

不平衡负载下逆变器并联系统电能质量治理

申小玲¹, 郭昌海²

(1. 贵州广播电视大学(贵州职业技术学院)机电与能源工程学院, 贵州 贵阳 550023;

2. 贵州省水利水电勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550023)

摘要:针对多逆变器并联系统输出侧电压不平衡的问题,提出一种基于主从控制的多逆变器并联系统输出级电压不平衡度抑制策略,旨在提升电压质量。首先对逆变器输出电压进行分析,得出负载电流中的负序分量是导致逆变器输出电压三相不对称的原因,进而提出基波旋转坐标变换的方法将负载电流中的正负序分量分离出来,其中负载电流中的全部负序分量由从逆变器承担,而主逆变器仅提供负载电流中的基波分量,并维持逆变器输出端电压稳定。所提控制策略将电能质量治理功能嵌入到从逆变器控制策略中,有效降低了输出端电压的不平衡度,避免了增加额外的电能质量治理装置。最后,基于PSCAD仿真和实验对所提控制算法的有效性进行了验证。

关键词:多逆变器并联系统;非对称负载;电压不平衡;主从控制

中图分类号:TM727 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22567

Power Quality Improve Strategy of Inverter Parallel System Under Unbalanced Load

SHEN Xiaoling¹, GUO Changhai²

(1. College of Mechanical, Electrical and Energy Engineering, Guizhou Radio & TV University

(Guizhou Vocational Technology Institute), Guiyang 550023, Guizhou, China;

2. Guizhou Survey and Design Research Institute for Water Resources and

Hydropower Co., Ltd., Guiyang 550023, Guizhou, China)

Abstract: Aiming at the problem of unbalanced output voltage of multi-inverter parallel system, a novel output stage voltage quality compensation strategy based on master-slave control was proposed. The output voltage of the inverter was analyzed, and the cause of the three-phase asymmetry of the inverter output voltage was caused by unbalanced load, the positive and negative sequence components in the load current were extracted by the method of fundamental rotation coordinate transformation, the remaining available capacity of the slave inverter was used to compensate the negative sequence component of the load current, while the main inverter only provided the fundamental component of the load current and maintained the stability of the output voltage of the inverter. The proposed control strategy embeds the power quality control function into the control strategy of the slave inverter, effectively reduce the imbalance of the output voltage and avoid adding additional power quality management devices. Finally, a parallel inverter simulation model was built in PSCAD environment to verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: multi-inverter parallel system; unbalanced load; unbalanced voltage; master-slave control

微电网系统中,常常采用多逆变器并联系统来扩容^[1-2]和增强系统冗余性^[3]。针对多逆变器并联系统运行控制策略,目前存在2种经典的控制算法:一主多从的主从控制^[4-5]和对等的下垂控制^[6-7]。下垂控制通过模拟传统电力系统中的同

步发电机(synchronous generator, SG)并联运行机制,能实时动态调节逆变器输出的有功和无功功率,该算法已发展成为并联运行逆变器的通用方法,且不需要多个逆变器间的通信即可实现功率均分,但下垂控制属于有差调节,并未模拟出SG

基金项目:贵州广播电视大学(贵州职业技术学院)校级课题(2018YB04)

作者简介:申小玲(1972—),女,硕士,高级实验师,Email:1703355496@qq.com

所固有的转子惯性,因此对微电网系统不能提供一定的惯性支撑。相较于下垂控制系统,主从控制系统由一个容量较大的分布式电源充当主电源,能较好地维持逆变器端电压稳定。同时在逆变器所带负荷为不平衡负荷时,主从控制优势更大^[8]。

微电网中的分布式电源多采用电力电子变换器并入电网,电力电子变换器的非线性特性以及微电网中遍布着的非对称负荷会导致逆变器输出电压严重畸变和不对称,如果对现有的逆变器算法不加以改进,畸变和不对称的电压势必会影响微电网中运行设备的可靠运行,也会影响到负荷的安全运行,本文只考虑逆变器输出电压中的非对称这一工况。因此,多逆变器并联系统无论采用何种控制策略,其输出端电压的质量是保证整个系统可靠运行的关键,因此,提高多逆变器并联系统输出端电压质量是亟需解决的问题^[9-10]。

目前针对逆变器输出电压质量问题,已有相关学者对其展开研究,并取得一定成果。文献[11-12]提出通过增加额外的电能质量治理装置来改善逆变器输出端电压不平衡问题,这无疑增加了系统的额外硬件成本。文献[13-14]提出在逆变器和三相不平衡负载间增加一个 Δ/Y 变压器,可以给由于三相不平衡负载所产生的不平衡电流提供一个电流通路,虽然有效降低了逆变器输出电压不平衡度,但也增加了额外的成本,同时变压器的存在增加了系统的损耗。文献[15-17]提出一种在逆变器直流侧并上分裂电容的方法,其中分裂电容的中性点直接与三相不对称负载中性点直相连,虽然在该种控制策略下逆变器输出三相电压基本对称,但由于中性电流直接流入分裂式电容,因而需要选取较大的电容。文献[18]提出一种将滑模控制和虚拟振荡器控制相结合的新方法,消除了三相低压微电网中由不平衡负载引起的电压不平衡。文献[19-20]提出了一种混合虚拟阻抗法,通过前馈并网点电压和反馈输出电流生成谐波电压参考值,较好地抑制了输出电压中的不平衡分量,但是需要过大的前馈/反馈增益才能取得较好的效果。

基于此,本文在上述文献的基础上,针对多逆变器并联系统,首先分析了不平衡负荷造成逆变器输出端电压不平衡的机理,然后对已有的主从控制策略进行了改进,将电能质量治理功能嵌入到其余从逆变器中,充分利用从逆变

器剩余可用容量对电压质量进行治理,最后基于PSCAD仿真对本文所提控制算法的有效性进行了验证。

1 逆变器输出电压不平衡分析

图1是主从控制中主逆变器比较经典的控制算法,包括电压外环和电流内环。电压外环负责维持逆变器输出端电压稳定,电流内环能提高系统响应速度。

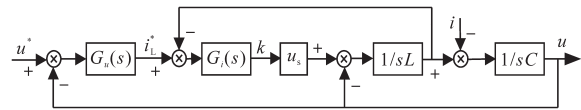


图1 主逆变器双闭环控制算法

Fig.1 The control-diagram of main inverter

图1中, $G_u(s)$ 为电压外环传递函数,可以采用PI控制或者P控制; $G_i(s)$ 为电流内环传递函数,同理也可以采用PI控制或者P控制; i, u, u^* 分别为主逆变器输出的实际电流、实际电压以及给定的参考电压指令。根据图1可以得出主逆变器输出电压和电流的关系表达式如下:

$$u(s) = u^*(s)H(s) - Z(s)i(s) \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} H(s) = \frac{G_u(s)G_i(s)k}{LCs^2 + kG_i(s)Cs + kG_u(s) + 1} \\ Z(s) = \frac{Ls + G_i(s)k}{LCs^2 + kG_i(s)Cs + kG_u(s) + 1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i(s), u^*(s)$ 分别为主逆变器输出的实际电流及给定的参考电压指令; $H(s)$ 为主逆变器输出电压到电压参考指令间的传递函数; $Z(s)$ 为主逆变器参考电压置0时,主逆变器输出电压 u 与输出电流 i 的比值,即等效输出阻抗; L, C, k 分别为逆变器滤波电感、滤波电容以及逆变器等效增益。

当逆变器所带非对称负载时,逆变器输出电流 i 中不仅含有正序电流分量,也将存在着负序电流分量。因此式(1)可以进一步表示为仅含正序分量(用下标p表示)和仅含负序分量(用下标n表示)的表达式,如下式所示:

$$\begin{cases} u_p = H(s)u_o - Z_p(s)i_p \\ u_n = 0 - Z_n(s)i_n \end{cases} \quad (3)$$

基于对称分量法可知,三个不对称的向量可以唯一地分解为三相对称的向量,那么当逆变器带非对称负载运行时,逆变器中的电流可以分解

为正、负、零序三组对称分量,如下式所示:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = i_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_p) \\ \cos(\omega t - 120^\circ + \theta_p) \\ \cos(\omega t + 120^\circ + \theta_p) \end{bmatrix} + i_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_n) \\ \cos(\omega t + 120^\circ + \theta_n) \\ \cos(\omega t - 120^\circ + \theta_n) \end{bmatrix} + i_0 \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_0) \\ \cos(\omega t + \theta_0) \\ \cos(\omega t + \theta_0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: i_p, i_n, i_0 分别对应逆变器电流中各分量的幅值; $\theta_p, \theta_n, \theta_0$ 分别为各自分量的初始相位角。

为了简化分析,将式(4)经过Park坐标变换到两相dq旋转坐标系下的表达式如下:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = T_{abcdq0} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = i_p \begin{bmatrix} \cos\theta_p \\ -\sin\theta_p \\ 0 \end{bmatrix} + i_n \begin{bmatrix} \cos(2\omega t + \theta_n) \\ -\sin(2\omega t + \theta_n) \\ 0 \end{bmatrix} + i_0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cos(\omega t + \theta_0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据式(5)可知,逆变器不对称的三相电流分量经过Park变换到两相的dq旋转坐标系下时,其中的正序分量会变成一个直流分量,而负序分量则会变成一个2倍工频的脉动分量,对于一个逆变三相三线制系统,由于没有零序电流通路,因此不考虑零序分量的影响。

采用PI控制的系统对直流信号能产生无穷大的增益,对直流信号控制效果好,能无静差跟踪参考信号,因此目前的主从控制策略中的主逆变器通常采用PI控制器就能达到很好的控制效果。然而,当逆变器所带非对称负载导致逆变器输出端电压不对称时,其端电压中存在的负序分量在dq两相旋转坐标系下产生的2倍工频脉动分量为一交流量,而PI控制器对交流信号的跟踪能力差,因此在带非对称负载运行时,难以降低逆变器输出电压的不平衡度,故本文采用从逆变器来改善逆变器输出端电压质量。

2 改进的主从控制策略原理

2.1 主从控制的原理

本文所提出的电压质量改善控制策略中,主逆变器维持原有的控制策略,依然充当电压源角色,仅将电能质量功能嵌入到从逆变器中,增加

了从逆变器电能质量治理功能,即由从逆变器来承担负载电流中的负序分量。其等效电路图如图2所示。

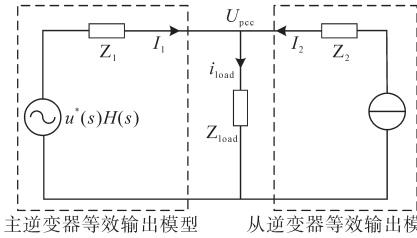


图2 具有电能质量治理功能的主从逆变器等效电路图

Fig.2 The equivalent circuit diagram of master-slave inverter with power quality control function

图2中, U_{pcc} 为主逆变器输出端电压, i_{load} 为非对称负载的电流,主逆变器输出端电压可以表示为

$$U_{pcc} = u^*(s)H(s) - Z_1 I_1 \quad (6)$$

从式(6)可以看出,要想减小 U_{pcc} 中的不平衡电压含量,关键在于减小逆变器输出阻抗 Z_1 上的负序压降,而输出阻抗上的负序压降可以从输出阻抗 Z_1 和输出电流 I_1 两方面进行控制,本文从输出电流 I_1 去考虑减小输出阻抗上的负序压降。

将 i_{load} 进行分解分别得到正序电流分量 i_p 和负序电流分量 i_n ,如下式:

$$i_{load} = i_p + i_n = I_1 + I_2 \quad (7)$$

如若不加控制,主逆变器的输出电流 I_1 中将含有部分负序分量,导致主逆变器输出阻抗上存在一定负序压降,则根据式(6)可知,由于给定的参考电压 $u^*(s)$ 是纯正弦的电压指令,因此 U_{pcc} 中将含有负序电压成分,导致 U_{pcc} 电压出现不对称。

因此本文采用主从逆变器控制,将负载中的负序电流全部由从逆变器来提供,负载中的正序电流则由主、从逆变器共同分担,如下式所示:

$$\begin{cases} I_2 = i_n + m i_p \\ I_1 = i_{load} - I_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: m 为从逆变器分担负载电流中负序电流分量的比例系数,取值0~1之间。

因此,采用上述控制算法后,主逆变器仅提供 i_{load} 中的正序电流分量,可保证逆变器输出的三相电压基本对称。

2.2 从逆变器控制策略

基于上面的分析可知,当逆变器带非对称负载运行时,若通过减小流入主逆变器中的负序电流分量,则可以使得逆变器输出电压基本三相对称。基于这一思路,本文选取由从逆变器来提供负载电流中的全部负序电流分量,而负载中的基

波电流则由主、从逆变器共同分担。所提出的从逆变器的控制框图如图3所示。

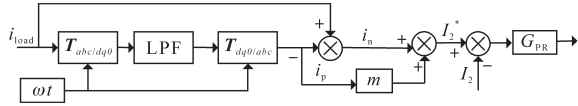


图3 从逆变器控制框图

Fig.3 Control block diagram of slave inverter

图3中, ω 为基波旋转角频率, G_{PR} 为电流内环传递函数。由图3可知,将负载电流 i_{load} 通过基波旋转坐标变换后,基波正序电流转换为直流量,负序分量转换为2倍频分量,通过低通滤波器LPF滤波后,得到直流量,其再经过基波旋转反变换得到基波正序电流 i_p ,用负载电流减基波电流正序分量得到负载电流中负序电流分量 i_n ,将分离出的正序电流 i_p 乘以一比例系数 m 后与负序电流分量 i_n 叠加,作为从逆变器参考电流指令值 I_2^* ,如下式所示:

$$I_2^* = i_n + mi_p \quad (9)$$

将从逆变器参考指令值 I_2^* 与从逆变器实际输出电流 I_2 比较后,送入到电流环控制器得到从逆变器的开关控制信号。

3 仿真分析

为了证明本文所提出的电压不平衡度改善策略的可行性,本文在PSCAD仿真环境搭建了如图1所示的逆变器并联系统仿真模型。仿真主要参数为:主逆变器电感 $L_1 = 3 \text{ mH}$,电容 $C_1 = 45 \text{ }\mu\text{F}$;电压外环PI比例系数0.55,积分系数5.5;电流内环P比例系数25;从逆变器电感 $L_2 = 2.5 \text{ mH}$,电容 $C_2 = 12 \text{ }\mu\text{F}$;功率电流环PI比例系数75,积分系数0.08;负序电流环PI比例系数4.5,积分系数1.5。

图4是采用传统的主从控制策略,即未加电能质量治理功能时主逆变器输出级电压的波形。其中,仿真中的非对称负载取: $r_a=20 \text{ }\Omega$, $r_b=6 \text{ }\Omega$, $r_c=80 \text{ }\Omega$ 。

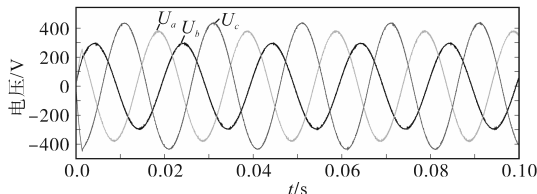


图4 未加电能质量治理功能时主逆变器输出电压波形

Fig.4 The output voltage waveform of the main inverter when the power quality control function is not added

当逆变器带非对称负载运行时,图5是采用本文所提的电压不平衡度改善算法时,主逆变器

输出电压的波形。

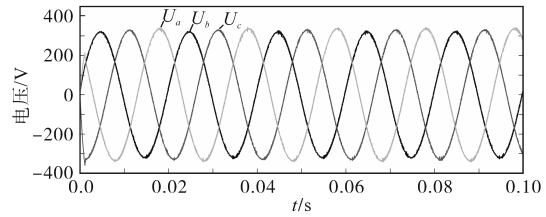


图5 本文所提的电压不平衡度改善算法时输出电压波形

Fig.5 The output voltage waveform of proposed algorithm for improving voltage unbalance degree is applied

从图4、图5可以看出,当逆变器带非对称负载运行时,若未加电能质量治理功能,主逆变器输出电压出现严重不对称,经计算,A相、B相、C相三相电压不平衡度分别达到了4.56%,7.85%,6.44%。当采用本文所提的电压不平衡度改善算法时,主逆变器三相输出电压不对称明显改善,输出三相电压基本对称,经计算,A相、B相、C相三相电压不平衡度分别为1.06%,1.15%,1.96%。

图6和图7分别为采用本文所提的电压不平衡度改善算法时,主、从逆变器输出电流波形图。由此可知,由于从逆变器承担了负载电流中的全部负序电流分量,因而导致了从逆变器输出电流的不对称现象,而主逆变器承担的仅是负载电流中的正序分量,故主逆变器的输出电流是三相对称的。

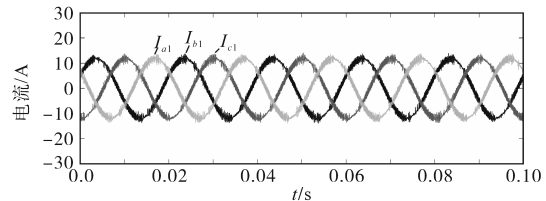


图6 主逆变器输出电流

Fig.6 The output current of main inverter

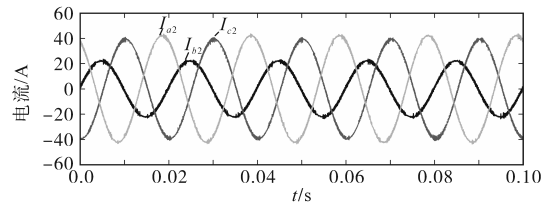


图7 从逆变器输出电流波形

Fig.7 The output current of slave inverter

4 实验验证

为了进一步验证所提的电压不平衡度改善算法的可行性,本文搭建了实验室样机,样机控制器采用TI公司的TMS28335芯片,其中实验参数取值与仿真参数一致,通过编程实现所提控制算法。

为了证明本文电压不平衡度改善算法的可行性,实验工况如下:初始从逆变器控制环不加负序电流补偿算法,1 s后增加从逆变器负序电流补偿环,所得到的实验波形如图8所示。图8a~图8d分别对应的是负载电压、主逆变器电流、从逆变器电流和负载电流波形。

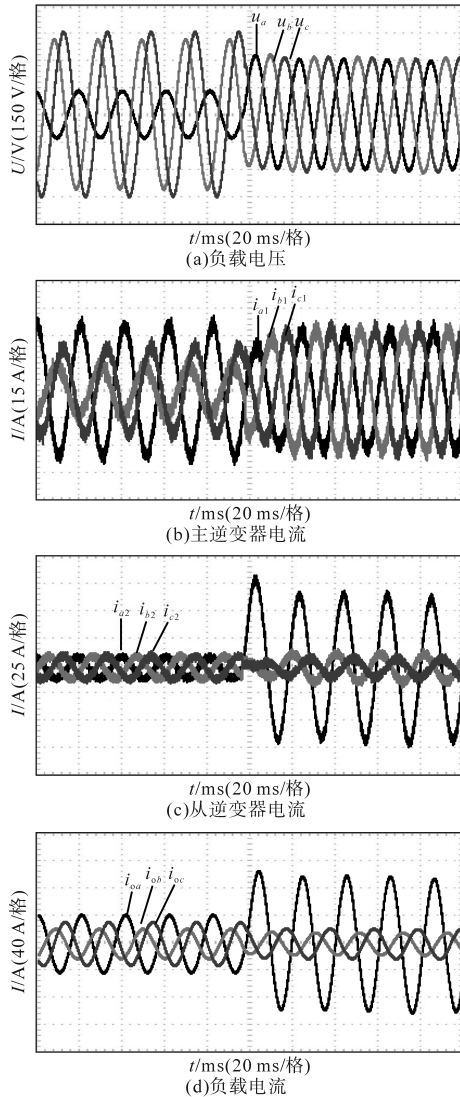


图8 本文所提的电压不平衡度改善算法时输出电压、电流波形

Fig.8 The proposed algorithm for improving voltage unbalance degree is applied to output voltage and current waveforms

从图8a的实验结果可以看出,当从逆变器控制环不加负序电流补偿时,负载电压出现三相不对称,不对称的电压会影响到负荷的稳定运行。1 s时刻,增加从逆变器负序电流补偿环后,负载电压波形基本三相对称,这是由于此时负载中的负序电流分量都由从逆变器来承担,而主逆变器仅承担负载中的正序电流分量,因而主逆变器输出电压三相对称,这与前文的理论分析相吻合。

图8b中主逆变器输出电流刚开始不对称是

由于负载中的负序电流分量导致,而1 s后由于负载中的负序电流分量都由从逆变器来承担,主逆变器仅承担负载中的正序电流,因而主逆变器输出电流三相对称。

图8c中从逆变器输出电流刚开始对称是由于从逆变器只提供负载中的正序电流,1 s后从逆变器增加负序电流补偿环,开始提供负载中的负序电流分量,因而导致其输出电流不对称。

经计算,补偿前A相、B相、C相三相电压不平衡度分别达到了15.38%,8.45%,9.25%。当采用本文所提的电压不平衡度改善算法时,主逆变器三相输出电压不对称明显改善,输出三相电压基本对称,经计算,A相、B相、C相三相电压不平衡度分别为1.1%,1.65%,1.72%。实验结果与仿真结果相吻合。

5 结论

微电网中存在的大量不平衡负荷不仅会降低多逆变器并联系统的输出级电压质量,也会影响到微电网中相关设备的安全可靠运行。基于此,本文提出了一种充分利用从逆变器剩余可用容量对电压质量进行治理的策略,所得出的结论如下:

1)将电能质量治理功能嵌入到从逆变器中,避免了增加额外的电能质量治理装置,降低了系统成本。

2)主逆变器维持原有的控制策略不变,其中负载电流中的正序电流分量由主、从逆变器共同承担,负载电流中的负序电流分量则全部由从逆变器承担,降低了主逆变器的备用容量。

参考文献

- [1] Yang Y, Wen H, Fan M, *et al.* Multiple-voltage-vector model predictive control with reduced complexity for multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(1):105-117.
- [2] Hidaka Y, Takagi F, Komatsu T, *et al.* A novel pole-changing method with multiple three-phase inverters[J]. IEEJ Transactions on Electrical & Electronic Engineering, 2019, 14(12): 1842-1850.
- [3] Lee A T L, Jin W, Tan S C, *et al.* Buck-Boost single-inductor multiple-output high-frequency inverters for medium-power wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4):3457-3473.
- [4] 张凡,牟龙华,王子豪,等.主从控制孤岛微电网的优化故

- 障控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1241-1248.
- [5] 李鑫卓. 基于主从控制的微电网平滑切换控制[J]. 电气自动化, 2019, 41(4):27-29.
- [6] 高佳宁, 韩蓓, 李国杰, 等. 考虑不确定性的下垂控制微电网可达性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24):7179-7188.
- [7] 陆维, 赵兴勇, 赵钰彬, 等. 孤网模式下交直流混合微电网互联变换器综合下垂控制[J]. 电测与仪表, 2018, 57(2): 106-113.
- [8] Rioual P, Pouliquen H, Louis J P. Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized model [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 11(3): 495-502.
- [9] 周柯, 葛钦, 葛平娟, 等. 不平衡负荷下输出并联型电力电子变压器的优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(S1):153-160.
- [10] 薛冰, 杨旭红, 张苏捷, 等. 不平衡电压下的虚拟同步发电机控制方法[J]. 电气传动, 2018, 48(4): 61-64.
- [11] 周柯, 王凯, 刘路, 等. 一种改进型并联混合有源电力滤波器及其控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30):67-72.
- [12] 汤赐, 罗安, 赵伟, 等. 混合型并联有源滤波器的稳定性[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6):43-48.
- [13] 彭力, 白丹, 康勇, 等. 三相逆变器不平衡抑制研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5):174-178.
- [14] Meersman B, Renders B, Degroote L, *et al.* Three-phase inverter-connected DG-units and voltage unbalance[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(4):899-906.
- [15] 韦徵, 茹心芹, 石伟, 等. 适用于不平衡负载工况下的微网逆变器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20):76-82.
- [16] 姜卫东, 吴志清, 李王敏, 等. 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.
- [17] Shen H, Zhang Y, Shi Y L, *et al.* Research on control strategy of three-phase grid-connected inverter under distorted and unbalanced voltage conditions[C]//Transportation Electrification Asia-Pacific, IEEE, 2014:1-6.
- [18] Liu Q, Tao Y, Liu X, *et al.* Voltage unbalance and harmonics compensation for islanded microgrid inverters[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(5):1055-1063.
- [19] Zeng Z, Yang H, Tang S, *et al.* Objective-oriented power quality compensation of multifunctional grid-tied inverters and its application in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3):1255-1265.
- [20] Wang T, Nian H, Zhu Z Q, *et al.* Flexible compensation strategy for voltage source converter under unbalanced and harmonic condition based on a hybrid virtual impedance method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7656-7673.

收稿日期:2020-10-20

修改稿日期:2020-11-15