

DOI: 10.7667/PSPC161619

NPC型三电平永磁同步风力发电并网逆变器模型 预测控制满足低电压穿越要求研究

马临超¹, 蒋炜华¹, 薛宝星²

(1. 河南工学院, 河南 新乡 453003; 2. 河南省电力公司检修公司, 河南 郑州 450007)

摘要: 在风力发电中低电压穿越要求为: 当电网电压降落的时候, 风力发电机不脱网且能够稳定电网电压和频率。风力发电机需要较高的功率和电压等级。因此, 多电平中点箝位型三电平逆变器非常适合这种设备。和其它控制方法相比, 模型预测控制具有动态响应快和跟踪性能好的优点, 但是工作频率低。为了能够满足低电压穿越的要求, 提出一种模型预测控制方法实现 NPC 三电平逆变器的风力转换。所提模型预测控制也能够实现 NPC 逆变器中点平衡控制, 通过选择冗余小矢量实现。仿真和实验验证了所提算法正确性。

关键词: 低电压穿越; NPC 型三电平逆变器; 模型预测控制; 中点平衡控制

Model predictive current control of grid-connected neutral-point-clamped permanent magnet synchronous wind power inverters to meet low-voltage ride-through requirements

MA Linchao¹, JIANG Weihua¹, XUE Baoxing²

(1. Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

2. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: The low-voltage ride through (LVRT) requirement demands the wind power to remain connected to the grid in the case of grid voltage dips. And the proposed control method can keep grid voltage and frequency stable. Wind power needs to increase power and voltage ratings. Therefore, multilevel inverters, such as neutral-point-clamped (NPC) inverters, are suited for this application. Model predictive control presents fast dynamic response and good current reference tracking than other control methods, but working at lower switching frequencies. In this paper, a model predictive control is proposed to the grid-side three-level NPC inverter as part of a wind energy conversion system in order to fulfill the LVRT requirements. DC-link neutral-point (NP) balance is also achieved by means of the model predictive control algorithm, which chooses the redundant small vectors of the NPC inverter. Simulation and experimental results confirm the validity of the proposed control method.

Key words: low-voltage ride through (LVRT); three-level NPC inverter; model predictive power control; neutral-point potential (NP) control

0 引言

最近几年, 随着国家政策的大力扶持, 风力发电技术得到快速增长。由于渗透率增加, 分布式能够在接入电网的时候需要保证可靠性和效率。电网要求: 在电网发生扰动的时候, 风力发电机能够实现低电压穿越的要求。风力转换系统中大都采用两电平逆变器拓扑, 但是现代风力发电系统需要较高

的功率和电压等级, 传统两电平逆变器很难满足要求^[1-3]。

二极管箝位型三电平逆变器具有高电压应力、开关损耗小和谐波小等优点, 在风力发电系统中得到广泛应用^[4]。

随着 NPC 型三电平逆变器的不断增加, 逆变器的控制已经成为风力发电系统中研究的关键技术^[5]。

NPC 型三电平逆变器控制策略主要包括 PI 控制、PR 控制、滞环控制和峰值电流反馈等, PI 和 PR 控制在现代逆变器应用较多^[6], 但是该方法需要

调节复杂的参数以及需要和矢量调制一起控制逆变器的输出，而且在风力发电系统中需要快速响应，该方法难以满足要求。滞环控制和峰值电流反馈等方法的输出谐波较大。

模型预测控制最为一种预测控制的一种，是基于动态模型和时间范围的控制。应用到逆变器中的不同模型预测控制中，有限集模型预测控制由于控制简单、响应快速和不需要矢量调制在新能源领域得到广泛应用。

文献[7-8]将模型预测控制应用到 NPC 型三电平并网逆变器中；文献[9]将模型预测技术应用到不平衡电网条件下的两电平逆变器中；文献[10]将模型预测控制应用到 DFIG 中，取得了较好的效果。但是目前相关文献鲜有基于模型预测控制研究低电压穿越的技术。

为了能够满足图 1 中基于背靠背控制器的永磁同步风力发电并网系统的低电压穿越要求^[11]，本文提出一种模型预测控制的 NPC 型三电平并网逆变器。

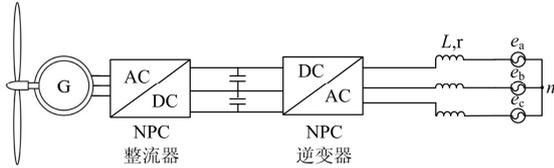


图 1 基于背靠背控制器的永磁同步风力发电并网系统
Fig. 1 Control system of permanent magnet synchronous wind generator connected to the grid through a back-to-back NPC converter

传统模型预测控制会受到延迟误差的影响，为了消除该影响，本文提出一种改进的模型预测控制，和传统方法相比，该方法考虑未来两个周期的时间延迟，从而解决了延迟带来的控制不准问题，保证了输出并网电流的波形质量。

针对 NPC 型三电平并网逆变器存在中点不平衡固有问題，通过三电平逆变器的冗余矢量实现中点平衡控制。

本文所提出的方法不仅能够解决中点平衡控制难题，而且能够快速实现并网电流跟踪控制，以及满足低电压穿越的要求。且通过控制延时补偿能够提高逆变器的输出并网电流质量。通过仿真和实验验证了所提算法的正确性。

1 NPC 型三电平逆变器模型预测控制

风力发电系统中 NPC 型三电平逆变器如图 2 所示。本文以 O 点作为参考点，NPC 型三电平逆变器在三相静止坐标系下的数学模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -\frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{ao} \\ u_{bo} \\ u_{co} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： L 是网测滤波电感； i_a, i_b, i_c 是并网电流； e_a, e_b, e_c 是电网电压； u_{ao}, u_{bo}, u_{co} 是逆变器输出电压。

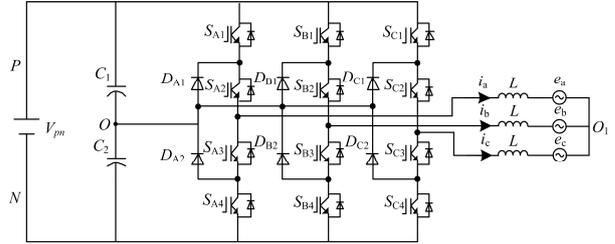


图 2 NPC 型三电平逆变器拓扑结构
Fig. 2 Topology of three-level T-type inverter

三电平并网逆变器电网电压矢量、输出电压矢量和与并网电流能够表示为

$$\begin{aligned} \vec{e} &= \frac{2}{3}(e_a + a \times e_b + a^2 \times e_c) \\ \vec{u} &= \frac{2}{3}(u_a + a \times u_b + a^2 \times u_c) \\ \vec{i} &= \frac{2}{3}(i_a + a \times i_b + a^2 \times i_c) \end{aligned} \quad (2)$$

式中， $a = e^{j2\pi/3}$ 。

中点箝位型三电平逆变器存在中点不平衡问题，因此并网逆变器的输出电压能够表示为

$$V_{xo} = S_x \frac{V_{pm}}{2} \quad (3)$$

式中 S_x 定义为开关状态，能够表示为

$$S_x = \begin{cases} 1, & S_{x1}=1, S_{x2}=1, S_{x3}=0, S_{x4}=0 \\ 0, & S_{x1}=0, S_{x2}=1, S_{x3}=1, S_{x4}=0 \\ -1, & S_{x1}=0, S_{x2}=0, S_{x3}=1, S_{x4}=1 \end{cases} \quad (4)$$

式中， $x=a, b, c$ 。

假设采样周期为 T_s ，则电流导数能够表示为

$$\frac{di(t)}{dt} \approx \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad (5)$$

将式(5)代入到式(1)能够得到

$$i_x(k+1) = \frac{T_s}{L} [v_{xo}(k) - e_x(k)] + i_x(k) \quad (6)$$

NPC 型三电平逆变器由于上下电容存在中点不平衡问题，文献[10]根据幅值将三电平逆变器的矢量分为大、中、小和零矢量，三电平的矢量如表 1 所示。

传统空间矢量调制和 SPWM 调制方法都是通

过调整小矢量和中矢量作用时间, 实现中点电位平衡控制。

表 1 电压矢量和开关状态

Table 1 Voltage vectors and switching states		
矢量名称	矢量分类	
零矢量	[OOO] [PPP] [NNN]	
小矢量	P-type	N-type
	[PPO] [POO]	[ONN] [ONN]
	[OPP] [OPO]	[NOO] [NNO]
	[POP] [OOP]	[ONO] [NON]
中矢量	[NPO] [PON] [OPN]	
	[PNO] [ONP] [NOP]	
大矢量	[PPN] [PNN] [NPN]	
	[PNP] [NNP] [NPP]	

对于零矢量大矢量, 由于其不会影响中点电位, 故对零矢量大矢量并不进行控制。中矢量虽然会影响中点平衡, 但是中矢量对中点电位平衡控制是不确定的, 故很难进行控制。

如图 3(a)所示, 当 NPC 型三电平逆变器的输出为 P-type 小矢量, 上侧的电容电压会减小; 如图 3(b)所示, NPC 型三电平逆变器的输出为 N-type 小矢量, 上侧电容电压会增加。

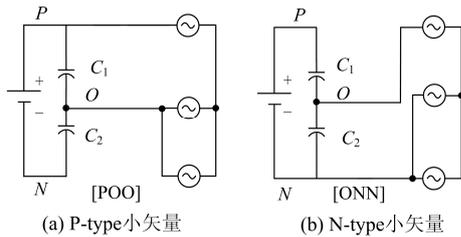


图 3 NPC 型三电平逆变器矢量对中点平衡影响
Fig. 3 Effect of the switching state on the NP voltage of the NPC inverter

因此, 本文采用通过表 1 中的 N-type 和 P-type 小矢量实现中点电位平衡控制。当上侧电容电压大于下侧电容电压, 选择 P-type 小矢量, 当上侧电容电压小于下侧电容电压, 选择 N-type 小矢量。

故本文提出模型预测控制策略实现中点平衡控制, 通过检测电容电压大小, 通过价值函数自动选择 N 型或者 P 型矢量实现中点电位平衡控制。该方法能够快速和简单的实现中点电位平衡控制。

为了准确实现控制, 本文提出模型预测控制需要增加一个周期延迟时间, 式(6)能够简化为

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}(k+2) \\ i_{\beta}(k+2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha}(k+1) \\ i_{\beta}(k+1) \end{bmatrix} + \frac{T_s}{L} \begin{bmatrix} u_{\alpha}(k+1) - e_{\alpha}(k+1) \\ u_{\beta}(k+1) - e_{\beta}(k+1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 $e(k+1), i(k+1)$ 能够通过二次拉格朗日插值得到为

$$e(k+1) = 3e(k) - 3e(k-1) + e(k-2) \quad (8)$$

$$i(k+1) = 3i(k) - 3i(k-1) + i(k-2)$$

为了实现低电压穿越、并网电流跟踪以及中点平衡控制, 采用的价值函数为

$$f = |i_{\alpha}(k+2) - i_{\alpha}^*| + |i_{\beta}(k+2) - i_{\beta}^*| + |V_p(k+2) - V_n(k+2)| \quad (9)$$

式中 $V_p(k+2), V_n(k+2)$ 通过二次拉格朗日插值得到为

$$V_p(k+1) = 6V_p(k) - 8V_p(k-1) + 3V_p(k-2) \quad (10)$$

$$V_n(k+1) = 6V_n(k) - 8V_n(k-1) + 3V_n(k-2)$$

通过价值函数能够自动找到最优的矢量, 然后将最优矢量进行输出, 该方法能够快速实现中点平衡控制和并网电流跟踪。

2 NPC 型三电平低电压穿越控制研究

新的并网规则要求大型风力发电厂中的逆变器需要能够耐受电网异常电压的能力, 从而能够避免电网电压降落时脱网, 引起电网输出不稳定^[12]。电网电压跌落包括两部分, 一部分是电网电压平衡跌落, 另外一部分是电网电压不平衡跌落^[13]。

在权威的 GB/T19963 风电场接入电力系统技术规定中, 国家电网颁布的最新并网要求规则如图 4 所示, 当电网电压跌落至曲线以下, 风力发电逆变器能够将电网切出。

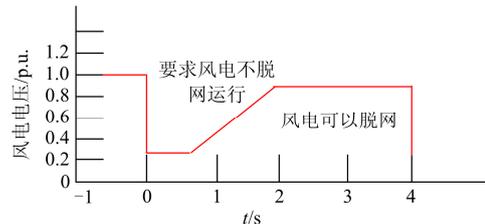


图 4 逆变器的低电压穿越能力要求

Fig. 4 LVRT capacity requirements of inverter

为了保证在电网正常条件和电网电压跌落情况均能够准确锁相, 本文采用文献[12]的锁相环技术。并网电流参考能够表示为

$$\begin{aligned} i_a^*(t) &= I^* \cos(\theta_g + \varphi^*) \\ i_b^*(t) &= I^* \cos(\theta_g - 2\pi/3 + \varphi^*) \\ i_c^*(t) &= I^* \cos(\theta_g + 2\pi/3 + \varphi^*) \end{aligned} \quad (11)$$

$$I^* = \sqrt{(I_A^*)^2 + (I_D^*)^2}, \varphi^* = \arctan \frac{I_A^*}{I_D^*} \quad (12)$$

式中 I_A^* 和 I_D^* 是风力发电系统中有功参考电流和无功参考电流，采用本文提出的模型预测控制，能够快速地实现低电压穿越功能。

3 仿真与实验结果

3.1 仿真结果

为了验证本文所提出的预测控制实现并网、中点平衡以及低电压穿越的正确性。

首先通过 Matlab/Simulink 仿真平台实现验证，仿真参数如表 2 所示，整个发电系统包括直流电源、NPC 三电平逆变器以及电网组成。

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

参数	数值
直流侧电压	600 V
直流侧电容	2600 μ F
参考电流(i_d^*)	10 A
滤波器	8 mH
电网频率	50 Hz

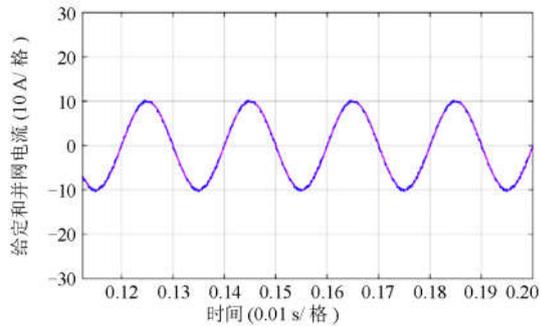
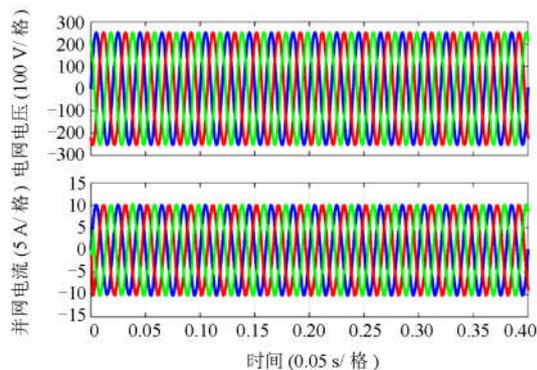


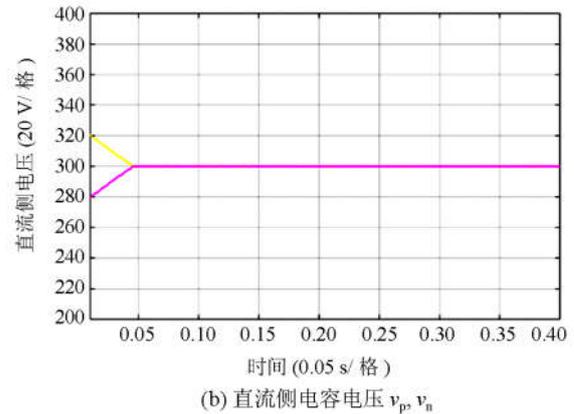
图 5 逆变器的输出电流波形

Fig. 5 Waveform of the phase current of inverter

图 6 为电网正常条件下的仿真结果，通过仿真能够看出加入本文提出预测控制算法以后并网电流波形良好，中点电位平衡。



(a) 电网电压 e_a, e_b, e_c 和线电流 i_a, i_b, i_c

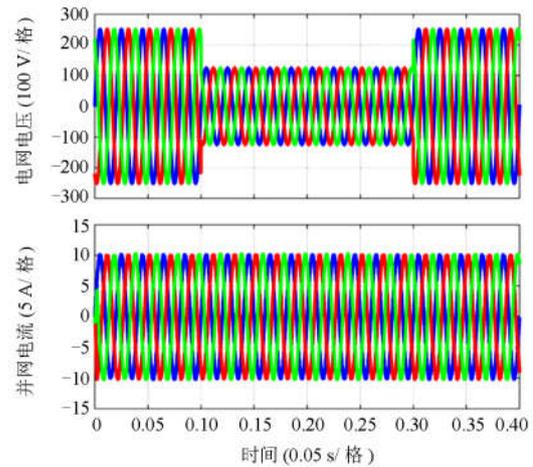


(b) 直流侧电容电压 v_p, v_n

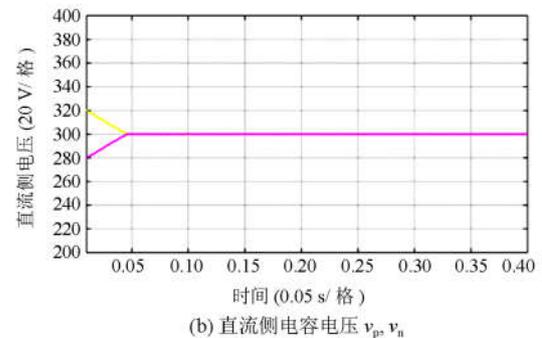
图 6 正常电网条件下的响应仿真图

Fig. 6 Simulation of the dynamic response during a normal grid voltage

图 7 为电网平衡跌落情况下的仿真结果，通过仿真能够看出虽然电网电压跌落，但是采用本文提出预测控制算法并网电流基本不变化，动态响应快，而且直流侧中点电位电压平衡。



(a) 电网电压 e_a, e_b, e_c 和线电流 i_a, i_b, i_c

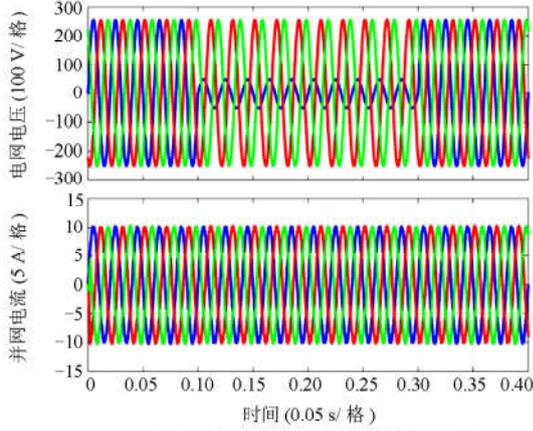


(b) 直流侧电容电压 v_p, v_n

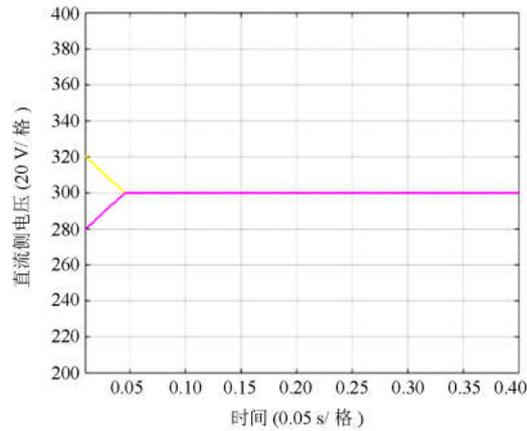
图 7 电网电压平衡跌落条件下的响应仿真图

Fig. 7 Simulation of the dynamic response during a balance grid voltage dip

图 8 为 A 相电网电压跌落情况下的仿真结果, 通过仿真能够看出虽然 A 相电网电压不平衡跌落, 但是预测控制算法动态响应快, 因此并网电流基本不变化, 而且直流侧中点电位电压控制良好。



(a) 电网电压 e_a, e_b, e_c 和线电流 i_a, i_b, i_c



(b) 直流侧电容电压 v_p, v_n

图 8 A 相电网电压跌落条件下的响应仿真图
Fig. 8 Simulation of the dynamic response during grid voltage of phase A dip

3.2 实验结果

为了验证本文所提出模型预测控制、低电压穿越和中点平衡算法的正确性, 搭建了一台 6 kW NPC 型三电平并网逆变器样机。实验参数如表 3 所示。

表 3 实验参数

Table 3 Experimental parameters

参数	数值
直流侧电压	600 V
直流侧电容	1800 μ F
参考电流 i_d^*	10/12 A
滤波器	8 mH
死区时间	2.5 μ s
电网频率	50 Hz

图 9 为采用本文模型预测控制后的实验波形, 通过波形能够看出, 输出线电压是标准的五电平, 控制良好。

图 10 和 11 为正常电网电压和 A 相电网电压跌落情况下的实验结果, 通过实验能够看出不管电网电压正常情况和跌落情况, 预测控制算法均能够快速的跟踪并网电流, 输出并网电流波形良好, 满足并网要求。

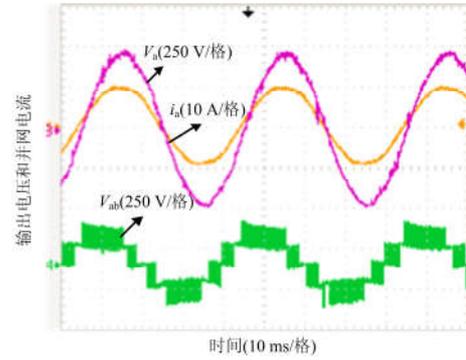


图 9 采用预测控制算法后逆变器的线电压波形
Fig. 9 Waveform of the line-to-line voltage after the model predictive control method is employed

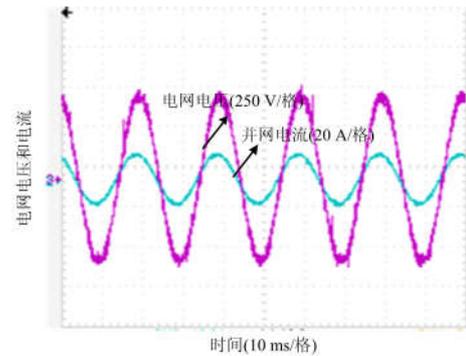


图 10 正常电网条件下的实验波形图
Fig. 10 Waveform of the dynamic response during a normal grid voltage

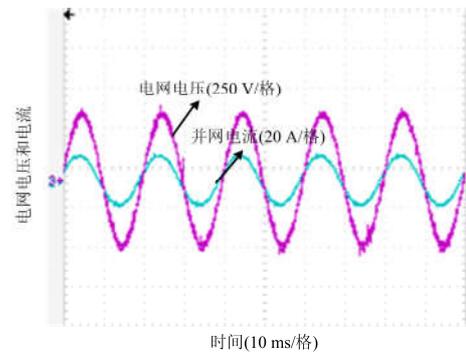


图 11 A 相电网电压条件下的实验波形图
Fig. 11 Waveform of the dynamic response during grid voltage of phase A dip

4 结论

本文首先对 NPC 型三电平并网逆变器的模型进行分析, 提出新型模型预测控制策略, 能够完美解决低电压穿越问题, 同时针对 NPC 型三电平逆变器存在中点不平衡固有问题, 通过价值函数自动选择最优矢量实现中点平衡控制。因此提出的模型预测控制在风力发电中的发展前景广阔。

参考文献

- [1] Wind energy barometer 2012[J]. Systèmes Solaires—Le J. l'Éolien, 2013(12): 46-69.
- [2] ALTIN M. Overview of recent grid codes for wind power integration[C] // Proc IEEE Int Conf Optim Elect Electron Equip, 2010: 1152-1160.
- [3] LISERRE M, CARDENAS R, MOLINAS M, et al. Overview of multi-MW wind turbines and wind parks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1081-1095.
- [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] PARK Y, SUL S K, LIM C H, et al. Reliability improvement of a T-type three-level inverter with fault-tolerant control strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2660-2673.
- [6] 彭咏龙, 朱劲波, 李亚斌. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 103-107.
PENG Yonglong, ZHU Jinbo, LI Yabin. Hybrid damping control based on the LC filter inductor voltage feedback and input shaping techniques[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 103-107.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] BARROS J D, SILVA J F. Optimal predictive control of three-phase NPC multilevel inverter: comparison to robust sliding mode controller[C] // Proc IEEE PESC, 2007: 2061-2067.
- [10] BARROS J D, SILVA J F A, JESUS É G A. Fast-predictive optimal control of NPC multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 619-627.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 陈波, 朱晓东, 朱凌志, 等. 光伏电站低电压穿越时的无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 6-12.
CHEN Bo, ZHU Xiaodong, ZHU Lingzhi, et al. Strategy for reactive control in low voltage ride through of photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 6-12.

收稿日期: 2016-09-27; 修回日期: 2016-11-22

作者简介:

马临超(1981—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统及智能电网、新能源技术;

蒋炜华(1981—), 男, 硕士, 主要从事电力系统自动化技术方面研究;

薛宝星(1980—), 男, 硕士, 主要从事电力系统自动化技术方面研究。

(编辑 张爱琴)