

DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2018.4.107

中图分类号:TM464

文献标志码:A

三相无变压器型 H7 光伏逆变器漏电流 分析抑制

张志文,周 滔,刘 军,范 威
(湖南大学电气与信息工程学院,长沙 410082)

摘要:对于无变压器非隔离型光伏逆变器,其漏电流的大小与逆变器的调制策略有关。以三相无变压器非隔离型 H7 光伏逆变器为研究对象,针对传统正弦脉宽调制 SPWM(sinusoidal pulse width modulation)直流电压利用率低的问题,采用线电压 PWM 控制的方法。通过开关之间的逻辑关系,提出一种改进型的线电压 PWM 控制方法,研究了 H7 光伏逆变器在 SPWM、线电压 PWM 和改进型线电压 PWM 3 种控制方式下的漏电流及输出电压波形。最后,通过 MATLAB 仿真研究,验证了所提控制方法的正确性和可行性。

关键词:H7 光伏逆变器;线电压 PWM 控制;漏电流;并网电压;MATLAB 仿真

Analysis and Inhibition of Leakage Current for Three-phase Transformerless H7 Photovoltaic Inverter

ZHANG Zhiwen, ZHOU Tao, LIU Jun, FAN Wei

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The amount of leakage current in a transformerless non-isolated photovoltaic(PV) inverter is related to the inverter's modulation strategy. In this paper, a three-phase transformerless non-isolated H7 PV inverter is adopted as the research object, and a control method of line-voltage pulse width modulation(PWM) is used to deal with the problem of low utilization rate of DC voltage under the conventional sinusoidal pulse width modulation(SPWM). Through the analysis of the logical relationship between switches, a modified line-voltage PWM control method is proposed, and the amount of leakage current and the output voltage waveform of the H7 PV inverter using these three control methods(SPWM, line-voltage PWM and modified line-voltage PWM) are studied. Finally, through the simulations conducted using MATLAB, the correctness and feasibility of the proposed control method are validated.

Keywords: H7 photovoltaic(PV) inverter; line-voltage PWM control; leakage current; network voltage; MATLAB simulation

近年来,能源匮乏问题日益严重,由于光能具有绿色、无污染性,光伏发电技术开始受到各国的广泛关注与研究。提高太阳能的利用效率,是推动光伏逆变器技术发展的主要动力。非隔离型并网逆变器由于去掉了升压侧或者输出端的隔离变压器,有效地提高了光伏逆变器的效率。然而,由于光伏

电池板构造的特殊性,使得光伏板与地之间存在着寄生电容,造成了一条漏电流通道^[1]。其本质是寄生电容、光伏系统和电网三者之间形成回路时,共模电压 CMV(common-mode voltage)在寄生电容上产生的共模电流 CMC(common mode current)^[2]。共模电流会引起并网电流畸变,带来辐射干扰,危及设备及人身安全^[3-4]。因此,有效抑制非隔离型光伏逆变器共模电流,对降低光伏系统损耗、电压畸变及系统谐波等具有重要意义。

文献[2]指出,共模电流与逆变器的调制方法和拓扑结构有关。对于单相光伏发电系统,因为调制

收稿日期:2016-09-02;修回日期:2017-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477046);湖南省创新创业技术投资资助项目(2017GK5021)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477046); Project of innovation and entrepreneurship technology investment in Hunan Province(2017GK5021)

方法相对简单,主要研究方向在拓扑结构上。一是直流旁路拓扑,如常见的 H5 拓扑、H6 拓扑;二是交流旁路拓扑,如 HERIC 拓扑、REFU 拓扑;三是中点箝位三电平拓扑^[5]。文献[6]研究了一种新型高效、高可靠性的单相非隔离光伏并网逆变器,其采用的 H6 对称拓扑结构,能使网侧和光伏电板之间进行安全隔离,去掉高频分量,从而达到抑制共模电流的目的。对于三相光伏发电系统,文献[7]针对非隔离型三相三电平光伏逆变器的共模电流问题,在分析三电平共模等效模型的基础上,采用改进型 LCL 滤波器,将滤波电容公共点接回到直流侧中性点,改变了三电平直流侧中点不平衡的机理,滤除寄生电容电压的高频分量,使共模电流大幅衰减。此外,很多学者在逆变器的拓扑和 PWM 调制等方面开展了很多有意义的研究和探索^[8-10]。

文献[11]提出了一种三相 H7 电压源型的新型光伏逆变器及其空间矢量调制方法。该方法通过在三相三桥臂的直流侧添加一个辅助开关,切断桥臂开关开通时直流侧与交流侧的电气连接,有效抑制了系统的共模电流。但该空间矢量调制需要判断扇区,计算量大。为了解决该问题,本文提出一种新的控制方法,采用线电压 PWM 调制方式,经过对开关调制信号进行逻辑组合,生成 PWM 脉冲信号,控制 H7 光伏逆变器的开关通断,达到抑制系统共模电流的效果。最后在 MATLAB/Simulink 软件上进行仿真分析,对方案进行验证。

1 非隔离型 H7 光伏逆变器漏电流分析

图 1 为三相无变压器非隔离型 H7 光伏逆变器的拓扑结构示意图^[11]。其中: L_G 为光伏电板和地之间的接地电感; L_F 为交流侧输出滤波电感; C_{PV} 为光伏电板对地寄生电容,其值一般在 50~150 nF/kvar 左右^[12]; C_{DC} 为直流侧母线电容。

主电路在传统三相光伏逆变器桥臂的直流侧增加了一个由 IGBT 和二极管并联组成的辅助开关 S_7 。对于无变压器隔离的三相传统光伏逆变器,当

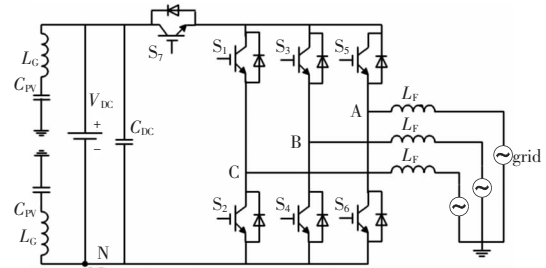


图 1 三相非隔离型 H7 光伏逆变器拓扑

Fig.1 Topology of three-phase non-isolated H7 PV inverter

续流期间所有上桥臂的逆变器开关处于导通或者关断状态时,直流侧和交流侧会形成一条漏电流的导通通道。因此,增加一个辅助开关 S_7 可在续流期间对光伏电板与并网端进行电气隔离,切断漏电流通道,从而抑制漏电流。H7 光伏逆变器抑制漏电流的工作原理分析如下。

已知三相系统 CMV^[11]为

$$V_{CM} = \frac{V_{AN} + V_{BN} + V_{CN}}{3} \quad (1)$$

以 A 相为例。当 A 相上桥臂 S_5 处于导通期间,其余两相桥臂以开关频率通断;当 A、B、C 三相开关未全部导通时, S_7 导通使交流侧产生输出电压。

若 S_1 关断、 S_3 关断,其等效电路如图 2(a)所示。此时共模电压 $V_{CM} = V_{DC}/3$ 。

若 S_1 开通、 S_3 关断,其等效电路如图 2(b)所示。此时共模电压 $V_{CM} = 2V_{DC}/3$ 。

若 S_1 关断、 S_3 开通,其等效电路如图 2(c)所示。此时共模电压 $V_{CM} = 2V_{DC}/3$ 。

当 S_1 开通、 S_3 开通时, S_7 则关断,交流侧与直流侧隔开,此时,漏电流没有流通过径,其等效电路如图 2(d)所示。此时共模电压 $V_{CM} = 0$ 。

同理可分析其他两相的共模电压幅值变化情况,此处不再赘述。

根据上述分析可以得出系统共模电压与 H7 逆变器的开关状态关系,如表 1 所示。由表 1 可知,系统共模电压的大小与逆变器开关状态有关,根据共模电流的定义: $i_{CM} = C_{PV} \frac{dV_{CM}}{dt}$,当通过合理分配载波调制来控制开关通断使得系统共模电压保持稳定不变时,共模电流为 0。

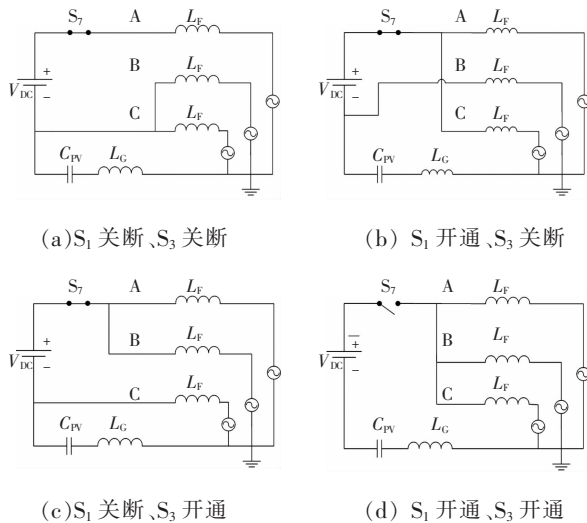


图 2 不同开关状态组合时的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit for different switch state combination

表 1 H7 光伏逆变器开关状态和共模电压关系

Tab.1 Relationship between switching states and CMV of H7 PV inverter

S ₅	S ₃	S ₁	S ₇	V _{AN}	V _{BN}	V _{CN}	V _{CM}
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	V _{DC}	V _{DC}	V _{DC}	0
1	0	0	1	V _{DC}	0	0	V _{DC} /3
1	1	0	1	V _{DC}	V _{DC}	0	2V _{DC} /3
0	1	0	1	0	V _{DC}	0	V _{DC} /3
0	1	1	1	0	V _{DC}	V _{DC}	2V _{DC} /3
0	0	1	1	0	0	V _{DC}	V _{DC} /3
1	0	1	1	V _{DC}	0	V _{DC}	2V _{DC} /3

2 线电压控制 PWM 调制策略

传统 SPWM 调制的三相 PWM 逆变电路中,以正弦波为调制波、三角波为载波,这种方法简单,易于实现。可是,当调制度为最大值 1 时,输出相电压的基波幅值为 $V_{DC}/2$, 输出线电压的基波幅值为 $\sqrt{3} V_{DC}/2$, 即直流电压利用率仅为 0.866, 其原因是正弦调制信号的幅值不能超过三角载波幅值。

对于线电压控制方式来说,即使给各个相电压同时叠加一个任意电压时,线电压也不会发生波形失真。这样,调制波中会包含幅值更大的基波分量,但调制波幅值并不超过三角载波的最大值。在三相

无中线系统中,零序谐波电流无通路。因此当给相电压叠加 3 倍基波频率的正弦波和直流分量信号时,线电压波形不会发生变化,仍为原波形,且具有较高的直流电压利用率。

常见的线电压 PWM 控制方式波形如图 3 所示。图 3 中, v_{cr} 为三角载波, v_a, v_b 和 v_c 分别为加入调制信号后的三相调制波; S_a, S_b 和 S_c 分别为 a、b 和 c 相触发脉冲信号,即开关信号; V_{CM} 为共模电压波形。

假设 v_{a1}, v_{b1}, v_{c1} 为原来的三相正弦波调制信号,则叠加信号^[13]为

$$v_p = -\min(v_{a1}, v_{b1}, v_{c1}) - 1 \quad (2)$$

新的三相调制信号分别为

$$\begin{cases} v_a = v_{a1} + v_p \\ v_b = v_{b1} + v_p \\ v_c = v_{c1} + v_p \end{cases} \quad (3)$$

该控制方式有以下优点^[13]:

(1)在信号波的 1/3 周期内开关器件不动作,可以使功率器件的开关损耗减少 1/3。

(2)最大输出线电压基波幅值为 V_{DC} , 和相电压控制方法相比,直流电压利用率提高了 15%。

由图 3 所示线电压控制的 PWM 调制可以看出,任意时刻仅有两相被调制,即任意时刻逆变器的桥臂最多只有两相导通。因此逆变器上桥臂的开关不可能同时导通,仅存在同时关断的情况。可见该调制方法并不适用于 H7 光伏逆变器。

由此,本文提出采用叠加三倍频的正弦波信号,合成新的鞍形调制波,各相电压及共模电压波

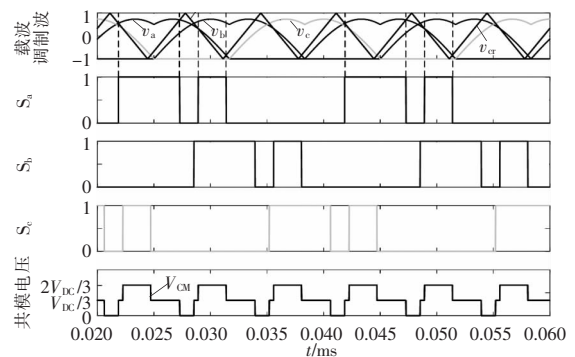


图 3 线电压两相控制方式

Fig.3 Two-phase line-voltage control method

形如图 4 所示。图 4 中的波形含义与图 3 相同。

令叠加信号 $v_0 = m \sin(3\omega t)$, 则调制波的叠加表达式为

$$\begin{cases} v_a = a \sin(\omega t) + v_0 \\ v_b = a \sin(\omega t - 2\pi/3) + v_0 \\ v_c = a \sin(\omega t + 2\pi/3) + v_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: a 为调制波基波幅值, 取值为 1; m 为 3 倍频调制波幅值, 在线电压 PWM 控制方法中, 调制信号的幅值不超过载波幅值。因此 m 可取开区间 $(0, 1)$ 的任意值。本文 m 取值 0.2。

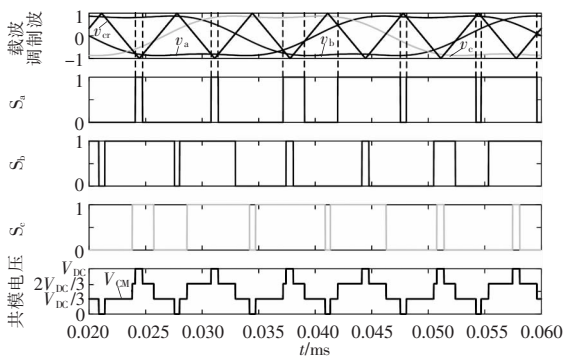


图 4 线电压鞍形波控制方式

Fig.4 Saddle-wave line-voltage control method

由表 1 可知, 交流侧 A、B、C 三相输出电压在 0 和 $V_{DC}/3$ 两者之间按规律变化。此时, 由图 4 可知, 共模电压在 $0, V_{DC}/3, 2V_{DC}/3, V_{DC}$ 间高频波动变化。对于三相非隔离型 H7 光伏逆变器, 若在三相桥臂都处于导通的时刻关断 S_7 , 使直流侧和交流侧电气隔离, 由于漏电流没有流电路径, 此时漏电流为 0, 漏电流得到有效抑制。该调制方法在三相非隔离型 H7 光伏逆变器中的控制策略分析如下。

根据第 1 节的分析, 可知漏电流的大小与载波调制策略有关。观察表 1 中的开关状态 S_5, S_3, S_1 和 S_7 , 可发现其与三相开关信号 S_c, S_b 和 S_a 具有一定的逻辑关系, 如表 2 所示。

由此, 可得到各开关状态与三相开关信号的逻辑运算表达式为

$$\begin{cases} S_5 = \overline{S_a + S_b + S_c} (S_a + S_b + S_c) + S_a \\ S_3 = \overline{S_a + S_b + S_c} (S_a + S_b + S_c) + S_b \\ S_1 = \overline{S_a + S_b + S_c} (S_a + S_b + S_c) + S_c \\ S_7 = \overline{S_a S_b S_c} (S_a + S_b + S_c) \end{cases} \quad (5)$$

综合上面的分析内容, 可以得到线电压控制方式 PWM 调制方案, 如图 5 所示。

表 2 开关逻辑状态

Tab.2 Logic states of switches

$S_c S_b S_a$	S_5	S_3	S_1	S_7
000	0	0	0	0
111	1	1	1	0
001	1	0	0	1
101	1	0	1	1
011	1	1	0	1
100	0	0	1	1
010	0	1	0	1
110	0	1	1	1

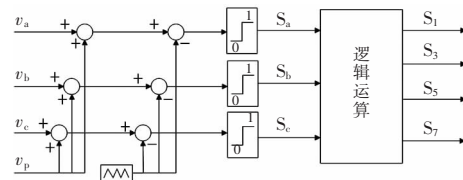


图 5 改进型线电压载波调制方案

Fig.5 Modified line-voltage carrier modulation scheme

3 系统仿真及验证

根据图 1 所示 H7 光伏逆变器的拓扑结构, 本文通过 MATLAB/Simulink 仿真软件, 采用图 5 所示的载波调制方法对 H7 光伏逆变器系统进行了仿真, 对本文提出的改进型调制方案进行验证, 并与传统 SPWM 和线电压 PWM 控制方法进行比较研究。仿真参数如下: 直流侧电压 120 V, 交流侧滤波电感 20 mH, 负载电阻 10 Ω , 寄生电容 120 nF, 开关频率 10 kHz。

为了全面分析 H7 光伏逆变器在不同载波调制下漏电流的抑制效果, 图 6 给出了 3 种 PWM 调制方式下的共模电压和共模电流的仿真波形。

传统 SPWM 调制下的仿真结果如图 6 (a) 所示。由图可知, 此时系统共模电压在 $0, V_{DC}/3, 2V_{DC}/3$ 之间波动, 且波动频率高, 波动幅值较大, 从而导致输出共模电流幅值高, 波动大。

线电压 PWM 调制方式波形如图 6(b) 所示。系统共模电压同样在 $0, V_{DC}/3, 2V_{DC}/3$ 之间周期性波

动,此时共模电压波动幅值有所减小,但仍旧存在着高频波动。

图6(c)为改进型线电压PWM调制的仿真波形。由图可知,当 S_7 关断时,共模电压在 $V_{DC}/3$ 、 $2V_{DC}/3$ 之间周期性波动;当 S_7 闭合时,共模电压在 $V_{DC}/3 \sim 0$ 以及 $2V_{DC}/3 \sim 0$ 之间波动。共模电压的波动频率和波动幅值减少了,从而使得共模电流得到一定程度的抑制。

此外,本文的研究重点是调制波对H7光伏逆变器系统漏电流的影响,并未考虑并网情况下电网电压的影响。实际应用中,电网电压的频率波动会对共模电流产生一定的影响^[14]。另外,由寄生电容与滤波电感以及电路中的杂散参数构成的谐振回路^[15]也会影响系统共模电压。对于H7三相光伏系统在考虑线路参数的情况下,如何采用更精确有效的控制策略并网运行还有待进一步深入研究。

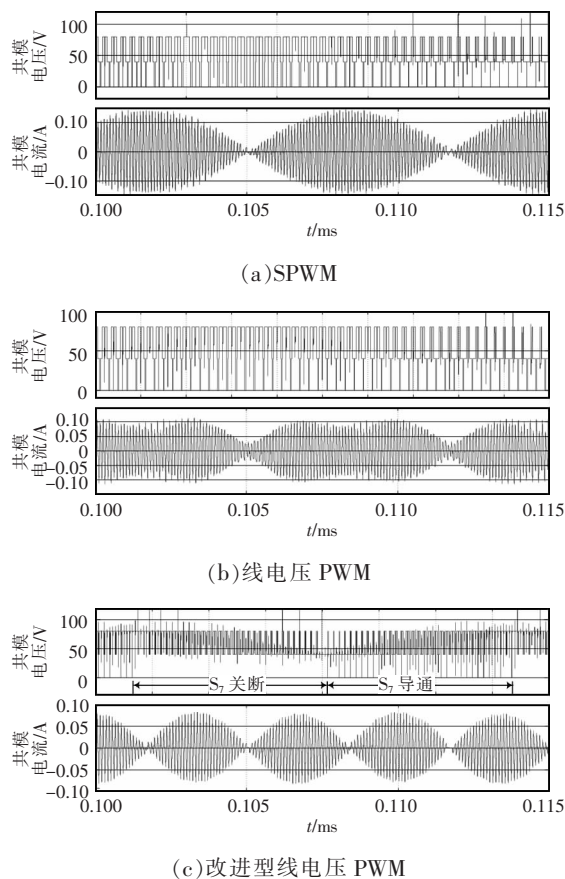


图6 共模电压与共模电流仿真结果

Fig.6 Simulation results of CMV and CMC

4 结语

本文以三相无变压器非隔离型H7光伏逆变器为研究对象,首先,分析了非隔离型H7光伏逆变器的系统模型及其共模电压的幅值变化规律;随后,分析了线电压PWM载波调制的工作原理,并比较了其与传统调制方式的不同与优点;最后,通过3种不同的调制方式对非隔离型H7光伏逆变器产生的漏电流进行仿真验证。结果表明,本文提出的改进型线电压PWM调制方式对非隔离型H7光伏逆变器漏电流具有更好的抑制作用。此外,本文提出的调制方式结构简单,易于实现,不需要空间矢量调制中复杂的判断算法和坐标系统转换,更利于工程实现,对于工程应用具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] Teodorescu R. 光伏与风力发电系统并网变换器[M]. 周克亮,王政,译. 北京:机械工业出版社,2012.
- [2] 郭伟扬,郭小强. 无变压器非隔离型光伏并网逆变器漏电流抑制技术[J]. 中国电机工程学报,2012,32(18):1-8. Wu Weiyang, Guo Xiaoqiang. A review of novel leakage current suppression techniques for transformerless photovoltaic inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 1-8(in Chinese).
- [3] Araneo R, Lammens S, Grossi M, et al. EMC issues in high-power grid-connected photovoltaic plants[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(3): 639-648.
- [4] Hernandez J C, Vidal P G, Medina A. Characterization of the insulation and leakage currents of PV generators:Relevance for human safety[J]. Renewable Energy, 2010, 35(3): 593-601.
- [5] 张勤进,刘彦呈,王川. NPC光伏并网逆变器共模电流抑制方法研究[J]. 电机与控制学报,2013,17(8):15-21. Zhang Qinjin, Liu Yancheng, Wang Chuan. Study of leakage current suppression method based on NPC photovoltaic grid-connected inverter.[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(8): 15-21(in Chinese).

- [6] 童鑫, 慧晶. 一种新型高效单相非隔离光伏并网逆变器[J]. 电源学报, 2014, 12(5): 51-55.
Tong Xin, Hui Jing. A novel photovoltaic grid-connected inverter of high efficiency single-phase without transformer[J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(5): 51-55 (in Chinese).
- [7] 张兴, 邵章平, 王付胜, 等. 非隔离型三相三电平光伏逆变器的共模电流抑制[J]. 电机与控制学报, 2013, 33(3): 29-36.
Zhang Xing, Shao Zhangping, Wang Fusheng, et al. Leakage current reduction for transformerless three-phase three-level photovoltaic inverters[J]. Electric Machines and Control, 2013, 33(3): 29-36 (in Chinese).
- [8] 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 (in Chinese).
- [9] 张兴, 李俊, 赵为, 等. 高效光伏逆变器综述[J]. 电源技术, 2016, 40(4): 931-934.
Zhang Xing, Li Jun, Zhao Wei, et al. Review of high efficiency photovoltaic inverter[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(4): 931-934 (in Chinese).
- [10] 张一博, 王聪. NPC 三电平光伏逆变器 SVPWM 合成和序列的优化[J]. 电源学报, 2012, 10(2): 72-75.
Zhang Yibo, Wang Cong. Synthesis and optimization of SVPWM for three-level NPC PV inverter[J]. Journal of Power Supply, 2012, 10(2): 72-75 (in Chinese).
- [11] Suan F T K, Rahim N A, Ping H W. Three-phase transformerless grid-connected photovoltaic inverter to reduce leakage currents[C]. 2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT). Langkawi, Malaysia, 2013: 277-280.
- [12] Kerekes T, Teodorescu R, Liserre M, et al. Evaluation of three-phase transformerless photovoltaic inverter topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(9): 2201-2211.
- [13] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [14] Kerekes T, Teodorescu R, Rodriguez P, et al. A new high-efficiency single-phase transformerless PV inverter topology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 184-191.
- [15] Li Wuhua, Gu Yunjie, Cui Wenfeng, et al. Improved transformerless inverter with common-mode leakage current elimination for a photovoltaic grid-connected power system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 752-762.

作者简介:

张志文(1963-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向:电气化铁道电能质量分析与控制,交直流电能变换系统理论与新技术,电力系统谐波抑制,E-mail:hdzww@126.com。

周滔(1989-),男,通信作者,硕士,研究方向:新能源发电,E-mail:494080190@qq.com。

刘军(1992-),男,硕士,研究方向:智能电网,E-mail:478928225@qq.com。

范威(1990-),男,硕士,研究方向:新能源发电,E-mail:857127144@qq.com。



张志文