

不平衡电网下新能源三相并网逆变器功率-电流协同控制研究

杨国良, 高鹏涛, 陈子文

(河北省电力电子节能与传动控制重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 近年来对于可再生能源的利用和分布式电源在电网系统中的比重日益上升, 电力系统电力电子化的趋势越来越明显。随之而来的问题是当电网电压不平衡时并网逆变器系统性能降低, 严重时需在电网中切除的问题, 这将严重影响电力系统的稳定性, 所以不平衡电网下的并网逆变器控制尤为关键。电网电压不平衡条件下系统的输出功率和电流质量是并网逆变器的主要关注指标。本文以三相三线制的 LCL 型并网逆变器为例, 分析相位检测失准和功率波动问题, 提出了一种改进的锁相环和功率-电流协同控制策略, 该方法可以统一参考电流公式和协调系数, 实现并网电流、有功功率和无功功率之间的平滑切换。通过 Matlab/Simulink 仿真和 RT-LAB 平台的实验, 验证了所提策略的可行性与有效性。

关键词: 不平衡电网; 三相逆变器; 功率-电流协调控制; 改进锁相环; 协调系数

Research on Power-current Cooperative Control of Three-phase Grid-connected Inverters for Renewable Energy under Unbalanced Grid Condition

YANG Guoliang, GAO Pengtao, CHEN Ziwen

(Hebei key Laboratory of Power Electronics for Energy Conservation and Drive Control,
Hebei Qinghuangdao 066004, China)

Abstract: In recent years, the utilization of renewable energy and the proportion of distributed generation in power grid systems have been increased significantly, and the trend of power electronics in power systems is becoming more and more evident. The problem that arises is that when the grid voltage is unbalanced, the performance of grid-connected inverters decreases which shall be eliminated in the power grid, otherwise it can seriously affect the stability of the power system. Therefore, the control of grid-connected inverters under unbalanced grid conditions is particularly critical. The output power and current quality of the system under unbalanced grid voltage conditions are the main concerned data of grid-connected inverters. In this paper, a three-phase three-wire LCL-type grid-connected inverter is taken as an example, the issues of phase detection inaccuracies and power fluctuations are analyzed, and an improved phase-locked loop (PLL) and power-current cooperative control strategy is proposed. This method can refer to the reference current formula and coordination coefficients to achieve smooth switching among grid-connected current, active power, and reactive power. The feasibility and effectiveness of the proposed strategy are verified through Matlab/Simulink simulations and experiments on the RT-LAB platform.

Keywords: unbalanced grid; three-phase inverter; power-current cooperative control; improved phase-locked loop; cooperation index

0 引言

为了实现“十四五”现代能源体系规划, 实现双

碳目标, 近些年来对于可再生能源的利用和分布式电源在电网系统中的比重日益上升, 电力系统电力电子化的趋势越来越明显^[1]。随之而来的问题是当

收稿日期: 2025-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(61873226)。

电网电压不平衡时并网逆变器系统性能降低,严重时需在电网中切除的问题,这将严重影响电力系统的稳定性,所以不平衡电网下的并网逆变器控制尤为关键。而正常性不平衡则通常源于电网参数与负荷的不匹配,比如三相负荷不均衡、单相大负荷的接入,或由于传输线路的老化和损伤导致的线路阻抗不一致等情况。

电流控制的关键在于参考电流的给定,文献[3]在电流内环与功率外环的基础上,基于瞬时功率概念,分别基于负序电流抑制、有功波动抑制与无功波动抑制给出参考电流公式。在此基础上,文献[4]基于参考电流最大值与额定功率的关系,通过改变功率输出来调节并网电流平衡,牺牲了并网逆变器系统的效率。文献[5]仅考虑电压跌落和谐波计算参考电流,未考虑有功功率波动与无功功率波动问题。文献[6]首先离线计算出了在获取最小峰值电流时参考指令电流中调节参数的值,并制作成表格。在控制过程中,通过查找表格来获取并网电流指令,从而实现电流的限流控制。然而,这种没有实时计算参考电流环节,会导致输出电流的畸变,并且还无法灵活调节功率。文献[7]在已有文献的基础上基于 $\alpha\beta 0$ 坐标系下给出通过正负序分量计算的统一参考电流表达式,并设置调节参数以实现从抑制无功功率波动到抑制有功功率波动的控制目标调节。文献[8]在双二次广义积分锁相基础上,研究了一种PI控制与电网电压前馈控制相结合的并网电流控制方法,适用于非理想电网工作条件。文献[9]提出通过控制并网系统输出电流最小,有功功率振荡和PCC点电压平衡3个目标的协调控制策略,但此方法需要控制器迅速提取电网不平衡信息,当电网电压不平衡时会使三相并网电流同时增大,如不设置过流保护会导致硬件电路损坏等缺点^[10]。文献[11]在复平面上构建参考电流公式,引入两个协调参数来指定不同的控制目标。文献[12]基于对之前的参考电流计算进行总结,提出了广义的参考电流给定方法,在多目标间建立协调控制的策略。

逆变器的控制策略可以根据其主要调节变量的不同分为电流控制和电压控制两种模式。在电压控制模式下,逆变器能够生成一个独立的电压,允许他既能独立运行也能并入电网^[13-19]。电压控制模式下的控制技术包括如下垂控制和虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制^[20-24]等。与电压控制模式相比,电流控制模式下的换流器拥有更简单的控制架构,在并网系统中得到了广泛的采用。

本文首先对于二阶广义积分器进行了改进,使其可以很好地抑制直流分量。对恒功率控制目标下的参考电流进行量化分析,根据并网电流、有功功率、无功功率3个目标,构建统一参考电流公式,引入协调系数使其能在各个目标下切换。最后在Matlab/Simulink中仿真验证控制策略的有效性。

1 并网逆变器的数学模型

1.1 并网逆变器结构

如图1所示为本文研究的三相并网逆变器的拓扑结构。图中: U_{dc} 为直流母线电压; S_1-S_6 为三相逆变器的开关管; L_1 为逆变器侧电感; L_2 为网侧电感; C_f 为支路电容; u_i 为逆变器桥侧电压; i_i 为逆变器输出的电流; u_g 为电网电压; i_g 为电网电流; Z_g 为电网阻抗;由于三相并网系统大多为强电网,电网阻抗可以忽略不计,本文基于此进行后续研究。

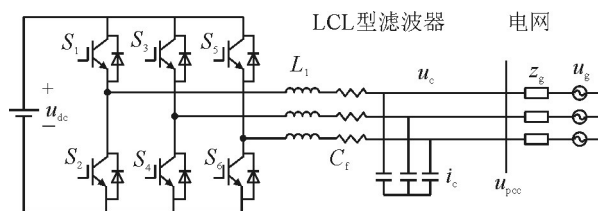


图1 三相并网逆变器的拓扑

Fig. 1 Topology of three phase grid-connected inverter

图中直流母线电压 u_{dc} 经过DC/AC逆变桥输出经过LCL滤波器连接到电网 u_g 上,LCL滤波器用于消除逆变器的高频谐波;采用电流控制实现并网逆变器向电网传送有功或无功功率。

LCL型并网逆变器目前已有较为成熟和广泛的应用,但在控制系统设计中,该数学模型存在着三相中所有变量均为交流量并且电流控制器的数量多阶数高的问题,目前常见的控制策略的搭建通常基于 $\alpha\beta$ 轴和dq轴上,在电网系统存在不平衡时,关键的问题在于控制的快速响应,防止系统崩溃,而dq轴上存在的耦合和大量三角函数运算无疑与上述需求相悖^[14-24]。综上所述,本文选择在 $\alpha\beta$ 上进行控制策略的设计。 α 轴和 β 轴结构相互独立且对称。为阐述方便,选取 α 轴模型进行分析。闭环参数主要有电容电流负反馈 H_{ic} 系数和并网电流调节器参数。对电流进行闭环控制,主要是为实现3大目标:减小并网电流稳态误差、降低谐波含量、提升动态响应速度,以此保障电流稳定、优质、高效运行。 α 轴LCL并网逆变器控制框图见图2。

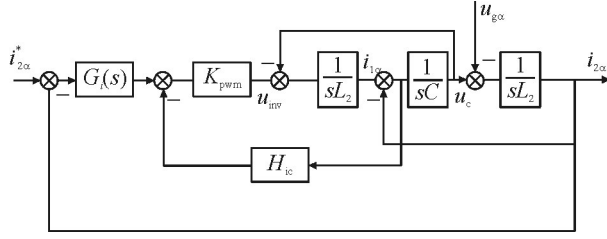


图2 α 轴 LCL 并网逆变器控制框图
Fig. 2 Control block diagram of the α -axis LCL grid-connected inverter

1.2 不平衡电压的正负序分离算法

在仅考虑电网电压不平衡时,三相三线制并网逆变器电网电压由正序分量和负序分量组成,其中负序分量会导致并网系统额外的功率损耗,频率波动和相位偏移问题。将不平衡电网电压由对称分量法分解为正序分量和负序分量,公式为

$$u_{abc}^+ = [u_a^+, u_b^+, u_c^+]^T = [T^+] u_{abc} \quad (1)$$

$$u_{abc}^- = [u_a^-, u_b^-, u_c^-]^T = [T^-] u_{abc} \quad (2)$$

式中,

$$[T^+] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[T^-] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

将其利用 Clarke 变换转换到 $\alpha\beta$ 轴上可得

$$u_{\alpha\beta}^+ = [u_{\alpha}^+, u_{\beta}^+]^T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} u_{\alpha\beta} \quad (5)$$

$$u_{\alpha\beta}^- = [u_{\alpha}^-, u_{\beta}^-]^T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} u_{\alpha\beta} \quad (6)$$

式中 q 为一个移相算子,等于 $e^{-j\pi/2}$ 。

分析式(5)-(6),如果想得到电网电压不平衡下的正负序分量以便于之后的控制策略设计,首先是要得到和的正交信号,目前研究中可以获得正交信号的方式有:1)周期延迟法;2)陷波器法;3)微分法。周期延迟法因为其存在时延问题响应较慢及对谐波无法抑制,因此无法用于含有背景谐波的电网中。陷波器法频率选择性和动态性能差的问题也在不平衡电网下应用存在缺点。在电网电压不平衡或存在畸变时,文献[25]将正序分量分离出再给到 SRF-PLL 进行控制,就可以避免负序分量与谐波分量对于锁相环的影响,这种由两个二阶广义积分器(second-order generalized integrator, SOGI)与 SRF-PLL 联合锁相的方法称为双二阶广义积分器锁相环(double second-order generalized integrator, DSOGI)。文献[26]已经分析基于 SOGI 的正负序分离算法可

以将正负序分离,并且 SOGI 的环节 $D(s)$ 只在基波处保持 0 dB 的增益,可以充当带宽滤波器环节,在 $Q(s)$ 时低频分量和直流分量会对此环节造成影响。为了消除此种不利影响,下面对 SOGI 环节加以改进,其结构框图见图 3。

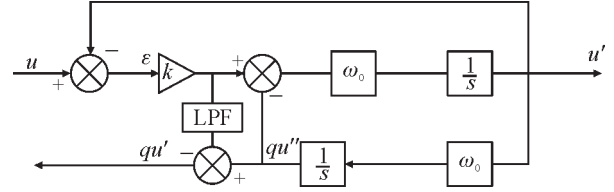


图3 改进 SOGI 控制框图
Fig. 3 Improved SOGI control block diagram

改进后的控制框图 3 传递函数为

$$\begin{cases} D_2(s) = \frac{v'(s)}{v(s)} = \frac{k\omega_0 s}{s^2 + k\omega_0 s + \omega_0^2} \\ Q_2(s) = \frac{qv'(s)}{v(s)} = \frac{k(\tau\omega_0^2 s - s^2)}{(s^2 + k\omega_0 s + \omega_0^2)(1 + \tau s)} \end{cases} \quad (7)$$

改进后的 DSOGI-PLL 工作原理可总结为:

- 1) 电网电压通过坐标变换到两相静止坐标系中;
- 2) 经过改进型 SOGI 正负序分离算法得到两相静止坐标系下的正序电压;
- 3) 经过坐标变换输入到 SRF-PLL 中进行相位估计并将锁相完成后的相位反馈到 SOGI 中作为 SOGI 的谐振频率。其中 DSOGI 的正负序分离出的正负序分量还可以为后续的参考电流提供数据进行实时计算。

将锁相完成后的相位再反馈 SOGI 中作为谐振频率可以有效的避免电网中的频率变化对于 SOGI 的影响,在频率变化时仍能保持其精准锁相的能力,提高 DSOGI-PLL 的频率适应能力。其中正负序分离算法中输出的两相静止坐标系的值,可以直接应用到参考电流计算环节进行实时参考电流计算,给此模块提供电压值去计算该工况下所需要的参考电流值,其改进后的 DSOGI-PLL 控制框图见图 4。

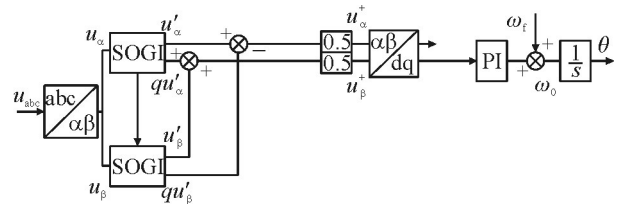


图4 改进 DSOGI-PLL 控制框图
Fig. 4 Improved DSOGI-PLL control block diagram

1.3 电压不平衡时逆变器的功率传输特性

在电网电压不平衡时,由于本文研究的为三相三线制系统无零序,不考虑谐波分量时,设三相并网系统中直流端电压为 E ,交流侧电网电压为 U ,并网电流为 I ,在电网电压不平衡时,其在同步旋转坐

标系可以由以下通式来表示

$$\begin{cases} U = e^{j\omega t} U_{dq}^+ + e^{-j\omega t} U_{dq}^- \\ E = e^{j\omega t} E_{dq}^+ + e^{-j\omega t} E_{dq}^- \\ I = e^{j\omega t} I_{dq}^+ + e^{-j\omega t} I_{dq}^- \end{cases} \quad (8)$$

当电压不平衡时,可以计算出其瞬时功率为

$$\begin{cases} p = P_0 + P_1 \cos(2\omega t) + P_2 \sin(2\omega t) \\ q = Q_0 + Q_1 \cos(2\omega t) + Q_2 \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ Q_0 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = 1.5 \begin{bmatrix} u_d^+ & u_q^+ & u_d^- & u_q^- \\ u_d^- & u_q^- & u_d^+ & u_q^+ \\ u_q^- & -u_d^- & -u_q^+ & u_d^+ \\ u_q^+ & -u_d^+ & u_q^- & -u_d^- \\ u_q^- & -u_d^- & u_q^+ & -u_d^+ \\ -u_d^- & -u_q^- & u_d^+ & u_q^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: P_0, Q_0 为有功无功的稳态分量; P_1, P_2 为有功功率的二次波动幅值; Q_1, Q_2 为无功功率二次波动的幅值。由式(9)可以看出,当电网电压不平衡时,有功无功都会存在二倍频的波动,如果不加以抑制可能会导致功率越限,严重时甚至会损坏电网中的设备。当交流侧电网电压不平衡时,其影响也会传导到直流侧,设直流侧阻抗为 R ,根据功率平衡原理可得

$$U_{dc} = \bar{U}_{dc} + \Delta U_{dc} \cos(2\omega t + \alpha) \quad (11)$$

1.4 电压不平衡时参考电流的计算

为了探究固定虚拟电容惯性控制中虚拟电容参数对系统的影响,分析式(10)可知,控制其正负序电流的大小的改变即可控制功率的输出,不同的控制方案对于参考电流的需求也各不相同。为了提高并网逆变器的性能,本节通过以下3个角度设计参考电流以控制功率输出:1)抑制负序电流,使并网系统输出三相正弦的并网电流;2)抑制有功功率波动,输出恒定的有功功率,保证了直流侧的电压稳定;3)抑制无功功率波动,输出恒定的无功功率。当无功功率波动较大时,可能会引起网侧电网波动,导致生产设备不能正常运行,不能保证用户的供电环节。由于本文之前的控制环节都是在两相静止坐标系下进行,所以将式(10)经过坐标变换到两相静止坐标系中可得

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ Q_0 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix} = 1.5 \begin{bmatrix} u_\alpha^+ & u_\beta^+ & u_\alpha^- & u_\beta^- \\ u_\alpha^- & u_\beta^- & u_\alpha^+ & u_\beta^+ \\ u_\beta^- & -u_\alpha^- & -u_\beta^+ & u_\alpha^+ \\ u_\beta^+ & -u_\alpha^+ & u_\beta^- & -u_\alpha^- \\ u_\beta^- & -u_\alpha^- & u_\beta^+ & -u_\alpha^+ \\ -u_\alpha^- & -u_\beta^- & u_\alpha^+ & u_\beta^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^+ \\ i_\beta^+ \\ i_\alpha^- \\ i_\beta^- \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = 1.5 (u_\alpha^+ i_\alpha^- + u_\beta^+ i_\beta^- + u_\alpha^- i_\alpha^+ + u_\beta^- i_\beta^+) \\ \lambda_2 = 1.5 (u_\alpha^+ i_\beta^- - u_\beta^+ i_\alpha^- - u_\alpha^- i_\beta^+ + u_\beta^- i_\alpha^+) \\ \lambda_3 = 1.5 (-u_\alpha^+ i_\beta^- + u_\beta^+ i_\alpha^- - u_\alpha^- i_\beta^+ + u_\beta^- i_\alpha^+) \\ \lambda_4 = 1.5 (u_\alpha^+ i_\alpha^- + u_\beta^+ i_\beta^- - u_\alpha^- i_\alpha^+ - u_\beta^- i_\beta^+) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_0 = 1.5 (u_\alpha^+ i_\alpha^+ + u_\beta^+ i_\beta^+ + u_\alpha^- i_\alpha^- + u_\beta^- i_\beta^-) \\ P_1 = 1.5 [\lambda_1 \cos(2\omega t) - \lambda_2 \sin(2\omega t)] \\ P_2 = 1.5 [\lambda_1 \sin(2\omega t) + \lambda_2 \cos(2\omega t)] \\ Q_0 = 1.5 (-u_\alpha^+ i_\beta^+ + u_\beta^+ i_\alpha^+ - u_\alpha^- i_\beta^- + u_\beta^- i_\alpha^-) \\ Q_1 = 1.5 [\lambda_3 \cos(2\omega t) - \lambda_4 \sin(2\omega t)] \\ Q_2 = 1.5 [\lambda_3 \sin(2\omega t) + \lambda_4 \cos(2\omega t)] \end{cases} \quad (14)$$

从式(12)中可以看出,电压不平衡时,系统瞬时功率中除了直流分量外,还会出现功率波动,因此,需要采用合适的控制策略对其控制,使系统能够稳定工作。

2 不平衡电网下功率-电流协同控制策略

2.1 电压不平衡下逆变器不同控制方案

1) 抑制负序电流

为了使并网电流恒定的,输出稳定的三相正弦波形,所以就要对负序分量进行抑制。通过式(12)可知,使式(12)中为零便可得到无负序分量的参考电流公式为

$$\begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_\alpha^+ & u_\beta^+ \\ u_\beta^+ & -u_\alpha^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^{+*} \\ i_\beta^{+*} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中, P^*, Q^* 为指定输入的有功功率参考值和无功功率参考值,通常为系统的额定输出,求解出式(15)可得

$$\begin{cases} i_\alpha^{+*} = \frac{2}{3} \frac{u_\alpha^+ P^* + u_\beta^+ Q^*}{(u_\alpha^+)^2 + (u_\beta^+)^2} \\ i_\beta^{+*} = \frac{2}{3} \frac{u_\beta^+ P^* - u_\alpha^+ Q^*}{(u_\alpha^+)^2 + (u_\beta^+)^2} \\ i_\alpha^{-*} = 0 \\ i_\beta^{-*} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

由上式可以看出,这种参考电流公式中只存在电网电压的加减,不会引入二倍频分量,将得到的参考电流进行复功率运算,发现其有功功率二倍频波动仍然存在,不能有效的抑制功率波动。

2) 抑制有功功率波动

为了保证有功功率的恒定,通过式(9)可知需控制 P_1, P_2 有功功率的二倍频波动分量为零,通过式(14)可知控制 λ_1, λ_2 为零即可。带入到式(12)求解可得

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^{+*} \\ i_{\beta}^{+*} \\ i_{\alpha}^{-*} \\ i_{\beta}^{-*} \end{bmatrix} = \frac{2P^*}{3D_1} \begin{bmatrix} u_{\alpha}^+ \\ u_{\beta}^+ \\ -u_{\alpha}^- \\ -u_{\beta}^- \end{bmatrix} + \frac{2Q^*}{3D_2} \begin{bmatrix} u_{\beta}^+ \\ -u_{\alpha}^+ \\ u_{\beta}^- \\ -u_{\alpha}^- \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: $D_1 = (u_{\alpha}^+)^2 + (u_{\beta}^+)^2 - (u_{\alpha}^-)^2 - (u_{\beta}^-)^2$; $D_2 = (u_{\alpha}^+)^2 + (u_{\beta}^+)^2 + (u_{\alpha}^-)^2 + (u_{\beta}^-)^2$ 。由式(17)可知,为了保证有功功率恒定,电流的指令值中必须同时存在正序和负序分量。将式(14)带回式(12)中,发现无功功率波动和三相电流不平衡依然存在。

3) 抑制无功功率波动

为了保证无功功率的恒定,通过式(9)可知需控制 Q_1 、 Q_2 有功功率的二倍频波动分量为零,通过式(14)可知控制 λ_3 、 λ_4 为零即可。带入式(12)可得

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^{+*} \\ i_{\beta}^{+*} \\ i_{\alpha}^{-*} \\ i_{\beta}^{-*} \end{bmatrix} = \frac{2P^*}{3D_2} \begin{bmatrix} u_{\alpha}^+ \\ u_{\beta}^+ \\ u_{\alpha}^- \\ u_{\beta}^- \end{bmatrix} + \frac{2Q^*}{3D_1} \begin{bmatrix} u_{\beta}^+ \\ -u_{\alpha}^+ \\ -u_{\beta}^- \\ u_{\alpha}^- \end{bmatrix} \quad (18)$$

由式(18)可知,当抑制无功功率波动时,也会带来负序分量,将得到的参考电流进行复功率运算,发现其有功功率波动仍然存在。根据式(16)~(18)可知,3种控制目标在数学模型上相互矛盾,不能同时满足三种控制目标。在控制三相并网电流平衡时,有功功率的波动可能会导致直流侧母线触发保护装置,使逆变器系统脱网。同时,无功功率的显著波动一旦注入电网,就可能导致供电点处电压的显著波动,影响用户的用电。控制有功功率恒定时,虽然能够稳定直流母线电压并确保逆变器的稳定运行,不损害直流侧的电力电子设备,但并网电流的平衡问题依然存在,可能无法满足并网要求,并且无功功率波动仍未得到解决。在控制无功功率恒定时也存在着上述类似的问题。所以需要寻找一个合适的控制方法,可以在这3种目标间调节,以满足在电网电压不平衡下并网逆变器仍可以工作的能力。

2.2 功率-电流协同控制策略

如上节所讨论的3种控制方法,虽然3种方法互相矛盾,但他们都存在着唯一数学模型式(12),能使在同一控制器下控制3种目标并平滑切换以更好的适应各种工况需求,将式(16)~(18)进行联立可得参考电流统一计算公式为

$$\begin{cases} i_{\alpha}^* = \frac{2P^*}{3} \times \frac{u_{\alpha}^+ + ku_{\alpha}^-}{M_1^2 + kM_2^2} + \frac{2Q^*}{3} \times \frac{u_{\beta}^+ - ku_{\beta}^-}{M_1^2 - kM_2^2} \\ i_{\beta}^* = \frac{2P^*}{3} \times \frac{u_{\beta}^+ + ku_{\beta}^-}{M_1^2 + kM_2^2} - \frac{2Q^*}{3} \times \frac{u_{\alpha}^+ - ku_{\alpha}^-}{M_1^2 - kM_2^2} \end{cases} \quad (19)$$

式中,

$$\begin{cases} M_1^2 = (u_{\alpha}^+)^2 + (u_{\beta}^+)^2 \\ M_2^2 = (u_{\alpha}^-)^2 + (u_{\beta}^-)^2 \end{cases} \quad (20)$$

分析式(20)可知,取不同的 k 值可以达到不同的输出目标,当 $k=0$ 时,抑制负序电流,使并网系统输出三相平衡的并网电流。当 $k=-1$ 时,抑制有功功率波动,保证了直流侧的电压稳定。当 $k=1$ 时,抑制无功功率波动。当 $-1 \leq k \leq 1$ 时,可以保证牺牲有功功率恒定,使并网电流逐渐平衡的控制,以防止过电流。当 $0 \leq k \leq 1$,可以牺牲并网电流的平衡度,以满足网侧电压恒定,保证用户供电的需求。通过调节 k 值,可以满足工程中不同工况的需求。由于此3种控制方案中,有两种都以牺牲电网电流的平衡度为代价,所以需在参考电流计算中加入限流公式,以防止过电流问题。其最终的控制框图如图5所示。

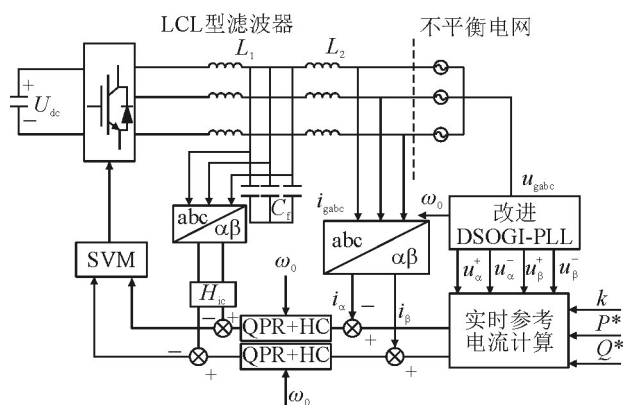


图5 平衡电网下功率-电流协同控制框图

Fig. 5 Power-current cooperative control block diagram under unbalanced grid conditions

2.3 仿真分析

为了对本章的电流控制策略的可信性进行验证,利用 Matlab/Simulink 仿真中搭建三相并网逆变器系统,其仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数
Table 1 Simulation Parameters

参数	数值	参数	数值
直流侧电压 U_{dc}/V	1 000	滤波电容 $C_f/\mu F$	5
电网电压 u_g/V	220	电容反馈 H_{ic}	0.3
有功功率 P/kW	10	QPR 控制器 K_p	0.15
开关频率 f/kHz	20	QPR 控制器 K_i	20
逆变侧电感 L_1/mH	5	QPR 控制器 ω_c	5
网侧电感 L_2/mH	1.5	QPR 控制器 ω_0	100

首先对比改进型 DSOGI-PLL 和传统 DSOGI-PLL 发现其在谐波加入时,验证 DSOGI-PLL 和 SRF-PLL 在电网电压不平衡和畸变的情况下两锁

相环的锁相能力,设定在 0.2 s 时,电网电压 A 相跌落到 150 V,电网电压 B 相跌落到 120 V,C 相保持不变,且在 0.4 s 时给电网加入 50 V 的 5 次谐波和 30 V 的 7 次谐波。其 DSOGI-PLL 和 SRF-PLL 的锁相能力如图 6 所示。观测 0.25~0.45 s 时的仿真波形可以看出改进型 DSOGI-PLL 不仅在电网电压不平衡时能输出准确的相位并且在电网电压畸变时也能做到精准锁相,但 SRF-PLL 在电网电压不平衡时相位已出现波动,在加入谐波时抖动更加剧烈,无法精准锁相。对比改进型 DSOGI-PLL 和传统 DSOGI-PLL 发现其在谐波加入时,改进型 SOGI 的频率波动小于传统 SOGI,证明改进之后对于谐波的抑制能力增强。

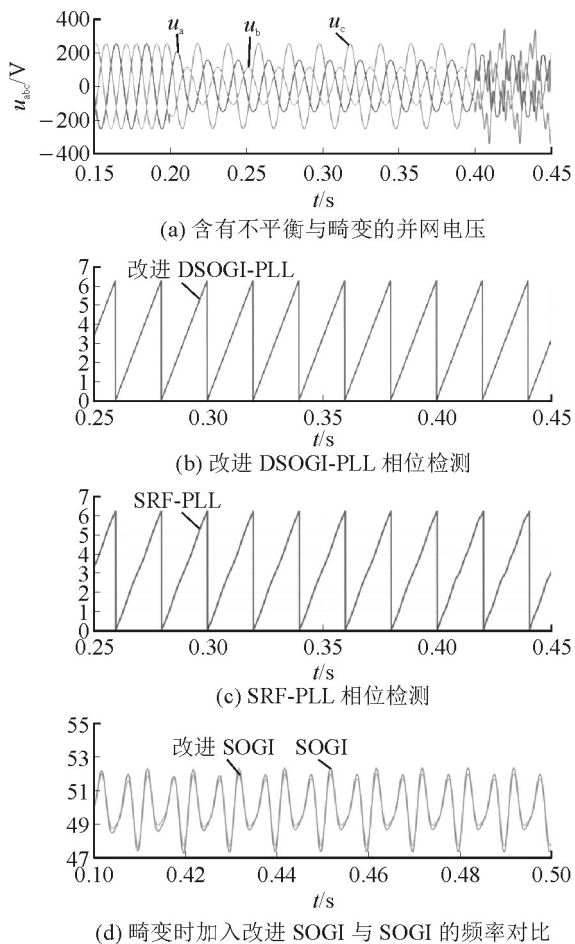


图6 并网电压不平衡加畸变时锁相环相位检测对比
Fig. 6 Comparison of PLL phase detection under unbalanced grid voltage with distortion

1) 抑制负序电流

设定在 0.2 s 处 A 相电网电压跌落到 150 V,B 相电网电压跌落到 120 V。根据本节分析该控制策略,当 $k=0$ 时可以控制并网电流输出平衡,消除负序分量,但有功功率,无功功率会存在二倍频波动。仿真波形如图 7 所示。

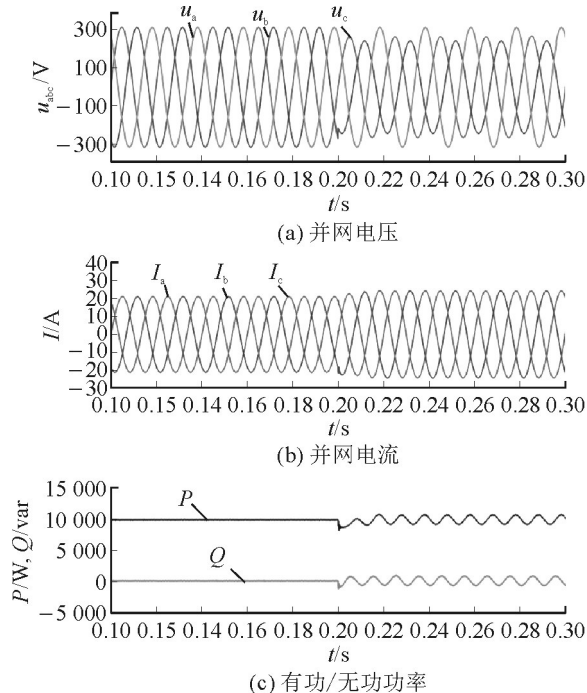


图7 $k=0$ 时电网由平衡到不平衡切换
Fig. 7 Switching of grid from balance to unbalance at $k=0$

通过图 7 可以看出当 $k=0$ 时控制策略可以较快的响应并保持三相并网电流输出平衡,但有功功率和无功功率都出现了二倍频的波动,分析式(15)可知,当电网电压不平衡越严重时,其波动幅值越大,可能导致功率和直流侧电压越限问题。

2) 抑制有功功率波动

电网电压不平衡程度同第一种目标,根据本节分析当 $k=-1$ 时并网逆变器系统输出的有功功率恒定,但其并网电流不平衡和无功功率波动的问题仍然存在。仿真波形如图 8 所示。

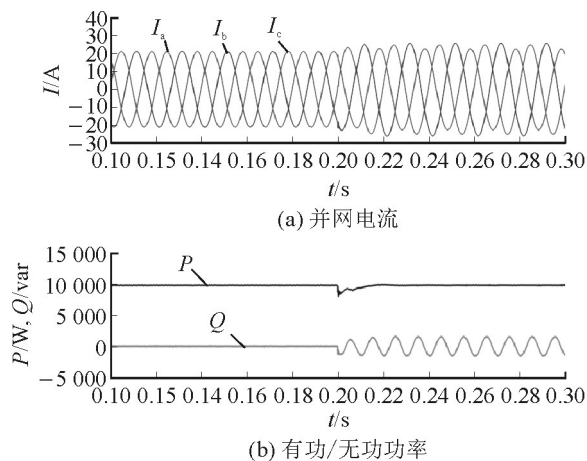


图8 $k=-1$ 时电网由平衡到不平衡切换
Fig. 8 Switching of grid from balance to unbalance at $k=-1$

图 8 为 $k=-1$ 时的仿真结果,当 $t=0.2$ s 电网切换到电网电压不平衡状态时,其有功功率的二倍频

波动被很好的抑制,并网电流输出虽有着很好的正弦度,但不再平衡,并且无功功率的波动幅值增加,有效的抑制了有功功率波动。为了防止电流越限,可以在限流环节中加入工程所能承受的最大电流。

3)抑制无功功率波动

其电网电压不平衡度同上,根据本节分析当 $k=1$ 时可以有效的抑制无功功率波动,但其有功功率波动和并网电流的不平衡度的问题依然存在,仿真波形如图9所示。

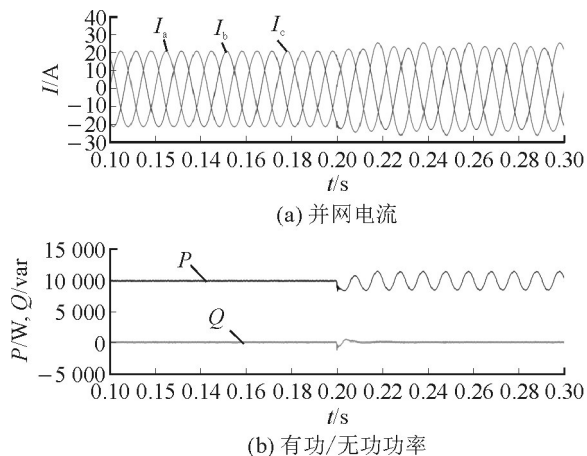


图9 $k=1$ 时电网由平衡到不平衡切换
Fig. 9 Switching of grid from balance to unbalance at $k=1$

图9为 $k=1$ 时的仿真结果,当 $t=0.2$ s电网切换到电网电压不平衡状态时,其无功功率的二倍频波动被很好的抑制,并网电流输出虽有着很好的正弦度,但不再平衡,并且有功功率的波动幅值增加,无功功率的二倍频得到有效控制。此方法通常在并网系统需要无功支撑的情况才会考虑使用。

4)各个控制目标的切换

为了验证其统一参考电流,使控制可以在3种目标下平滑控制的可行性,在仿真中将 k 从-1到1之间进行变化,见图10。其电网不平衡度同上,分析波形可以得知在平衡电网电压下,本控制策略依旧能很好的保持并网电流平衡无畸变输出,当 $t=0.2$ s切为不平衡工况时,引入协同系数 k 后系统的功率和并网电流不再处于3种极端情况,在 k 从-1到1变化时,当 $k=0$ 时,可以消除并网电流中的负序,当 k 从-1到1变化时有功功率波动逐渐增加,无功功率波动逐渐减小,当 $k=-1$ 时有功功率的二倍频波动消失, $k=1$ 时无功功率的二倍频波动消除。因此改变 k 可以实现并网电流平衡度从不平衡归于平衡再到不平衡同时也平衡电流和功率之间的矛盾。可以实现多种控制目的的平滑切换,给不平衡电网电压下的电流-功率控制带来灵活性,提高了并网逆变器的工作效果。

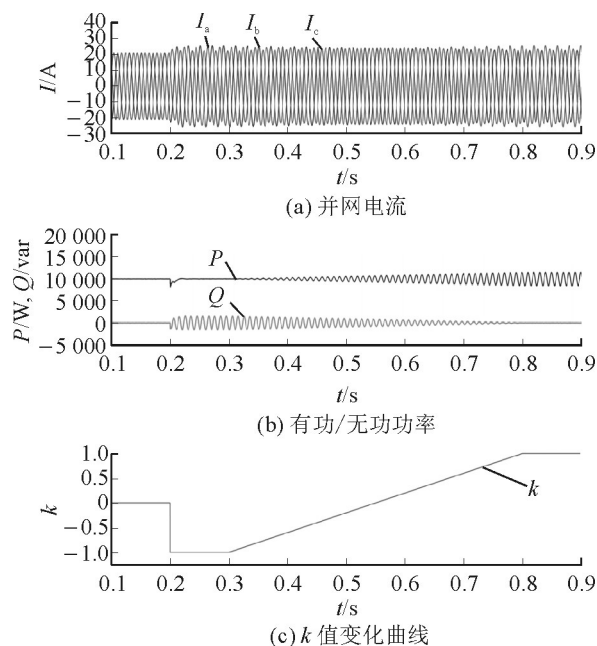


图10 k 从-1到1变换时并网电流与功率变化
Fig. 10 Grid-connected current and power variations as k varies from -1 to 1

3 RT-LAB半实物实验

为验证本方案的可行性和正确性,在RT-LAB半实物实验平台上进行了验证。实验参数和仿真参数一致。RT-LAB半实物实验平台如图11所示,电网电压不平衡状态如图12所示。



图11 RT-LAB半实物实验平台
Fig. 11 RT-LAB hardware-in-the-loop (HIL) experimental platform

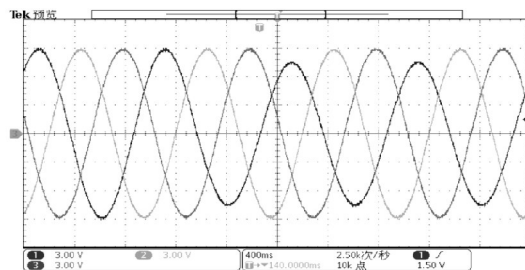


图12 电网电压不平衡状态
Fig. 12 Unbalanced condition of grid voltage

为了验证改进DSOGI-PLL对于直流分量有着很好的抑制作用,在三相电网电压A相中加入10 V的直流分量,验证改进DSOGI-PLL与DSOGI-PLL

的相位检测能力,观测其频率波动,发现改进DSOGI-PLL在有直流分量时可以很好的保持频率在基波处,而DSOGI-PLL在直流分量的加入出现频率抖动的问题,与第2节仿真分析结果相同,证明改进DSOGI-PLL相比于DSOGI-PLL有着直流分量抑制的能力。锁相环相位检测对比波形图见图13,加入直流分量后改进DSOGI-PLL与传统DSOGI-PLL频率对比见图14。

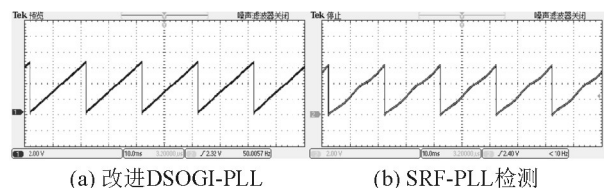


图13 锁相环相位检测对比波形图
Fig. 13 Comparison waveform of PLL phase detection

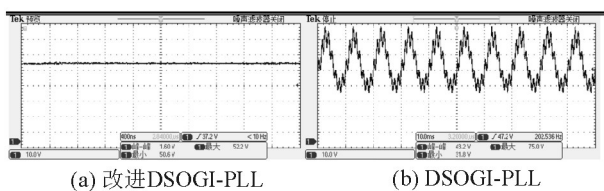


图14 加入直流分量后改进DSOGI-PLL与传统DSOGI-PLL频率对比
Fig. 14 Frequency comparison of improved DSOGI-PLL and DSOGI-PLL after addition of DC component

验证不平衡电网下功率-电流控制的有效性,设置协调系数 k 从0到-1到1之间的切换实验。3种工况下功率与并网电流的波形图见图15。其中电网不平衡工况同上,在0.15s由平衡切换到不平衡 $k=0$ 时观测实验波形,发现并网电流略微增大,有功功率无功功率出现二倍频波动。之后将 k 从0切换到1,发现其无功功率波动被很好的抑制电网电流无畸变,但出现不平衡,无功功率波动增大,最后从1切换到-1,发现其有功功率出现二倍频波动,无功功率恒定。从3组动态切换可以证明调节系数 k 可以满足不同工况需求的并网电流,有功功率与无功功率。

由图15(a)可知,当 $k=0$ 时平衡电网突变成不平衡电网时,可以保证并网电流快速保持三相平衡且无畸变,但有功功率无功功率出现波动。由图15(b)可知,当 k 从0变为1时,可以将无功功率恒定,有功功率波动变大,由于并网电流注入负序,不再平衡。由图15(c)可知,当 k 从1切换为-1时有功功率恒定,无功功率波动变大,由于并网电流注入负序,不再平衡。经3次切换可知当 k 从-1到1变化时有功从恒定到波动慢慢增大,无功从波动减小到

恒定,并网电流由不平衡到平衡再到不平衡。证明调节参数 k 可以根据不同的工况需要来满足其不同的需求,有着功率电流协调控制的能力。

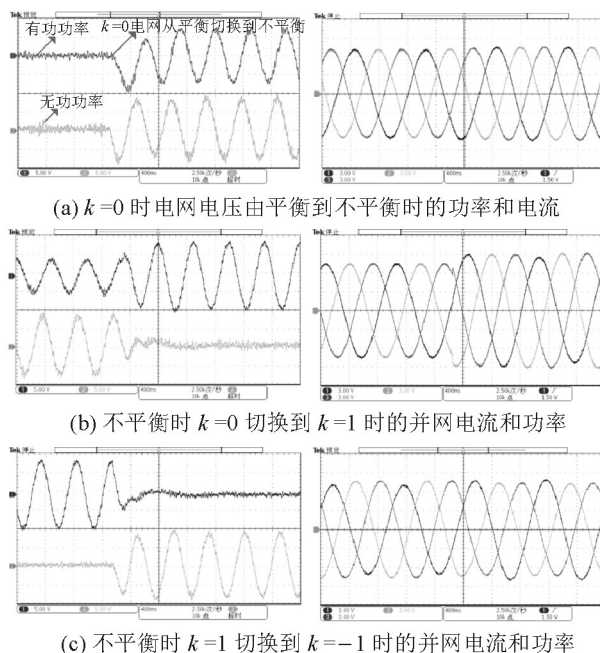


图15 3种工况下功率与并网电流的波形图
Fig. 15 Waveform of power and grid-connected current under three different operating conditions

4 结语

对不平衡电压下的瞬时功率波动进行了定性分析,通过改进锁相环以抑制不平衡电网对锁相环的影响。分析二阶广义积分器的传递函数频域特性,发现直流分量对其的影响较大,基于此影响对二阶广义积分器加以改进使其有抑制直流分量的特性并提出了3种控制方式,包括电流负序分量抑制、有功功率恒定和无功功率恒定。最后,为了解决功率控制和并网电流控制之间矛盾,引入了协同控制系数 k ,通过调节 k 的值便可以在这3种目标下平滑切换,可以根据不同工况输出其需要的各个目标值。所提出的控制策略在电网电压不平衡时可以实现输出功率与电流平衡的协调控制,验证了所提策略的正确性和有效性。在工程应用中有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 孙华东,张振宇,林伟芳,等. 2011年西北电网风机脱网事故分析及启示[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 76-80.
SUN Huadong, ZHANG Zhenyu, LIN Weifang, et al. Analysis and implications of the 2011 Northwest power grid wind turbine disconnection accident[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 76-80.
- [2] 刘国华,谷屹,孙庆丰,等. 新能源发展趋势研究[J]. 石油石化绿色低碳, 2018, 2(3): 6-14.

- LIU Guohua, GU Yi, SUN Qingfeng, et al. Research on the development trend of new energy[J]. Green and Low-carbon Petroleum and Petrochemicals, 2018, 2(3): 6-14.
- [3] WANG F, DUARTE J L, HENDRIX M A M. Pliant active and reactive power control for grid-interactive converters under unbalanced voltage dips[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(5): 1511-1521.
- [4] MIAO L, ZHANG Y, XIAO X, et al. Multi-objective coordinated control strategy for grid-connected inverter under unbalanced voltage conditions[J]. Journal of Energy Engineering, 2020, 146(3): 205-216.
- [5] ZHANG Y, MIN Z. Model-free predictive current control of a PWM rectifier based on space vector modulation under unbalanced and distorted grid conditions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(2): 2319-2329.
- [6] MIRET J, CASTILLA M, CAMACHO A, et al. Control scheme for photovoltaic three-phase inverters to minimize peak currents during unbalanced grid-voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 4262-4271.
- [7] GUO X, LIU W, ZHANG X, et al. Control strategy for microgrid inverter under unbalanced grid voltage conditions [C]//2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, Turkey, 2014.
- [8] 陈姝慧. 非理想电网工作条件下三相LCL型逆变器并网电流控制策略研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- [9] SHABESTARY M M, MOHAMED Y I. Analytical expressions for multi-objective optimization of converter based DG operation under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 7284-7296.
- [10] 阳同光, 桂卫华. 电网不平衡情况下并网逆变器控制策略综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 241-246.
- YANG Tongguang, GUI Weihua. A review of control strategies for grid-connected inverters under unbalanced grid voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 241-246.
- [11] CASTILLA M, MIRET J, SOSA J L, et al. Grid-fault control scheme for three-phase photovoltaic inverters with adjustable power quality characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 2930-2940.
- [12] 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.
- [13] TAUL M G, GOLESTAN S, WANG X, et al. Modeling of converter synchronization stability under grid faults the general case[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(3): 2790-2804.
- [14] 叶吉亮. 不平衡电网电压下三相并网逆变器的控制策略研究[D]. 太原:太原理工大学, 2018.
- [15] 李巍巍. 三相LCL型并网逆变器中电网电压引起的谐波和不平衡电流抑制研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.
- [16] 陈智. 不对称电压跌落故障下三相四桥臂逆变器PQ控制技术[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2023.
- [17] WU Weimin, HE Yuanbin, BLAABJERG, et al. An LLCL power filter for single-phase grid-tied inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 782-789.
- [18] WU W, SUN Y, LIN Z, et al. A modified LLCL filter with the reduced conducted EMI noise[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3393-3402.
- [19] XU Jinbang, YANG. An LTCL filter for three-phase grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4322-4338.
- [20] HOSEINIZADEH S M, OUNI S, KARIMI H, et al. Comparison of PLL-based and PLL-less vector current controllers[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(1): 436-445.
- [21] ZAMANI A R, GHADERI M H, HAMZEH M. Dynamic response and filtering capability improvement of $\alpha\beta$ frame cascaded delayed signal cancellation based PLL[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(2): 1156-1163.
- [22] 房志学, 苏建徽, 王华锋, 等. 微网逆变器低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 143-149.
- FANG Zhixue, SU Jianhui, WANG Huafeng, et al. Low-voltage ride-through control strategy for microgrid inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 143-149.
- [23] 涂娟, 汤宁平. 基于改进型DSOGI-PLL的电网电压同步信号检测[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2350-2356.
- TU Juan, TANG Ningping. Grid voltage synchronization signal detection based on improved DSOGI-PLL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2350-2356.
- [24] KABIRI R, HOLMES D G, MCGRATH B P. Control of active and reactive power ripple to mitigate unbalanced grid voltages[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 52(2): 1660-1668.
- [25] NOURALINEJAD A, BAGHERI A, MARDANEHM, et al. Improving the decoupled double SRF PLL for grid connected power converters[C]//Proceedings of the 5th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference. Tehran, Iran: IEEE 2014: 347-352.
- [26] ACHLERKAR P D, PANIGRAHI B K. New perspectives on stability of decoupled double synchronous reference frame PLL[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(1): 285-302.

作者简介:

杨国良(1973—),男,教授,主要研究方向为新能源发电及并网技术等。E-mail: Y99ygl@ysu.edu.cn。

高鹏涛(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为逆变器并网与微电网控制。

陈子文(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为逆变器并网与微电网控制。