

DOI: 10.7667/PSPC151766

T型三电平逆变器无差拍电流预测和中点平衡控制方法

郭利辉

(许昌学院电气(机电)工程学院, 河南 许昌 461000)

摘要: 根据 T 型三电平逆变器的特点, 提出一种新型无差拍预测控制方法。和传统无差拍方法相比, 该方法能够提高电流跟踪的速度和精度, 在相同开关频率下可使输出并网电流畸变减少。为了进一步解决 T 型三电平逆变器固有的中点不平衡问题, 提出一种新型 SVPWM 调制策略实现中点平衡控制。在分析 T 型三电平逆变器模型的基础上, 根据上侧电容和下侧电容电压的差值, 通过增加或者减少小矢量作用时间实现中点电位平衡控制。实验结果验证了所提出的新型无差拍控制和 SVPWM 调制策略可以同时实现并网电流快速跟踪和中点平衡控制问题。

关键词: T 型三电平逆变器; 无差拍预测控制; SVPWM; 中点平衡控制; 快速跟踪

Deadbeat predictive current and neutral voltage balancing control method parallel three-level T-type inverters

GUO Lihui

(School of Electrical (Electro-mechanical) Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: A new deadbeat predictive current control method is proposed according to the characteristics of three-level T-type inverter (3LT²I). Compared to the conventional deadbeat method, this method can fast track the current and reduce the THD of the output current. In order to solve the problem of the neutral-point potential (NP) unbalancing, the novel SPWM method is proposed to realize the NP balance. Based on the model of the 3LT²I, the time of the conventional symmetric SVPWM is changed by adding or subtracting the minimum dwell time based on the upper and lower capacitor voltage. Experiment results from a prototype inverter prove that both NP balance control and fast grid-connected current tracking can be realized using the novel deadbeat controller and SVPWM strategy.

Key words: three-level T-type inverter (3LT²I); deadbeat predictive control; SVPWM; neutral-point potential (NP) control; fast tracking

0 引言

随着分布式能源大规模接入大电网, 电网电能质量急剧恶化, 这对于大电网提出了更高的挑战。因此对并网逆变器输出电流提出了更高的要求, 目前并网逆变器大都采用两电平拓扑, 很难满足大电网高电能质量的要求^[1-4]。传统二极管钳位型三电平逆变器虽能够提高电能质量, 但是其具有开关数目多、导通损耗大和功率损耗不均匀等缺点, 而且效率相对较低, 很难在光伏新能源中广泛应用^[5-7]。

基金项目: 2016年度河南省科技厅科技攻关项目(162102210298); 2015年度河南省科技厅科技攻关项目(152102210342); 2015年度河南省高等学校重点科研项目(15B470007); 2014年许昌市科技发展计划项目(140202049)

T型三电平并网逆变器的出现解决了上述难题, 如图1所示。该拓扑和传统的两电平逆变器相比, 具有开关选择多和输出谐波小的优点; 和传统二极管钳位逆变器相比具有更少的开关数目, 因此效率较高。而且T型三相三电平并网逆变器已经广泛应用于光伏发电系统^[8]。

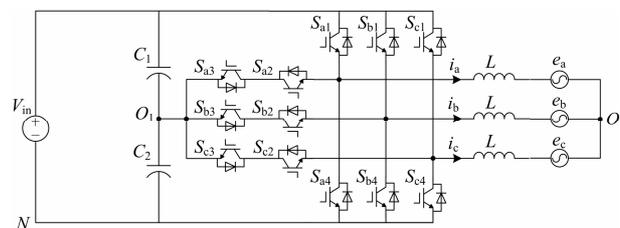


图1 T型三电平逆变器结构

Fig. 1 Topology of three-level T-type inverter

对于 T 型逆变器, 并网电流控制是影响发电系统电能质量的另外一个重要原因^[9]。电流控制通常采用多种控制策略, 如滞环控制、同步旋转坐标系下 PI 控制、同步静止坐标系下 PR 控制。滞环控制具有很快的动态响应, 但是输出电流波形失真以及误差较大; 在同步旋转坐标系下, 逆变器的电流和电压分量直接被控制, 但是模型之间相互耦合, 不能实现无静差跟踪; 在静止坐标系下实现 PR 控制, 虽然能够实现无静差跟踪, 但是 PR 参数很难调节^[10]。近年来, 无差拍电流跟踪控制和空间矢量调制是一种新型控制方法, 在数字控制电力电子变换器得到广泛应用。在实际数字化无差拍电流预测控制中, 存在一定延迟。文献[11-12]采用无差拍电流预测控制方法, 但是没有考虑实际情况延迟。文献[13-15]采用自适应无差拍控制, 虽然考虑实际延迟, 但是采用的算法复杂, 难以在实际工程中应用。文献[16-17]采用直接功率控制, 通过开关表实时选择有功和无功电流控制, 该方法没有电流和 PWM 调制模块, 实现简单, 但是该方法开关频率不确定, 滤波器很难设计。

为了消除实际延迟带来的误差影响, 本文提出一种改进型无差拍预测电流控制。和传统无差拍电流预测控制方法相比, 改善了因为延迟带来控制不准问题, 从而能够保证输出电流畸变率减小, 对三电平逆变器中的中点不平衡问题提出了一种基于 SVPWM 调制中点不平衡的控制方法, 该方法通过改变小矢量作用时间实现中点平衡控制, 实验验证具有很好的实现效果。

本文所提出的方法不仅能够解决中点平衡控制难题, 并且具有快速的电流跟踪效果。通过样机验证了所提算法的精确性和有效性。

1 三相 T 型三电平并网逆变器无差拍预测控制方法

T 型三电平光伏并网逆变器如图 1 所示。以 N 点为参考点, T 型三电平光伏并网逆变器在三相静止坐标系下的模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{ON} \\ u_{ON} \\ u_{ON} \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{aN} \\ u_{bN} \\ u_{cN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: i_a, i_b, i_c 是并网电流; e_a, e_b, e_c 是电网电压; u_{ON} 是 O 点和 N 点之间的电压; L 是网测滤波器电感; u_{aN}, u_{bN}, u_{cN} 是逆变器输出电压。

为了实现无差拍预测电流控制算法, 将 T 型三电平光伏并网逆变器的三相静止坐标系模型转化成

两相同步静止坐标系模型, 得

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_\alpha - e_\alpha \\ u_\beta - e_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

T 型三电平并网逆变器的电压和电流矢量为

$$\begin{aligned} \bar{i}_1 &= \frac{2}{3}(i_a + a \times i_b + a^2 \times i_c) \\ \bar{u}_1 &= \frac{2}{3}(u_{aN} + a \times u_{bN} + a^2 \times u_{cN}) \\ \bar{e}_1 &= \frac{2}{3}(e_a + a \times e_b + a^2 \times e_c) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $a = e^{j2/3\pi}$ 。

假设采样周期为 T_s , 式(2)中电流离散化为

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(k) - i(k-1)}{T_s} \quad (4)$$

相电流和相电压可以通过电流传感器和电压传感器获得。为了准确实现控制, 本文提出无差拍模型预测控制方法, 需要考虑一个周期延迟时间, 由式(2)和式(4)可以得到离散化的电流平均模型为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) \\ i_\beta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha(k) \\ i_\beta(k) \end{bmatrix} + \frac{T_s}{L} \left(\begin{bmatrix} u_\alpha(k+1) \\ u_\beta(k+1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_\alpha(k+1) \\ e_\beta(k+1) \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

式中 $e_\alpha(k+1), e_\beta(k+1)$ 通过二次拉格朗日插值得到:

$$\begin{aligned} e_\alpha(k+1) &= 3e_\alpha(k) - 3e_\alpha(k-1) + e_\alpha(k-2) \\ e_\beta(k+1) &= 3e_\beta(k) - 3e_\beta(k-1) + e_\beta(k-2) \end{aligned} \quad (6)$$

由式(5)得到输出电压模型为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(k+1) \\ u_\beta(k+1) \end{bmatrix} = -\frac{L}{T_s} \begin{bmatrix} i_\alpha(k) \\ i_\beta(k) \end{bmatrix} + \frac{L}{T_s} \begin{bmatrix} i_\alpha^*(k+1) \\ i_\beta^*(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha(k+1) \\ e_\beta(k+1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 $i_\alpha^*(k+1)$ 和 $i_\beta^*(k+1)$ 为得到的理想给定值, 通过二次拉格朗日插值得到:

$$\begin{aligned} i_\alpha^*(k+1) &= 3i_\alpha^*(k) - 3i_\alpha^*(k-1) + i_\alpha^*(k-2) \\ i_\beta^*(k+1) &= 3i_\beta^*(k) - 3i_\beta^*(k-1) + i_\beta^*(k-2) \end{aligned} \quad (8)$$

为解决传统的 PI 控制存在响应速度慢和参数难调等问题, 保证三相 T 型三电平逆变器输出电流跟踪速度和控制精度, 本文提出一种改进型无差拍电流预测控制方法。即由式(7)得到电压矢量, 然后将电压矢量值送到 SVPWM 中, 实现输出电流的快速跟踪控制。

2 T 型三电平中点平衡控制研究

T 型三电平逆变器 SVPWM 和注入零序分量 SVPWM 具有相同的效果, 因此也包含 27 个开关矢量。27 个开关矢量包括 1 个零矢量, 6 个大矢量, 6 个中矢量和 6 个小矢量。其中小矢量和中矢量具有

相同的开关矢量，如表 1 所示。

表 1 开关状态和电压矢量

Table 1 Switching states and voltage vectors		
矢量	开关状态	
零矢量	[OOO] [PPP] [NNN]	
大矢量	[PPN] [NPN] [PNN] [NPP] [NNP] [PNP]	
中矢量	[PON] [NPO] [OPN] [PNO] [NOP] [ONP]	
小矢量	P 型	N 型
	[OOP]	[NNO]
	[POO]	[ONO]
	[OPO]	[NON]
	[OPP]	[NOO]
	[POP]	[ONN]
	[PPO]	[ONN]

空间电压矢量和开关状态之间的关系如图2所示。

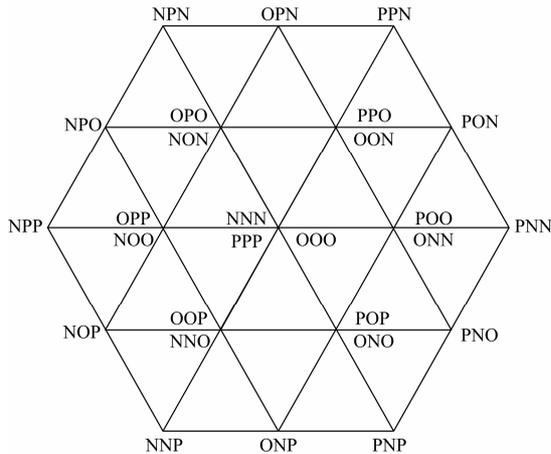


图 2 T型三电平逆变器空间矢量图

Fig. 2 Space-vector diagram of a 3LT¹

如图 3 所示，零矢量[PPP]没有和直流侧电容相连，故不会影响中点平衡。大矢量[PNN]也没有和直流侧电容相连，也不会影响中点平衡。中矢量[OPN]对中点电位的影响是不确定的，很难采用该矢量实现中点平衡控制。N-type 矢量[NON]会减小下侧电容电压，P-type 矢量[OPN]会减小上侧电容电压，因此可以采用这两个矢量实现中点平衡控制。

注入零序分量 SVPWM 和 SVPWM 具有相同的控制效果，但是实现简单。因此本文采用注入零序分量的控制方法实现中点平衡控制。

可以得出控制三电平 T 型逆变器所需的调制信号为

$$U_i = u_i + u_o \quad (9)$$

式中： u_i 为输出调制信号； u_o 为注入零序分量， $u_o = -0.5(u_a + u_b + u_c)$ 。

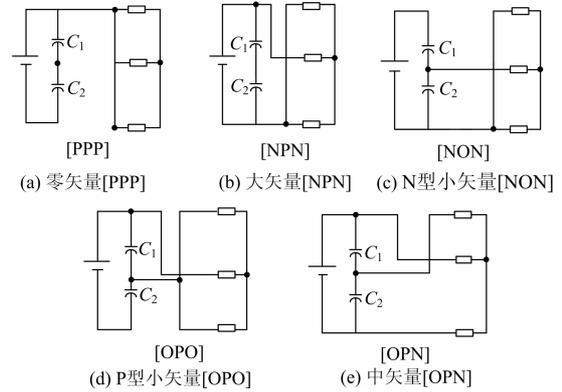


图 3 三电平逆变器开关状态对中点平衡影响

Fig. 3 Influence of the switching state of the neutral point voltage in the three-level inverter

当下侧电容电压 V_{dc2} 大于上侧电容电压 V_{dc1} ，可采用 N 型小矢量实现中点平衡控制。

即 A 相、B 相和 C 相的调制波 U_a 、 U_b 、 U_c 分别同时减去一定比例的 U_{min} ， U_{min} 为 U_a 、 U_b 、 U_c 最小值。图 4 为 V_{dc2} 大于 V_{dc1} 时电压偏移以及修正的小矢量分布图。

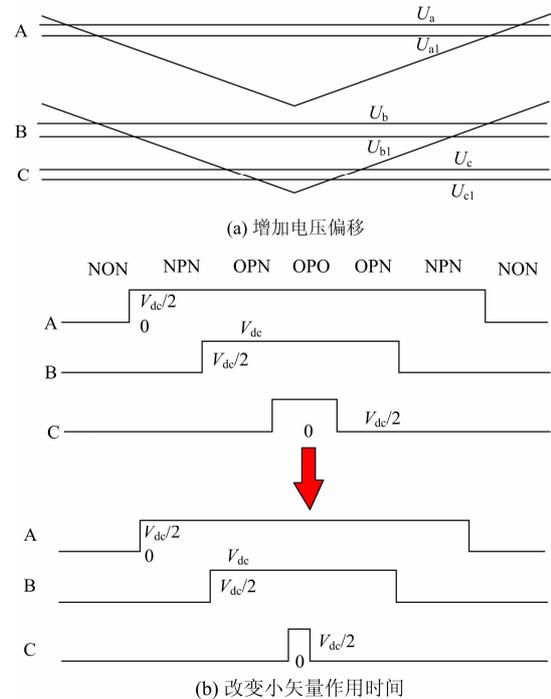


图 4 V_{dc1} 小于 V_{dc2} 的情况

Fig. 4 Condition that V_{dc1} is smaller than V_{dc2}

反之，如果下侧电容电压 V_{dc2} 小于上侧电容电压 V_{dc1} ，P-type 小矢量用于实现中点平衡控制，即 A 相、B 相和 C 相的调制波 U_a 、 U_b 、 U_c 分别同时加上 U_{min} 。图 5 为 V_{dc1} 大于 V_{dc2} 的电压偏移以及小矢量的修正图。

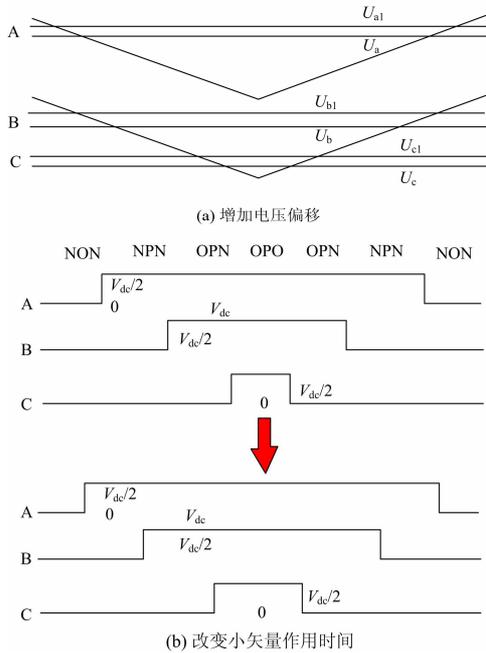


图 5 V_{dc1} 大于 V_{dc2} 的情况

Fig. 5 Condition that V_{dc1} is larger than V_{dc2}

3 实验结果

为了验证本文所提无差拍电流预测控制算法和中点平衡算法的正确性，搭建了一台 10 kW T 型三电平并网逆变器样机。实验参数如表 2 所示。整个系统由三相不可控整流桥、T 型三电平逆变器、电流和电压检测以及保护电路组成。

表 2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

参数	数值
e_a, e_b, e_c	220 V
直流侧电压	600 V
滤波器	2 mH
参考电流(i_a^*)	8/5 A
电网频率	50 Hz
死区时间	3 μ s
直流侧电容	3 300 μ F

图 6 为 T 型三电平逆变器在采用本文提出算法前后实验对比图，图中可以看出采用本文提出算法以后实现了中点平衡。

图 7 为 T 型三电平逆变器的线电压 u_{ab} 和相电流 i_a 实验波形。实验结果表明 T 型三电平逆变器样机运行良好。

图 8 为一台 T 型三电平逆变器给定电流 $I_{a_ref} = 8$ A 时，传统方法和本文方法对比的实验波形。从图 8 可以看出输出电流为 i_a 为 8 A，实现了无静差跟踪控制。

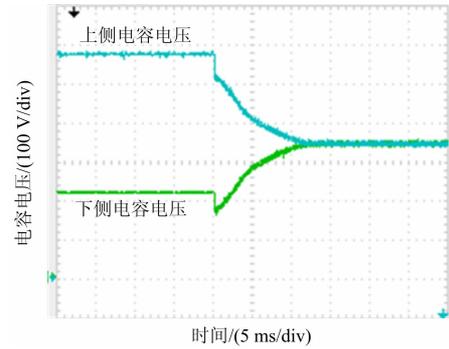


图 6 逆变器的电容电压波形

Fig. 6 Waveform of the capacitor voltage of inverter

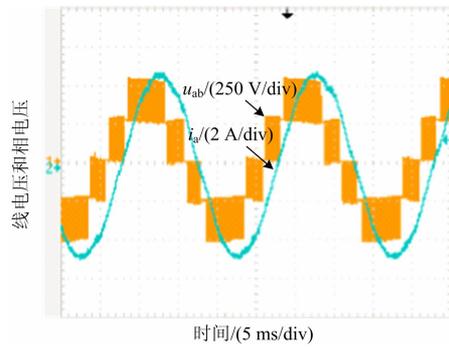
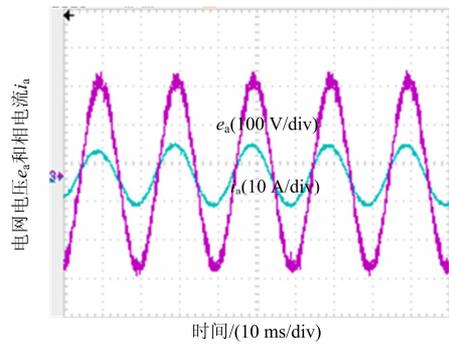
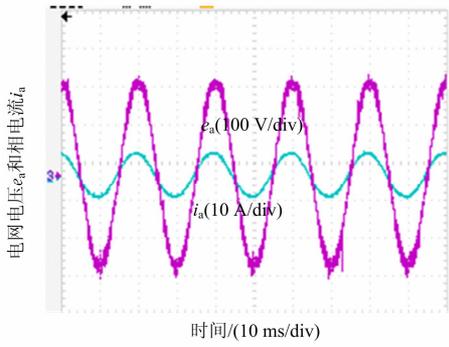


图 7 逆变器的线电压和相电流波形

Fig. 7 Waveform of the line-to-line voltage and phase current of inverter



(a) 本文提出方法



(b) 传统无差拍控制方法

图 8 逆变器的输出电流波形

Fig. 8 Waveform of the phase current of inverter

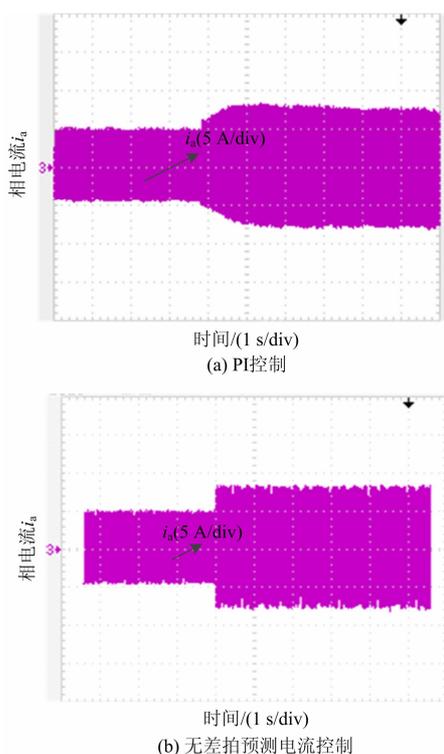
通过表 3 可以看出无差拍预测电流控制具有较小的谐波。

表 3 实验参数

Table 3 Experimental parameters

	提出无差拍控制方法	传统无差拍控制方法
输出电流 THD	2.56%	3.13%

图 9 为 T 型三电平逆变器给定电流从 $I_{a_ref}=5$ A 跳变到 $I_{a_ref}=8$ A 时, 传统 PI 方法和本文方法对比的实验波形。通过实验可以看出, 传统方法动态响应较慢, 本文提出无差拍预测电流控制能够实现快速响应, 而且无超调。

图 9 给定相电流从 $I_{a_ref}=5$ A 跳变到 8 AFig. 9 Reference current I_{a_ref} responses to a step change in 5 A to 8 A

4 结论

本文根据三相并网逆变器动态数学模型, 提出了一种新型无差拍控制方法, 该无差拍控制方法加了控制的延迟, 和传统无差拍控制方法相比, 具有更高的电流跟踪精度和更好的输出电流波形质量。和传统的 PI 控制相比, 具有更快的响应速度。同时为了解决中点不平衡的固有问题, 本文提出一种新型注入零序分量 SVPWM 控制方法, 通过改变小矢量的作用时间实现中点平衡控制, 从而能够进一步

提高 T 型三电平并网逆变器的输出性能。

参考文献

- [1] 刘胜荣, 杨苹, 肖莹, 等. 两级式光伏并网逆变器的无差拍控制算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 26-29.
LIU Shengrong, YANG Ping, XIAO Ying, et al. Algorithm research of deadbeat control for double-stage photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 26-29.
- [2] 张明光, 陈晓婧. 光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 28-33.
ZHANG Mingguang, CHEN Xiaojing. A control strategy of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 28-33.
- [3] 翦志强, 司徒琴. 三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 126-130.
JIAN Zhiqiang, SITU Qin. Control method of photovoltaic grid-connected inverter under three-phase voltage unbalanced dips[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 126-130.
- [4] 王若醒, 吴迎霞, 杨恢宏, 等. 两级式 T 型三电平光伏逆变器的关键技术研究及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 58-62.
WANG Ruoxing, WU Yingxia, YANG Huihong, et al. Research on key technologies of double-stage T-type three-level photovoltaic inverter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 58-62.
- [5] 张瑾, 齐铂金, 张少如. Z 源三电平中点钳位逆变器的空间矢量调制方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 108-114.
ZHANG Jin, QI Bojin, ZHANG Shaoru. A space vector PWM algorithm for Z-source three-level NPC inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 108-114.
- [6] 姜卫东, 王群京, 陈全, 等. 一种完全基于两电平空间矢量调制的三电平空间矢量调制算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 108-114.
JIANG Weidong, WANG Qunjing, CHEN Quan, et al. SVPWM strategy for three-level inverter based on SVPWM strategy for two-level inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 108-114.
- [7] 王慧敏, 温坤鹏, 张云, 等. 基于精细分区控制的三电平逆变器中点电位平衡策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 144-152.

- WANG Huimin, WEN Kunpeng, ZHANG Yun, et al. Neutral point potential balance strategy for NPC three-level inverter based on meticulous partition control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(19): 144-152.
- [8] CHOI U M, LEE H H, LEE K B. Simple neutral-point voltage control for three-level inverters using a discontinuous pulse width modulation[J]. IEEE Transactions on Energy Converters, 2013, 28(2): 434-443.
- [9] 刘斌, 黄凯伦, 伍家驹, 等. 一种具有中点电位平衡可降低损耗的三电平空间矢量调制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 197-203.
- LIU Bin, HUANG Kailun, WU Jiaju, et al. A novel SVPWM method considering neutral-point potential balancing and reducing switching losses for three-level inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 197-203.
- [10] MOSSOBA J, LEHN P. A controller architecture for high bandwidth active power filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1): 317-325.
- [11] KUKRER O. Discrete-time current control of voltage-fed three-phase PWM inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 11(2): 260-269.
- [12] 梁海峰, 冯燕闯, 刘子兴, 等. 基于无差拍控制的光伏电站低电压穿越技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 110-115.
- LIANG Haifeng, FENG Yanchuang, LIU Zixing, et al. Research on low voltage ride through of photovoltaic plant based on deadbeat control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 110-115.
- [13] 方宇, 裘迅, 邢岩, 等. 基于预测电流控制的三相高功率因数 PWM 整流器研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 69-73.
- FANG Yu, QIU Xun, XING Yan, et al. Research on three-phase high power factor correction based on predictive digital current controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 69-73.
- [14] 庄淑瑾, 孙玉坤, 任明炜, 等. 静止无功发生器的预测电流控制方法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 53-56.
- ZHUANG Shujin, SUN Yukun, REN Mingwei, et al. Predictive current control method of static var generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(11): 53-56.
- [15] MOHAMED Y A R I, EL-SAADANY E F. An improved deadbeat current control scheme with a novel adaptive self-tuning load model for a three-phase PWM voltage-source inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 749-759.
- [16] MALINOWSKI M, KAZMIERKOWSKI M, HANSEN S, et al. Virtual-flux-based direct power control of three-phase PWM rectifiers[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(7): 1019-1026.
- [17] 王久和, 李华德. 一种新的电压型 PWM 整流器直接功率控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 47-52.
- WANG Jiuhe, LI Huade. A new direct power control strategy of three-phase boost type PWM rectifiers[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 47-52.

收稿日期: 2015-10-06; 修回日期: 2015-12-14

作者简介:

郭利辉(1981-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为新能源发电并网技术。E-mail: gloriagordon@163.com

(编辑 周金梅)