronics, 2013, 47(4): 90-92.
- [9] 韩愚拙, 林明耀, 郝立, 等. 电压型 PWM 整流器三状态直接功率控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 208-212.
- HAN Yuzhuo, LIN Mingyao, HAO Li, et al. Triple-state direct power control strategy of three phase boost type PWM rectifiers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 208-212.
- [10] 苏晓东, 焦姣. 基于瞬时功率理论的电压型 PWM 整流器研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(10): 54-56.
- SU Xiaodong, JIAO Jiao. Research on instantaneous power theory of voltage source PWM rectifier[J]. Power Electronics, 2010, 44(10): 54-56.
- [11] 姚志垒, 肖岚. 基于改进 DPC-SVM 的三相并网逆变器[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 66-70.
- YAO Zhilei, XIAO Lan. Three-phase grid-connected inverters with improved DPC-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 66-70.
- [12] 杨达亮, 卢子广, 杭乃善. 配电网静止同步补偿器直接功率控制[J]. 电力电子技术, 2013, 47(1): 89-91.
- YANG Daliang, LU Ziguang, HANG Naishan. Direct power control for distribution static synchronous compensator[J]. Power Electronics, 2013, 47(1): 89-91.
- [13] 张倩倩, 许彦, 李新宇, 等. STATCOM 的定频直接功率控制技术[J]. 电测与仪表, 2009, 46(527): 28-31.
- ZHANG Qianqian, XU Yan, LI Xinyu, et al. Research on VO-SVM-DPC STATCOM system[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2009, 46(527): 28-31.
- [14] CORTES P, RODRIGUES J, ANTONIEWICZ P. Direct power control of an AFE using predictive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2516-2523.
- [15] 席裕庚, 李德伟, 林妹. 模型预测控制—现状与挑战[J]. 自动化学报, 2012, 38(9): 1-15.
- XI Yugeng, LI Dewei, LIN Shu. Model predictive control-status and challenges[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(9): 1-15.
- [16] RODRIGUEZ J, DIXON J, ESPINOZA J, et al. PWM regenerative rectifiers: state of the art[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(1): 5-22.

收稿日期: 2014-03-27; 修回日期: 2014-06-10

作者简介:

郭三明(1959-), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事电子技术及仪器仪表的研究; E-mail: hnlg\_gsm@126.com

孙鹏荆(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术。