

飞跨电容逆变器漏电流控制在光伏并网中的研究

梅文明¹ 李美成¹ 许傲然² 谷彩连²

(1.华北电力大学可再生能源学院 新能源电力系统国家重点实验室 北京 102206; 2.沈阳工程学院 沈阳 110136)

摘要: 飞跨电容逆变器已经广泛应用到光伏并网发电系统中。但是,该系统中存在漏电流和电网不平衡问题会导致并网电流畸变和系统损耗增加。本文提出一种新型控制策略和空间矢量调制方法实现飞跨电容逆变器的漏电流抑制和并网控制。首先,建立并网发电系统的漏电流共模回路模型。然后,分析了传统空间矢量调制技术会导致漏电流大的原因。在此基础上,提出一种新型空间矢量调制技术,其能够得到相对平衡的共模电压,因此漏电流会得到相应的减少。最后通过仿真验证了本文提出空间矢量调制技术的正确性。

关键词: 飞跨电容逆变器; 漏电流; 无隔离光伏系统; 空间矢量调制; 脉宽调制技术

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1001-7119(2018)10-0162-05

DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2018.10.030

Research on Leakage Current Control of Flying Capacitor Inverter in Photovoltaic Grid-connected System

Mei Wenming¹ Li Meicheng¹ Xu Aoran² Gu Cailian²

(1. North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;
2. Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

Abstract: Flying capacitor inverters have been widely used in photovoltaic grid-connected power generation systems. However, the presence of leakage currents and grid imbalance in this system can lead to grid-connected current distortion and increased system losses. This paper presents a new control strategy and space vector modulation method to realize the leakage current suppression and grid-connected control of flying capacitor inverters. First, a leakage current common-mode loop model for a grid-connected power generation system is established. Then, the reason why the traditional space vector modulation technology causes leakage current is analyzed. Based on this, a novel space vector modulation technique is proposed, which can obtain a relatively balanced common-mode voltage. Therefore, the leakage current will be reduced accordingly. Finally, the correctness of the space vector modulation technique proposed in this paper is verified by simulation.

Keywords: flying capacitor inverter; leakage current; non-isolated photovoltaic system; space vector modulation; pulse width modulation technology

最近几年,光伏并网发电得到了广泛关注。但是光伏并网发电系统存在漏电流问题,漏电流会造成系统损耗增加以及并网电流畸变^[1-3]。为了抑制

漏电流,传统方法是采用隔离变压器的方法实现电网和光伏电池之间的隔离,但是该方法会增加系统的成本、体积和效率。和传统的隔离变压器光伏并

收稿日期: 2017-11-06

作者简介: 梅文明(1983-)男,高级工程师,博士研究生,研究方向: 可再生能源与清洁能源。

E-mail: 656085652@qq.com。

网发电系统相比,无隔离光伏并网发电系统具有高效率、低成本以及体积小的优点。这种拓扑的挑战是漏电流的抑制问题。为了解决漏电流问题,文献[4-7]从拓扑和调制方面对其进行了研究。主要分为单相和三相并网发电系统。对于单相并网发电系统,采用额外的开关实现恒定共模,从而可以抑制漏电流。上述方法虽然可以抑制漏电流,但是工作在硬开关模式,会增加系统损耗。文献[8]提出一种软开关无隔离遍野器,能够同时实现系统效率提高和漏电流的抑制。

对于三相并网发电系统,文献[9-11]提出一种三相四桥臂拓扑结构,实现共模电压的抑制。该方法能够很好地抑制漏电流,但是上述方法都是限制在三相两电平光伏逆变器系统,对于三相多电平光伏逆变器并不适用。事实上,文献[12、13]研究了多电平光伏逆变器,但是对于多电平光伏逆变器的漏电流抑制研究较少。多电平逆变器拓扑主要包括级联 H 桥逆变器、二极管箝位逆变器和飞跨电容逆变器^[14-16]。和二极管箝位逆变器相比,不需要二极管,会降低系统成本。和 H 桥逆变器相比,不需要隔离的直流源。因此,飞跨电容逆变器很适合用于光伏并网发电系统。但是,到目前为止,还未有研究飞跨电容逆变器的漏电流抑制相关研究。

而且,并网发电系统中往往存在电网不平衡的情况,为此,本文提出一种空间矢量调制和并网控制策略,实现飞跨电容逆变器的漏电流的抑制和并网电流跟踪控制。

1 三相飞跨电容逆变器并网控制

图 1 为三电平飞跨电容逆变器的拓扑结构。以三电平飞跨电容逆变器的 N 点作为参考点,在电网平衡条件下根据基尔霍夫定律得到三电平飞跨电容的数学模型为:

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

式中 $V_a、V_b、V_c$ 为三电平飞跨电容逆变器的输出相电压; $e_a、e_b、e_c$ 为电网电压; $i_a、i_b、i_c$ 为三电平飞跨电容逆变器的输入电流; u_{ON} 为电网 O 点到 N 点的电压; L 为三电平飞跨电容逆变器滤波电感。

为了简化三相飞跨电容逆变器的控制,需要对其坐标变换,将三相飞跨电容逆变器的坐标转化为 $d-q-z$ 轴,变换矩阵表示为:

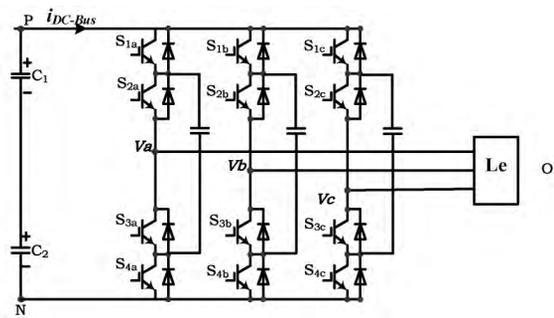


图 1 三电平飞跨电容逆变器拓扑

Fig.1 Topology of three-level flying capacitor inverter

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(ut) & \cos\left(ut - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(ut + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(ut) & -\sin\left(ut - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(ut + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

三相飞跨电容逆变器在 $d-q-z$ 坐标系的:

$$-\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} V_{dc} \quad (3)$$

式中: i_d 和 i_q 为三相飞跨电容逆变器在 d 轴和 q 轴的电流; $d_d、d_q$ 为三相飞跨电容逆变器在 d 轴和 q 轴的占空比。 V_{dc} 为直流侧电压。

在电网平衡条件下,三相飞跨电容逆变器可采用 PI 控制器实现并网电流控制,飞跨电容逆变器的比例积分控制器能够表示为:

$$G(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (4)$$

但是在电网不平衡情况下,电网系统会存在正序分量和负序分量,表示为:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = E_{nm} \begin{bmatrix} \cos\omega t \\ \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} + E_{pm} \begin{bmatrix} \cos\omega t \\ \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: ω 是大电网基波频率; E_{nm} 和 E_{pm} 分别表示电网电压的负序分量和正序分量的幅值。

上述 PI 控制器方法不能消除 d 轴和 q 轴的 2ω 交流量,为了消除该影响,本文提出一种比例积分谐振控制器为:

$$G(s) = \frac{k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2} + k_p + \frac{k_i}{s} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \vec{V}_{ref} T_s &= \vec{V}_0 T_0 + \vec{V}_7 T_7 + \vec{V}_{13} T_{13} \\ T_s &= T_0 + T_7 + T_{13} \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $\vec{V}_0, \vec{V}_7, \vec{V}_{13}$ 的占空比时间为 T_0, T_7, T_{13} , 矢量 $\vec{V}_0, \vec{V}_7, \vec{V}_{13}, \vec{V}_{ref}$ 能够表示为:

$$\begin{aligned} \vec{V}_0 &= 0 \\ \vec{V}_7 &= \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot e^{j\frac{\pi}{6}} \cdot V_{dc} \\ \vec{V}_{13} &= \frac{2}{3} \cdot V_{dc} \\ \vec{V}_{ref} &= V_{ref} \cdot e^{j\theta} \end{aligned} \quad (14)$$

假设 M 为调制比, 从而能够得到占空比时间为:

$$\begin{aligned} T_0 &= \left(1 - \frac{1}{2} M \sin\theta - \frac{\sqrt{3}}{2} M \cos\theta \right) T_s \\ T_7 &= (2 M \sin\theta) T_s \\ T_{13} &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} M \cos\theta - \frac{3}{2} M \sin\theta \right) T_s \end{aligned} \quad (15)$$

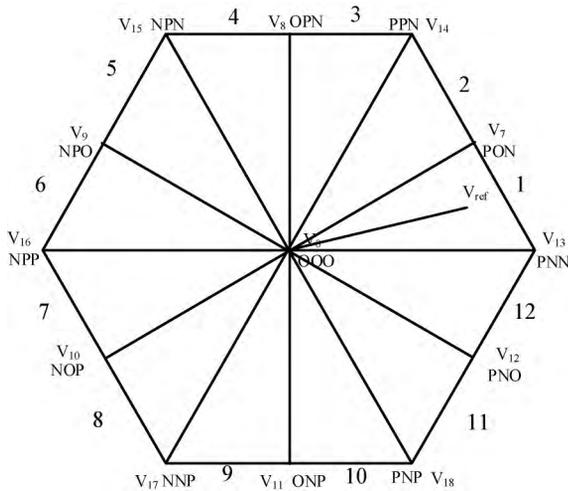


图 3 提出三电平飞跨电容逆变器空间矢量图

Fig.3 Proposed space-vector diagram of three-level flying capacitor inverter

其它扇区可以采用相同方法实现漏电流的抑制。

4 仿真结果

为了验证所提控制算法和调制的正确性, 本文搭建了一台 10 kW 三电平飞跨电容逆变器仿真平台, 飞跨电容逆变器的仿真参数如表 3 所示。整个系统包括直流电源、飞跨电容逆变器主电路和 L 滤

波器。

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation Parameters	
电网电压	220 V, 110 V, 220 V
直流电压	600 V
直流侧电容	2200μF
滤波器	1.6 mH
滤波电容	13.5μF
给定电流	15 A
电网频率	50 Hz

图 4 为电网不平衡情况, 即 $e_a = 220 \text{ V}, e_b = 110 \text{ V}, e_c = 220 \text{ V}$ 采用传统 PI 方法和提出方法三电平飞跨电容逆变器的并网电流波形。从图中可以看出, 采用传统方法的并网电流发生畸变, 采用提出方法后, 并网电流畸变消失。

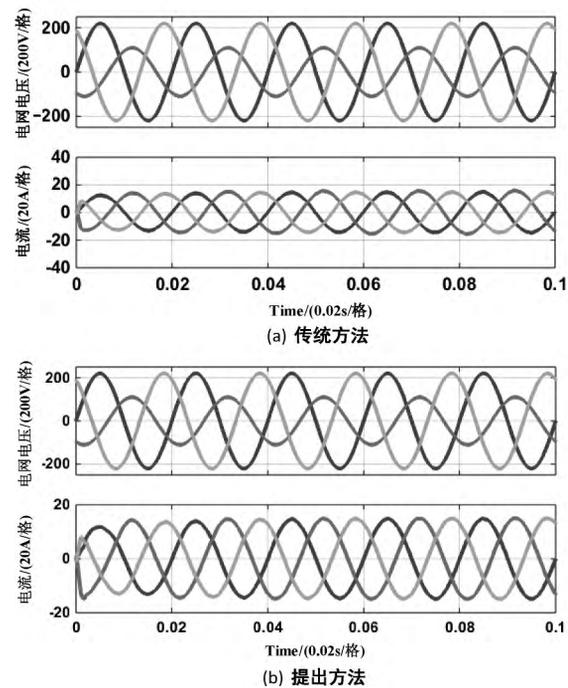


图 4 飞跨电容逆变器并网电流波形

Fig.4 Waveforms of flying capacitor inverter

图 5 为飞跨电容逆变器采用传统空间矢量调制方法和提出方法的线电压对比波形, 由波形可以看出, 两种方法的线电压都为标准的五电平波形。

图 6 为飞跨电容逆变器采用传统空间矢量调制方法和提出调制方法漏电流波形, 由波形可以看出, 漏电流得到明显抑制。

5 结论

非隔离三电平飞跨电容逆变器虽然具有成本低、体积小等优点, 已经广泛应用到光伏并网发电系

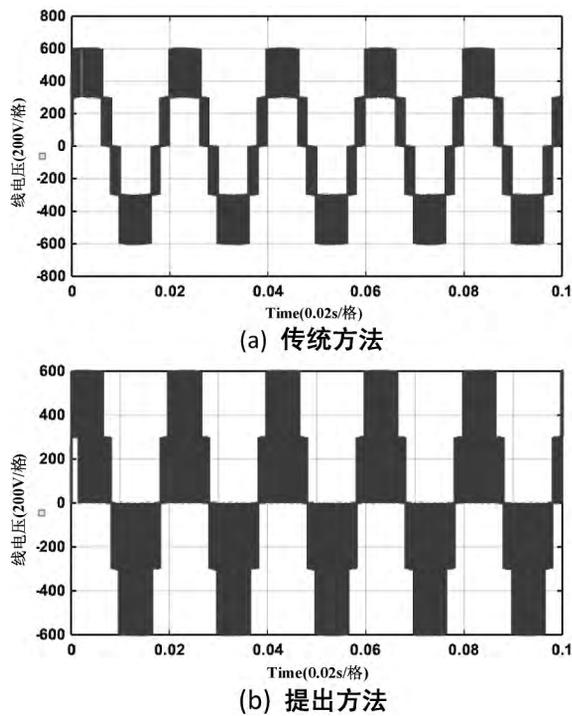


图 5 飞跨电容线电压波形

Fig.5 Waveforms of line-to-line voltage in flying capacitor inverter

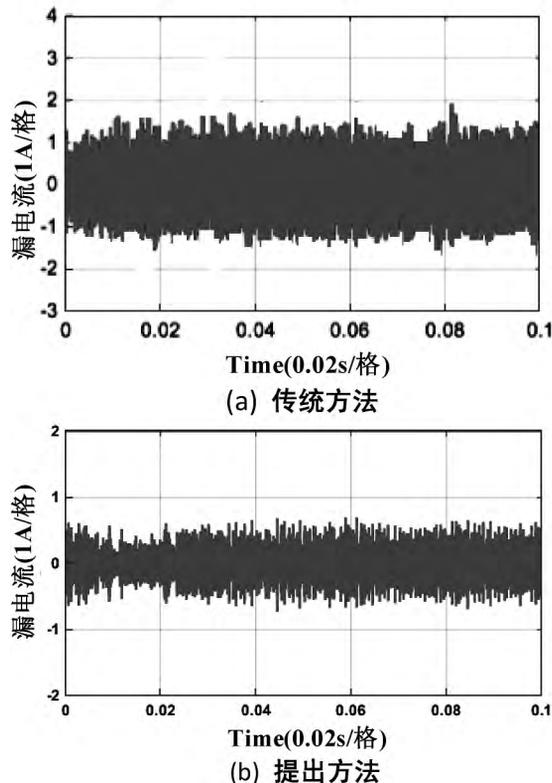


图 6 三电平飞跨电容逆变器输出漏电流波形

Fig.6 Waveforms of leakage current in flying capacitor inverter

统中。但是该系统存在漏电流和电网不平衡问题会导致并网电流畸变和系统损耗增加。本文提出一种新型控制策略和空间矢量调制方法实现飞跨电容逆变器的漏电流抑制和并网控制。最后通过仿真验证了本文提出空间矢量调制技术的正确性。该方法具有很好的实际意义,对于我国光伏产业发展具有很好的促进作用。

参考文献:

- [1] W. Li , Y. Gu , H. Luo , *et al.* , “Topology review and derivation methodology of single-phase transformerless photovoltaic inverters for leakage current suppression ,” *IEEE Trans. Ind. Electron.* , 2015 , 62(7) : 4537-4551.
- [2] Y. Tang , W. Yao , and P. C. Loh , “Highly reliable transformerless photovoltaic inverters with leakage current and pulsating power elimination ,” *IEEE Trans. Ind. Electron.* , 2016.63(2) : 1016-1026.
- [3] S. Kouro , J. I. Leon , D. Vinnikov , and L. G. Franquelo , “Grid-connected photovoltaic systems: An overview of recent research and emerging PV converter technology ,” *IEEE Ind. Electron. Mag.* , 2015 , 9(1) : 47-61.
- [4] B. Ji , J. Wang , and J. Zhao , “High-efficiency single-phase transformerless PV H6 inverter with hybrid modulation method ,” *IEEE Trans. Ind. Electron.* , 2013 60(5) : 2014-2115.
- [5] L. Zhang , K. Sun , L. L. Feng , *et al.* , “A family of neutral point clamped full-bridge topologies for transformerless photovoltaic grid tied inverters ,” *IEEE Trans. Power Electron.* , 2013 28(2) : 730-739.
- [6] L. Zhang , K. Sun , Y. Xing , *et al.* , “H6 transformerless full-bridge PV grid-tied inverters ,” *IEEE Trans. Power Electron.* , 2014 29(3) : 1229-1238.
- [7] H. Xiao , K. Lan , B. Zhou , *et al.* , “A family of zero current transition transformerless photovoltaic grid-connected inverter ,” *IEEE Trans. Power Electron.* , 2015 30(6) : 3156-3165.
- [8] H. F. Xiao , X. P. Liu , and K. Lan , “Zero-voltage-transition full bridge topologies for transformerless photovoltaic grid-connected inverter ,” *IEEE Trans. Ind. Electron.* , 2014 61(10) : 5393-5401.
- [9] D. Dong , F. Luo , D. Boroyevich , and P. Mattavelli , “Leakage current reduction in a single-phase bidirectional AC-DC full-bridge inverter ,” *IEEE Trans. Power Electron.* , 2012 27(10) : 4281-4291.
- [10] T. Kerekes , R. Teodorescu , M. Liserre , C. Klumpner , and M. Sumner , “Evaluation of three-phase

- transformerless photovoltaic inverter topologies," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2009, 24(9): 2202–2211.
- [11] B. Yang, W. Li, Y. Gu, et al. "Improved transformerless inverter with common-mode leakage current elimination for a photovoltaic grid-connected power system," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2013, 27(2): 752–762.
- [12] M. C. Cavalcanti, K. C. de Oliveira, A. M. de Farias, et al. Camboim, "Modulation techniques to eliminate leakage currents in transformerless three-phase photovoltaic systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2010, 57(4): 1360–1368.
- [13] J. S. Lee and K. B. Lee, "New modulation techniques for a leakage current reduction and a neutral-point voltage balance in transformerless photovoltaic systems using a three-level inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2014, 29(4): 1720–1732.
- [14] 郭利辉. T 型三电平逆变器无差拍电流预测和中点平衡控制方法 [J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(18): 127–132.
- [15] 龚博, 程善美, 秦忆. 基于载波的三电平中点电压平衡控制策略 [J]. *电工技术学报*, 2013, 28(6): 172–177.
- [16] 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.

(上接第 161 页)

- [5] 乔闹生, 邹北骥, 邓磊, 等. 一种基于图像融合的含噪图像边缘检测方法 [J]. *光电子: 激光*, 2012(11): 2215–2220.
- [6] 叶鸿瑾, 张雪英, 王亚男. 融合提升小波和形态学熵权的医学图像边缘检测 [J]. *计算机应用与软件*, 2014(2): 214–216.
- [7] 姚宇峰, 夏开建, 钟珊, 等. 改进的形态学和小波变换边缘检测算法研究 [J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(21): 214–216.
- [8] Zhang H, Luo L, Yang K, et al. Improved multi-scale wavelet in pantograph slide edge detection [J]. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(19): 5681–5683.
- [9] 黄海龙, 王宏. 一种基于小波变换和数学形态学的边缘检测算法 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2011(9): 1315–1318.
- [10] 高国荣, 刘冉, 羿旭明. 一种改进的基于小波变换的图像边缘提取算法 [J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2005, 51(5): 615–619.
- [11] 李杰, 苗长云, 武志刚, 等. 基于数学形态学的图像边缘检测算法的研究 [J]. *计算机科学*, 2012(S1): 546–548.
- [12] 朱士虎, 黄智, 魏明生. 融合小波变换和形态学差分的图像边缘检测 [J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(35): 174–177.
- [13] 陈宏希. 基于品质因数的边缘检测算子性能优劣客观评价研究 [J]. *自动化与仪器仪表*, 2015(8): 8–10.