

电网电压谐波畸变条件下并网逆变器的控制策略研究

杨旭红, 郝鹏飞

(上海电力大学 自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 为了提高电网电压畸变条件下分布式发电系统的适应能力, 实现逆变器输出电流的高质量并网, 需要改进其传统控制策略。首先, 建立三相 LCL 型并网逆变器的等效数学模型, 分析电网背景谐波影响入网电流的机理。然后, 提出一种基于 PMCI(比例多复数积分)控制器和改进电网电压前馈的有源阻尼控制策略。通过 PMCI 控制器实现对基波电流的无静差跟踪和对谐波的有效补偿, 引入电网电压前馈提高整个控制系统对电网电压扰动的响应速度, 同时滤除部分谐波。最后, 在 MATLAB/Simulink 中搭建逆变器的控制模型, 仿真结果显示电网电压谐波畸变条件下, 所提出的控制策略能够有效削弱电网背景谐波对入网电流的影响, 证明了该控制策略的可行性与有效性。


关键词: 电网电压谐波畸变; 并网逆变器; 比例多复数积分控制器; 电网电压前馈

文章编号: 1007-1881(2021)06-0022-06

DOI: 10.19585/j.zjdl.202106004

中图分类号: TM712

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Research on Control Strategy of Grid-Connected Inverter under Grid Voltage Harmonic Distortion

YANG Xuhong, HAO Pengfei

(College of Automatic Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: To improve the adaptability of the distributed generation system under grid voltage distortion and achieve a high-quality grid connection of the inverter output current, it is essential to improve its traditional control strategy. First, an equivalent mathematical model of the three-phase LCL grid-connected inverter was established, and the mechanism of background harmonics in the grid affecting the grid current was analyzed. Then, an active damping control strategy based on proportional multiple complex integral (PMCI) controller and improved grid voltage feedforward was proposed. The PMCI controller realizes the tracking of the fundamental current without static errors and the effective compensation of the harmonics. The introduction of grid voltage feedforward can improve the response speed of the entire control system to grid voltage disturbances and filter out part of harmonics. Finally, a control model of the inverter was built in MATLAB/Simulink. The simulation results showed that under the grid voltage harmonic distortion, the proposed control strategy turned out to be feasible and effective by mitigating the impact of grid background harmonics on grid current.

Keywords: grid voltage harmonic distortion; grid-connected inverter; PMCI controller; grid voltage feedforward

0 引言

近年来, 随着对以风能、太阳能等为主的可再生清洁能源的大力开发与利用, 越来越多的 DGS(分布式发电系统)被接入大电网^[1]。并网逆

变器发挥着 DGS 和配电网之间中心纽带的作用, 通常将其连接 LCL 滤波器完成并网。但 LCL 滤波器作为一个三阶系统, 存在固有的谐振问题, 而且谐波阻抗较低^[2-3], 这意味着从并网逆变器注入到配电网的电流容易受电网电压扰动的干扰。因此, 能否降低由电网电压背景谐波引起的网侧电流谐波畸变决定着 LCL 型并网逆变器性能的好坏^[4]。

为了提升逆变器的性能, 文献[5-6]提出一种

基金项目: 上海市电站自动化技术重点实验室开放课题(13DZ2273800); 上海市重点科技攻关计划(上海市科委地方院校能力建设项)(14110500700)

基于电网电压比例前馈的双环控制策略，通过增大系统的输出阻抗来削弱电网电压背景谐波对并网电流的影响，但对谐波的抑制能力有限。文献[7-9]在此基础上进行了改进，可以较大程度地降低电网电压引起的入网电流谐波，但是前馈函数引入了电网电压的导数和二阶导数项，无法在数字化控制中精确实现，而且数字化中固有的延迟也没有考虑在内，因此在实际控制中，整体的谐波抑制效果不太理想。文献[10-12]同时实现了对基波电流的跟踪和对畸变电网电压扰动的抑制，取得良好的控制效果，但是采用的比例多谐振调节器存在阶数高、参数设计困难的缺点。文献[13]为了提高并网电流质量，基于增大环路增益的思想，采用了一种PI(比例-积分)加重重复控制的混合型电流控制器用于电容电流的有源阻尼控制策略中。文献[14]采用了双调节器用于非理想工况下MMC(模块化多电平换流器)的控制，取得了良好的控制效果。由于非整数倍周期的延时在数字控制系统中难以实现，故而上述2种方法中重复控制器的控制性能很大程度上受到了限制。文献[15]将滑模理论用于传统功率控制，提出SMCDPC(滑模变结构直接功率控制)策略，最大优点是对所有次数谐波都有一定的抑制能力，在实际工程中有很大的应用价值，但算法复杂，计算量庞大。

综合上述分析，本文以三相LCL型光伏并网逆变器为研究对象，建立其数学模型，研究畸变电网电压对逆变器入网电流的影响机制，并提出了一种基于PMCI(比例多复数积分)控制器和改进电网电压前馈的新型复合有源阻尼控制策略，削弱电网背景谐波对系统的影响，从而为大电网提供高效、高质量的入网电流。在MATLAB/Simulink中搭建仿真模型，对所提策略的正确性与可行性进行验证。

1 三相LCL型并网逆变器模型

三相光伏并网逆变器的拓扑及其控制结构如图1所示。为了消除高频谐波，三相逆变桥经LCL滤波器并入电网，采用电容电流反馈的有源阻尼控制策略消除谐振频率处的谐振尖峰问题，提高并网逆变器稳定性。对于三相LCL型逆变器，考虑到dq旋转坐标系下两轴存在耦合项，因此在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下采取相应的控制策略。图

1中： U_{dc} 为逆变器直流侧电压； H_{ic} 、 H_{ug} 分别为电容电流反馈系数和电网电压前馈项； U_{gk} 、 I_{gk} 、 I_{ck} 分别为电网电压、逆变器并网侧电流、滤波电容电流，其中 $k=a, b, c$ 表示三相； C 为滤波电容； L_1 、 L_2 为滤波电感； I^* 为给定的电流参考值； $G_i(s)$ 为控制器传递函数，其中 s 为拉普拉斯算子；PLL为锁相环；SVPWM为空间矢量脉宽调制。

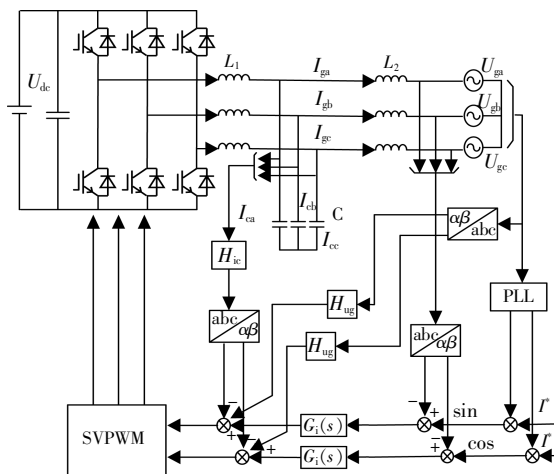


图1 三相并网逆变器的拓扑及其控制结构

2 电网电压对并网电流影响机理分析

由于两相静止坐标系下 α 轴和 β 轴彼此对称且独立无耦合，故本文选择 α 轴下并网逆变器数学模型进行分析。 α 轴下逆变器控制结构如图2所示，其中 K_{PWM} 为逆变器增益， $I_{g\alpha}$ 为并网电流。

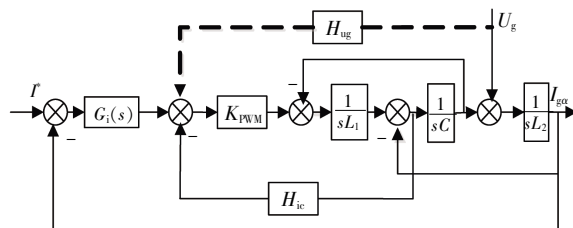


图2 α 轴下并网逆变器控制结构

由图2可以看出， α 轴下LCL逆变器模型是一个双输入单输出系统，假设参考电流 I^* 为输入1，电网电压扰动 U_g 为输入2，在只考虑输入1的情况下，系统的开环传递函数：

$$G_o(s) = \frac{G_i(s)}{L_1 L_2 C s^3 + H_{ic} L_2 C s^2 + (L_1 + L_2) s} \quad (1)$$

闭环传递函数

$$G_c^i(s) = \frac{I_{gr}}{I^*} = \frac{G_i(s)}{L_1 L_2 C s^3 + H_{ic} L_2 C s^2 + (L_1 + L_2)s + G_i(s)} \quad (2)$$

当只考虑输入 2 时, 系统闭环传递函数:

$$G_c^v(s) = \frac{I_{gr}}{U_g} = \frac{L_2 C s^2 + C s + 1}{L_1 L_2 C s^3 + H_{ic} L_2 C s^2 + (L_1 + L_2)s + G_i(s)} \quad (3)$$

根据叠加原理, 由式(2)和(3)整理可得逆变器并网电流:

$$I_{gr} = G_c^i(s) I^* + G_c^v(s) U_g \quad (4)$$

由式(4)可知, 并网电流 I_{gr} 受参考电流 I^* 和电网电压 U_g 的控制, 参考电流为固定量, 而电网电压为不可控量。当电网电压畸变时, 由于 $G_c^v(s)$ 不为零, 入网电流必定受网侧背景谐波影响, 谐波含量增大。为了避免背景谐波造成入网电流无法达到并网标准要求的 THD(总谐波畸变率)小于 5%, 必须满足电网电压在谐波频率处增益 $|G_c^v(s)|$ 趋于零的条件, 由式(3)分析可得, 只有使 $G_i(s)$ 在特定谐波频率处增益为无穷大才能满足上述条件, 进而得到高质量的入网电流。

3 控制方法

3.1 PMCI 控制器的提出

本文是在 $\alpha\beta$ 坐标系下完成对直流量的跟踪控制, 需要分别对基波电流分量进行跟踪和对谐波电流分量进行抑制。传统 PI 控制无法满足要求, 故而采用改进的 PI 控制器即 PCI 控制器^[16], 其传递函数为:

$$G_{PCI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s - j\omega} \quad (5)$$

式中: k_p 和 k_i 分别为比例系数和复数积分系数; ω 为角频率; j 为复数, 但在传递函数中难以实现, 基于 $\alpha\beta$ 参考坐标系的正交关系 ($m_\alpha = jm_\beta$), 复数域控制器可以通过如图 3 的结构来实现^[16]。

同时由式(5)可知, G_{PCI} 在基波频率处增益为:

$$|G_{PCI}(j\omega)| = \sqrt{k_p^2 + \left(\frac{k_i}{s - j\omega}\right)^2} \quad (6)$$

由式(6)可知, 在特定频率处 PCI 控制器增益为无穷大, 满足第 2 节中提出的对于 $G_i(s)$ 的要求。针对此特性, 考虑到在谐波频率处增益也能够保持无穷大, 故采用了 PMCI 控制器对畸变电网电压中主要含有的 5 次、7 次谐波进行补偿控制。h 次谐波补偿控制结构如图 4 所示, 其传递

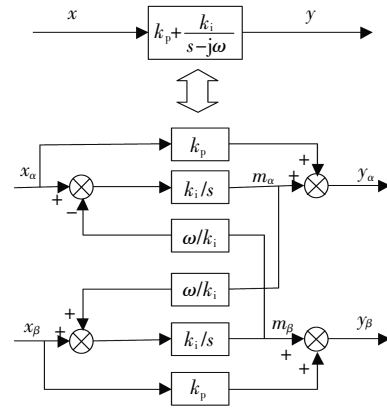


图 3 PCI 控制器结构

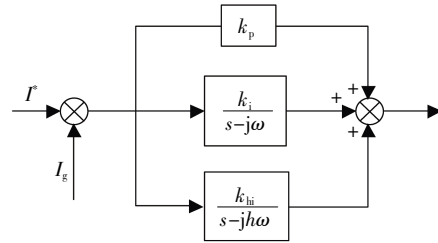


图 4 h 次谐波补偿控制结构

函数为:

$$G_{PMCI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s - j\omega} + \frac{k_{hi}}{s - jh\omega} \quad (7)$$

图 5 为 PMCI 控制器的 Bode 图。由式(7)和 Bode 图可以看出, PMCI 控制器在基波和特定谐波频率处的增益均为无穷大, 满足第 2 节分析中提出的使电网电压增益趋于零的条件。因此, 将 PMCI 控制器引入控制回路中, 同时实现对基波的跟踪和对谐波的抑制。

3.2 改进电网电压前馈控制

上述采用的 PMCI 控制器主要是通过增大环路增益的方式对电网电压中主要含有的 5 次、7 次固定次谐波进行抑制。而电压前馈控制是通过增大系统阻抗来削弱电网电压背景谐波的影响, 同时还可以提高系统的动态响应速度。

由图 2 可得图 6, 利用等效变换:

$$G_1(s) = \frac{K_{PWM}}{s^2 L_1 C + s C K_{PWM} H_{ic} + 1} \quad (8)$$

$$G_2(s) = \frac{s L_1}{K_{PWM}} \quad (9)$$

$$G_3(s) = 1 + \frac{s L_1}{K_{PWM} G_i(s)} \quad (10)$$

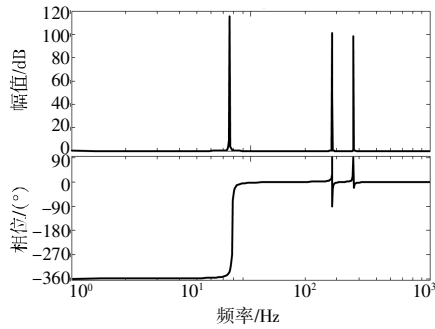


图 5 PMCI 控制器 Bode 图

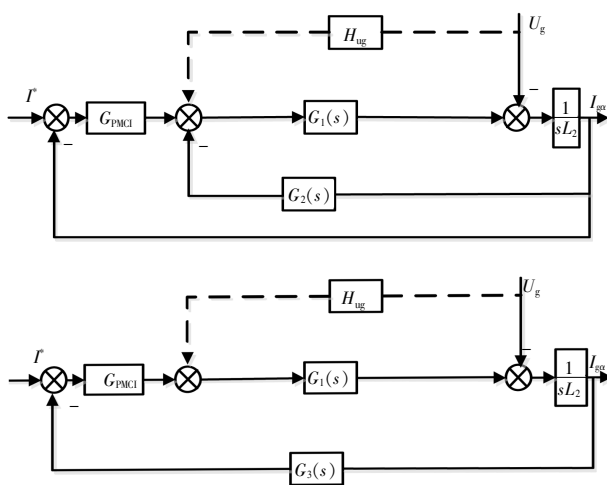


图 6 等效控制结构

若要通过前馈环节对电网电压扰动进行补偿, 则需满足:

$$H_{ug}G_1(s)=1 \quad (11)$$

由此可知:

$$H_{ug} = \frac{1}{K_{PWM}} + sCH_{ic} + \frac{s^2L_1C}{K_{PWM}} \quad (12)$$

由式(12)可以看出, 前馈项 H_{ug} 包括比例项和一阶、二阶微分项, 由于数字电路中微分项实现比较困难, 本文考虑利用全前馈函数中的比例项来实现对电压中含有的主要次谐波进行抑制。文献[17]针对全前馈各项的作用进行了详细的讨论与分析, 该文指出满足误差函数幅值标幺值小于 0.1 的条件, 即可视为电压比例前馈与全前馈具有同等的滤波能力。通过建立误差函数并绘制误差曲线发现, 当频率不大于 400 Hz 时, 可保证误差不超过 0.1。由此可见电网电压中主要含有 5 次、7 次背景谐波都在可接受误差对应的频率范围之内, 故取前馈项:

$$H_{ug}^* = \frac{1}{K_{PWM}} \quad (13)$$

本文基于电容电流反馈的有源阻尼, 采用简化后的前馈项(即比例前馈)以及 PMCI 控制器构成复合控制环, 对电网电压主要含有的 5 次、7 次谐波进行抑制, 提高了系统对电网电压的适应能力, 实现了良好的动态性, 同时也提高了整个系统的稳定性。

4 实验仿真分析

为了验证本文所提方法的可行性与有效性, 在 MATLAB/Simulink 中搭建三相并网逆变器的控制模型进行仿真, 参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

仿真参数	数值
直流侧电压 U_{dc}/V	650
网侧相电压 U_g/V	220
逆变器侧滤波电感 L_1/mH	9
网侧滤波电感 L_2/mH	3
滤波电容 $C/\mu F$	10
基波频率 f/Hz	50
电容电流反馈系数 H_e	1
逆变器开关频率 f/kHz	25
比例系数 k_p	1.1
积分系数 k_i	80
谐波频率处积分系数 k_{s1}, k_{s2}	20, 20

在 0.08 s 时给三相理想电网电压中注入以 5 次、7 次为主的背景谐波, 含量分别为 10% 和 3%, 三相电网电压波形如图 7 所示, 在谐波引入时刻发生畸变。图 8—10 为常规 PCI 控制下的 A 相电压、并网电流波形以及电流的 FFT(快速傅里叶变换)分析。可以看出在 0.08 s 前电压处于理想状态时, 并网电流 THD 值为 0.18%, 而 0.08 s 在电压中加入少许谐波后并网电流 THD 值增加到 1.66%, 其中 5 次谐波由 0.14% 增加到 1.3%, 7 次谐波由 0.08% 增加到 0.65%。这个结果充分验证了第 2 节的理论分析。

图 11 和图 12 为仅在 PMCI 控制器下 A 相电压、电流波形及其 FFT 分析频谱, 可见并网电流中谐波含量减小到 0.59%, 其中 5 次谐波降至 0.38%, 7 次谐波降至 0.15%。

在控制系统中加入本文所提基于 PMCI 控制

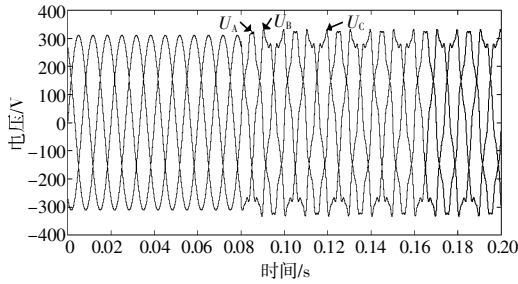


图7 背景谐波下电网电压

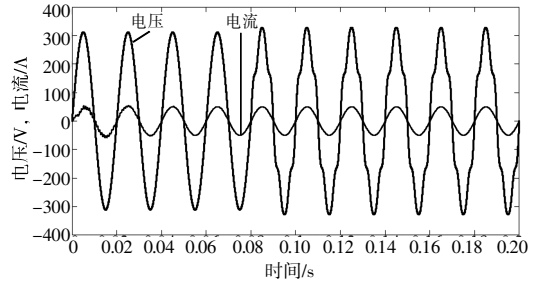


图11 PMCI控制下A相电压和电流

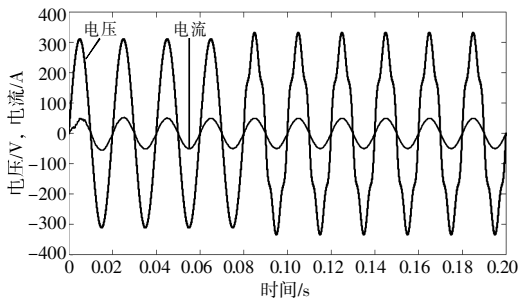


图8 PCI控制下A相电压和电流

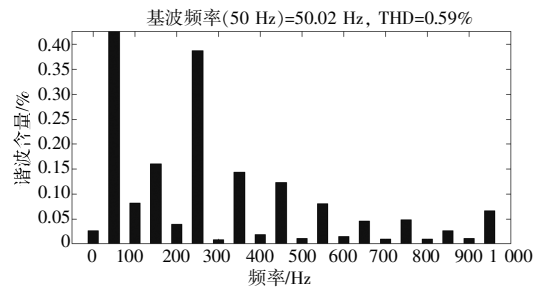


图12 PMCI控制下A相电流FFT分析

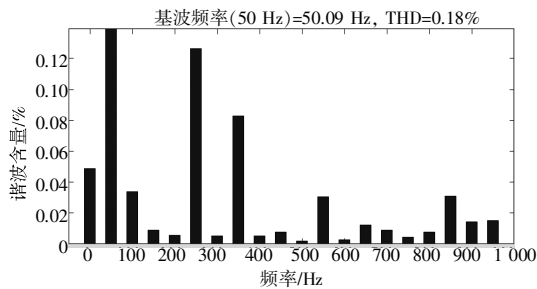


图9 前0.8s电流FFT分析

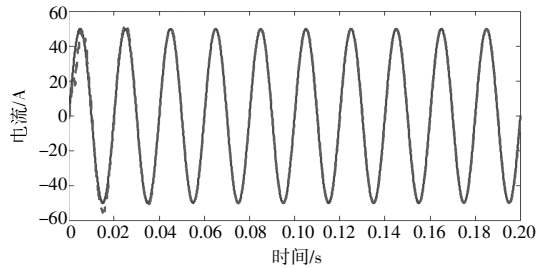


图13 α 轴电流跟踪波形

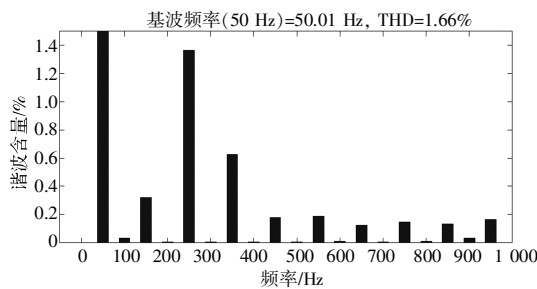


图10 0.8s后电流FFT分析

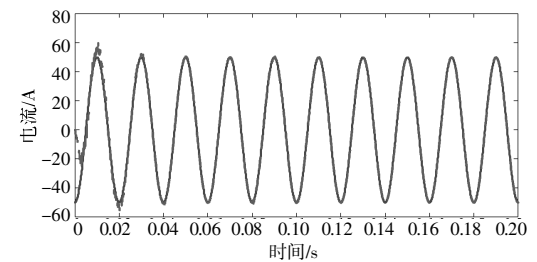


图14 β 轴电流跟踪波形

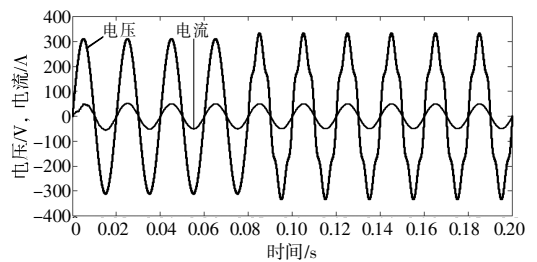


图15 本文所提方法下A相电压和电流

器和电网电压比例前馈得控制策略后并网参考电流跟踪波形如图13和图14所示, α 轴、 β 轴电流都能够准确跟踪给定的参考电流。逆变器输出A相电压和并网电流如图15所示, 其电流的FFT分析如图16所示。可以看出, 三相LCL型逆变器在此控制策略下, A相并网电流能够实现与电网

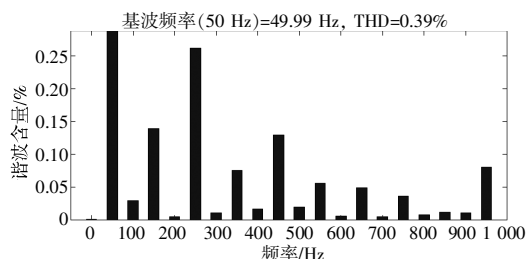


图 16 本文所提方法下 A 相电流 FFT 分析

电压同步并网, THD 值进一步降低至 0.39%, 主要的 5 次、7 次谐波含量分别为 0.26% 和 0.13%, 而且在加入谐波后电流在极短时间内便可达到并网标准, 在理想电网状态和电网发生谐波畸变状态下都能够实现电流的高质量并网。

5 结语

电网在实际工作过程中不会一直处于理想状态运行, 难免会含有一定成分的背景谐波, 如果不加以抑制, 会影响传统控制系统的稳定性。本文分析了电网电压背景谐波造成逆变器入网电流畸变的原因, 在此基础上对传统控制方法进行改进, 提出了一种基于 PMCI 控制器和改进电网电压前馈的有源阻尼控制策略, 可以有效削弱电网电压背景谐波的影响, 降低入网电流 THD, 实现高质量并网。通过仿真分析, 验证了所提出控制策略的有效性与可行性。

参考文献:

[1] 杨兴武,王涛,徐依明,等.基于虚拟电感的 LCL 型并网逆变器电网电压前馈控制策略[J].太阳能学报,2020,41(11):56-63.

[2] 马文杰,欧阳森,杨林.适用于三相并网逆变器的新型谐振控制方法[J].电网技术,2019,43(8):2884-2891.

[3] LI P,WU W,HU K.A Multicell network control and design for three-phase grid-connected inverter[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2021,68(4):2740-2749.

[4] 李国庆,张馨月,陈继开,等.计及谐波影响的光伏逆变器控制方法研究[J].电测与仪表,2014,51(10):70-76.

[5] 叶吉亮,李岚,刘海霞,等.电网电压不平衡及谐波状态下的并网逆变器控制策略[J].电力系统保护与控制,2018,46(6):113-119.

[6] 周培东,赵宇,李继川,等.电网谐波下 PWM 变换器的

谐波电流抑制[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(5):91-96.

[7] LI W,RUAN X,PAN D,et al.Full-feedforward schemes of grid voltages for a three-phase LCL-type grid-connected inverter[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(6):2237-2250.

[8] WANG X,RUAN X,LIU S,et al.Full feed-forward of grid voltage for grid-connected inverter with LCL filter to suppress current distortion due to grid voltage harmonics[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2010,25(12):3119-3127.

[9] 潘嘉进,刘彦呈,张勤进,等.基于电网电压全前馈的七电平光伏并网系统[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(6):53-58.

[10] HU J,ZHANG W,WANG H,et al.Proportional integral plus multi-frequency resonant current controller for grid-connected voltage source converter under imbalanced and distorted supply voltage conditions[J].Journal of Zhejiang University(Science A),2009,10(10):1532-1540.

[11] 韩刚,蔡旭.不平衡及畸变电网下并网逆变器的比例多谐振电流控制[J].电力自动化设备,2017,37(11):104-112.

[12] JIA Y,ZHAO J,FU X.Direct grid current control of LCL-filtered grid-connected inverter mitigating grid voltage disturbance[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2013,29(3):1532-1541.

[13] 都成刚,黄静.非理想电网下 LCL 逆变器并网电流质量改善研究[J].电力电子技术,2018,52(11):99-103.

[14] 梁莹玉,刘建政.谐波和不对称电网电压 MMC-HVD 桥臂电流控制策略[J].电网技术,2018,42(8):2494-2502.

[15] 熊平化,孙丹,邓伦杰.广义谐波电网环境电压源型并网逆变器滑模变结构直接功率控制策略[J].电网技术,2016,40(6):1845-1850.

[16] 郭小强.光伏并网逆变器通用比例复数积分控制策略[J].中国电机工程学报,2015,35(13):3393-3399.

[17] 董文明.电网电压畸变下 LCL 型并网逆变器控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.

收稿日期: 2021-04-06

作者简介: 杨旭红(1969),女,博士,教授,研究方向为智能电网控制技术、新能源发电及储能技术、火电和核电机组的仿真建模及控制技术。

(本文编辑: 徐 晗)