

应用于负序电流补偿的无锁相环并网逆变器控制策略

周野, 崔双喜, 樊小朝, 王维庆, 吴彬兵

(新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 电网电压不平衡时, 负序电流会严重影响并网逆变器输出电能的品质, 电网信息的检测速度是影响负序电流补偿的主要因素之一。为此提出基于虚拟矢量的无锁相环控制策略。首先, 分析了锁相环与无锁相环控制策略之间的区别。其次, 通过引入延迟消除算法消除电网不平衡下所产生的二次谐波分量。最后, 在固定频率旋转坐标系下通过双闭环控制对负序电流进行直接控制。实验结果表明, 无锁相环控制策略不但抑制负序电流, 而且省略了以往锁相环对电网电压的跟踪过程, 从而在响应时间上更胜一筹。

关键词: 电网不平衡; 无锁相环; 负序电流; 并网逆变器

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd23079

Grid-tied Inverter Control Strategy Without PLL for Compensating Negative Sequence Current

ZHOU Ye, CUI Shuangxi, FAN Xiaochao, WANG Weiqing, WU Binbing

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: When the grid voltage is unbalanced, the negative sequence current will seriously affect the quality of the output power of the grid-connected inverter. The detection speed of the grid information is one of the main factors of negative sequence current compensation. Therefore, a control strategy without phase-locked loop (PLL) based on virtual vector was proposed. Firstly, the difference between the control strategy with and without PLL was analyzed. Secondly, the reordering elimination algorithm was adopted to eliminate the second harmonic component generated under the imbalance of the power grid. Finally, the double-loop control was used to directly control the negative sequence current in a fixed frequency rotating frame. The experiment results show that the control strategy without PLL not only suppresses the negative sequence current, but also omits the previous PLL tracking process of the grid voltage, which is better in response time.

Key words: unbalanced voltage; without phase-locked loop (PLL); negative sequence current; grid-connected inverter

三相电压不平衡是一种常见的电力系统运行工况, 会严重干扰并网逆变器的输出电能质量, 只有确保并网逆变器的动态性能和稳定运行, 才能满足日益苛刻的应用需求^[1]。

在对电网不平衡下并网逆变器的研究中, 已有文献通过锁相环 (phase-locked loop, PLL) 在两相旋转坐标系中采用 PI 控制^[2]或直接功率控制^[3]来实现负序电流的补偿, PLL 对相位检测的速度是影响负序电流补偿的主要因素之一。现有的

PLL 方案中单同步坐标系软锁相环^[4]由于结构简单、可靠性好的优势在逆变器控制中得到了广泛的应用。但当电网电压不平衡时, 电压负序分量会在旋转坐标系下产生 2 倍频分量, 致使 PLL 无法准确锁相^[5]。为了解决这一问题, 文献[6-7]在两相静止坐标系下, 通过二阶广义积分器对电网电压进行移相来获取正序分量, 以此避免了 2 倍频分量的影响。文献[8]在 $d-q$ 坐标系下提出的延迟运算周期滤波器具有易于实现、抗噪声能力强

基金项目: 新疆大学自然科学基金 (BS160246); 国家自然科学基金 (51666017); 国家自然科学基金 (51667019);

国家自然科学基金 (51667020); 国家自然科学基金 (51567022)

作者简介: 周野 (1993—), 男, 硕士, Email: 784508894@qq.com

等特点,但在一些要求较高的应用中,通过滤波器设计显然在响应时间上是难以满足需求的。文献[9]利用正、负序解耦网络来抑制负序分量的影响,但该方法控制参数很难在线优化,动态响应时间较长。为了更好地解决三相电网电压不对称时的锁相误差,文献[10]提出了易于数字实现的改进软锁相环算法。上述改进型PLL方案,都力图通过设计更好的滤波器以及控制器参数,以期在滤波性能以及响应时间方面获得更好的折中。此外,也有学者探索不需要锁相环的相位检测方案。文献[11]通过给定的虚拟角频率 $\omega^* = 100\pi$ 构建虚拟正交信号,通过相应的开环数学运算获得瞬时电压正序分量以及对应电网相位,从而省略了闭环锁相过程。

为了进一步提高并网逆变器对负序电流补偿的能力,本文参考文献[11]无锁相环检测思想,提出一种基于虚拟矢量的无锁相环控制策略,同样给定虚拟角频率 ω^* 并进行积分来获取 abc/dq 变换所需的角速度 θ^* ,利用该角度实现电压、电流的坐标变换,并据此进行 $d-q$ 坐标系下的计算与控制。

本文所提控制策略因避免了PLL跟踪电网电压的过程及参数设计困难的问题,使得整个控制系统的负序电流补偿性能得以提升,且在电网电压相位突变时有更快的动态响应速度。

1 基于矢量控制的有锁相环与无锁相环控制策略对比

图1为并网逆变器的主电路拓扑结构,且不存在零序分量^[12]。

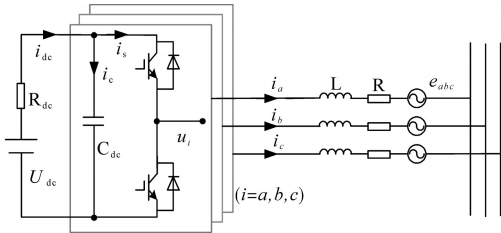


图1 并网逆变器结构图

Fig.1 The diagram of grid inverter

根据图1,并网逆变器的电压回路方程可表示如下:

$$\mathbf{e}^+ = \mathbf{u}^+ + L \frac{d\mathbf{i}^+}{dt} + \mathbf{i}^+ R \quad (1)$$

$$\mathbf{e}^- = \mathbf{u}^- + L \frac{d\mathbf{i}^-}{dt} + \mathbf{i}^- R \quad (2)$$

式中:上标“+”、“-”分别为正、负序分量; $\mathbf{e}, \mathbf{u}, \mathbf{i}$ 分别为三相静止坐标系下的电网电压、逆变器输出电压、网侧电流矢量。

由内模控制原理^[13]可知,PI调节器内只包含一次积分环节,无法对积分环节为二次输入信号实现无差控制,为了补偿交流负序电流,需通过坐标变换对其进行降阶处理,坐标变换中相位角的信息又是通过PLL的闭环锁相而得到。

1.1 常规锁相环的检测

根据对称分量法可知,电网电压可用下式表示:

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}^+ + \mathbf{e}^- = \begin{bmatrix} U_a \sin(\omega t + \theta_a) \\ U_b \sin(\omega t + \theta_b) \\ U_c \sin(\omega t + \theta_c) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: U_a, U_b, U_c 分别为 a, b, c 相的电压幅值; $\theta_a, \theta_b, \theta_c$ 分别为 a, b, c 相的初始相位。

根据式(3),三相不平衡电网电压正、负序分量可以分别表示为

$$\mathbf{e}^+ = \begin{bmatrix} U_m^+ \sin(\omega t + \varphi^+) \\ U_m^+ \sin(\omega t - 2\pi/3 + \varphi^+) \\ U_m^+ \sin(\omega t + 2\pi/3 + \varphi^+) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{e}^- = \begin{bmatrix} U_m^- \sin(\omega t + \varphi^-) \\ U_m^- \sin(\omega t + 2\pi/3 + \varphi^-) \\ U_m^- \sin(\omega t - 2\pi/3 + \varphi^-) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: φ^+, φ^- 分别为电网电压的初相位的正、负序分量; ω 为电网电压实际角频率; U_m^+, U_m^- 分别为电网电压正、负序分量的幅值。

如图2所示,PLL需要通过闭环结构去追踪电网电压相位。

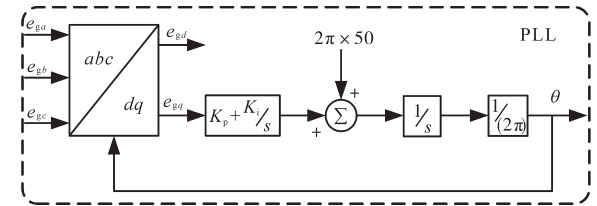


图2 PLL控制结构框图

Fig.2 The block diagram of PLL control structure

以正序电压分量为例,PLL将锁定的相角 $\theta^+ = \omega t + \varphi^+$ 代入坐标变换矩阵 $\mathbf{C}_{abcdq_m}^+(\theta^+)$:

$$\mathbf{C}_{abcdq_m}^+(\theta^+) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta^+ & \cos(\theta^+ - 2\pi/3) & \cos(\theta^+ + 2\pi/3) \\ \sin\theta^+ & \sin(\theta^+ - 2\pi/3) & \sin(\theta^+ + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (6)$$

此时,电网电压表达式为

$$\mathbf{e}_{dq}^+ = \mathbf{C}_{abcdq_{pll}}^+(\theta^+) \cdot \mathbf{e}^+ = U_m^+ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据文献[14], PLL作为闭环二阶系统,其响应时间表达式为

$$t_r = \frac{\pi - \arctan(\sqrt{1-\xi^2}/\xi)}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad (8)$$

式中: ω_n, ξ 分别为无阻尼自然振荡频率和阻尼比。

由式(8)可知 PLL在跟踪电网电压过程中产生的 t_r 会影响电网信息的检测时间并影响后续控制系统的性能提升,尤其在电网不平衡下,需要使用改进型的 PLL 方案,由文献[7]可知,在电网电压不平衡下,PLL 方案的动态响应时间大约在 25 ms 左右。为了缩短系统承受负序电流的时间,需要进一步提高控制系统的响应性能。

另一方面,在电机控制当中,为了使异步电机物理模型等效于直流电动机,通常采用磁场定向矢量控制^[15]。可以看出不同定向方式导致相应物理量在不同坐标系下的计量值不同。电网电压在不平衡下会发生突变,因此基于电网电压定向的坐标系并不适合作为参考。对于坐标系的选取,一般选择固定不变的量作为参考。例如,铯原子半衰期作为时间的基准。

1.2 基于虚拟矢量的无锁相环控制

如图3所示,本文采用虚拟矢量定向,通过构建固定不变的旋转坐标系,保证电网电压与旋转坐标系相对静止。以正序分量为例,直接设置固定频率 $f=50$ Hz 为基准,通过积分得到固定相位角 $\theta=2\pi ft=\omega t$,并以 θ 构建两相旋转坐标系。

图3为同步 $d-q$ 坐标系和固定频率旋转 $d-q$ 坐标系间的关系示意图。

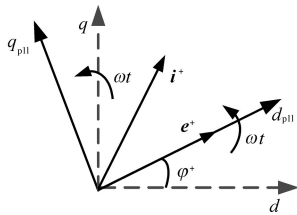


图3 同步 $d-q$ 坐标系和固定频率旋转 $d-q$ 坐标系间的关系

Fig.3 Relationships between the synchronous $d-q$ frame and the fixed $d-q$ frame

将固定相位 θ 代入变换矩阵 $\mathbf{C}_{abcdq}^+(\theta)^{[16]}$, 变换矩阵如下:

$$\mathbf{C}_{abcdq}^+(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (9)$$

由图3可见, $\mathbf{e}_{d_{pll}}^+, \mathbf{e}_{q_{pll}}^+$ 和 $\mathbf{e}_d^+, \mathbf{e}_q^+$ 之间存在下列关系:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}_d^+ \\ \mathbf{e}_q^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi^+ & -\sin\varphi^+ \\ \sin\varphi^+ & \cos\varphi^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{d_{pll}}^+ \\ \mathbf{e}_{q_{pll}}^+ \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{dq_{pll}/dq} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{d_{pll}}^+ \\ \mathbf{e}_{q_{pll}}^+ \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{C}_{dq_{pll}/dq} = \begin{bmatrix} \cos\varphi^+ & -\sin\varphi^+ \\ \sin\varphi^+ & \cos\varphi^+ \end{bmatrix} \quad (11)$$

联立式(6)、式(9)、式(11),可得:

$$\mathbf{C}_{abcdq_{pll}}^+(\theta^+) = \mathbf{C}_{dq_{pll}/dq} \mathbf{C}_{abcdq}^+(\theta) \quad (12)$$

式中:下标“pll”为锁相环变量。

由式(12)可知,该固定频率旋转坐标系与同步旋转坐标系之间属于线性变换,因此在控制系统设计中两者之间并无差别。且在固定频率旋转坐标系下的电网电压检测不需要在通过响应时间 t_r , 因此控制系统的响应性能得以提升。

结合式(4)、式(9),在固定频率下旋转 $d-q$ 坐标系的虚拟矢量可表示为

$$\mathbf{e}_{dq}^+ = \mathbf{C}_{abcdq}^+(\theta) \cdot \mathbf{e}^+ = U_m^+ \begin{bmatrix} \cos\varphi^+ \\ \sin\varphi^+ \end{bmatrix} \quad (13)$$

1.3 电网信号的正负序分离

把不平衡电压 $\mathbf{e}$ 代入变换矩阵 $\mathbf{C}_{abcdq}^+(\theta)$ 得到:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{dq}^+ &= \mathbf{C}_{abcdq}^+(\theta) \cdot \mathbf{e} \\ &= U_m^+ \begin{bmatrix} \cos\varphi^+ \\ \sin\varphi^+ \end{bmatrix} + U_m^- \begin{bmatrix} \cos[(2\omega)t + \varphi^-] \\ -\sin[(2\omega)t + \varphi^-] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14)可知,由于正负分量的相序不同,在负序分量中会引入因旋转方向与正序分量不同而产生的2倍频分量。为了消除2倍频分量,本文采用延迟消除(delayed signal cancellation, DSC)算法^[17]来分离 $d-q$ 旋转坐标系下的正序分量及负序分量。

n 次谐波的消除方法如下式所示:

$$U_d(t) = \frac{1}{2} [\widehat{U}_d(t) + \widehat{U}_d(t - \frac{T}{2n})] \quad (15)$$

式中: n 为谐波次数; $\widehat{U}_d(t)$ 为 d 轴电压原始矢量; $\widehat{U}_d(t - \frac{T}{2n})$ 为延迟矢量; T 为周期。

为了得到负序分量的直流量,其坐标变换矩阵 $\mathbf{C}_{abcdq}^-(\theta)$ 如下所示:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{abcdq}^-(\theta) &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

在顺时针旋转固定频率 $d-q$ 坐标系下的电压 $\mathbf{e}_{dq}^-$ 为

$$\begin{cases} u_d^{**} = e_d^+ + (K_p + \frac{K_I}{s})(i_d^{**} - i_d^+) - \omega Li_q^+ \\ u_q^{**} = e_q^+ + (K_p + \frac{K_I}{s})(i_q^{**} - i_q^+) - \omega Li_d^+ \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} u_d^{*-} = e_d^- + (K_p + \frac{K_I}{s})(i_d^{*-} - i_d^-) - \omega Li_q^- \\ u_q^{*-} = e_q^- + (K_p + \frac{K_I}{s})(i_q^{*-} - i_q^-) - \omega Li_d^- \end{cases} \quad (28)$$

由式(27)、式(28)可知,并网逆变器电压指令值与以往PLL不同,需同时考虑 d, q 轴上的分量。

此外,为了对比锁相环和无锁相环控制性能的优良度,引入绝对积分误差(integral absolute error, IAE),其公式为

$$J_{IAE} = \int_0^\infty |\Delta I(t)| dt = \int_0^\infty |I_{md}(t) - I_{ma}(t)| dt \quad (29)$$

式中: $I_{md}(t)$ 为被测量的电流值; $I_{ma}(t)$ 为稳态时的理论电流值。

4 实验验证

在实验样机平台上验证无锁相环策略的正确性,系统结构如图4所示。

实验主要参数如下所示:直流侧电压 700 V,交流电网电压 380 V,采样频率 10 kHz,额定功率 1 kW,电压外环比例系数 1,电压外环积分系数 150,电流内环比例系数 0.8,电流内环积分系数 120,直流侧电容 3.5 mF,滤波电感 2.4 mH,滤波电感阻值 0.1 Ω 。

以双闭环补偿负序电流策略为基准,分别在双二阶广义积分器软锁相环和无锁相环策略下进行实验。

图5为负序电流补偿的对比结果,其中最上方曲线代表的是电网电压由三相平衡状态突变为电网不平衡状态的触发过程。由图5可以看出与有锁相环控制策略相比,无锁相环控制策略能更快地补偿负序电流,大约在 5 ms 左右跟踪上了逆变器指令电流。

图6为网侧电压在 $d-q$ 坐标系下的方均根值和IAE对比结果,可以看出在有锁相环或无锁相环控制策略下,三相电网电压的幅值都能够被准确检测,但在无锁相环控制策略下电网电压幅值更快达到稳态值,且无锁相环的IAE结果仅是锁相环的50%。

为了更好地看出负序电流补偿过程,图7a、图7b分别给出了网侧电流在 $d-q$ 坐标系下方均根值和IAE结果。由图7可知,在无锁相

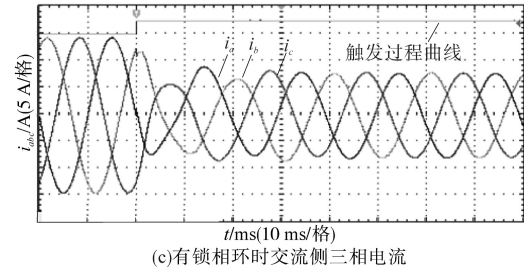
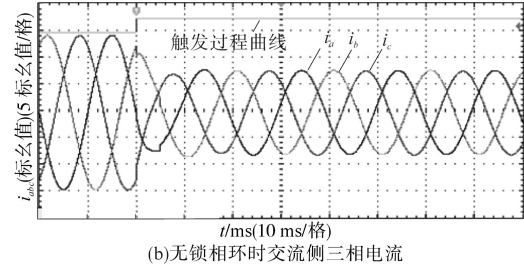
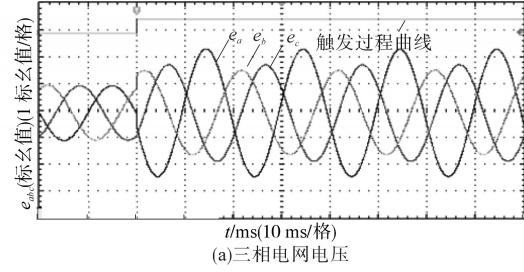


图5 负序电流补偿的对比结果

Fig.5 Comparison results of negative sequence current compensation

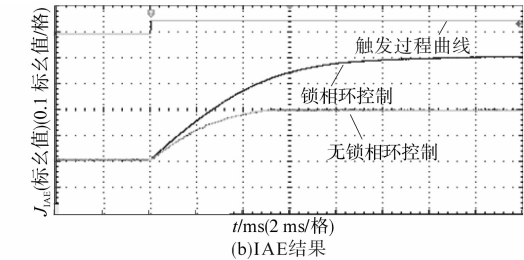
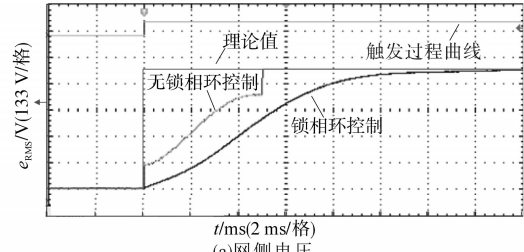


图6 电网电压动态响应时间对比

Fig.6 Result of negative sequence components of grid voltage in frequency invariant

环控制策略下,网侧电流更快达到稳态值,且无锁相环控制策略IAE结果仅是锁相环控制策略的45%。图8为网侧电流环中负序电流在 $d-q$ 坐标系下方均根值结果,在无锁相环控制策略下,负序电流被更快抑制为零,大约 18 ms 左右。

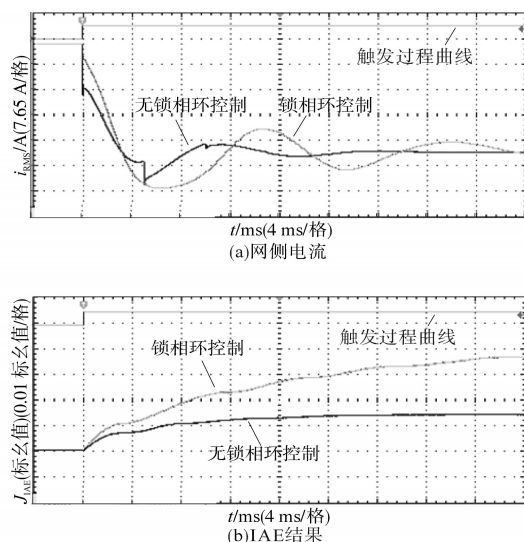


图7 有无锁相环的网侧电流动态响应对比

Fig.7 Result of negative sequence components of grid voltage in frequency variation

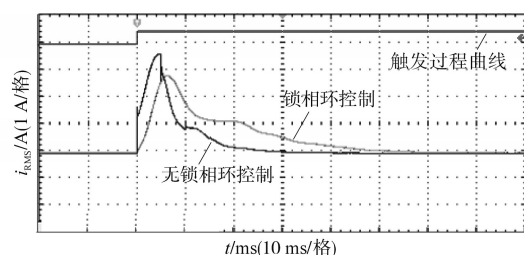


图8 有无锁相环的网侧负序电流动态响应时间对比

Fig.8 Result of power response with and without PLL in frequency variation

5 结论

本文提出了快速补偿负序电流的虚拟矢量无锁相环并网逆变器控制策略,通过理论与仿真对比得到以下结论:

1)无锁相环控制策略无需以往锁相环控制策略的动态检测时间,避免了复杂难以实现的改进PLL方法,简化了系统控制结构。

2)在电网电压相位突变时相比于锁相环控制策略,基于虚拟矢量的无锁相控制策略具有更快的动态响应,具有一定的工程实用价值。

3)无锁相策略实施于固定频率的旋转坐标系中,不依赖电网信息检测,提高了负序电流补偿的响应时间。

参考文献

[1] 彭江伟,朱德文,杨红岸,等.三相电压不平衡时二阶广义积分器锁相环设计方法[J].电气传动,2017,47(9):

35-39.

Peng Jiangwei, Zhu Dewen, Yang Hongan, *et al.* Design of phase locked loop based on second order generalized integrator for unbalanced three-phase voltage[J]. Electrical Drive, 2017, 47(9): 35-39.

[2] 孟建辉,石新春,付超,等.基于PR控制的光伏并网电流优化控制[J].电力自动化设备,2014,34(2):42-47.

Meng Jianhui, Shi Xinchun, Fu Chao, *et al.* PV grid connected current optimal control based on PR control [J]. Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 42-47.

[3] Song Hong-seok, Nam Kwanghee. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 953-959.

[4] Wang F, Duarte J L, Hendrix M A M. Pliant active and reactive power control for grid interactive converters under unbalanced voltage dips stationary frame[J]. IEEE transactions on power electronics, 2011, 26(5): 1151-1160.

[5] Li Zixin, Li Yaohua, Wang Ping. Control of three-phase boost-type PWM rectifier in stationary frame under unbalanced input voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(10): 2521-2530.

[6] Chen Wei, Geng Xiujie, Liu Tao. Stationary frame deadbeat power control of three phase PWM rectifiers under unbalanced grid voltages[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 108: 223-233.

[7] 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. Synchronizing signal detection for grid voltage based on modified DSOGI-PLL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2350-2356.

[8] Du Liwei, Li Mingxian, Tang Zhen, *et al.* A fast positive sequence components extraction method with noise immunity in unbalanced grids[J]. Electronics Newsweekly, 2020, 35(7): 6682-6685.

[9] 彭秋波,盘宏斌,刘勇.LCL型三相并网逆变器双闭环解耦控制器设计[J].电工技术学报,2014,29(4):103-110.

Peng Qiubo, Pan Hongbin, Liu Yong. Design of dual loop decoupling controller in LCL three phase grid connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 103-110.

[10] 袁志昌,宋强,刘文华.改善动态相位跟踪和不平衡电压检测性能的改进软锁相环算法[J].电网技术,2010,34(1):31-35.

Yuan Zhichang, Song Qiang, Liu Wenhua. A modified soft phase lock loop algorithm improving the performance in dynamic phase tracking and detection of unbalanced voltage[J]. Power System Technology 2010, 34(1): 31-35.

[11] 熊连松,修连成.不平衡工况下电网电压序分量快速提取方法[J].电力系统自动化,2019,43(11):144-152.

- Xiong Liansong, Xiu Liancheng. Fast extraction method of grid voltage sequence components in unbalanced conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 144-152.
- [12] 姜卫东,吴志清.电网不对称时抑制负序电流并网逆变器的控制策略[J].电工技术学报,2015,30(16):77-84.
- Jiang Weidong, Wu Zhiqing. Control strategy of suppressing negative sequence current of grid-connected inverter base on asymmetric grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015,30(16):77-84.
- [13] 张兴,季建强,张崇巍,等.基于内模控制的三相电压型PWM整流器不平衡控制策略研究[J].中国电机工程学报,2005(13):51-56.
- Zhang Xing, Ji Jianqiang, Zhang Chongwei, *et al.* Study of internal model control base three-phase PWM rectifier under unbalanced input voltage condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2005(13):51-56.
- [14] Hu Jiabing, He Yikang. Modeling and control of grid connected voltage-sourced converters under generalized unbalanced operation conditions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(3): 903-1003.
- [15] 年珩,於妮飒,曾嵘.不平衡电压下并网逆变器的预测电流控制技术[J].电网技术,2013,37(5):1123-1129.
- Nian Heng, Yu Nisa, Zeng Rong. Predictive current control for grid-connected inverters under unbalanced grid voltage[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1123-1129.
- [16] 王要强,吴凤江,孙力.带LCL输出滤波器的并网逆变器控制策略研究[J].中国电机工程学报,2011,31(12):34-40.
- Wang Yaoqiang, Wu Fengjiang, Sun Li. Control strategy for grid connected inverter with an LCL output filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 34-40.
- [17] 熊连松,卓放,刘小康.增强型滑动平均滤波算法及其在畸变电网相位同步控制中的应用[J].电工技术学报,2015,30(21):13-23.
- Xiong Liansong, Zhuo Fang, Liu Xiaokang. Enhanced moving average filter and its applications in phase locking control of distorted power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 13-23.
- [18] 赤木泰文,埃德森,毛立赛.瞬时功率理论及其在电力调节中的应用[M].北京:机械工业出版社,2003.
- Takebun Akagi, Edson, Morisai. Instantaneous power theory and its application in power regulation[M]Beijing: China Machine Press, 2003.
- [19] 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):22-29.
- 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): 22-29.

收稿日期:2021-02-17

修改稿日期:2021-03-19