

基于电网电压前馈的 VSG 平衡电流控制策略

党克, 田勇

(东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 在电网电压不平衡条件下基于虚拟同步发电机(VSG)控制策略的逆变器输出三相电流不平衡并且电流幅值过大。针对此问题,提出一种基于电网电压前馈的VSG平衡电流控制策略。利用VSG电流内环的控制框图推导出前馈控制器的传递函数,再将电网电压经前馈控制器前馈至电流内环,减轻故障电压对电流波形的干扰,降低电流畸变率。将瞬时有功、无功功率的平均值反馈到VSG算法得到抑制负序电流的电压参考指令,在电网电压故障期间使并网电流依然保持三相平衡而且幅值稳定。最后通过MATLAB/Simulink仿真证明了所提控制策略的有效性。

关键词: 虚拟同步发电机; 电网电压不平衡; 电网电压前馈; 电流参考指令

中图分类号: TM 761 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)01-0035-06

doi: 10.12177/emca.2020.178

VSG Balanced Current Control Strategy Based on Grid Voltage Feedforward

DANG Ke, TIAN Yong

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The output three-phase current of the inverter based on the control strategy of virtual synchronous generator (VSG) is unbalanced and the current amplitude is too large. To solve this problem, a VSG balanced current control strategy based on voltage feedforward is proposed. The transfer function of the feedforward controller is derived by using the control block diagram of the VSG current inner loop, and then the grid voltage is fed forward to the current inner loop through the feedforward controller. The interference of the fault voltage to the current waveform and the current distortion rate are reduced. The average values of instantaneous active power and reactive power are fed back to VSG algorithm to get the voltage reference instruction of restraining negative sequence current, which can make the grid connected current keep three-phase balance and stable amplitude during the voltage fault period. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is proved by MATLAB/Simulink simulation.

Key words: virtual synchronous generator; grid voltage imbalance; grid voltage feedforward; current reference command

0 引言

随着化石燃料的开采以及温室效应的加剧,传统发电行业的发展受到限制,以太阳光、风能为代表的新能源发电等分布式电源得到大力发展^[1]。虽然新能源发电具有低碳环保、取之不尽等优点,但其不具备火电机组频率调节和电压调

节的能力。随着新能源发电在电网中的比重不断提高,传统的旋转备用容量和转动惯量相对减少,对电网的安全稳定运行造成威胁^[2]。为了实现新能源发电友好并网,文献[3]提出虚拟同步发电机(VSG)技术,通过将同步发电机的二阶经典模型引入到逆变器的控制算法中,使分布式电源能够模仿同步发电机外特性运行,从而使新能源发

收稿日期: 2020-09-06; 收到修改稿日期: 2020-11-19

作者简介: 党克(1960—)男,研究员,研究方向为新能源发电技术、电力系统电能质量。

电具备频率调节和电压调节能力并且能够为电网提供一定的阻尼和惯性^[4]。文献[5]给出了基于VSG技术光伏发电系统的数学模型和建模方法,对VSG 4种运行模式进行仿真分析。文献[6]通过改变惯量系数提高VSG在弱电网下的频率稳定性。文献[7]利用模糊控制理论改进VSG的电压电流双环控制,提高VSG动态响应速度。文献[8]在频率给定值后加入积分环节,电网频率发生偏移时提高VSG的频率和有功功率稳定性。文献[9]提出自适应转动惯量和阻尼系数控制策略,抑制扰动下有功、频率波动。

目前,电网正常运行时的VSG技术已经较为成熟,但针对电网电压不平衡时VSG的控制策略研究较少。文献[10]给出了抑制并网电流负序分量、抑制有功功率波动和抑制无功功率波动这3种控制目标负序电流指令计算方法和VSG控制结构。文献[11]重新设计了负序电流控制结构,将3种控制目标整理成统一表达式,实现了3种控制目标平滑切换及功率和电流的协调控制,但过多的正负序分离计算会导致控制延时。文献[12-13]通过线路方程将VSG电压参考值转化成电流正序参考指令,从而引入电流控制结构,实现对负序电流的抑制,线路参数的不准确性影响控制效果。文献[14]利用动态电压补偿限制负序电流和峰值电流,达到三相电流平衡的目的,但电压信号计算过于复杂,实现较为困难。

以抑制负序电流为控制目标的多数控制策略均需要采用的正、负序双电流控制环,增加了控制结构的复杂程度。本文提出基于电网电压前馈的VSG控制策略,保证VSG在不平衡电压下输出三相电流依然保持平衡,减小逆变器输出有功功率、无功功率的波动,不需增加额外的控制结构。将电网电压经过前馈控制器前馈至VSG电流内环,降低故障电压对逆变器输出电流的不良影响,利用有功功率和无功功率的平均值生成正序电流参考指令,使三相电流保持平衡。最后,通过MATLAB/Simulink仿真证明本文所提策略的有效性和可靠性。

1 VSG 基本原理

基于VSG技术的三相电压源式逆变器电路拓扑结构如图1所示。VSG控制算法根据并网公

共连接点(PCC)处的有功、无功功率生成逆变器输出电压矢量信号,通过电压电流双环控制结构生成电压控制信号,再经过正弦脉宽调制(SPWM)后产生相应的脉冲来控制逆变器开关。图1中, L 、 C 和 L_g 分别为滤波电感、电容和线路电感; e_a 、 e_b 和 e_c 为逆变器输出三相电压; u_a 、 u_b 和 u_c 为三相电网电压; i_a 、 i_b 和 i_c 为逆变器输出三相电流; U_{DC} 为直流侧电压; U_{pcc} 为并网公共连接点处的电压。

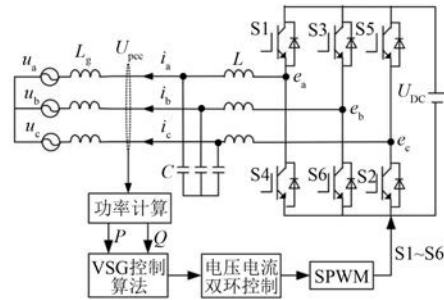


图1 VSG 电路拓扑结构

VSG控制算法由功频、励磁2个环节组成,如图2所示。其中, P_e 为电磁功率。

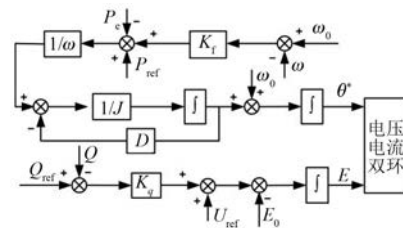


图2 VSG 原理图

为了模拟同步发电机的一次调频特性,功频环节含有频率、有功下垂控制,表达式如下^[15]:

$$P = P_{ref} + K_f(\omega_0 - \omega) \tag{1}$$

式中: K_f 为下垂系数; P 、 P_{ref} 分别为有功功率的实际值和参考值。

VSG根据同步发电机二阶模型来模拟同步发电机的惯性和阻尼,其转子运动方程为

$$\begin{cases} J \frac{d\Omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \tag{2}$$

式中: J 、 D 分别为转动惯量和阻尼系数; Ω 、 ω 分别为机械角速度和电气角速度,当同步发电机的极对数为1时二者相等; T_m 、 T_e 分别为机械转矩

和电磁转矩; θ 为功角; ω_0 为电网同步角速度。

励磁环节模拟无功功率下垂控制特性, 表达式如下^[16]:

$$K \frac{dE}{dt} = [(Q_{\text{ref}} - Q)K_q + U_{\text{ref}} - U_m] \quad (3)$$

式中: K 为积分系数; E 为 VSG 输出电动势; Q_{ref} 和 Q 分别为无功功率参考值和实际值; K_q 为电压下垂控制系数; U_m 、 U_{ref} 分别为并网逆变器输出电压幅值的实际值与参考值。

综上所述, 有功-频率环节生成逆变器输出电压的功角 θ^* , 无功-电压环节生成逆变器输出电压幅值 E^* , 二者经过式(4)生成三相电压参考值 e^* , 再通过电压电流双环控制得到控制信号:

$$e^* = \begin{cases} E^* \sin\theta^* \\ E^* \sin(\theta^* - 2\pi/3) \\ E^* \sin(\theta^* + 2\pi/3) \end{cases} \quad (4)$$

2 电压前馈控制策略

在电网电压不平衡期间, 欲使故障电压不影响逆变器输出电流质量, 将电网电压作为扰动量经前馈控制器引入电流内环, 推导出前馈控制器的传递函数, 以降低故障电压的干扰。

2.1 前馈控制器传递函数的推导

本文采用基于旋转坐标系下的控制策略, 因为电流控制环的 d 轴和 q 轴已进行前馈解耦, d 轴和 q 轴控制结构对称, 所以仅针对 d 轴推导电压前馈控制器的传递函数表达式, 根据并网逆变器的数学模型可得电流环 d 轴控制框图, 如图 3 所示。 $G(s)$ 为 PI 控制器传递函数; $H(s)$ 为前馈控制器的传递函数; i_d^* 为 d 轴电流参考指令; L 和 C 分别为滤波电感和电容; Z 为线路阻抗。当开关频率足够高时, 逆变器的放大特性可由比例增益 K_{PWM} 近似表示^[17]。对于使用 SPWM 的逆变器 K_{PWM} 为

$$K_{\text{PWM}} = \frac{U_{\text{DC}}}{U_{\text{tri}}} \quad (5)$$

式中: U_{DC} 为直流母线电压值; U_{tri} 为三角载波的幅值。

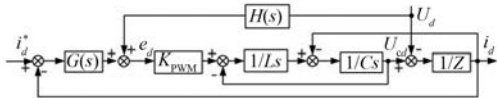


图3 电网电压前馈控制框图

根据图 3 可得如下方程组:

$$\begin{cases} (i_d^* - i_d)G(s) + U_d H(s) = e_d \\ \left[(e_d K_{\text{PWM}} - u_{cd}) \frac{1}{sL} - i_d \right] \frac{1}{sC} = u_{cd} \\ (u_{cd} - U_d) \frac{1}{Z} = i_d \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)进行整理可得 i_d 具体表达式:

$$\begin{cases} i_d = \frac{G(s)K_{\text{PWM}}}{f} i_d^* - \frac{k}{f} U_d \\ f = K_{\text{PWM}} G(s) + Z + s^2 ZCL + sL \\ k = [1 + s^2 CL - H(s)K_{\text{PWM}}] \end{cases} \quad (7)$$

在含有 U_d 项的系数中只有 $H(s)$ 为可变量, 为了避免电网电压对逆变器输出电流的不良影响, 应使 U_d 对 i_d 完全补偿即 k 为零, 即可计算出前馈控制器的传递函数:

$$H(s) = \frac{1 + s^2 CL}{K_{\text{PWM}}} \quad (8)$$

式(8)分子中含有二阶微分项, 这不仅在实际工程中难以实现, 而且在电网电压跌落瞬间微分项会使前馈信号趋近于无穷大, 危及系统的稳定运行。

根据阶跃响应的终值定理, 在电压电流稳态时将式(8)化简为

$$H(s) = \frac{1}{K_{\text{PWM}}} \quad (9)$$

2.2 电流参考值的选取

根据式(7)可知逆变器输出电流不仅受电网电压的影响还与电流参考值密切相关, 而电网电压不平衡会影响电流参考值的准确性。不对称故障、三相负载不平衡会导致电压的不平衡, 不平衡度为

$$\varepsilon_u = \frac{\sqrt{(u_d^-)^2 + (u_q^-)^2}}{\sqrt{(u_d^+)^2 + (u_q^+)^2}} \quad (10)$$

式中: 下标“ d ”和“ q ”分别代表旋转坐标系下的 d 轴分量和 q 轴分量; 上标“+”和“-”分别代表正序分量和负序分量。

由 VSG 原理可知逆变器输出有功功率和无功功率分别反馈到功频模块和励磁模块生成电压参考值, 电压参考值再经过电压控制环生成电流参考值。然而在电压不平衡期间逆变器输出复功率为^[18]

$$S = P + jQ = 1.5UI^* = 1.5 \times$$

$$(U_{dq}^+ e^{j\omega t} + U_{dq}^- e^{-j\omega t})(I_{dq}^+ e^{j\omega t} + I_{dq}^- e^{-j\omega t})^* \quad (11)$$

式中： U 、 I 分别为电网电压和并网电流；上标“*”代表共轭。

将式(11)写成瞬时功率形式：

$$\begin{cases} P = P_0 + P_{c2}\cos(2\omega t) + P_{s2}\sin(2\omega t) \\ Q = Q_0 + Q_{c2}\cos(2\omega t) + Q_{s2}\sin(2\omega t) \end{cases} \quad (12)$$

式中： P_0 、 Q_0 为有功、无功的平均值； P_{c2} 、 Q_{c2} 和 P_{s2} 、 Q_{s2} 为有功、无功的波动项幅值。

具体值为

$$\begin{cases} P_0 = 1.5(U_d^+ I_d^+ + U_q^+ I_q^+ + U_d^- I_d^- + U_q^- I_q^-) \\ Q_0 = 1.5(U_q^+ I_d^+ - U_d^+ I_q^+ + U_q^- I_d^- - U_d^- I_q^-) \\ P_{c2} = 1.5(U_d^- I_d^+ + U_q^- I_q^+ + U_d^+ I_d^- + U_q^+ I_q^-) \\ Q_{c2} = 1.5(U_q^- I_d^+ - U_d^- I_q^+ + U_q^+ I_d^- - U_d^+ I_q^-) \\ Q_{s2} = 1.5(-U_d^- I_d^+ - U_q^- I_q^+ + U_d^+ I_d^- + U_q^+ I_q^-) \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知消除负序电流可减轻瞬时功率振荡。

此时如果有功功率和无功功率的倍频分量反馈到 VSG 算法中会使电压参考值产生波动,进而使电流参考值发生波动,三相电流依然无法保持平衡。传统控制策略断开电压外环后通过有功、无功参考值与电压正序分量重新计算出电流参考值,但失去了 VSG 模拟同步发电机的意义。本文将瞬时有功、无功的平均值反馈到 VSG 算法中,既能得到恒定的电压参考值又能保留 VSG 的惯性特征。

计算有功、无功功率的平均值需使用正负序分离技术,本文采用降阶广义积分器^[19](ROGI)对电网正负序电压进行分离。与传统的二阶广义积分器(SOGI)相比,ROGI 的主要特点是计算速度快,结构易于工程实现。ROGI 的传递函数为

$$G_{ROGI}(s) = \frac{\omega_0}{s - j\omega_0} \quad (14)$$

式中： ω_0 为 ROGI 的谐振频率,一般取电网基波角频率。

在 ω_0 处 ROGI 的增益较大,而在其他处 ROGI 的增益较小几乎为零,由此可见,角频率和电网基波角频率相等的正序电压可快速被分离出来。

综上所述,不平衡电压下的 VSG 电压前馈控

制结构如图 4 所示。瞬时功率的平均值 P_0 和 Q_0 经 VSG 算法生成稳定的电压参考值相角 θ 和幅值 E ,经电压环和电流环产生电压控制信号,电网电压经过前馈控制器前馈到电流环中。当电压不平衡时前馈控制器生效,不需要模式切换,对任何类型的不平衡故障均有效。图 4 中,P 为比例控制,PI 为比例积分控制,避免双比例积分控制环节使回路产生振荡; u 为电网电压;PLL 为锁相环; ω 为电角度。

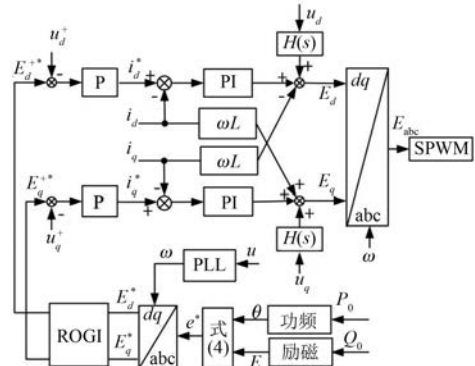


图 4 电压前馈控制

3 仿真与验证

3.1 仿真工况

利用仿真软件 MATLAB/Simulink 搭建 VSG 并网模型(如图 1),在施加电网电压不平衡故障后分析 VSG 输出电流、有功功率及无功功率曲线,对所提策略的有效性进行验证。仿真主要参数如表 1 所示。

表 1 仿真主要参数

参数名称	参数值
直流母线电压/V	800
并网相电压有效值/V	220
滤波电感/mH	2
滤波电容/ μ F	40
逆变器开关频率/Hz	10
线路阻抗/ Ω	0.07
K_{PWM}	0.8
额定有功功率/kW	25
额定无功功率/var	0
额定频率/Hz	50

3.2 仿真结果

图 5(a) 为电网 A 相电压在 0.2 s 跌落 50% 时逆变器输出三相电流波形图。电网电压正常下并网电流三相对称, 故障发生后 A 相电流和 C 相电流幅值骤增, B 相电流幅值减小, 三相电流出现严重畸变。由图 6(a) 可以看出, 采用本文所提策略后实现三相电流达到平衡。谐波分析结果表明, 2 次谐波含量为 1.4%, 0 次谐波含量为 0.9%, 总谐波畸变率 (THD) 为 2.56%, 小于 GB/T 14549—1993 规定的 5%。

图 5(b) 为电压故障下的有功功率曲线。电网电压平衡时逆变器输出有功功率为 25 kW, 故障后有功功率存在 2 倍频振荡。由图 6(b) 可知采用所提策略抑制负序电流后有功功率振荡部分减小, 在 20~30 kW 之间波动。

图 5(c) 为电压故障下的无功功率曲线。电压未发生故障时逆变器输出无功功率为零, 故障发生后无功功率骤升而且大幅度波动。由图 6(b) 可知, 采用所提策略后无功功率振荡范围大大缩小。

图 5(d) 为电压故障下的频率曲线, 已经超出

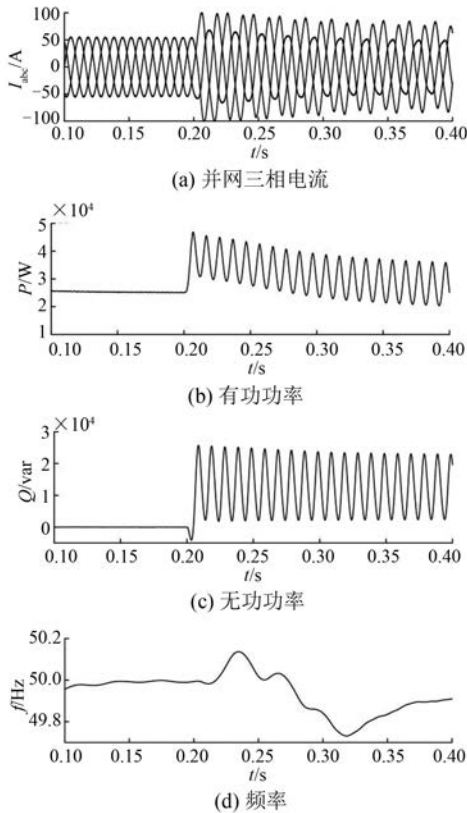


图 5 传统 VSG 控制策略仿真结果

(50 ± 0.2) Hz 范围, 由图 6(d) 可知, 采用所提策略后频率依然符合 GB/T 15945—2008 规定的“我国电网频率正常为 50 Hz”。

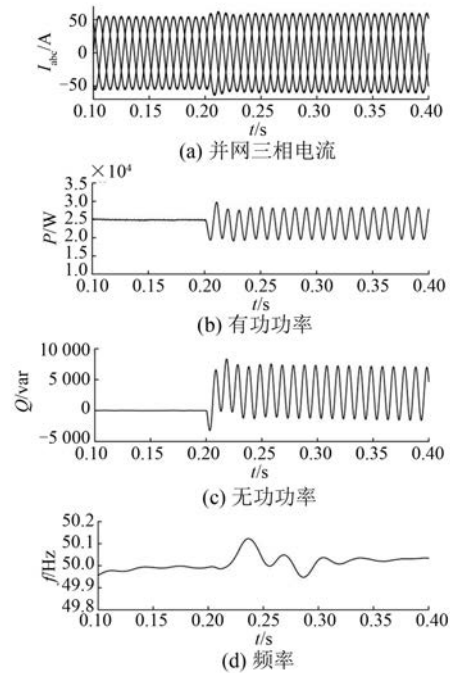


图 6 基于电压前馈的 VSG 控制策略仿真结果

3.3 不同前馈控制策略对比

图 7 是并网三相电流波形图。当电网 A 相电压在 0.2 s 跌落至零后, VSG 输出电流幅值骤增且严重畸变。图 8 是采用不含前馈控制器的传统前馈控制策略, 虽然电流幅值得到限制, 但谐波含量较高, THD 为 4.1%。而由图 9 可知采用所提策略后电流谐波含量较低, THD 为 2.55%。

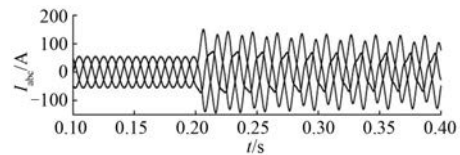


图 7 并网三相电流波形

4 结 语

本文把电网电压作为扰动量, 将其经前馈控制器引入 VSG 的电流内环, 通过电流内环的控制框图推导出前馈控制器的传递函数, 同时利用有功、无功功率的平均值使 VSG 算法生成正序电流参考指令, 保证三相电流平衡。得出如下结论:

(1) 由于前馈控制器的存在, 大大降低了不

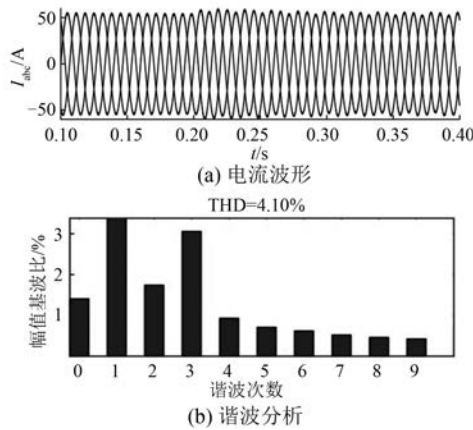


图8 传统前馈控制策略电流谐波分析

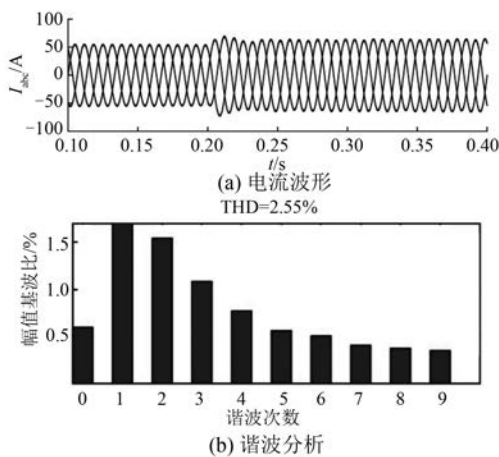


图9 本文所提前馈控制策略电流谐波分析

平衡电压对逆变器输出电流的不良影响,并网电流只因电流参考指令的改变而发生变化。

(2) 电网电压不平衡时逆变器输出功率发生波动导致电流参考值波动,影响前馈控制策略的效果。以瞬时功率的平均值反馈到功频、励磁环节得到恒定的电流参考值,保证了VSG的惯性不变。

【参考文献】

[1] 唐酿,盛超,陈萌,等. 虚拟同步发电机技术综述[J]. 南方电网技术,2016,10(11): 30.

[2] 郑天文,陈来军,陈天一,等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(21): 165.

[3] 张兴,朱德斌,徐海珍. 分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J]. 电源学报,2012(3): 1.

[4] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报,2017,37(2): 349.

[5] 任自盼,鲁宝春,赵亚龙,等. 光伏虚拟同步发电机建模与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(13): 92.

[6] 李东东,刘庆飞. 虚拟同步发电机频率稳定性分析[J]. 电机与控制应用,2018,45(6): 40.

[7] 杨旭红,薛冰. 基于模糊控制的虚拟同步发电机并网策略研究[J]. 电机与控制应用,2017,44(11): 38.

[8] 司家荣,蔡国伟,孙正龙,等. 基于下垂控制逆变器的虚拟发电机建模与特性研究[J]. 电测与仪表,2017,54(22): 116.

[9] 杨赞,梅飞,张宸宇,等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(3): 125.

[10] 张健夺,吴学智,唐芬. 电网电压不平衡下的改进虚拟同步机控制方法[J]. 电力电子技术,2018,52(5): 28.

[11] 杨明,高龙将,王海星,等. 电网不平衡下虚拟同步发电机功率-电流协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(6): 17.

[12] 陈天一,陈来军,汪雨辰,等. 考虑不平衡电网电压的虚拟同步发电机平衡电流控制方法[J]. 电网技术,2016,40(3): 904.

[13] ZHENG X, WANG C, PANG S. Injecting positive-sequence current virtual synchronous generator control under unbalanced grid [J]. IET Renewable Power Generation,2019,13(1): 165.

[14] 郭岩,郑天文,司杨,等. 基于动态电压补偿的VSG电流平衡及峰值电流控制[J]. 电力系统自动化,2018,42(9): 108.

[15] 张兴,曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京:机械工业出版社,2011: 133-136.

[16] 程启明,余德清,程尹曼,等. 基于自适应旋转惯量的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(12): 79.

[17] SHI K, YE H, XU P, et al. Low-voltage ride through control strategy of virtual synchronous generator based on the analysis of excitation state [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(9): 2165.

[18] ZHENG T, CHEN L, GUO Y, et al. Comprehensive control strategy of virtual synchronous generator under unbalanced voltage conditions [J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2018,12(7): 1621.

[19] 党克,赵思敏,于盛祥,等. 基于ROGI-FLL的电网同步技术[J]. 电力电子技术,2017,51(2): 22.