

基于电感电压反馈和输入整形技术的 LC 滤波器混合阻尼控制

彭咏龙, 朱劲波, 李亚斌

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 电流型 PWM 整流器采用 LC 环节来滤除谐波及帮助器件换流, LC 型滤波器呈二阶特性, 存在谐振尖峰, 且电容阻尼较小, 在控制系统存在扰动, 容易引起电流波形畸变和振荡。提出了一种采用输入整形技术和电感电压反馈结合的控制策略, 输入整形技术能够有效地抑制小阻尼系统的振荡, 电感电压反馈控制能够在外部干扰抑制网侧电流波形畸变。结合两者的优点, 可有效地解决电流型脉宽调制整流器网侧电流振荡和畸变。仿真验证了所提出的控制策略能够有效减少电流畸变, 增加系统的稳定性, 并具有一定工程实用性。

关键词: 电流型 PWM 整流器; LC 谐振; 有源阻尼; 输入整形; 电感电压反馈

Hybrid damping control based on the LC filter inductor voltage feedback and input shaping techniques

PENG Yonglong, ZHU Jinbo, LI Yabin

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Current PWM rectifier links in the network side using LC devices help filter harmonics and commutation, LC type filter has second order characteristics, the presence of the resonance peak and the resistor of capacitance is also very small, which is easy to cause the current waveform distortion in the transient process or in steady-state oscillation in the case of the presence of the control system disturbances. This paper presents a control strategy using input shaping techniques and combining inductive voltage feedback, which can effectively inhibit distortion and vibration caused by LC links under the external interference or current command change. Input shaping technique can effectively suppress the vibration of small damping system, inductor voltage feedback control can suppress side current waveform distortion in the external interference. This paper combining the both advantages can effectively solve the current mode pulse width modulation rectifier side current oscillations and distortion. The performance of the proposed method is verified by simulation and experimental results, distortion of the line current is effectively reduced and the stability of the system is improved.

Key words: CSR; LC resonance; active damping; input shaping; inductive voltage feedback

中图分类号: TM46 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0103-05

0 引言

随着超导技术的应用和发展, 电感的储能效率将得到提高, 电流型 PWM 整流器(CSR)成为新的研究热点^[1-2]。电流型整流器是基于 BUCK 的降压电路, 直流侧电压低于额定值, 可直接用于需要金属加工、直流电机驱动、超导储能等大功率场合^[2]。CSR 网侧采用 LC 滤波环节来滤除谐波并能有效地帮助器件换流, 但电容的阻尼一般较小, 使得二阶滤波环节的阻尼系数很小, 在控制变量变化的时候容易引起网侧电流波形的畸变和振荡^[3]。

一般地, 抑制电流振荡的方法包括无源阻尼控制和有源阻尼控制^[3-5]。无源阻尼控制直接将电阻并

联或者串联在电容及电感两端, 具有很好的抑制效果, 但是在大功率场合会产生很大的功率损耗。有源阻尼控制通过控制算法来抑制谐振, 在不消耗有功功率的前提下, 抑制电流振荡, 具有很好的应用前景。

文献[6]采用电感电压反馈的虚拟电阻控制, 可以抑制网侧电流畸变, 但不能很好的抑制暂态振荡。文献[7]提出电容电压高通滤波的虚拟谐波阻尼控制, 该方法可实现对谐波分量的抑制, 但是实现困难, 且经滤波后存在延迟。文献[8]提出了输入整形技术在电流型整流器抑制暂态振荡中的应用。本文提出了电感电压反馈和直流电流给定值输入整形相结合的有源阻尼控制策略。该策略不仅能抑制由外

部干扰引起的电流畸变，还能有效抑制由直流电流给定变化产生的暂态振荡，且控制算法对直流侧电流波形不产生影响。最后通过仿真验证了本文提出的控制策略的有效性和实用性。

1 电流型 PWM 整流器数学模型

电流型 PWM 整流器的主电路结构如图 1 所示，交流侧采用 LC 滤波器，滤除网侧电流的谐波并帮助功率器件换流，整流桥采用全控型 IGBT 串联二极管的形式，直流侧的平波电抗是为了稳定直流电流。

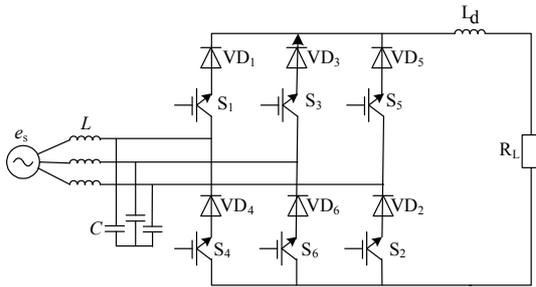


图 1 三相电流型整流器主电路图

Fig. 1 Main circuit of three phase current source rectifier

由于三相电路结构对称，图 1 所示的电路可简化图 2 所示的单相等值电路。从图 2 可得网侧电流的传递函数用式(1)来表述。

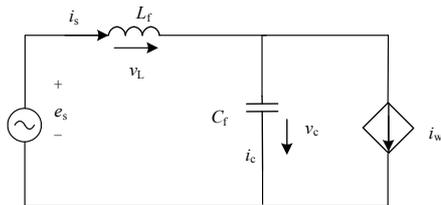


图 2 简化的 BUCK 型整流器单相等值电路

Fig. 2 Single phase equivalent circuit of BUCK-type rectifier

$$\begin{cases} I_s(s) = G_{ii}(s)I_w(s) + G_{iv}(s)e_s(s) \\ G_{ii}(s) = \frac{1}{s^2L_fC_f + sr_{Ls}C_f + 1} \\ G_{iv}(s) = \frac{sC_f}{s^2L_fC_f + sr_{Ls}C_f + 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $G_{ii}(s)$ 和 $G_{iv}(s)$ 分别为整流器侧电流 i_w 和网侧输入电压 e_s 到网侧电流 i_s 的传递函数； r_{Ls} 是滤波电抗上的电阻值。二阶系统的谐振频率 ω_n 和系统的阻尼系数 ζ 如式(2)所示。

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{1/L_fC_f} \\ \zeta = \frac{r_{Ls}}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} \end{cases} \quad (2)$$

在三相电网电压对称的情况下可忽略电网电压对网侧电流的影响。

2 LC 滤波器的有源阻尼控制

无源阻尼是通过在滤波电容器或者滤波电抗两端串联或者并联一个阻尼电阻来控制谐振频率，从而实现对 LC 滤波谐振振荡的抑制，但是，在大功率应用场合，无源阻尼控制的阻尼电阻上会消耗大量的有功功率，且对系统的散热有着较高的要求。

滤波电感并联电阻的电流型整流器系统的结构框图如图 3 所示。

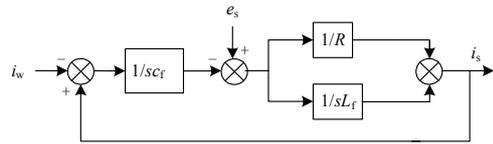


图 3 电感并联电阻的系统框图

Fig. 3 System block diagram of inductive shunt resistor

由图 3 经过转换，可得到等效的系统框图如图 4 所示。

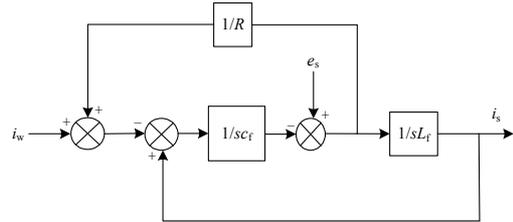


图 4 经过转化后的系统框图

Fig. 4 System block diagram after transformed

滤波电感并联电阻后整流器侧电流的传递函数变为 $G_{ii}^*(s)$ ，如式(3)所示。

$$G_{ii}^*(s) = \frac{1}{s^2L_fC_f + sL_f/R + 1} \quad (3)$$

式中， R 为电感并联电阻，并联电阻后二阶系统的谐振频率 ω_n^* 和系统的阻尼系数 ζ^* 如式(4)所示。

$$\begin{cases} \omega_n^* = \omega_n \\ \zeta^* = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \end{cases} \quad (4)$$

从式(4)可以看出，在滤波电感两端并联电阻不改变系统的谐振频率 ω_n ，但改变了系统的阻尼比 ζ ，通过调整电阻 R 的大小可以调整系统的阻尼比，从而抑制系统振荡。系统的频率响应如图 5 所示，从图中可以看出，加入阻尼电阻可有效地降低在 LC 滤波器的谐振频率处的谐振峰值，从而很好地抑制系统振荡。

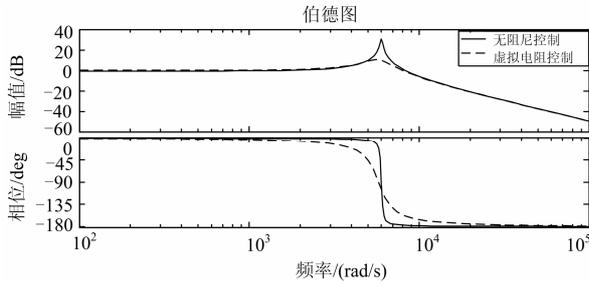


图 5 电感并联电阻前后的系统伯德图

Fig. 5 Bode diagram inductive system before and after the shunt resistor

有源阻尼是通过在控制过程中增加虚拟的等效阻尼电阻来实现对振荡的消除。采用有源阻尼方法和并联阻尼电阻的无源阻尼方法具有相同的降低谐波振荡的效果, 并且不会产生额外的功率损耗。采用虚拟电阻控制后, 常用的有源阻尼方法包括虚拟电阻^[9-10]、控制信号补偿前馈调节^[11]以及利用补偿器产生控制信号的策略^[12]。

本文采用电感电压反馈和输入整形技术结合的有源阻尼控制, 通过反馈电感电压, 实现电感并联电阻的有源控制, 使得系统效率更高, 控制方法更加灵活。

3 输入整形技术和虚拟电阻结合的 LC 振荡有源阻尼控制

输入整形技术源于抑制小阻尼伺服系统振荡模式的残留振荡, 是一种用开环输入调制方法来抑制系统的残留振荡, 在快速响应系统中得到广泛应用^[13]。LC 环节会产生暂态振荡稳态电流畸变的原因是当 PWM 调制的方式突然发生变化时, 由于滤波电容器过充电和过放电, 并且通常电容器的阻尼很小, 起不到很好的抑制作用, 文献[8]介绍了零极点对消的输入整形技术在电流型整流器抑制振荡中的应用, 通过输入整形控制, 可以有效地控制在电流指令值发生变化时产生的暂态振荡。本文采用三阶的等间距的输入补偿器, 此补偿器容易实现, 补偿器如图 6 所示。

图 6 中所示的阶跃时间 t_1 和 t_2 分别为^[8]

$$\begin{cases} t_1 = \frac{\pi}{3\omega_n} \\ t_2 = \frac{2\pi}{3\omega_n} \end{cases} \quad (4)$$

式中, ω_n 为二阶 LC 滤波器的自然振荡频率。输入整形控制可有效抑制系统的暂态振荡, 但在外界扰

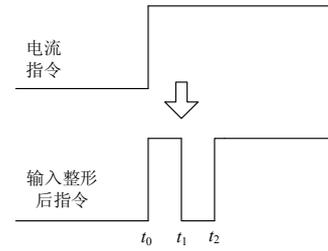


图 6 输入整形后的电流指令

Fig. 6 Current command after input shaping

动情况下, 像电网电压波动, 以及 LC 滤波参数发生变化时不能很好的抑制振荡。本文结合了输入整形技术和有源阻尼控制的优势, 不仅能抑制系统的暂态振荡, 还能加强在外界扰动时系统的稳定性, 控制系统的结构框图如图 7 所示。

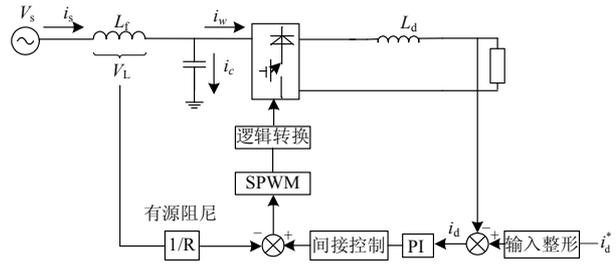


图 7 电流型整流器混合阻尼控制结构框图

Fig. 7 Current rectifier hybrid damping control block diagram

直流电流指令 i_d^* 经输入整形控制后, 与测得的直流电流值 i_d 比较, 得到的差值通过 PI 调节器输出到间接控制模块, 算出三相 SPWM 调制波, 再与有源阻尼控制的滤波电感电压进行相减, 得到最终有源阻尼和输入整形后的三相调制信号, 把 SPWM 输出的两逻辑控制信号转化为电流型整流器的三逻辑控制信号, 得到适用于电流型 PWM 整流器的控制逻辑, 对开关器件进行通断控制, 产生驱动 IGBT 的触发脉冲^[14-15]。

4 系统仿真验证

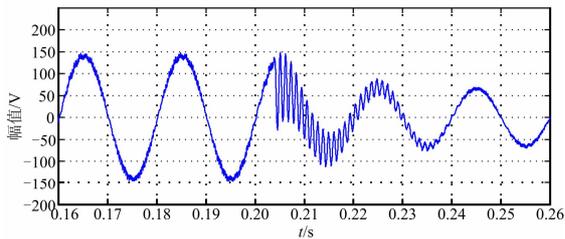
通过 Matlab/Simulink 仿真软件验证本文提出的电感电压反馈和输入整形技术结合有源阻尼控制的性能。系统仿真参数为: 网侧额定相电压 220 V, 滤波电容 $C=100 \mu\text{F}$, 电感 $L=0.0003 \text{ H}$, 直流侧平波电抗 $L_d=5 \text{ mH}$, 负载 $R_L=1 \Omega$, 开关频率 $f_z=3 \text{ kHz}$, 阻尼电阻 $R=10 \Omega$ 。由系统的 LC 参数和式(3)可算出 $t_1=0.0001813 \text{ s}$, $t_2=0.0003626 \text{ s}$ 。

通过仿真验证了在直流电流参考值变化时, 所提出的阻尼控制的有效性, 并在电网电压扰动下,

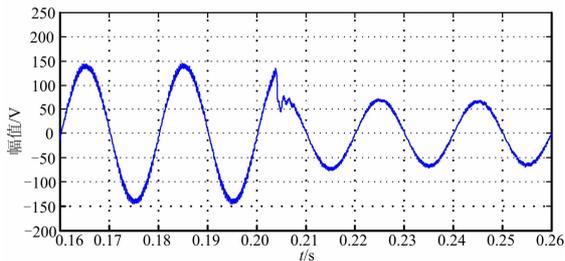
验证了混合阻尼控制能减小电流畸变。在 $t=0.204\text{ s}$ 时参考值由 250 A 降到 170 A ，在 $t=0.404\text{ s}$ 时电流参考值由 170 A 升到 270 A 。图 8 分别为未采用阻尼控制和采用本文提出的新型阻尼控制的仿真图，在图中指令电流在 0.204 s 时由 250 A 降到 170 A 。

图 9 为网侧电流指令在 0.404 s 由 170 A 升到 270 A 时，采用无阻尼控制和本文提出的混合阻尼控制的网侧电流仿真波形。

由仿真图可以看出，采用电感电压反馈和输入整形结合的混合阻尼控制策略能有效抑制网侧电流



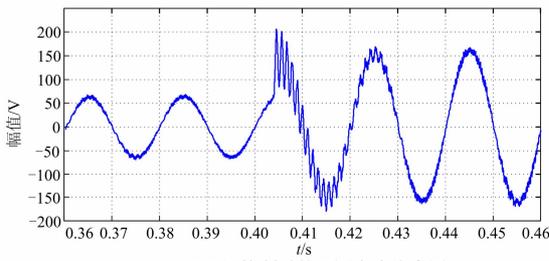
(a) 无阻尼控制时网侧电流的仿真图



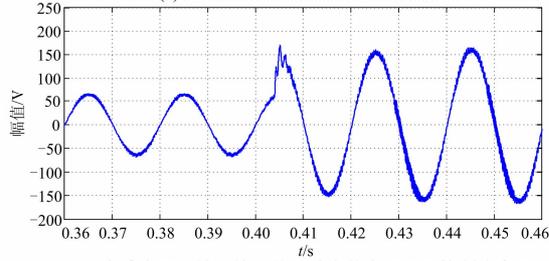
(b) 电感电压反馈和输入整形结合的有源阻尼控制仿真图

图 8 电流指令由 250 A 降到 170 A 时的网侧电流仿真图

Fig. 8 Network side of current simulation diagram under current command dropped from 170 A to 250 A



(a) 无阻尼控制时的网侧电流仿真图



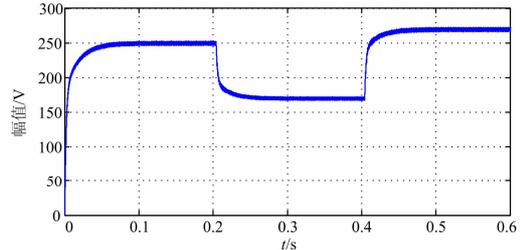
(b) 电感电压反馈和输入整形结合的有源阻尼控制仿真图

图 9 电流指令由 170 A 升到 270 A 时的网侧电流仿真图

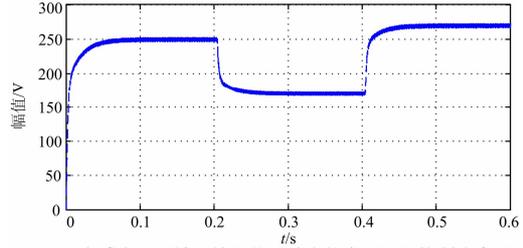
Fig. 9 Network side of current simulation diagram under current command rise from 270 A to 170 A

振荡。图 10 为无阻尼控制和混合阻尼控制时，直流侧电流波形。

LC 滤波器中电容器的阻尼比较小，在电网电压发生扰动的情况下，电流型整流器容易产生振荡，图 11 为 0.064 s 到 0.084 s 之间，在电网电压加入 0.06 p.u. 的 7 次谐波和 0.05 p.u. 的 11 次谐波的仿真图，从图中可看出电压畸变后，会引起电流振荡，在加入本文提出的控制策略后，可有效地减小系统振荡。



(a) 无阻尼控制时的网侧电流仿真图

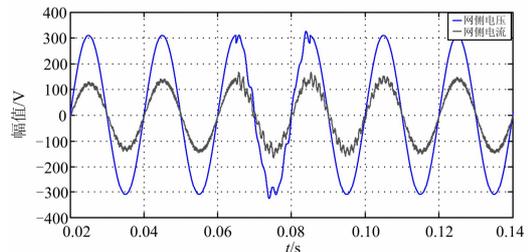


(b) 电感电压反馈和输入整形结合的有源阻尼控制仿真图

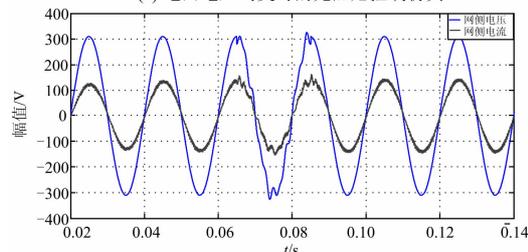
图 10 不同控制方式下的直流侧电流波形仿真图

Fig. 10 DC side current waveform simulation diagram

under different control modes



(a) 电网电压畸变时的无阻尼控制仿真



(b) 电网电压畸变时的混合有源阻尼控制仿真图

图 11 电网电压畸变时的网侧电压电流仿真图

Fig. 11 Network side voltage and current simulation diagram

when the grid voltage distortion

5 结论

本文提出一种采用电感电压反馈和输入整形技

术相结合的 LC 滤波器有源阻尼控制策略。通过采样滤波电感电压来实现电感并联电阻的虚拟阻尼控制, 加上输入整形技术对直流电流指令的补偿, 不仅能在指令发生变化时, 抑制系统的振荡, 还能在外界电网电压干扰情况下, 减小系统的振荡, 改善稳态时线电流波形以及暂态下滤波器的稳定性, 系统的效率与无源阻尼系统相比得到了很大的提高。仿真验证了本文提出的混合阻尼控制策略的优良性能, 不仅能够有效改善网侧和直流侧电流波形, 而且能够有效保护开关设备承受由 LC 谐振引起的过电压问题。

参考文献

- [1] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 徐德鸿, 正田英介. 超导储能装置用 GTO PWM 电流型变流器模块方阵[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(2): 124-130.
- [3] DAHONO P A. A method to damp oscillations on the input LC filter of current-type AC-DC PWM converters by using a virtual resistor[C] // Telecommunications Energy Conference, 2003, INTELEC'03, The 25th International: IEEE, 2003: 757-761.
- [4] 伍小杰, 孙蔚, 戴鹏, 等. 一种虚拟电阻并联电容有源阻尼法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 122-128.
WU Xiaojie, SUN Wei, DAI Peng, et al. An active damping method of virtual resistor in parallel with capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 122-128.
- [5] 张学广, 刘义成, 王瑞, 等. 一种新型的 PWM 变换器 LCL 滤波器有源阻尼控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 36(10): 188-192.
ZHANG Xueguang, LIU Yicheng, WANG Rui, et al. A novel active damping control strategy for PWM converter with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 36(10): 188-192.
- [6] 武霆, 陈丹, 李哲峰, 等. 抑制网侧电流振荡的新型电流型 PWM 整流器[J]. 电力电子技术, 2008, 42(2): 65-66.
WU Ting, CHEN Dan, LI Zhefeng, et al. Three-phase current-source type PWM rectifier based on current damping method[J]. Power Electronics, 2008, 42(2): 65-66.
- [7] 彭咏龙, 黄潇潇, 李亚斌. 三相 BUCK 型 SVPWM 整流器 LC 振荡阻尼混合控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 90-95.
PENG Yonglong, HUANG Xiaoxiao, LI Yabin. Damping of LC oscillation using a hybrid combination approach for three-phase Buck-type SVPWM rectifier[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 90-95.
- [8] NEBA Y. A simple method for suppression of resonance oscillation in PWM current source converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(1): 132-139.
- [9] LI Y W, LOH P C, BLAABJERG F, et al. Investigation and improvement of transient response of DVR at medium voltage level[C] // PROC, IEEE APEC, 2006: 1074-1080.
- [10] SONG Wenxiang, CAO Dapeng, QIU Jinyong, et al. Study on the control strategy of three-level PWM rectifier based on SVPWM[C] // Power Electronics and Motion Control Conference, 2009, IPEMC '09, IEEE 6th International, May 17-20, 2009: 1622-1625.
- [11] 张宪平, 林资旭, 李亚西, 等. LCL 滤波的 PWM 整流器新型控制策略[J]. 电工技术学报, 2007, 21(2): 74-77.
ZHANG Xianping, LIN Zixu, LI Yaxi, et al. A novel control strategy for PWM rectifier with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 21(2): 74-77.
- [12] LI Y W, WU B, ZARGARI N R, et al. Damping of PWM current-source rectifier using a hybrid combination approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1383-1393.
- [13] 包艳, 王辉, 肖雁鸿. 输入整形器抑制残留振荡的研究[J]. 长沙大学学报, 2004, 17(4): 12-14.
BAO Yan, WANG Hui, XIAO Yanhong. Residual Vibration reduction using input shapers[J]. Journal of Changsha University, 2004, 17(4): 12-14.
- [14] 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.
- [15] 邱银锋, 梁志珊. abc 坐标系下空间矢量 PWM 实现研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 36-40.
QIU Yinfeng, LIANG Zhishan. Research on implementation of the space vector PWM in abc coordinates[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 36-40.

收稿日期: 2014-04-21; 修回日期: 2014-05-28

作者简介:

彭咏龙(1966-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用;

朱劲波(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用; E-mail: zhujinbo2013@126.com

李亚斌(1970-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新型功率变换技术。