

单相并网逆变器的直流分量抑制策略

杨 亮^{1,2}, 苏 剑², 刘海涛², 吕志鹏², 王逸超³, 贺加贝³, 王 聪¹

(1. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京 100083;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;

3. 湖南大学 国家电能变换与控制工程技术研究中心, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为解决并网逆变器的直流注入问题, 以 *LCL* 型并网逆变器为研究对象, 提出一种可抑制直流分量的并网逆变器电流跟踪控制策略。所提策略采用直接控制入网电流的双闭环技术, 其中电流外环在常规基波电流控制支路的基础上, 增加了一条由积分控制器组成的直流分量抑制支路, 在不影响逆变器基波电流跟踪控制表现的基础下, 可增大逆变器的直流输出阻抗, 抑制直流分量的产生。所提策略实现简单, 无需检测输出电流中的直流分量, 其直流抑制的机理为在逆变器输出端口串联一个在直流分量无穷大而在交流频率处的阻值有限的虚拟阻抗。通过建模和频域分析证实了所提策略的直流抑制性能。仿真和实验进一步验证所提策略不仅可以实现基波指令信号的无静差跟踪, 而且对直流分量具有良好的抑制表现。

关键词: 直流注入; 直流分量抑制; 逆变器; 并网; 闭环控制; 积分控制器; 直流输出阻抗; 频域分析; 电流控制

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.022

0 引言

随着近年来开发新能源意识的逐渐普及, 越来越多的家庭用户选择无变压器式光伏并网逆变器向电网输送能量^[1-3], 逆变器的直流注入问题受到了众多研究人员的关注^[4-5]。

逆变器输出电流中的直流分量会影响逆变器本身的正常工作, 导致波形失真。同时, 直流电流注入电网会使配电变压器饱和, 导致过热、跳闸, 产生偶次谐波^[6], 并会加剧导线的腐蚀, 引起计量表的测量误差。因此, IEEE 和 IEC 都对逆变器输出电流中的直流分量进行了限制, 其中 IEEE 1574 中规定光伏并网电流中直流分量必须小于系统额定电流的 0.5%^[7]。

目前, 国内外针对光伏发电系统的直流注入问题已有初步研究。早期的直流抑制策略主要是在逆变器输出端和电网间安装隔离变压器, 但带隔离变压器的光伏发电系统体积大, 效率低, 并不是解决直流注入问题的理想方案。针对无变压器式光伏发电系统, 已提出的解决方法主要可归为下述 3 类。

a. 研制可抑制直流分量的新型逆变器拓扑结构^[8-9]。具有直流抑制功能的逆变器拓扑主要为半桥逆变器及其改进拓扑, 其主要思想是无论半桥逆变

器中的开关器件处于何种状态, 并网电流始终会经过直流侧电容, 使直流分量被电容隔离, 从而消除直流分量。但半桥逆变器及其改进拓扑结构复杂, 所需直流侧电压高, 相比现有成熟的全桥拓扑结构, 控制难度和开关器件数量增加, 性价比优势不明显。

b. 检测补偿法^[10-12]。检测补偿法的关键是测量输出电流中的直流分量, 通过适当控制算法产生补偿信号, 反馈到并网电流调制信号中, 最终达到抑制直流分量的目的。已提出的直流分量检测方法包括自校正电流检测法^[13]、一阶电路检测法^[14]等, 但无论哪种检测法都会增加系统的复杂程度, 并且直流分量的检测精度及灵敏度决定了直流抑制的实际效果^[15]。

c. 电容隔直法。根据电容通交隔直的特点, 在逆变器交流侧串入真实的或者虚拟的电容来抑制直流电流。选择串入真实电容时, 为了避免基波压降过大, 串入的电容取值一般较大, 成本较高, 且存在物理损耗。文献^[16]提出了基于虚拟电容的直流抑制方法, 采用控制方法代替无极性电容, 既可实现零直流注入, 又可避免串入电容损耗, 但当逆变器采用 *LCL* 型滤波器时, 串联的电容将带来新的谐振问题。

针对现有直流分量抑制策略的不足, 本文以单相 *LCL* 型并网逆变器为研究对象, 提出一种新的可抑制直流分量的并网逆变器控制策略。所提策略采用直接控制入网电流的双闭环技术, 其中电流外环在常规基波电流控制支路^[17-23]的基础上, 增加了一条直流分量抑制支路, 在不影响逆变器基波电流跟踪控制表现的基础下, 可增大逆变器的直流输出阻抗, 抑制直流分量的产生。与现有的检测补偿法相比, 本文所提方法实现简单, 无需检测输出电流中的直流分量, 便

收稿日期: 2014-10-27; 修回日期: 2015-02-11

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51237003); 国家电网“千人计划”专项支持项目(PD71-12-017); 国家电网公司基础性前瞻性科技项目(PD71-14-001, PD71-14-003)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51237003), the “Thousands of People Plan” Special Support Project of State Grid Corporation of China(PD71-12-017), and the Basic and Prospective Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(PD71-14-001, PD71-14-003)

于工程实现。通过对控制系统的闭环传递模型的频域分析证实了所提策略的控制表现,并通过仿真和实验进一步验证了所提策略的有效性。

1 单相光伏系统及直流分量产生原因

图 1 为单相并网发电系统结构示意图,由光伏阵列、前级升压电路、后级并网逆变器、LCL 滤波器组成。图中 i_1 为逆变器侧电感电流, i_2 为网侧电感电流, i_C 为滤波电容电流, u_{dc} 为逆变电路直流储能电容电压, u_{inv} 为逆变器输出端电压, u_{grid} 为电网电压。光伏阵列将太阳能转换为直流电能, DC/DC 升压环节实现最大功率点跟踪控制, 并网逆变器主要实现并网电流跟踪控制和前后级母线电压的稳压控制。

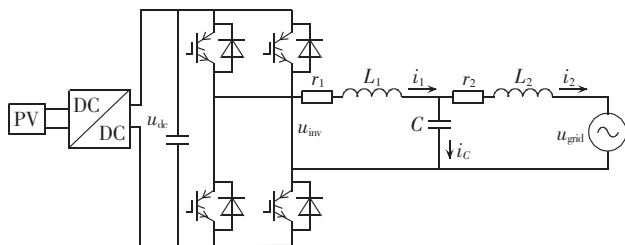


图 1 单相并网逆变器系统结构图

Fig.1 Structure of single-phase grid-connected inverter

由于电容通交隔直, 而电感对直流分量可视为短路, 因此稳态下的直流分量回路可通过图 2 所示电路描述, 其中 r_1 和 r_2 为滤波电感内阻。

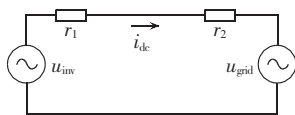


图 2 直流分量流通回路

Fig.2 DC current circuit

从图 2 可见, 逆变器输出电流中的直流分量大小由逆变器输出端电压、电网电压以及滤波电感内阻共同决定。实际中, 电网电压为标准的正弦波电压, 不允许存在直流偏置分量, 而滤波电感内阻一般较小。因此, 逆变器输出端的直流电压分量作用在小的直流回路阻抗上将可能产生较大的直流输出电流。

逆变器输出端的直流电压分量产生的原因有多种, 包括逆变器开关器件动作不一致、电流采样传感器的零点漂移以及参考电流信号中的直流分量等。这些因素往往较难从源头上得到抑制, 因此为了有效避免逆变器的直流注入问题, 一种可行的手段就是增加直流回路的阻抗, 通过增大逆变器的直流输出阻抗来抑制直流分量的产生。

2 单相并网逆变器电流控制策略

本文所提的并网逆变器电流跟踪控制策略如图 3 所示。为了对照本文所提策略与常规并网逆变器

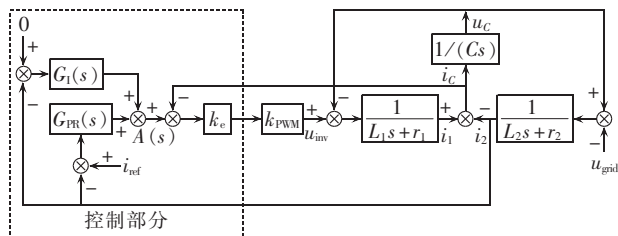


图 3 所提出的电流跟踪控制策略框图

Fig.3 Block diagram of proposed strategy for current tracking control

电流跟踪控制策略的差异, 图 4 展示了常规并网逆变器电流跟踪控制策略^[17]。2 种策略均采用反馈电容电流的双闭环入网电流控制技术。逆变桥可等效为比例环节 k_{PWM} , 电流内环采用电容电流反馈环, 用以增加系统阻尼, 抑制 LCL 的谐振尖峰, 采用比例 (P) 控制, k_e 为电流内环 P 控制器比例系数。

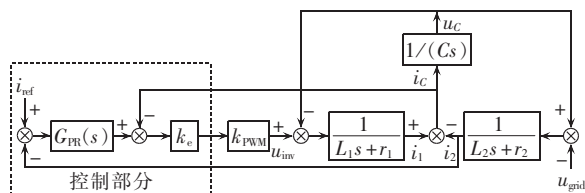


图 4 常规电流跟踪控制框图

Fig.4 Block diagram of conventional strategy for current tracking control

与常规的双闭环控制技术中电流外环仅包含一条控制支路所不同的是, 本文为了抑制直流输出电流, 电流外环由基波控制支路和直流抑制支路 2 条支路并联组成。其中基波控制支路主要实现入网电流对基波指令电流信号 i_{ref} 的精确无差跟踪控制, 因此基波控制支路控制器 G_{PR} 可选取在基波频率处具有无穷大增益的比例谐振控制器, 其表达式为:

$$G_{PR}(s) = K_P + \frac{K_r s}{s^2 + \omega_1^2} \quad (1)$$

其中, K_P 、 K_r 分别为比例谐振控制器的比例系数和积分系数; ω_1 为基波角频率。

直流抑制支路的控制目标是抑制输出电流中的直流分量, 使入网电流中的直流分量为零。 G_1 为直流抑制支路控制器, 可选择在直流分量处具有无穷大增益的积分控制器来实现对直流分量的无差控制。 G_1 的表达式可表示为:

$$G_1(s) = \frac{K_I}{s} \quad (2)$$

其中, K_I 为积分控制器的积分系数。

为了理解所提策略对直流分量的抑制机理, 对没有直流抑制支路和加入直流抑制支路 2 种情况下的逆变器输出电压 u_{inv} 展开研究。没有直流抑制支路作用时, 即传统的双闭环控制技术, 由图 4 可得逆变器输出电压 u_{inv1} 可表示为:

$$u_{inv1}(s) = k_e k_{PWM} G_{PR}(i_{ref} - i_2) - k_e k_{PWM} i_C \quad (3)$$

其中输出电压 u_{inv1} 中前一项主要实现入网基波电流的跟踪控制,后一项为电容电流反馈部分,主要作用为抑制 LCL 谐振尖峰。加入直流抑制支路作用后,由图 3 可以得到逆变器输出电压 u_{inv2} 可表示为:

$$u_{inv2}(s) = k_e k_{PWM} G_{PR}(i_{ref} - i_2) - k_e k_{PWM} i_C - k_e k_{PWM} G_1 i_2 \quad (4)$$

对比式(3)和式(4)有关系:

$$u_{inv2}(s) = u_{inv1}(s) - k_e k_{PWM} G_1 i_2 \quad (5)$$

对式(5)进行分析可知,加入直流抑制支路的作用效果可等效为在 u_{inv1} 的输出端串联一个阻值为 $k_e k_{PWM} G_1$ 的虚拟电阻 R ,其对直流分量的等效电路如图 5 所示。

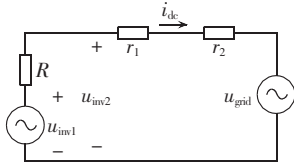


图 5 加入抑制支路后的直流分量等效回路

Fig.5 Equivalent DC current circuit with DC suppression branch

虚拟电阻 R 的阻值大小主要受积分控制器影响,其在交流频率处的阻值有限,但在直流分量处, R 的阻值为无穷大。因此,加入直流抑制支路实际上是在逆变器的输出电压端串联了一个无穷大的直流电阻,从而抑制了直流分量的产生。与现有的检测补偿法相比,本文所提策略虽然也是通过适当控制算法产生补偿信号进而反馈到并网电流调制信号中,最终达到抑制直流分量的目的,但本文所提方法实现更为简单,仅在常规双闭环控制技术的基础上增加一条直流抑制回路,并且所提策略实现过程不需要检测输出电流中的直流分量,更便于工程应用。下文将通过控制系统的建模分析进一步揭示所提策略的控制特性,并且表明所增加的直流抑制支路并不影响逆变器基波电流跟踪控制表现。

3 所提策略的建模分析

根据图 3 所示电流框图,忽略电感内阻的影响,以电流外环输出信号 $A(s)$ 和电网电压 u_{grid} 作为输入,可得到逆变器网侧输出电流表达式为:

$$i_2 = G_1(s) A(s) - G_2(s) u_{grid}(s) \quad (6)$$

$$G_1(s) = \frac{k_e k_{PWM}}{L_1 L_2 C s^3 + L_2 C k_e k_{PWM} s^2 + (L_1 + L_2) s}$$

$$G_2(s) = \frac{L_1 C s^2 + k_e k_{PWM} C s + 1}{L_1 L_2 C s^3 + L_2 C k_e k_{PWM} s^2 + (L_1 + L_2) s}$$

其中, $G_1(s)$ 为电流外环输出信号 $A(s)$ 和逆变器网侧输出电流之间的传递函数; $G_2(s)$ 为电网电压 u_{grid} 和逆变器网侧输出电流之间的传递函数。

根据电流外环支路结构,电流外环输出信号 $A(s)$ 为 2 条支路的输出信号之和,可表示为:

$$A(s) = G_{PR}(s)(i_{ref} - i_2) + G_1(s)(0 - i_2) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),得:

$$i_2(s) = H(s) i_{ref} - Y(s) u_{grid} \quad (8)$$

其中, $H(s)$ 为逆变器电流跟踪闭环传递函数; $Y(s)$ 为并网逆变器对电网电压的等效并联导纳。详细的表达式如下:

$$H(s) = \frac{G_{PR}(s) G_1(s)}{G_{PR}(s) G_1(s) + G_1(s) G_1(s) + 1} \quad (9)$$

$$Y(s) = \frac{G_2(s)}{G_{PR}(s) G_1(s) + G_1(s) G_1(s) + 1} \quad (10)$$

主要电路和控制器参数选取如下: LCL 滤波器中 $L_1 = 2 \text{ mH}$, $C = 10 \text{ } \mu\text{F}$, $L_2 = 0.5 \text{ mH}$; 直流侧电压 400 V ; 电网电压单相有效值 $220 \text{ V}/50 \text{ Hz}$; 开关频率 10 kHz ; 内环比例系数 $k_e = 0.1$; 基波谐振控制器参数 $K_p = 0.3$, $K_r = 80$; 直流积分控制器参数 $K_I = 30$ 。

令 $H(s)$ 和 $Y(s)$ 中直流抑制支路控制器 $G_1(s) = 0$, 可得到常规电流跟踪控制策略相对应的闭环传递函数, 2 种策略下的闭环传递函数 $H(s)$ 和 $Y(s)$ 的伯德图分别如图 6、图 7 所示。

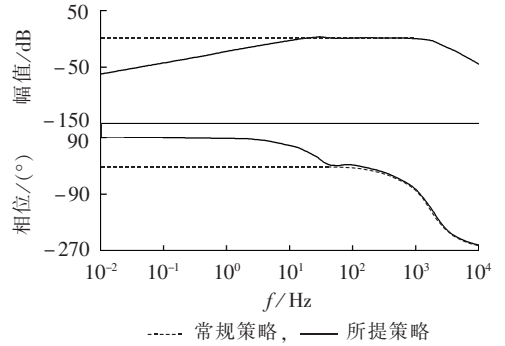


图 6 不同策略下 $H(s)$ 伯德图

Fig.6 Bode diagram of $H(s)$ for different strategies

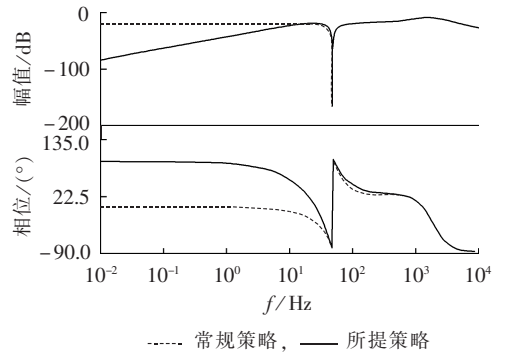


图 7 不同策略下 $Y(s)$ 伯德图

Fig.7 Bode diagram of $Y(s)$ for different strategies

图 6 中,与预期一致,没有直流抑制支路作用的常规电流跟踪策略闭环传递函数(虚线)在直流分量处的闭环增益接近 0 dB ,导致指令信号中直流成分引入入网电流而产生直流注入问题。而采用本文所提的电流跟踪控制策略后,电流跟踪闭环传递函数(实线)在直流分量处增益很小,接近为零(小于 -50 dB),

而在基波频率处增益接近于 0 dB,跟踪相角差接近于 0°。因此,采用本文所提电流跟踪控制策略几乎不影响基波电流的跟踪控制表现,但却可以很好地抑制指令信号中的直流分量。

图 7 为并网逆变器对电网电压等效并联导纳的伯德图,对比可见,加入直流抑制支路后,等效导纳在低频段和直流分量处的增益明显降低。因此,即便电网电压中含有少量的直流偏置电压分量,由于并联导纳在直流分量处的增益很小,这些偏置电压分量对逆变器输出电流的负面影响也可忽略。

4 仿真与实验验证

利用 Psim9.0 仿真软件验证本文所提直流抑制策略的有效性。仿真中,逆变器额定容量设为 2 kW,其余仿真参数和控制参数同第 3 节中。

采用直流电源来维持直流侧电压稳定,逆变器基波指令电流信号 i_{ref} 由常数 k 乘以电网电压同步相位 $\sin \theta_{PLL}$ 得到,即:

$$i_{ref} = k \sin \theta_{PLL} \quad (11)$$

为了验证所提直流抑制策略的有效性,在基波指令电流信号中叠加 1 A 的直流偏置分量。令 $k=10$,分别对没有直流抑制支路的常规电流双闭环策略和加入直流抑制支路的双闭环策略进行对比仿真分析。

图 8 为没有直流抑制支路时的逆变器输出电流波形。从图中可见,逆变器输出电流中含有明显的直流偏置分量,直流分量幅值约为 1 A,根据 IEEE 1574 规定,逆变器并网电流中直流分量应小于额定电流的 0.5%,本文逆变器容量为 2 kW,因此注入电网的直流分量应小于 0.045 A。可见常规电流双闭环策略对直流分量的抑制作用较差。

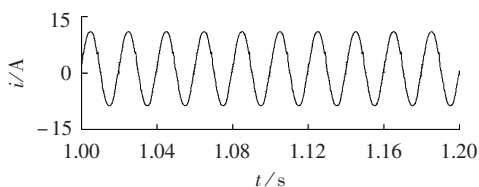


图 8 没有直流抑制支路的仿真结果

Fig.8 Simulative results without DC suppression branch

加入直流抑制支路的双闭环策略的仿真波形如图 9 所示,加入直流抑制支路后即等效为在逆变器输出端串入一个无穷大的直流电阻,因此输出电流中几乎不含直流分量,输出电流为无直流偏置的正弦波电流,满足 IEEE 直流注入标准,验证了本文直流抑制策略的有效性。仿真波形中并网电流出现的局部不光滑是由于谐波毛刺引起的,但此时入网电流谐波畸变率均小于 5%,满足 IEEE 的谐波并网标准。

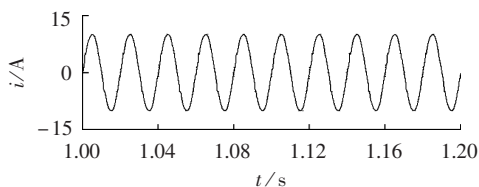


图 9 加入直流抑制支路的仿真结果

Fig.9 Simulative results with DC suppression branch

图 10 为加入直流抑制支路时的逆变器输出电流动态响应波形。基波指令电流信号幅值在 1.1 s 从 10 A 阶跃至 15 A,从图中可见,逆变器输出电流能较快地跟踪基波指令电流信号变化,动态表现性能良好。

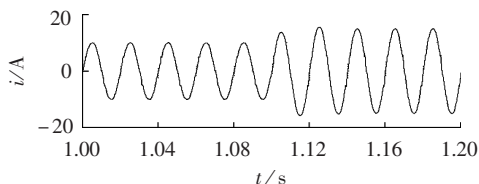


图 10 加入直流抑制支路的动态响应性能

Fig.10 Dynamic response with DC suppression branch

为了进一步验证本文所提直流抑制策略的有效性,在实验室搭建了单相并网发电平台,采用直流电源维持直流侧电压的稳定,逆变器基波指令电流信号采用给定方式得到,如式(11)所示。

实验中,为了更好地观察所提策略对直流分量的抑制效果,在基波指令电流信号中叠加 2 A 的直流偏置分量。令 $k=10$,分别对没有直流抑制支路的常规电流双闭环策略和加入直流抑制支路的双闭环策略进行对比实验研究。

采用常规电流双闭环策略的实验结果如图 11 所示。与预期一致,由于常规电流跟踪策略的闭环传递函数在直流分量处的闭环增益接近 0 dB,因此指令信号中的直流分量被引入了输出电流,逆变器输出电流中的直流分量高达 2 A,远超过 IEEE 限制值。

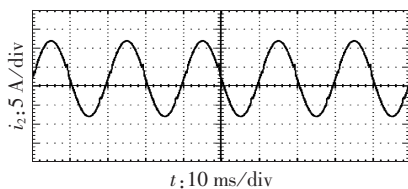


图 11 没有直流抑制支路的实验结果

Fig.11 Experimental results without DC suppression branch

采用本文所提的直流抑制策略的实验结果如图 12 所示。加入直流抑制支路后,输出电流波形上下对称,几乎不含直流分量,较好地抑制了直流分量注入电网。

图 13 为采用本文所提策略时,电网电压和逆变器输出电流的波形图。从图中可见,逆变器输出电流

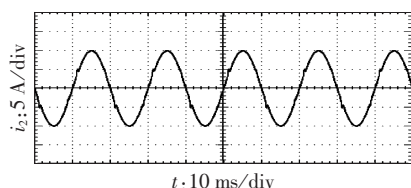


图12 加入直流抑制支路的实验结果

Fig.12 Experimental results with DC suppression branch

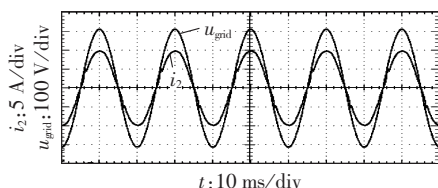


图13 基波电流跟踪控制表现

Fig.13 Performance of fundamental current tracking control

与电网电压相位一致,输出电流幅值约为 10 A,可见,所提的直流抑制策略并不影响逆变器的基波电流控制。

5 结论

本文针对现有直流分量抑制策略的不足,提出一种新的可抑制直流分量的并网逆变器控制策略。所提方法无需检测输出电流中的直流分量,可通过积分器的作用增大逆变器的直流输出阻抗,抑制直流分量的产生。该方法具有实现简单、不影响逆变器的基波电流跟踪控制表现、直流抑制效果好的优点。该方法是通过增加逆变器的直流输出阻抗来抑制逆变器输出电流中的直流分量,下一步拟将类似的思想移植到谐波域,通过增大逆变器的谐波输出阻抗来提高逆变器输出电流对谐波扰动的抑制能力。

参考文献:

- [1] 国家电网公司. 关于做好分布式电源并网服务工作的意见[R]. 北京:国家电网公司,2013.
- [2] 鲍薇,胡学浩,何国庆,等. 分布式电源并网标准研究[J]. 电网技术,2012,36(11):46-52.
BAO Wei,HU Xuehao,HE Guoqing,et al. Study on standard for grid-integration of distributed resources[J]. Power System Technology,2012,36(11):46-52.
- [3] 王立乔,孙孝峰. 分布式发电系统中的光伏发电技术[M]. 北京:机械工业出版社,2010:206-213.
- [4] 周林,杨冰,郭珂,等. 光伏并网系统中直流注入问题最新进展及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(6):147-155.
ZHOU Lin,YANG Bing,GUO Ke,et al. The progress and development trend of the DC injection issue in PV grid-connected systems[J]. Power System Protection and Control,2012,40(6):147-155.
- [5] BLEWITT W M,ATKINSON D J,KELLY J,et al. Approach to low-cost prevention of DC injection in transformerless grid connected inverters[J]. IET Power Electron,2010,3(1):111-119.

- [6] AHFOCK A,HEWITT A J. DC magnetization of transformers[J]. IEE Proceedings of Electric Power Applications,2006,153(4):601-607.
- [7] Standards Coordinating Committee 21. IEEE std 1547.1-2005 Standard for conformance tests procedures for equipment interconnecting distributed resources with electric power systems[S]. New York,USA:The Institute of Electrical and Electronics Engineers,Inc,2003.
- [8] GONZALEZ R,LOPEZ J,SANCHIS P,et al. Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(2):693-697.
- [9] LOPEZ O,TEODORESCU R,GANDOY J D. Multilevel transformerless topologies for single-phase grid-connected converters[C]//IEEE Proceedings of IECON 2006. Paris,France:[s.n.],2006:5191-5196.
- [10] 刘鸿鹏,王卫,吴辉. 光伏逆变器的调制方式分析与直流分量抑制[J]. 中国电机工程学报,2010,30(9):27-32.
LIU Hongpeng,WANG Wei,WU Hui. Modulation mode analysis and suppressing DC current of PV inverter[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(9):27-32.
- [11] 陈堃,陈昌旺,刘涤尘. 光伏并网逆变器输出电压直流分量的瞬时补偿策略[J]. 电网技术,2013,37(11):3080-3085.
CHEN Kun,CHEN Changwang,LIU Dichen. Instantaneous compensation strategy of DC component in output voltage of photovoltaic grid-connected inverters[J]. Power System Technology,2013,37(11):3080-3085.
- [12] 栗晓政,孙建平,甄晓亚,等. 基于 PR 与 PI 联合控制策略的光伏并网系统直流注入抑制技术[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):118-122.
LI Xiaozheng,SUN Jianping,ZHEN Xiaoya,et al. DC injection suppression technology based on PR & PI integrated control for grid-connected PV system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):118-122.
- [13] ARMSTRONG M,ATKINSON D J,MARK J C. Auto-calibrating DC link current sensing technique for transformerless grid connected H-bridge inverter system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2006,21(5):1385-1393.
- [14] BOWETELL L,AHFOCK A. Direct current offset controller for transformerless single-phase photovoltaic grid-connected inverters[J]. IET Renewable Power Generation,2010,4(5):428-437.
- [15] 陈良亮,肖岚,龚春英,等. 逆变器并联系统直流环流产生原因及其检测与抑制方法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(9):56-61.
CHEN Liangliang,XIAO Lan,GONG Chunying,et al. Reasons and methods for detecting and restraining DC circulating current in parallel inverter system[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(9):56-61.
- [16] 王宝诚,郭小强,梅强,等. 无变压器非隔离型光伏并网逆变器直流注入控制技术[J]. 中国电机工程学报,2009,29(36):23-29.
WANG Baocheng,GUO Xiaoqiang,MEI Qiang,et al. DC injection control for transformerless PV grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(36):23-29.
- [17] 徐志英,徐爱国,谢少军. 采用 LCL 滤波器的并网逆变器双闭环网电流控制技术[J]. 中国电机工程学报,2009,29(27):36-41.
XU Zhiying,XU Aiguo,XIE Shaojun. Dual-loop grid current technique for grid-connected inverter using an LCL filter[J].

- Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27):36-41.
- [18] 胡雪峰, 韦微, 陈轶涵, 等. LCL 滤波并网逆变器的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27):142-148.
- HU Xuefeng, WEI Zheng, CHEN Yihan, et al. A control strategy for grid-connected inverters with LCL filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27):142-148.
- [19] 杨亮, 王聪, 吕志鹏, 等. 基于同步逆变器的预同步并网方式[J]. 电网技术, 2014, 38(11):3103-3108.
- YANG Liang, WANG Cong, LÜ Zhipeng, et al. The method of pre-synchronized grid-connection of synchronverter[J]. Power System Technology, 2014, 38(11):3103-3108.
- [20] 杨亮, 王聪, 吕志鹏, 等. 模拟同步发电机特性的同步逆变器研制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(11):12-16.
- YANG Liang, WANG Cong, LÜ Zhipeng, et al. Prototype validation of synchronverter for synchronous-generator-emulated[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2014, 26(11):12-16.
- [21] 王宝安, 谭风雷, 商姣. 模块化多电平换流器模块冗余优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1):13-19.
- WANG Baoan, TAN Fenglei, SHANG Jiao. Optimal configuration of modular redundancy for MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1):13-19.
- [22] 张巍, 汪飞, 阮毅, 等. 适于单相微电网应用的并网接口系统[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10):33-39, 47.
- ZHANG Wei, WANG Fei, RUAN Yi, et al. Grid-interfacing system for single-phase microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10):33-39, 47.
- [23] 薛畅, 申科, 纪延超, 等. 模块化多电平换流器的电容电压平衡方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7):27-31.
- XUE Chang, SHEN Ke, JI Yanchao, et al. Capacitor voltage balancing of modular multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7):27-31.

作者简介:



杨 亮

杨 亮(1982—), 男, 辽宁阜新, 工程师, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术, 在配电网及微电网中的应用 (E-mail: yesno2005@126.com);

苏 剑(1971—), 男, 山西朔州人, 高级工程师, 研究方向为配网运行与控制、电力市场、微电网 (E-mail: sujian@epri.sgcc.com.cn);

刘海涛(1978—), 男, 山东潍坊人, 高级工程师, 研究方向为分布式发电与微电网 (E-mail: lhtcn@epri.sgcc.com.cn)。

DC component suppression strategy for single-phase grid-connected inverter

YANG Liang^{1,2}, SU Jian², LIU Haitao², LÜ Zhipeng², WANG Yichao³, HE Jiabei³, WANG Cong¹

(1. China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Aiming at the DC injection of grid-connected inverter, the grid-connected inverter with *LCL* filter is studied and a strategy of current tracking control is presented to suppress its DC component, which adopts the dual closed loop technique to directly control the grid-connecting current. A DC component suppression branch consisting of an integral controller is added to the conventional fundamental current control branch in the outer current-loop, which increases the DC output impedance of inverter to suppress its DC component, without affecting the fundamental current tracking control. The implementation of the proposed strategy is simple because, without DC component detection, only the virtual impedance is connected in series to the output port of inverter, which is infinite to DC component while small to AC frequency. A model is built and the frequency domain analysis proves its DC inhibition performance. The simulative and experimental results show that, the fundamental reference tracking with zero steady-state error is realized and the DC component is well suppressed.

Key words: DC injection; DC component suppression; electric inverters; grid-connection; closed loop control; integral controller; DC output impedance; frequency domain analysis; electric current control