

DOI: 10.7667/PSPC151886

有限集预测控制减少三相电压源逆变器共模漏电流方法

陈素华

(许昌学院电气(机电)工程学院, 河南 许昌 461000)

摘要: 为了解决光伏并网发电系统漏电流问题, 针对三相电压源逆变器, 提出一种新型有限集模型预测控制减少逆变器共模电压的方法, 即对光伏并网发电系统进行建模分析。研究发现只有非零矢量用于减少共模电压, 故将非零矢量带入价值函数得到最优的矢量并在下一个周期使用。该新型有限集模型预测控制将共模电压限制于 $\pm 1/6V_{dc}$, 可以减少光伏发电系统中漏电流, 保证人身安全。和传统 PI 控制方法相比, 模型预测控制可以提高电流跟踪的速度和精度。实验结果表明, 该新型有限集模型预测控制能够减少共模电压和控制负载电流, 具有快速的动态响应。

关键词: 三相逆变器; 模型预测控制; 共模电压; 漏电流; 动态响应

Finite set control model predictive control method to reduce common-mode leakage for three-phase voltage source inverter

CHEN Suhua

(College of Electrical Information Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: In order to resolve the leakage current problem, this paper proposes a new finite-set model predictive control to reduce common-mode voltage of three-phase inverter. The model of photovoltaic (PV) grid power generation systems is analyzed. The study finds that only the nonzero vector is used to reduce the common mode voltage. Therefore, the nonzero vector is brought into the value function and the optimal vector is got to be used in the next cycle. The common-mode voltage can be limited to $\pm 1/6V_{dc}$ by using the proposed finite-set model predictive control. This method can suppress the leakage current and guarantee the safety of human life. Compared with traditional PI method, it can improve the current tracking speed and precision. Therefore, the proposed model predictive control can reduce the common mode voltage and load current and has fast dynamic response.

Key words: three phase inverter; model predictive control; common mode voltage; leakage current; dynamic response

0 引言

采用 PI 控制器加 PWM 矢量调制三相电压源逆变器由于具有可控的电流幅值和频率已经在分布式发电领域得到广泛应用^[1-5]。在电压源逆变器方面, 快速地开关产生的共模电压能造成过电压应力和电磁辐射, 将造成系统的不稳定。随着我国对于新能源发电的逐步重视, 光伏发电系统得到快速发展, 但是漏电流是制约光伏发电系统快速发展的瓶颈^[6]。相关研究提出了减少共模电压的方法为共模漏电流的研究奠定了基础。文献[7-11]提出不采用零矢量的方法减少共模电压。该 PWM 方法结合 PI 电流控制器不仅能够实现共模电压的减少, 还能够控制逆变器输出电流。

文献[12]在交流侧加入了隔离变压器, 但是该方法增加了系统的成本和降低系统效率。文献[13]在并网逆变器中增加无源器件实现共模漏电流的减少, 该方法也增加系统成本。

相对于上述方法, 通过控制和调制实现共模漏电流的方法较好, 在成本和效率方面都非常的突出^[14-18]。

上述方法需要实时调节 PI 参数, 而且系统较高的开关频率会增加系统的共模漏电流。有限集模型预测控制具有快速的动态响应在光伏并网逆变器得到广泛应用。但是预测控制在两电平并网逆变器漏电流还未见相关文献报道。

对于三相逆变器, 电流控制是影响分布式发电电能质量的重要原因。电流控制通过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[19]。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[20-21]采用无差拍电流预测控制, 但是没有考虑实际情况延迟。文献[22]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[23]采用直接功率控制, 通过开关表实时选择控制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。

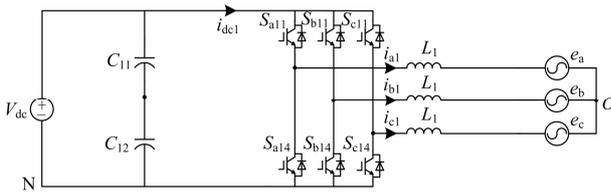


图 1 两电平逆变器拓扑结构

Fig. 1 Topology of two-level inverter

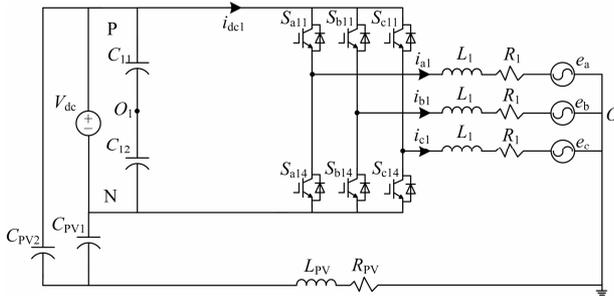


图 2 光伏并网逆变器系统

Fig. 2 Topology of PV inverter system

而且为了消除实际延迟带来的误差影响, 本文提出一种模型预测电流控制。和传统模型电流预测控制相比, 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。

1 两电平并网逆变器平均模型

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} = -\frac{R_1}{L_1} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} u_{ON} \\ u_{ON} \\ u_{ON} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} u_{aN} \\ u_{bN} \\ u_{cN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: i_{a1}, i_{b1}, i_{c1} 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_1 是网测滤波器电感; u_{aN}, u_{bN}, u_{cN} 是逆变器输出电压; R_1 是交流侧线路阻抗。

本文需要采用预测控制实现电流控制, 首先将三相静止坐标系转化成两相同步静止坐标的模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{\alpha 1} \\ i_{\beta 1} \end{bmatrix} = -\frac{R_1}{L_1} \begin{bmatrix} i_{\alpha 1} \\ i_{\beta 1} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} u_{\alpha 1} - e_{\alpha} \\ u_{\beta 1} - e_{\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

两电平并网逆变器的输出电流、输出电压和并网电压矢量分别为

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

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

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

本文采用的相电流和相电压可以通过电流传感器和电压传感器获得。由式(2)和式(4)可以得到离散化的输出电流平均模型为

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

实际情况下存在一定的延迟, 该延迟会造成控制不精确, 本文提出的有限集模型预测控制考虑一个周期的时间延迟, 由式(5)可以获得。

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}(k+1) \\ i_{\beta}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha}(k) \\ i_{\beta}(k) \end{bmatrix} + \frac{T_s}{L} \begin{bmatrix} u_{\alpha}(k+1) \\ u_{\beta}(k+1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{\alpha}(k+1) \\ e_{\beta}(k+1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $e_{\alpha}(k+1), e_{\beta}(k+1)$ 通过二次拉格朗日插值得到, 如式(7)所示。

$$e(k+1) = 3e(k) - 3e(k-1) + e(k-2) \quad (7)$$

为了减少计算量, 本文采用的有限集预测控制转化成电压矢量的方法, 通过对式(5)进行变换得到式(8)。

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}(k+1) \\ u_{\beta}(k+1) \end{bmatrix} = \frac{RT_s + L}{T_s} \begin{bmatrix} i_{\alpha}^*(k+1) \\ i_{\beta}^*(k+1) \end{bmatrix} - \frac{L}{T_s} \begin{bmatrix} i_{\alpha}(k) \\ i_{\beta}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{\alpha}(k+1) \\ e_{\beta}(k+1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

2 基于三相并网逆变器有限集预测控制描述

三相并网逆变器在光伏并网发电和分布式发电

系统中得到广泛应用, 本文提出一种有限集预测控制实现共模电压抑制和快速的电流跟踪。

传统有限集预测控制是比较静止坐标系下电流值和给定的电流值, 从而可以选择最优的开关矢量。

$$g = |i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}(k+1)| + |i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}(k+1)| \quad (9)$$

式中: $i_{\alpha}(k+1)$ 和 $i_{\beta}(k+1)$ 可以通过式(6)得到;

$i_{\alpha}^*(k+1)$ 和 $i_{\beta}^*(k+1)$ 通过二次拉格朗日插值得到, 如式(10)所示。

$$\begin{aligned} i_{\alpha}^*(k+1) &= 3i_{\alpha}^*(k) - 3i_{\alpha}^*(k-1) + i_{\alpha}^*(k-2) \\ i_{\beta}^*(k+1) &= 3i_{\beta}^*(k) - 3i_{\beta}^*(k-1) + i_{\beta}^*(k-2) \end{aligned} \quad (10)$$

该方法为了得到最优的开关矢量, 首先需要计算 8 次电流值, 然后将 8 对电流值 $i_{\alpha}(k+1)$ 和 $i_{\beta}(k+1)$ 通过价值函数 g 从而可以获得最优的开关矢量。整个过程需要大量的计算。

为了减少计算量和实现共模漏电流, 本文提出了改进型有限集预测控制算法。首先需要得到最优的电压矢量值, 如式(8)所示。

然后将如图 5 所示的 8 个矢量对应的电压矢量带入价值函数 g 获得最优的矢量值, 价值函数如式(11)所示。

$$g = |u_a(k+1) - u_a| + |u_{\beta}(k+1) - u_{\beta}| \quad (11)$$

上述改进的有限集模型预测控制能够快速的跟踪电流。首先根据共模电压选择共模漏电流最小的矢量值, 然后将上述矢量值通过价值函数能够得到最优的开关矢量, 将该开关矢量输出就可以实现快速的电流跟踪和漏电流抑制。

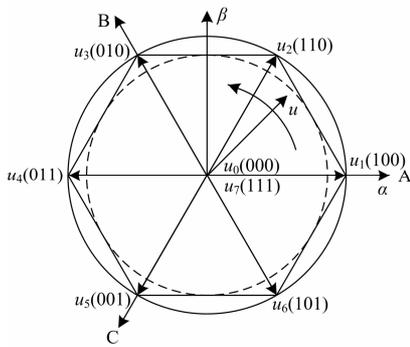


图 3 两电平逆变器矢量图

Fig. 3 Space-vector diagram of a two-level inverter

3 两相逆变器共模电压和中点平控制

非隔离并网逆变系统的电池板和大地之间存在寄生电容, 寄生电容上共模电压变化会产生共模漏电流。非隔离光伏并网逆变器如图 2 所示, 其中寄生电容 C_{PV} 的大小和光伏电池板、空气湿度以及

土壤性质等外部因素有关, L_{PV} 和 R_{PV} 指的是漏电流电感和电阻。

图 2 为非隔离型逆变器简化模型, 图中电流的四条路径之和为 0, 表达式如式(12)所示。

$$\begin{aligned} \frac{V_{AN} + V_{AN} - E_a}{Z_L} + \frac{V_{BN} + V_{CM} - E_b}{Z_L} + \\ \frac{V_{CN} + V_{CM} - E_c}{Z_L} + \frac{V_{CM}}{Z_{PV}} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: V_{CM} 为 Z_{PV} 的电压; Z_{PV} 包括 C_{PV}, R_{PV} 和 L_{PV} 。

如果电网 O 点是独立的, 如图 2 所示, V_N 可以表示为

$$V_N = -\frac{V_{AN} + V_{BN} + V_{CN}}{3} \quad (13)$$

逆变器的输出电压为

$$u_{xN} = V_{dc}(S_x) = S_x V_{dc} \quad (14)$$

式中 $x = \{a, b, c\}$ 。

开关状态 S_x 定义为每一相的开关状态为

$$S_x = \begin{cases} 1, S_{x1} = 1, S_{x4} = 0 \\ -1, S_{x1} = 0, S_{x4} = 1 \end{cases} \quad (15)$$

将式(14)带入到(13)可得 V_N 为

$$V_N = -\frac{V_{dc}(S_a) + V_{dc}(S_b) + V_{dc}(S_c)}{3} \quad (16)$$

通过上述分析可知共模电压 V_{CM} 或 V_N 的幅值和频率, 共模电感 L_{PV} , 共模电容 C_{PV} , 共模电阻 R_{PV} 有关系。共模电感 L_{PV} , 共模电容 C_{PV} , 共模电阻 R_{PV} 受环境的影响难以控制。因此可以通过控制共模电压 V_N 的幅值和频率实现共模漏电流抑制。

本文提出一种新的方法实现共模漏电流抑制, 即通过模型预测控制选择共模漏电流最小的矢量值, 采用该矢量值就可以实现共模漏电流的抑制, 下面将详细分析。

3.2 两电平并网逆变器共模漏电流抑制

通过式(16)能够看出, 当 V_N 不变化的时候, 能够完全抑制漏电流, 但是实际情况下很难采用该种情况。从表 1 能够看出, 如果不采用零矢量, 能够减少共模电压的变化, 从而可以在一定程度上抑制漏电流, 本文采用的预测控制选择 $1/6V_{dv}, 0, -1/6V_{dv}$ 对应的电压矢量, 如表 2 所示。

4 实验结果

为了验证本文所提电流预测控制算法的正确性, 搭建了一台 10 kW 两电平并网逆变器样机。实验参数如表 3 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 1 开关状态和共模电压之间的关系

Table 1 Relationship between switching states and CMV

| 矢量 | V_{CM} |
|-------------|-------------|
| V_1 (PNN) | $-V_{dc}/6$ |
| V_2 (PPN) | $V_{dc}/6$ |
| V_3 (NPN) | $-V_{dc}/6$ |
| V_4 (NPP) | $V_{dc}/6$ |
| V_5 (NNP) | $-V_{dc}/6$ |
| V_6 (PNP) | $V_{dc}/6$ |
| V_7 (PPP) | $V_{dc}/2$ |
| V_8 (NNN) | $-V_{dc}/2$ |

表 2 本文提出共模漏电流所用开关之间和共模电压之间的关系

Table 2 Relationship between switching states and CMV based on the proposed method

| 矢量 | V_{CM} |
|-------------|-------------|
| V_1 (PNN) | $-V_{dc}/6$ |
| V_2 (PPN) | $V_{dc}/6$ |
| V_3 (NPN) | $-V_{dc}/6$ |
| V_4 (NPP) | $V_{dc}/6$ |
| V_5 (NNP) | $-V_{dc}/6$ |
| V_6 (PNP) | $V_{dc}/6$ |

表 3 实验参数

Table 3 Experimental parameters

| | |
|-----------------|--------------|
| e_a, e_b, e_c | 200 V |
| 直流侧电压 | 600 V |
| 直流侧电容 | 3300 μ F |
| 参考电流(i_d^*) | 8/5 A |
| 滤波器 | 2 mH |
| 死区时间 | 3 μ s |
| 电网频率 | 50 Hz |
| R_f | 15 Ω |
| C_f | 0.01 μ F |

传统方法和所提方法下逆变器漏电流的测试条件寄生电容为 0.01 μ F，寄生电阻为 15 Ω 。

图 4 为采用传统预测方法的漏电流和共模电压波形，从图中可以看出，传统的漏电流已经达到 400 mA，已经超出国家标准，对人身安全造成很大的隐患。共模电压主要分布在 100 V 到 600 V 之间。

图 5 是采用本文提出的预测控制以后的波形，图中可以看出漏电流抑制到 50 mA，已经低于国家标准要求。共模电压分布也相对集中。因此本文提出的方法能够有效的抑制漏电流。

图 6 为本文提出的模型预测控制方法的电流波形，给定电流为 10 A，图中可以看出电流波形能够完美的跟踪给定电流，而且能够和电网电压保持同频同相。

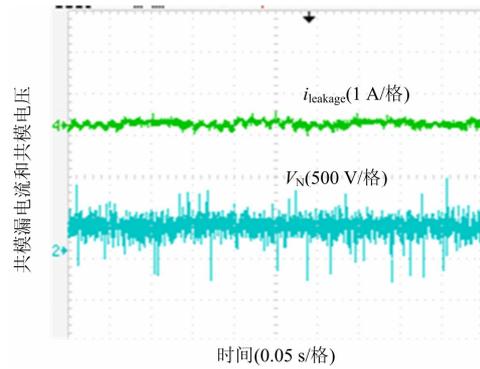


图 4 采用传统方法共模电压 V_N 和漏电流实验波形
Fig. 4 Experimental waveforms of V_N and leakage current with conventional method

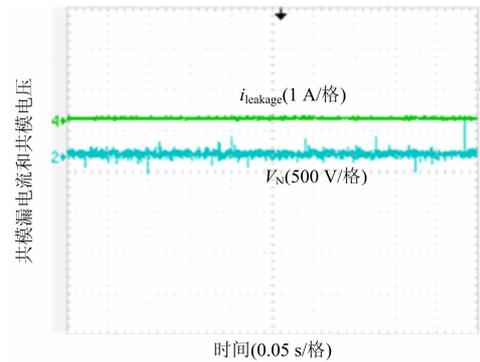


图 5 采用提出方法共模电压 V_N 和漏电流仿真波形
Fig. 5 Experimental waveforms of V_N and leakage current with proposed method

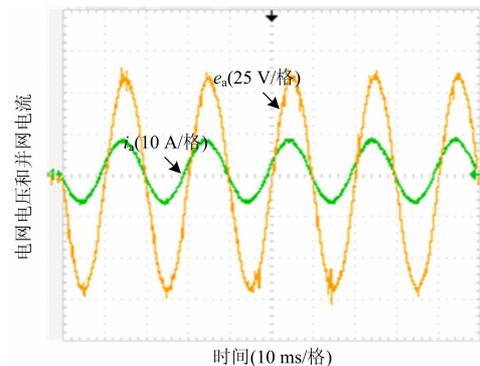


图 6 给定电流为 10 A 时采用模型预测方法电流波形
Fig. 6 Experimental waveforms of current and grid voltage with proposed model predictive control when the reference current is 10A

为了验证本文所提算法具有快速的响应速度，图 7(a)为传统 PI 控制器，可以看出电流从 5A 阶跃到 9A 的时候，电流响应速度较慢，而且有超调。图 7(b)为本文提出的模型预测控制，电流能够实现快速跟踪，动态响应速度快且无超调。

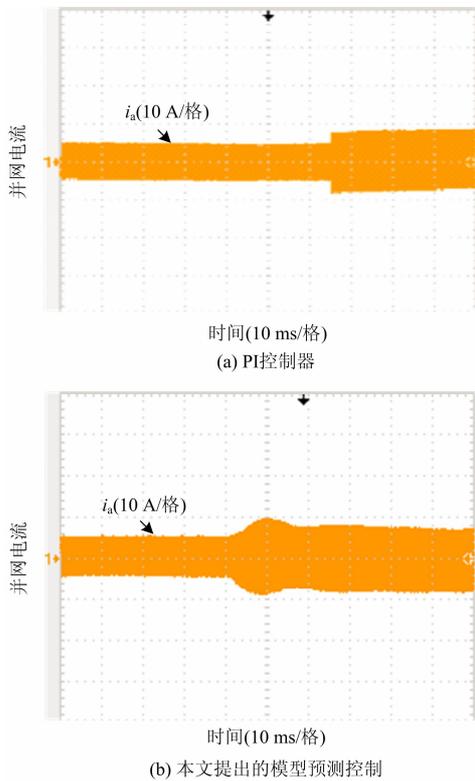


图7 给定电流从5A阶跃到9A电流波形.

Fig. 7 Experimental waveforms of the reference currents from 5A to 9A

5 结论

本文根据三相并网逆变器动态数学模型, 提出新型模型电流预测控制, 并实现并网控制和漏电流抑制。主要优点是:

- 1) 新型模型预测电流控制计算简单, 容易实现。和传统的模型控制器相比, 新的有限集模型控制加了控制的延迟, 波形质量和控制精度变高。
- 2) 快速性是有限集电流预测控制优良品质, 基于有限集模型电流预测控制的三相并网逆变在分布式发电中具有很好地利用价值。
- 3) 本文提出有限集模型预测控制能够实现漏电流的抑制, 对于光伏并网系统的发展具有重大的意义。

参考文献

- [1] ATIA Y, SALEM M. Microcontroller-based improved predictive current controlled VSI for single-phase grid-connected systems[J]. *Journal of Power Electronics*, 2013, 13(6): 1016-1023.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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.
- [5] 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.
- [6] KIMBALL J W, ZAWODNIOK M. Reducing common-mode voltage in three-phase sine-triangle PWM with interleaved carriers[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(8): 2229-2236.
- [7] KOUTROULIS E, BLAABJERG F. Design optimization of transformerless grid-connected PV inverters including reliability[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(1): 325-335.
- [8] ZHANG L, SUN K, FENG L, et al. A family of neutral point clamped full-bridge topologies for transformerless photovoltaic grid-tied inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(2): 730-738.
- [9] GU Y, LI W, ZHAO Y, et al. Transformerless inverter with virtual DC bus concept for cost-effective grid-connected PV power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(2): 793-805.
- [10] KERKES T, TEODORESCU R, LISERRE M, et al. Evaluation of three-phase transformerless photovoltaic inverter topologies[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(9): 2202-2211.
- [11] HELDWEIN M L, ERTL H, BIELA J, et al. Implementation of a transformerless common-mode active filter for offline converter systems[J]. *IEEE Transactions on*

- Industrial Electronics, 2010, 57(5): 1772-1786.
- [12] DONG D, LUO F, BOROYEVICH D, et al. Leakage current reduction in a single-phase bidirectional AC-DC full-bridge inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 4281-4291.
- [13] YANG B, LI W, GU Y, et al. Improved transformerless inverter with common-mode leakage current elimination for a photovoltaic grid-connected power system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 27(2): 752-762.
- [14] CAVALCANTI M C, DE OLIVEIRA K C, DE FARIAS A M, et al. Modulation techniques to eliminate leakage currents in transformerless three-phase photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(4): 1360-1368.
- [15] CAVALCANTI M C, FARIAS A M, OLIVEIRA K C, et al. Eliminating leakage currents in neutral point clamped inverters for photovoltaic system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 435-443.
- [16] 郭小强, 魏宝泽, 贾晓瑜, 等. FB10 三相非隔离光伏并网逆变器共模电流抑制研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 135-142.
GUO Xiaoqiang, WEI Baoze, JIA Xiaoyu, et al. Common mode current suppression for FB10 three-phase non-isolated PV grid-connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 135-142.
- [17] 周玉斐, 黄文新, 赵萍. 三相耦合电感单级升压逆变器非隔离光伏并网发电系统[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 190-199.
ZHOU Yufei, HUANG Wenxin, ZHAO Ping. A transformerless photovoltaic grid-connected system of three-phase single-stage boost inverter with coupled inductor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 190-199.
- [18] 崔文峰, 胡森军, 李武华, 等. 基于有源钳位的无变压器型单相光伏并网逆变器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 26-32.
CUI Wenfeng, HU Senjun, LI Wuhua, et al. An active voltage clamp transformerless inverter for single-phase photovoltaic grid-connected systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 26-32.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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: 2015-10-26; 修回日期: 2015-12-17

作者简介:

陈素华(1980-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事电力电子、智能电网设计研究。

(编辑 张爱琴)