

DOI: 10.7667/PSPC151051

基于多载波和 PR 控制实现变换器并联环流抑制研究

陈素华

(许昌学院电气信息工程学院, 河南 许昌 461000)

摘要: 逆变器的并联由于具有容量大、低成本和能够增加系统的容量而备受关注。但是逆变器的并联会带来环流问题, 环流不仅会降低系统效率, 而且会使输出并网电流发生畸变。环流主要在零矢量中产生, 通过双环控制实现环流抑制, 外环在零序分量采用无差拍实现环流抑制, 内环采用多载波消除零矢量的作用时间, 环流能够得到非常好的抑制。在并网并联逆变系统中, 电流控制器的结构和参数对系统稳定性和输出电流质量至关重要。电流环采用 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的比例谐振控制器, 省去了复杂的坐标变换, 从而使计算简单易实现。该方法不需要增加额外的硬件, 能够较好地抑制环流和具有动态反应快等优点。通过仿真和实验验证了理论分析的正确性。

关键词: 逆变器并联; 环流; PR 控制器; 多载波调制

Multicarrier PWM and PR control strategy of circulating current reduction for grid-connected converters

CHEN Suhua

(College of Electricity and Information Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: The use of parallel three-phase converters has become more popular due to their simplicity, low cost, and expandability. However, the pulse width modulation (PWM) switching of parallel three-phase converters causes circulating current. The circulating current is mainly affected by the zero vectors. This paper proposes a multicarrier PWM for parallel three-phase converters. The multicarrier PWM can synthesize the desired output voltage without using zero vectors. Through the double loop control to realize circulation inhibition, outer ring in the zero sequence component circulation is realized by using no beat; the inner ring uses the carrier to eliminate the effect of zero vector more time, which can get very good restrain circulation. Furthermore, the structures and parameters of current controller are very important for the system's stability and the output current's quality in the grid-connected inverter application. The PR controller is used in the current loop which is in the $\alpha\beta$ stationary reference frame. This method eliminates the complex coordinate transformation while making the simple calculation. And the method does not need to add additional hardware, which can suppress the circulation current well and have the advantages of quick dynamic response. Finally, simulation and experiment results are presented to prove the validity of the theoretical analysis.

Key words: parallel inverters; circulating current; PR controller; multicarrier modulation

0 引言

环境污染日益严重, 新能源是解决该问题的关键途径^[1-3]。随着变换器在分布式电源、微电网中的广泛应用^[4-5], 对变换器可靠性和容量提出了更高的要求, 受到容量限制, 传统单机变换器已经满足大功率发展的需求。变换器并联可以解决高功率等级

和可靠性的要求^[6]。但是模块并联存在环流问题, 环流能够引起电流谐波畸变, 严重时由于电流应力不平衡烧坏 IGBT 管。因此研究变换器的并联环流技术意义重大^[7-9]。

国内外学者对变换器的并联环流抑制进行了大量的研究。文献[10-11]提出了采用双直流源或者隔离变压器方式实现环路电流的阻断, 采用该控制策略尽管可以有效地抑制环流, 但是大大增加了系统成本。文献[12-14]中指出可以采用非线性算法来抑制环流, 但是该方法理论上可行, 实际中实现起来比较复杂。

基金项目: 河南省科技厅计划项目(162102210301); 河南省教育厅高等学校重点科研项目(15A470019)

文献[15-20]提出了一种改变空间矢量调制的零矢量控制方法,该方法容易实现,具有较好的效果,但是和 SPWM 调制相比控制相对复杂。文献[21-22]分别描述了基于微分平坦理论模块化并联多电平环流抑制方法和模块化多电平环流抑制策略,这些抑制方法,虽然可以达到抑制效果,但是,结构复杂,难度较大。文献[23]对大规模风电接纳及送出的系统进保护进行了研究,提出了环流抑制的问题,但该文以设计为主,并没有给出具体的抑制方法。

本文首先分析了三相 PWM 变换器并联系统的环流模型,然后采用双环抑制环流的方法,外环采用无差拍和注入零序分量的方法实现环流抑制,在此基础上设计控制逆变器的多载波环流抑制方法,比传统的方法环流抑制效果要优异很多。并针对传统 PI 控制器跟踪慢的缺点设计 PR 控制器,该控制器能够实现快速无静差跟踪。最后通过仿真和实验进行了验证。

1 三相逆变器并联的零序环流模型

本文中并联变换器系统采用单直流源的方式,变换器的并联结构如图 1 所示。理想情况下并联逆变器的参数设置一致不会产生环流,但是实际情况下死区设置、并网电抗器区别以及控制延迟等因素会产生环流。

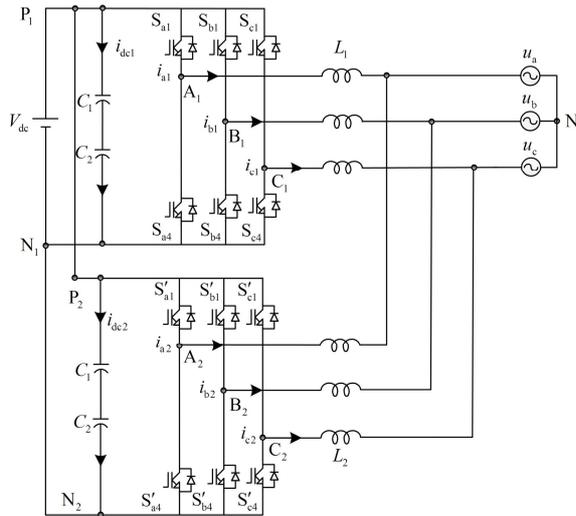


图 1 三相逆变器并联拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of parallel connection system of three-phase inverter

三相并网逆变器并联的平均模型表示如下。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} u_N \\ u_N \\ u_N \end{bmatrix} + \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} d_{a1} \\ d_{b1} \\ d_{c1} \end{bmatrix} u_{dc} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_2} \begin{bmatrix} u_N \\ u_N \\ u_N \end{bmatrix} + \frac{1}{L_2} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L_2} \begin{bmatrix} d_{a2} \\ d_{b2} \\ d_{c2} \end{bmatrix} u_{dc} \quad (2)$$

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{2C} \left([d_{a1} \ d_{b1} \ d_{c1}] \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} + [d_{a2} \ d_{b2} \ d_{c2}] \begin{bmatrix} i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} + i_o \right) \quad (3)$$

式中: i_o 为电网电流 i_a 、 i_b 、 i_c 之和; d_a 、 d_b 、 d_c 为并联逆变器的桥臂输出占空比; L 为滤波电感; C 为直流侧 C_1 和 C_2 电容之和; u_{dc} 为输入电压值; u_a 、 u_b 、 u_c 为电网电压; u_N 为电网中性点电压。

单台逆变器不能形成环流通路,故不存在零序环流。但是对于并联逆变器存在环路,而且零序环流方向相反,大小相等,如式(4)所示。

$$i_o = i_{o1} = -i_{o2} \quad (4)$$

为了研究逆变器环流抑制的控制方法,首先分析环流产生的原理。将逆变器的 A 相、B 相和 C 相变换到同步旋转坐标系 $dq0$ 。

本文定义坐标变换矩阵为式(5)所示。

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过上述坐标变换,三相静止坐标系下交流流量变换成两相同步旋转坐标系下的直流量为式(6)、式(7)。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} d_{d1} \\ d_{q1} \end{bmatrix} u_{dc} \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} d_{d2} \\ d_{q2} \end{bmatrix} u_{dc} \quad (7)$$

根据基尔霍夫定律可知,图 2 交流侧的公式为

$$\frac{d_{o1} v_{dc}}{3} + d_{a1} \cdot v_{dc} - \frac{1}{L_1} \frac{di_{a1}}{dt} = \frac{d_{o2} \cdot v_{dc}}{3} + d_{a2} v_{dc} - \frac{1}{L_2} \frac{di_{a2}}{dt} \quad (8)$$

$$\frac{d_{o1} v_{dc}}{3} + d_{b1} \cdot v_{dc} - \frac{1}{L_1} \frac{di_{b1}}{dt} = \frac{d_{o2} \cdot v_{dc}}{3} + d_{b2} v_{dc} - \frac{1}{L_2} \frac{di_{b2}}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{d_{o1} v_{dc}}{3} + d_{c1} \cdot v_{dc} - \frac{1}{L_1} \frac{di_{c1}}{dt} = \frac{d_{o2} \cdot v_{dc}}{3} + d_{c2} v_{dc} - \frac{1}{L_2} \frac{di_{c2}}{dt} \quad (10)$$

从式(8)~式(10)得到环流公式为

$$v_{dc}(d_{o1} - d_{o2}) = (L_1 - L_2) \frac{di_o}{dt} \quad (11)$$

两台逆变器零序占空比时间之差如式(12)。

$$\Delta d = d_{o1} - d_{o2} \quad (12)$$

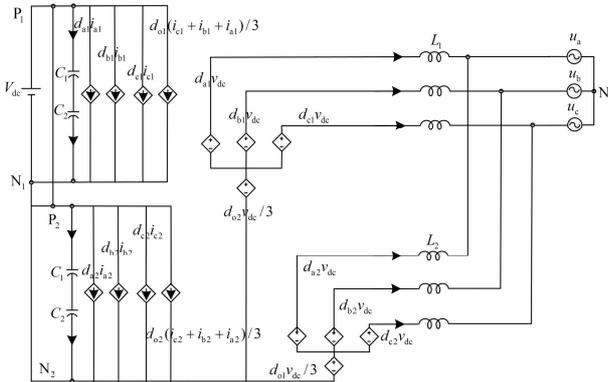


图 2 并联逆变器的平均模型

Fig. 2 Average model parallel connection system of three-phase inverter

2 外环基于注入零序分量环流抑制

从式(11)可以看出，零序环流 i_o 和两台逆变器的零序占空比有关，因此可以改变两台逆变器的占空比实现环流抑制，本文提出了基于注入零序分量的环流抑制方法。

首先采样输出电网端电流 i_a 、 i_b 、 i_c 得到零序环流 i_o ，然后假设零序电流给定值为 0，零序环流和零序电流给定值经过无差拍控制得到环流修正值 y ，如式(13)。

$$y = \frac{[0 - i_o(k)] \cdot (L_1 + L_2)}{T \cdot V_{dc}(k)} \cdot 6 \quad (13)$$

最后为了保证环流抑制不影响输出电流的波形质量，本文将环流修正值输出给零序分量，零序分量为式(14)。

$$V_{OFF} = -0.5(\max(V_x) + \min(V_x)) \quad (14)$$

式中， V_x 为调制波 V_a 、 V_b 、 V_c 。

为了保证环流抑制效果达到最佳，因此在调制方面可以实现内环控制，即通过减少零矢量作用时间或者不采用零矢量作用时间的方法解决零序环流。

3 内环环流的抑制方法

如表 1 所示为一个模块的 8 种开关状态，用 $V_0 \sim V_7$ 表示，为了描述方便，用“+”表示并联系统环流的方向与正方向相同，“-”表示环流的方向与正方向相反。环流的大小与数字的大小成正比，数

字越大，环流越大，如表 1 所示。因此只要减少零序开关，相间的环流就能够得到抑制。

表 1 两并联模块开关状态和环流之间的关系

Table 1 Relation between switching states and circulating current

	V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7
V_0	0	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-3
V_1	1	0	-1	0	-1	0	-1	-2
V_2	2	1	-1	1	0	1	1	-1
V_3	1	0	-1	0	-1	0	-1	-2
V_4	2	1	0	1	0	1	0	-1
V_5	1	0	-1	0	-1	0	-1	-2
V_6	2	1	0	1	0	1	0	-1
V_7	3	2	1	2	1	2	1	0

根据前文的分析可知，只要设法减小零序开关状态就可以减小相间环流，为此本文提出了双载波的 SPWM 方案。在每个并联模块中使用两个相角互差 180° 的三角载波。在三相调制波中 V_{a1}^* 的值处于 V_{b1}^* 和 V_{c1}^* 之间，与载波 C_n 进行比较，而 V_{b1}^* 和 V_{c1}^* 与原载波 C_p 比较，然后产生开关状态量 $V_1(100)$ 、 $V_4(011)$ 、 $V_5(001)$ 、 $V_6(101)$ ，如图 3 所示。其他开关状态也是通过中间值与载波 C_n 进行比较，而最大值和最小值与原载波 C_p 比较。

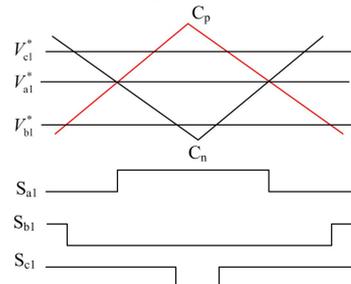


图 3 双载波和调制波比较

Fig. 3 Comparison between dual-carrier PWM and modulating wave

为了实现交流电流的无静差跟踪，本文采用 PR 控制器实现 A、B、C 三相解耦之后的 α 和 β 跟踪控制，图 4 所示为系统控制框图。

4 仿真和实验结果分析

为了对上述环流抑制控制方法的有效性进行证明，对并联逆变器进行环流仿真。仿真参数如表 2 所示。

在并网控制器的并联系统中，滤波电感的大小相等，模块之间的给定电流也是相等的，图 5 为滤波电感和给定电流分别相等的时候的环流仿真波形，从图中可以看出无环流抑制和环流抑制的波形对比。

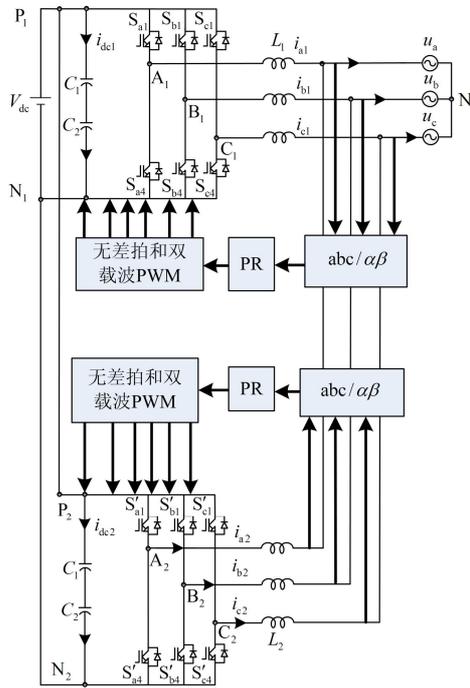


图 4 系统控制框图

Fig. 4 System control block diagram

表 2 逆变器参数

Table 2 Inverter parameters

参数	数值
直流电压/V	600
开关频率/Hz	6 000
输出频率/Hz	50
桥臂电感/mH	2/4
直流电容/ μ F	3 300

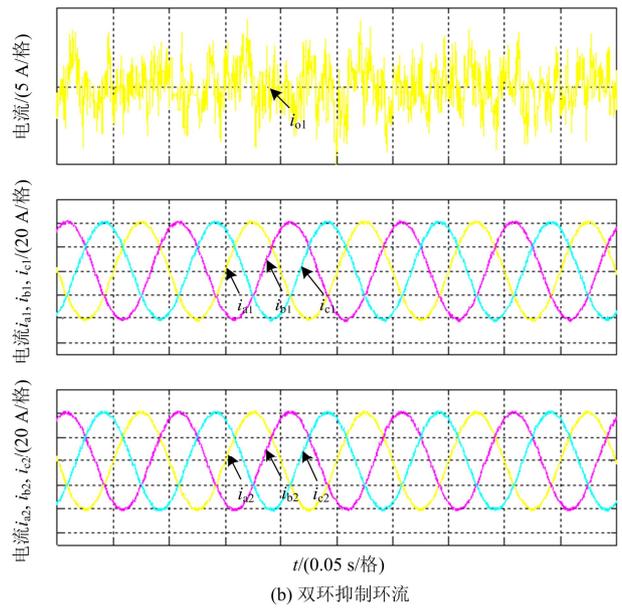
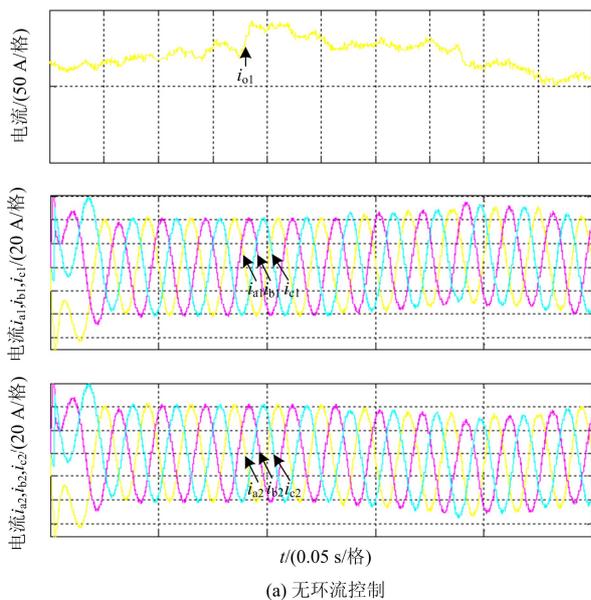


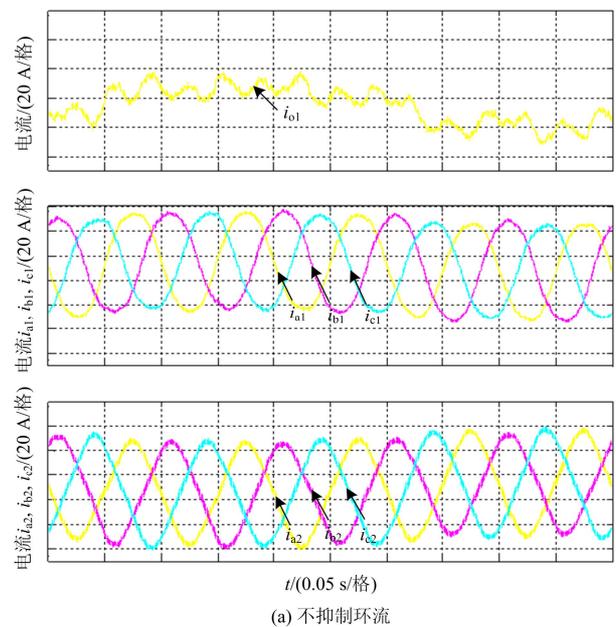
图 5 滤波电感为 2 mH 给定电流为 40 A 时的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of filtering inductance for

2 mH and 40 A current

实际情况下，光伏并网逆变器的并联电感值可能存在一定的不同，图 6 为滤波电感不等时给出的仿真波形，滤波电感分别为 2 mH 和 4 mH 时，从图中可以看出不进行控制时电流发生了很大的畸变，加入双载波调制方法环流抑制明显改善。

为了验证理论的正确性，本文搭建实验平台，实验参数和仿真结果一致。



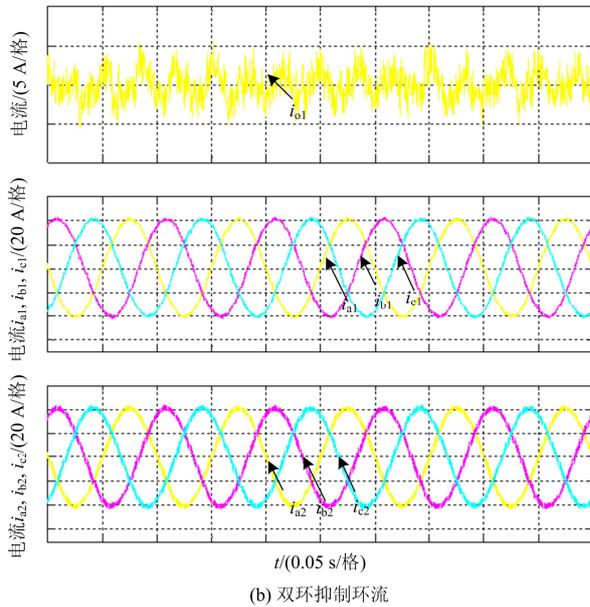


图 6 滤波电感分别为 2 mH 和 4 mH 给定电流为 40 A 时的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of filtering inductance for 2 mH, 4 mH and 40 A current

在并联系统中首先考虑滤波电感的大小相等，模块之间的给定电流也是相等的，由于实验条件的限制，本文给定电流为 5 A，图 7 为滤波电感和给定电流分别相等时候的环流实验波形，从图中可以看出环流抑制的效果非常理想。

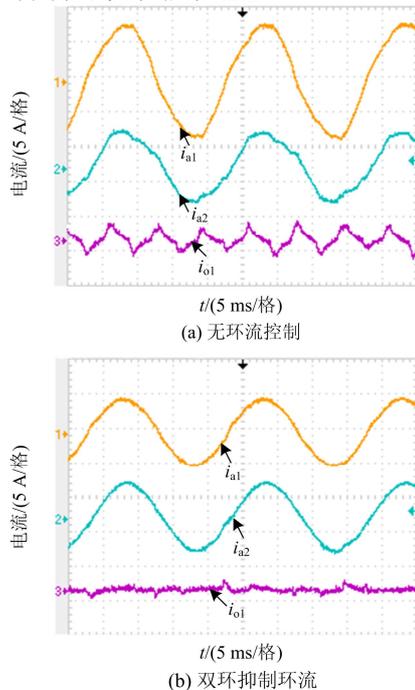


图 7 滤波电感为 2 mH 给定电流为 5 A 时的实验结果

Fig. 7 Experimental results of filtering inductance for 2 mH and 5 A current

5 结论

本文提出的方法是通过多载波和无差拍实现环流抑制。外环采用注入零序分量方法，该方法不会影响输出电流，内环采用多载波的抑制方法实现环流抑制，而且采用 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的比例谐振 (Proportional Resonant, PR) 控制器，实现复杂的坐标变换以及准确的跟踪，该方法不需要额外的器件，降低了系统的成本，能够很好地实现环流抑制和并网功能。

参考文献

- [1] 黄学良, 刘志仁, 祝瑞金, 等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-149.
HUANG Xueliang, LIU Zhiren, ZHU Ruijin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 142-149.
- [2] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [3] 王兆宇, 艾芊. 三电平逆变器空间矢量调制及中点电压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 131-136.
WANG Zhaoyu, AI Qian. Space vector modulation for three-level inverter and neutral point potential control[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 131-136.
- [4] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126, 131.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126, 131.
- [5] 蔡国伟, 孔令国, 潘超, 等. 风光储联合发电系统的建模及并网控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 196-204.
CAI Guowei, KONG Lingguo, PAN Chao, et al. System modeling of wind-PV-ES hybrid power system and its control strategy for grid-connected[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 196-204.
- [6] 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.
- [7] ZHANG D, WANG F, BURGOS R, et al. Common-mode circulating current control of parallel interleaved three-phase two-level voltage-source converters with discontinuous space-vector modulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3925-3935.
- [8] ITKONEN T, LUUKKO J, LAAKKONEN T, et al. Modeling and analysis of the dead-time effects in parallel PWM two-level three-phase voltage-source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(11): 2446-2455.
- [9] PAN C T, LIAO Y H. Modeling and coordinate control of circulating currents in parallel three-phase boost rectifiers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 52(2): 825-838.
- [10] COUGO B, MEYNARD T. Parallel three-phase inverters: Optimal PWM method for flux reduction in intercell transformers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(8): 2184-2191.
- [11] JACOBINA C B, DOS SANTOS E C, ROCHA N, et al. Single-phase to three-phase drive system using two parallel single-phase rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(5): 1285-1295.
- [12] CHEN T P. Zero-sequence circulating current reduction method for parallel HEPWM inverters between AC bus and DC bus[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 290-300.
- [13] YE Z, XING K, MAZUMDER S, et al. Modeling and control of parallel three-phase PWM boost rectifiers in PEBB-based DC distributed power systems[C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998. APEC '98. Conference Proceedings 1998, Thirteenth Annual, 1998, 2: 1126-1132.
- [14] WALKER L H. 10 MW GTO converter for battery peaking service[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 1990, 26(1): 63-72.
- [15] MAZUMDER S K, ACHARYA K, TAHIR M. Joint optimization of control performance and network resource utilization in homogeneous power networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1736-1745.
- [16] SATO Y, KATAOKA T. Simplified control strategy to improve AC-input-current waveform of parallel-connected current-type PWM rectifiers[J]. IEE Proceedings — Electric Power Applications, 1995, 142(4): 246-254.
- [17] 张学广, 王瑞, 徐殿国. 并联型三相 PWM 变换器环流无差拍控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 31-37.
ZHANG Xueguang, WANG Rui, XU Dianguo. A dead-beat control strategy for circulating-current in parallel connection systems of three-phase PWM converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 31-37.
- [18] MAZUMDER S K. A novel discrete control strategy for independent stabilization of parallel three-phase boost converters by combining space-vector modulation with variable-structure control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(4): 1070-1083.
- [19] 胡维昊, 王跃, 姚为正, 等. 直驱型变速恒频风力发电系统中零序环流的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 99-105.
HU Weihao, WANG Yue, YAO Weizheng, et al. Zero-sequence current in direct drive variable-speed constant-frequency wind energy conversion systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 99-105.
- [20] CHEN T P. Circulating zero-sequence current control of parallel three-phase inverters[J]. IEE Proceedings—Electric Power Applications, 2006, 153(2): 282-288.
- [21] 宋平岗, 何峰. 基于微分平坦理论模块化多电平换流器环流抑制控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 43-48.
SONG Pinggang, HE Feng. Differential flatness based method of circulating current suppressing control for modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 43-48.
- [22] 张浩, 吴金龙, 杨美娟, 等. 模块化多电平换流器新型桥臂环流抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 73-80.
ZHANG Hao, WU Jinlong, YANG Meijuan, et al. A novel bridge arm circulating current restraint strategy for modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 73-80.
- [23] 廖志刚, 何世恩, 董新洲, 等. 提高大规模风电接纳及送出的系统保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 41-46.
LIAO Zhigang, HE Shien, DONG Xinzhou, et al. Research on the system protection for enhancing the accommodation and transmission of large scale wind power[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 41-46.

收稿日期: 2015-06-24; 修回日期: 2016-01-22

作者简介:

陈素华(1980-), 女, 讲师, 硕士学位, 主要从事电力电子、智能电网设计研究。E-mail: chenshxc@126.com

(编辑 魏小丽)