

DOI: 10.7667/PSPC171889

弱电网下基于复数滤波器的并网电压前馈控制策略

郑征, 黄旭, 杨明, 李斌

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 随着分布式逆变并网电源的广泛部署, 电网所需的传输线路不断增长, 再加上配电变压器漏感等因素的影响, 电网越来越表现出弱电网特性。在弱电网情况下, 为减小电流稳态误差, 并网电压比例前馈系统得到了广泛应用, 然而由于其引入了与电网阻抗相关的正反馈回路, 导致系统相角裕度大幅降低, 严重影响并网逆变器的稳定性。以三相 LCL 并网逆变器为例, 通过伯德图分析电网阻抗对并网逆变器稳定性的影响, 提出在并网电压比例前馈环节串联复数滤波器的控制方案。分析表明该方案可以提高弱电网条件下并网逆变器的稳定性。最后搭建了三相 5 kW 并网逆变器仿真模型, 验证了该方案的有效性。

关键词: 并网逆变器; 弱电网; 复数滤波器; 伯德图; 稳定性

Grid voltage feedforward control strategy for weak grid based on complex filter

ZHENG Zheng, HUANG Xu, YANG Ming, LI Bin

(School of Electrical Engineering & Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: As the penetration of the distributed energy source in the grid is becoming higher and higher, the grid is increasingly showing the characteristics of weak grid due to some factors like the longer transmission lines and distribution transformer leakage inductance. The proportion feedforward system is widely employed to reduce the current steady-state error in weak grid conditions. The phase margin will be greatly reduced, which affects the stability of grid-connected inverter due to the introduction of the positive feedback loop associated with the grid impedance. Taking the three-phase LCL grid-connected inverter as an example, the influence of the grid impedance on the stability of grid-connected inverter is analyzed by the Bode diagram, and the control strategy that connects a complex filter in series in grid-connected voltage proportional feedforward loop is proposed. The analysis shows that the strategy can improve the stability of grid-connected inverter in a weak grid. Finally, a 5 kW three phase grid-connected inverter simulation model is built to verify the effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61703144) and Key Science and Technology Project of Colleges and Universities of Henan Education Department (No. 17A470010).

Key words: grid-connected inverter; weak grid; complex filter; Bode diagram; stability

0 引言

近年来, 随着世界各国对太阳能、风能等可再生能源的高度重视, 分布式发电系统在电网中的所占比例持续增大^[1-3]。然而, 随着分布式电源以及用户的广泛分布, 低压输电线路往往较长, 在线路阻抗和变压器漏感的共同影响下电网阻抗变得不可

忽略, 此外由于并网电压存在严重的背景谐波, 实际电网日益表现出弱电网特性^[4-7]。在弱电网情况下, 目前并网逆变器中广泛使用的并网电压比例前馈控制策略会额外引入一条与电网阻抗相关的反馈回路, 大幅降低了并网逆变器的相角裕度, 对并网逆变器的并网电流质量和稳定性造成了严重的威胁^[8-9]。因此应当对并网逆变器的稳定性进行改进优化。

目前, 国内外研究者判断 LCL 型并网逆变器的稳定性主要有以下两种方式。1) 基于阻抗的稳定性分析方法^[5], 该方法在静止坐标系或旋转坐标系下

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61703144); 河南省教育厅高等学校重点科研项目 (17A470010); 河南省矿山电力电子装置与控制创新型科技团队基金 (CXTD2017085)

建立系统的阻抗模型, 根据电网阻抗与逆变器阻抗之间的比值是否满足奈奎斯特(Nyquist)判据来判断系统的稳定性。文献[10]针对单相 LCL 型并网逆变器建立数学模型, 通过分析输出阻抗与稳定性之间的关系, 提出使用虚拟阻抗法来提高 LCL 型并网逆变器在弱电网下的性能。文献[11]提出了一种具有阻抗主动调节能力的并网逆变器控制策略以提高不同电网条件下并网逆变器的稳定性。然而这些方法均需要对电网阻抗进行实时测量, 对计算能力要求较高, 增加了控制算法的复杂程度。2) 控制系统建模分析法^[12-13], 该方法使用时域或频域稳定性分析方法来判断并网逆变器的稳定性。文献[14]利用伯德图和根轨迹分析了电网阻抗对并网逆变器稳定性的影响。文献[15]则首先建立了弱电网下的系统模型, 然后提出了谐振前馈的思想用来提升系统的稳定性。

本文以三相 LCL 型并网逆变器为研究对象, 首先对控制系统进行建模, 随后利用伯德图对系统的稳定性加以分析, 得到电网阻抗对系统稳定性的影响规律, 据此提出基于复数滤波器的并网电压前馈改进策略。该策略可以显著提升弱电网下并网逆变器的稳定性。最后搭建了一个 5 kW 的实验仿真平台, 验证了所提出控制策略的有效性。

1 建立 LCL 型并网逆变器数学模型

图 1 为三相 LCL 型并网逆变器结构图。逆变器侧电感 L_1 、网侧电感 L_2 以及滤波电容 C 构成了 LCL 型滤波器。由于电网侧电网电阻有利于系统的稳定性, 所以在分析电网阻抗对 LCL 型并网逆变器稳定性的影响时仅考虑电网电感 L_g 的作用^[10]。并网电压 U_{abc} 经过锁相环进行锁相输出相位信息 θ , K_d 为有源阻尼系数, G_f 为比例反馈系数, G_c 为电流调节器传递函数。

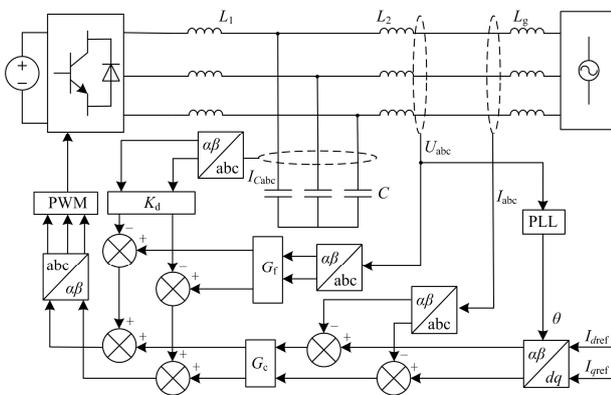


图 1 三相 LCL 型并网逆变器结构图

Fig. 1 Three-phase LCL grid-connected inverter

将三相 LCL 型并网逆变器数学模型经过坐标变换转化到两相静止坐标系下, 此时两相电流相互独立, 不存在耦合关系。LCL 型并网逆变器控制框图如图 2 所示。

在没有比例前馈 G_f 时, 参考电流 i_{ref} 到 i_g 的开环传递函数为式(1)所示。

$$G_{ir-ig}(s) = (k_{pwm} G_c(s)) / [s^3 CL_1(L_2 + L_g) + s^2 k_{pwm} Ck_d(L_2 + L_g) + s(L_1 + L_2 + L_g)] \quad (1)$$

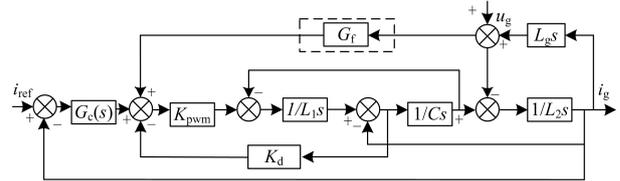


图 2 LCL 型并网逆变器控制框图

Fig. 2 Control block diagram of LCL grid-connected inverter

并网电压 $u_{pcc}(u_{pcc} = u_g + L_g \cdot i_g)$ 到 i_g 的传递函数如式(2)所示。

$$G_{upcc-ig}(s) = \frac{G_{ir-ig}(s)}{1 + G_{ir-ig}(s)} \cdot \frac{s^2 CL_1 + s Ck_d k_{pwm} + 1}{G_c(s) k_{pwm}} \quad (2)$$

由上可见, u_{pcc} 对输出电流造成了稳态误差, 为了减小 u_{pcc} 对输出电流的稳态误差, 目前在 LCL 型并网逆变器中广泛使用并网电压比例前馈的控制方案。在加入比例前馈 G_f 后, 参考电流 i_{ref} 到 i_g 的开环传递函数如式(3)所示。

$$G_{ir-ig}(s) = (k_{pwm} G_c(s)) / [s^3 CL_1(L_2 + L_g) + s^2 k_{pwm} Ck_d(L_2 + L_g) + s(L_1 + L_2 + L_g) - sL_g k_{pwm} G_f] \quad (3)$$

2 比例反馈对稳定性的影响

两相静止坐标系下逆变器的数学模型两相相互独立, 不存在耦合关系, 但是控制变量为正弦量, 传统的 PI 控制器无法做到无静差控制, 因此采用准比例谐振(Proportional Resonant, PR)控制器^[16]。准 PR 控制器可以在两相静止坐标系下达到与旋转坐标系下的 PI 控制器一样的控制效果。准 PR 控制器传递函数为

$$G_c(s) = K_p + K_r \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (4)$$

式中; K_p 、 K_r 为准 PR 控制的比例、谐振系数; ω_c 为控制器控制带宽; ω_0 为电网电压基波角频率。

图 3 为有无并网电压比例前馈伯德图对比。由此图可以看出在增加了并网电压比例前馈后, 低频段的系统增益有所增加, 但高频段的相角裕度由

50.5°大幅下降至 10.5°，严重影响了系统的稳定性。

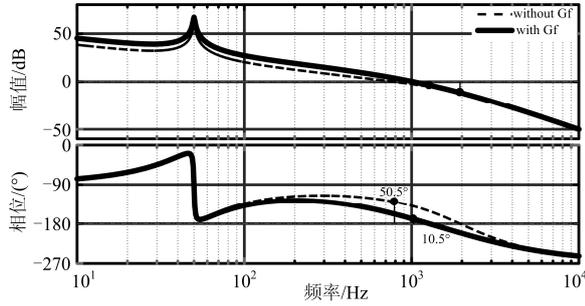


图 3 有无并网电压比例前馈系统伯德图对比

Fig. 3 Bode diagram of the system with and without grid-voltage proportional feedforward

此外，为了降低并网侧低次谐波对控制器的影响，一般在准 PR 控制器并联 5 次、7 次谐波补偿项，谐波补偿项的加入也会使系统的相角裕度降低。

3 基于复数滤波器的改进方法

根据第 2 节的分析可以看出：引入的并网电压比例前馈在高频段对系统的相角裕度产生了严重影响，从而降低了系统的稳定性。因此可以考虑在并网电压比例前馈环节串联滤波环节使并网电压比例前馈在高频段衰减，从而降低并网电压比例前馈对系统相角裕度的影响。

文献[17]提出了一种基于交叉解耦自适应复数滤波器的电网同步锁相环，其可以快速准确实现电网同步锁相功能。文献[18]使用复数滤波器测量电网电压正负序分量，从而实现了对电网电压畸变不平衡条件下并网逆变器的控制。文献[19]则在文献[17]的基础上设计了高阶解耦复数滤波方案。本文借鉴它们所使用的交叉解耦复数滤波器，利用复数滤波器所具有的滤波特性，将其应用在并网逆变器的并网电压前馈通道上，提出了基于复数滤波器的并网逆变器系统控制策略。

交叉解耦复数滤波器频域数学模型表达式如式(5)所示，其结构如图 4 所示。图中， ω_{fc} 为滤波器截止频率。

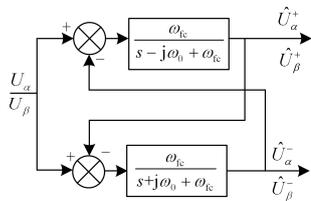


图 4 交叉解耦复数滤波器

Fig. 4 Cross decoupling complex filter

在 50 Hz 的电网条件下， ω_0 取电网电压基波角频率 314 rad/s。截止频率 ω_{fc} 则利用特征值分析进行优化设计。当 ω_{fc} 变化时，复数滤波器的主导特征值变化情况如图 5 主导特征值分布图所示。

$$\begin{cases} \hat{U}_\alpha^+(s) = \frac{\omega_{fc}}{s - j\omega_0 + \omega_c} (U_\alpha(s) - \hat{U}_\alpha^-(s)) \\ \hat{U}_\beta^+(s) = \frac{\omega_{fc}}{s - j\omega_0 + \omega_c} (U_\beta(s) - \hat{U}_\beta^-(s)) \\ \hat{U}_\alpha^-(s) = \frac{\omega_{fc}}{s + j\omega_0 + \omega_c} (U_\alpha(s) - \hat{U}_\alpha^+(s)) \\ \hat{U}_\beta^-(s) = \frac{\omega_{fc}}{s + j\omega_0 + \omega_c} (U_\beta(s) - \hat{U}_\beta^+(s)) \end{cases} \quad (5)$$

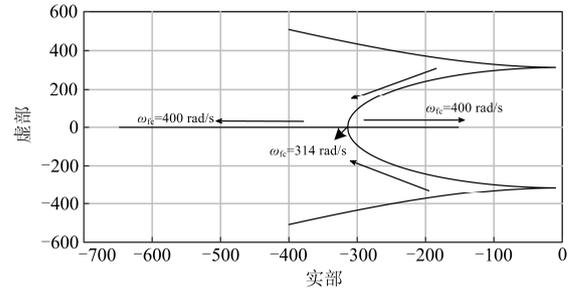


图 5 主导特征值分布图

Fig. 5 Dominant eigenvalue distribution

根据特征值分布情况可以看出，当 ω_{fc} 取值为 314 时，可以兼顾系统的滤波效果和动态特性^[17]。其中 $\omega_{fc}/(s - j\omega_0 + \omega_{fc})$ 为一阶正序滤波器， ω_0 取电网电压基波频率 314 rad/s，参数 ω_{fc} 取 314 rad/s，一阶正序滤波器伯德图如图 6 所示。

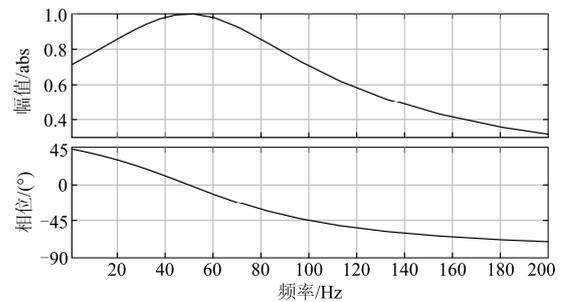


图 6 一阶正序滤波器伯德图

Fig. 6 Bode diagram of the first-order positive sequence filter

将复数滤波器 G_h 串联在并网电压比例前馈环节，串联后 LCL 并网逆变器控制图如图 7 所示。

利用伯德图进行分析验证，图 8(a)为未在并网电压比例前馈串联复数滤波器的伯德图，图 8(b)为串联了复数滤波器后的伯德图。

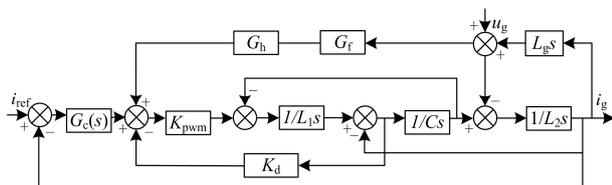


图 7 串联复数滤波器后逆变器控制框图

Fig. 7 Control block diagram of the inverter with complex filter

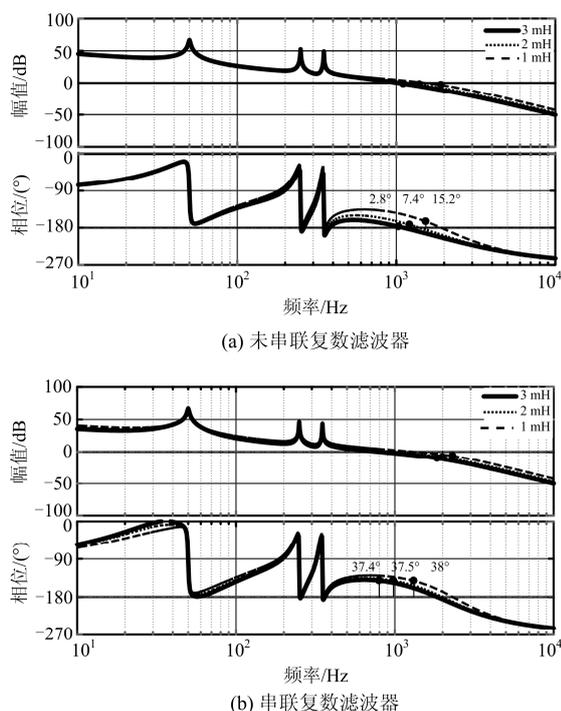


图 8 系统伯德图

Fig. 8 Bode diagram of the system

由图 8 可以看出,在电网阻抗分别为 1 mH、2 mH、3 mH 的条件下,未串联复数滤波器时稳定裕度为: 15.2°、7.4°、2.8°,系统的稳定裕度随着电网阻抗的上升快速下降,严重影响了系统的稳定性;相同电网阻抗条件下,在并网电压比例前馈环节串联了复数滤波器后的系统稳定裕度分别为 38°、37.5°、37.4°,系统的稳定性得到了有效提升且受电网阻抗变化的影响较小。

对复数滤波器进行数字化实现时,可以按照式(6)进行离散化变换。

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1}{s} \Leftrightarrow \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{T_s(23z^{-1} - 16z^{-2} + 5z^{-3})}{12(1 - z^{-1})} \quad (6)$$

4 仿真验证

本文基于 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了三相 LCL 型并网逆变器模型,使用参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型参数

Table 1 Parameters of the simulation model

参数	数值	参数	数值
直流侧电压 U_{dc}	500 V	并网侧电感 L_2	0.5 mH
并网侧电压有效值 V_{abrms}	180 V	滤波电容 C	5 μ F
额定功率 P_{out}	5 kW	阻尼系数 K_d	0.15
开关频率 f_{sw}	10 kHz	PR 控制器参数 K_p	0.112
逆变器侧电感 L_1	2 mH	PR 控制器参数 K_r	6.86

在电网阻抗为 4.5 mH 的条件下,进行仿真实验,可以得到在串联复数滤波器以及不串联复数滤波器情况下的系统并网点输出电压电流波形,波形对比如图 9 所示。

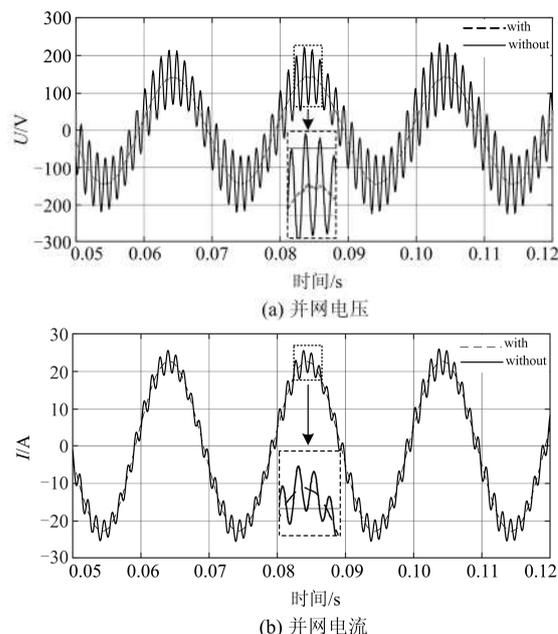
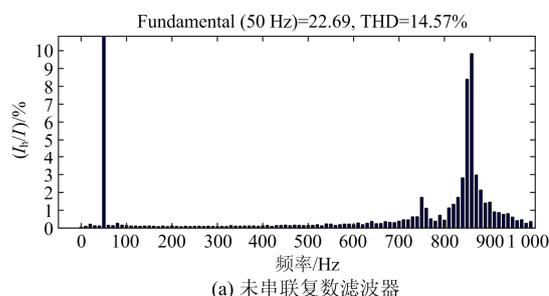


图 9 并网点电压电流对比

Fig. 9 Comparison of grid voltage and current waveforms

可以看出,没有复数滤波器的实验波形畸变较为明显,增加了复数滤波器的实验波形则较好。

使用快速傅里叶分析有无复数滤波器情况下的并网电流谐波含量,分析结果如图 10 所示。没有复数滤波器时谐波含量为 14.57%,远远超过了 IEEE Std.929-2000 标准(THD<5%)^[20],在增加了复数滤波器后谐波含量为 0.41%,效果显著。



(a) 未串联复数滤波器

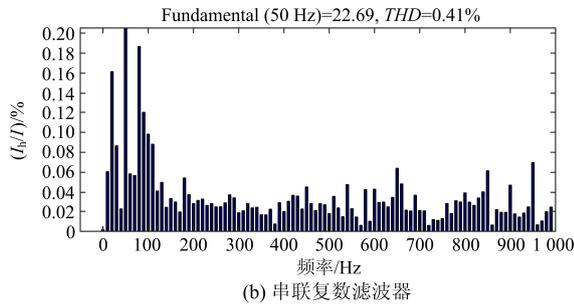


图 10 并网电流谐波分析

Fig. 10 Harmonics analysis of grid current

通过图 11 进一步分析两种状况下系统的输出功率, 没有复数滤波器的系统有功功率、无功功率大幅波动, 而增加了复数滤波器的系统有功功率输出稳定在 5 kW, 与设计参数一致。

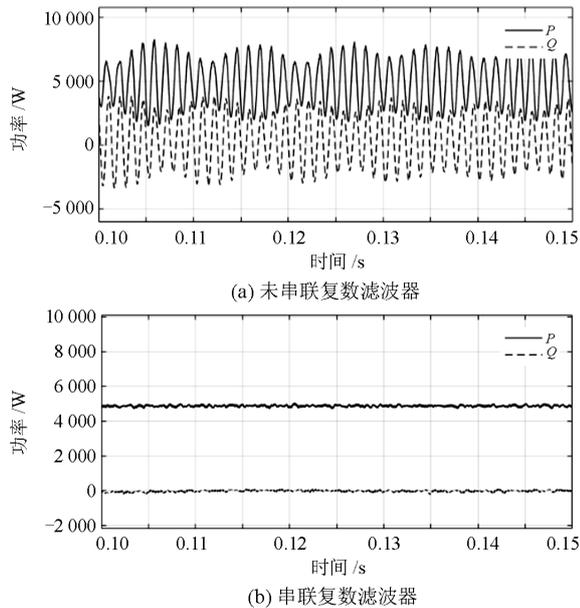


图 11 输出功率波形

Fig. 11 Waveforms of output power

通过以上分析可以看出, 在电压比例反馈环节串联复数滤波器可以有效增加系统在弱电网条件下的稳定性。

5 结论

目前并网逆变器广泛使用的并网电压比例前馈控制方案在弱电网条件下性能恶化, 入网电流产生畸变。本文首先对 LCL 型并网逆变器进行了建模分析, 总结了比例前馈环节降低系统稳定裕度的原因, 然后提出了使用复数滤波器来提升系统稳定性的方法, 并使用伯德图对其进行了验证。最后, 搭建了 5 kW 的并网逆变器仿真模型, 对所提出的方

法进行了仿真验证。结果证明, 该方法可以有效提高弱电网下并网逆变器的稳定裕度, 对提升并网逆变器运行稳定性、改善并网电流质量具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 朱晓荣, 刘世鹏, 张海宁, 等. 不平衡电网电压下光伏并网逆变器滑模直接电压/功率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 133-140.
ZHU Xiaorong, LIU Shipeng, ZHANG Haining, et al. Sliding mode control based direct voltage/power control strategy for PV grid connected inverter under unbalanced grid voltage[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 133-140.
- [2] BLAABJERG F, TEODORESCU R, LISERRE M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [3] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [4] LISERRE M, TEODORESCU R, BLAABJERG F. Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(1): 263-272.
- [5] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.9.
- [6] GLOVER E, CHANG C, DIMITRY G, et al. Frequency stability for distributed generation connected through grid-tie inverter[C] // Proceedings of IEEE Power System Technology Conference, October 30-November 2, 2012, Christchurch, New Zealand: 1-6.
- [7] 谢宁, 罗安, 马伏军, 等. 大型光伏电站与电网谐波交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 9-16.
XIE Ning, LUO An, MA Fujun, et al. Harmonic interaction between large-scale photovoltaic power stations and grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 9-16.
- [8] ABEYASEKERA T, JOHNSON C M, ATKINSON D J, et al. Suppression of line voltage related distortion in current controlled grid connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(6): 1393-1401.
- [9] 胡伟, 周友斌, 杜镇安, 等. 多并网逆变器系统谐振抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 45-50.

- HU Wei, ZHOU Youbin, DU Zhenan, et al. Research on resonance suppression strategy of system with multiple grid-connected inverters[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 45-50.
- [10] 杨东升, 阮新波, 吴恒. 提高 LCL 型并网逆变器对弱电网适应能力的虚拟阻抗方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2327-2335.
- YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. A virtual impedance method to improve the performance of LCL-type grid-connected inverters under weak grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2327-2335.
- [11] 陈新, 张旸, 王赟程. 基于阻抗分析法研究光伏并网逆变器与电网的动态交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4559-4567.
- CHEN Xin, ZHANG Yang, WANG Yuncheng. A Study of dynamic interaction between PV grid-connected inverters and grid based on the impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4559-4567.
- [12] XU Jinming, QIAN Qiang, XIE Shaojun, et al. Grid-voltage feedforward based control for grid connected LCL-filtered inverter with high robustness and low grid Current distortion in weak grid[C] // 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 20-24, 2016, Long Beach, CA, USA: 1919-1925.
- [13] 杨明, 周林, 张冬霞, 等. 考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 214-223.
- YANG Ming, ZHOU Lin, ZHANG Dongxia, et al. Stability analysis of large-scale photovoltaic power plants for the effect of grid impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 214-223.
- [14] YANG Shuitao, LEI Qin, PENG Fang, et al. A robust control scheme for grid-connected voltage-source inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 202-212.
- [15] 徐飞, 汤雨, 谷伟. 弱电网条件下 LCL 型并网逆变器谐振前馈控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4970-4979.
- XU Fei, TANG Yu, GU Wei. Resonant feedforward control strategy for LCL-type grid-connected inverters in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4970-4979.
- [16] 王秀云, 毛瑞鹏, 田壁源, 等. 基于 PI 与准 PR 联合控制的光伏并网电流优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 121-125.
- WANG Xiuyun, MAO Ruipeng, TIAN Biyuan, et al. Optimal control of photovoltaic grid-connected current based on PI and quasi-PR control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 121-125.
- [17] 王宝诚, 伞国成, 郭小强, 等. 分布式发电系统电网同步锁相技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 50-55.
- WANG Baocheng, SAN Guocheng, GUO Xiaoqiang, et al. Grid synchronization and PLL for distributed power generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 50-55.
- [18] 郭小强, 邬伟扬, 漆汉宏. 电网电压畸变不平衡情况下三相光伏并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 22-28.
- GUO Xiaoqiang, WU Weiyang, QI Hanhong. Control strategies of three-phase PV grid-connected inverter under distorted and unbalanced voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 22-28.
- [19] 王德玉, 刘文钊, 郭小强, 等. 非理想电网电压情况下并网变换器高阶解耦复数滤波并网同步技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2576-2583.
- WANG Deyu, LIU Wenzhao, GUO Xiaoqiang, et al. Grid synchronization technique with high-order decoupled complex filters for grid-connected converters under non-ideal grid voltages[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2576-2583.
- [20] IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems: IEEE Std.929—2000[S].

收稿日期: 2017-12-28; 修回日期: 2018-03-06

作者简介:

郑 征(1965—), 女, 博士, 教授, 研究方向为可再生能源功率变换与并网技术、大功率电力电子与电力系统控制; E-mail: zhengzh@hpu.edu.cn

黄 旭(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网发电技术; E-mail: huangxutongxue@163.com

杨 明(1982—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新能源并网发电技术。E-mail: yangming0391@163.com

(编辑 姜新丽)