

基于虚拟同步机的微电网不平衡工况下 改进控制策略

黄河遥¹, 王鲁杨¹, 吴嘉明², 柏扬³, 丁权⁴, 白洪山¹

(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司 市北供电公司, 上海 200431; 3. 国网上海市电力公司 工程建设咨询分公司, 上海 200120; 4. 国网浙江省电力公司 玉环市供电公司, 浙江 台州 317600)

摘要: 虚拟同步发电机技术能为微电网频率稳定提供虚拟惯量, 而微电网运行时存在大量不对称负荷, 为补偿不平衡负载, 输出三相对称电压电流, 提出一种改进的基于虚拟同步机控制策略。在双二阶广义积分器中引入一个可调节系数 λ , 使输出的三相不对称电压能够准确分离出正、负序电压和电流, 并提取出电压电流幅值、频率、相角信息, 使输出电压达到三相平衡。电流控制采用一种基于 dq 坐标系的分序控制, 使三相不平衡电流输出平衡。最后在 Matlab/Simulink 仿真平台和 HIL 硬件在环实验平台中通过对比传统虚拟同步控制策略和改进后虚拟同步控制策略, 验证了所提控制策略的有效性和正确性。

关键词: 虚拟同步机; 微电网; 不对称负荷; 可调节系数; dq 坐标系分序控制

中图分类号: TM341; TM727 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22911

Improved Control Strategy Based on Virtual Synchronous Generator Under Unbalanced Condition of Microgrid

HUANG Heyao¹, WANG Luyang¹, WU Jiaming², BAI Yang³, DING Quan⁴, BAI Hongshan¹

(1. College of Electrical Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shibei Power Supply Company, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200431, China; 3. Engineering Construction Consulting Company, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200120, China; 4. Yuhuan Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Taizhou 317600, Zhejiang, China)

Abstract: Virtual synchronous generator technology can provide virtual inertia for the frequency stability of microgrid, but there are a lot of asymmetric loads in the operation of microgrid. In order to compensate the unbalanced load and output three-phase symmetrical voltage and current, an improved control strategy based on virtual synchronous generator was proposed. An adjustable coefficient λ was introduced into the dual second-order generalized integrator, so that the positive and negative sequence voltages and currents can be accurately separated from the output three-phase asymmetrical voltages, and the information of voltage and current amplitude, frequency and phase angle can be extracted, the output voltage reaches three-phase equilibrium. The current control adopted a sequential control based on dq coordinate system to balance the unbalanced current output of three phases. Finally, the effectiveness and correctness of the proposed control strategy were verified by comparing the traditional virtual synchronous control strategy with the improved virtual synchronous control strategy in the Matlab/Simulink simulation platform and the HIL hardware in-loop experiment platform.

Key words: virtual synchronous generator (VSG); microgrid; asymmetric load; adjustable coefficient; dq coordinate system sequence control

微电网主要是以风能、太阳能为主电源, 以 逆变器作为 DC-AC 变换的接口, 在一些新能源充

基金项目: 上海绿色能源并网工程技术研究中心资助项目(13DZ2251900)

作者简介: 黄河遥(1996—), 女, 硕士研究生, Email: 793652818@qq.com

足但电力缺乏的地区具有良好的发展前景,但是运行缺乏安全稳定性。为满足微电网中所缺乏的惯性和阻尼,使逆变器具有同步发电机的外特性,虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)应运而生^[1-2]。

VSG在微电网中所输出的电压通常为开环运行,对机端电压控制能力不强。由于分布式电源的接入,会存在大量不对称负荷,负载不平衡将引起三相电压、电流输出不平衡^[3-4]。为了抑制负序电压分量,补偿不平衡负载,输出三相平衡电压,国内外学者进行大量研究并取得了诸多成果^[5-9]。文献[5]提出一种改进的二阶广义积分器(second-order generalized integrator, SOGI)三相电流正、负序提取算法,使三相电压电流平衡的同时消除了电网侧直流分量影响。文献[6]分析了SOGI的带通特性、参数选取原则,分离出直流分量,同时衰减其他高次谐波成分,实现了电网电压不平衡时,相位检测误差为零。文献[7]为补偿微电网孤岛运行中不平衡负载导致的三相不平衡电流,提出了一种基于双二阶广义积分器(dual second-order generalized integrator, DSOGI)的不平衡电流补偿策略,但该方法未对不平衡电压进行控制。文献[8]针对虚拟同步机带非线性负载所带来的输出电压畸变和

电网电流谐波含量高的问题,提出PI+准PR的谐波电压抑制策略,但该方法未对电流平衡进行控制。

对于VSG微电网系统中存在大量不对称负荷的情况,先对其不对称原理进行了分析,为使输出三相电压电流平衡,提出一种改进的VSG控制策略,电压控制中引入改进后的双二阶广义积分器锁相环(revised dual second-order generalized integrator-phase locked loop, RDSOGI-PLL),通过控制可调节系数 λ 取最优值,使输出三相电压的相位、频率、正负序分量能被准确提取和检测出来。电流控制是基于 dq 坐标系,使输出不对称电流达到三相平衡,实现了微电网带不平衡负载工况时,通过VSG的电压电流环控制实现了输出三相电压电流的平衡,保证了微电网运行的安全可靠。通过搭建Matlab/Simulink仿真平台验证了所提控制策略的有效性和正确性。

1 虚拟同步机带不平衡负载的工况分析

1.1 VSG的拓扑结构及其传统控制策略

图1为VSG的拓扑结构,主电路由三相逆变器及LC滤波电路构成,由PCC端来控制电路的离网和并网,VSG的控制部分由功频调节、励磁调节、同步发电机方程以及电压电流双闭环控制构成。

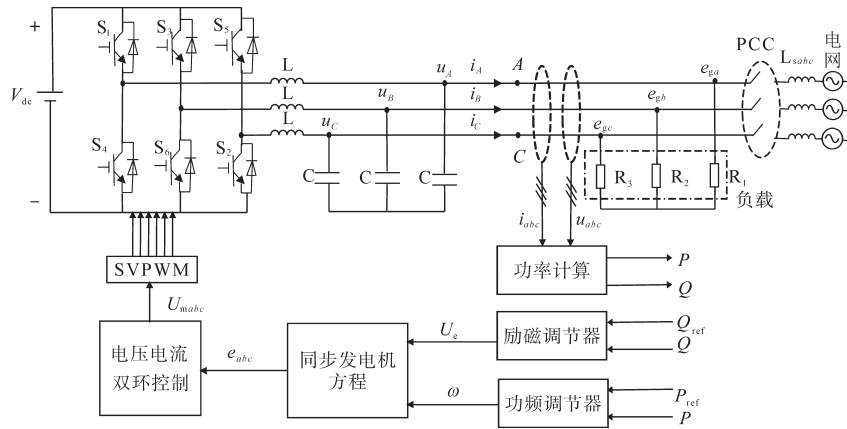


图1 虚拟同步发电机拓扑结构

Fig.1 Virtual synchronous generator topology structure

VSG能使逆变器具有同步发电机的外特性,VSG的机械方程和电磁方程如下式:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D\Delta\omega = \frac{P_m}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega_0} - D\Delta\omega \\ \frac{d\sigma}{dt} = \Delta\omega = \omega - \omega_n \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω, ω_n 分别为转子角速度的实际值、额定值;

T_m, T_e 分别为同步发电机的机械、电磁转矩; P_m, P_e 分别为VSG的机械、电磁功率; D 为虚拟同步机的阻尼系数, $N \cdot m \cdot s / rad$; J 为虚拟同步机的转动惯量; σ 为功角; θ 为电角度; $\Delta\omega$ 为VSG实际转子角速度与额定角速度的差; ω_0 为二阶广义积分器的中心角频率,一般取 100π 。

VSG的输出电压 u_{abc} 满足:

$$u_{abc} = e_{abc} - L di_{abc} / dt - Ri_{abc} \quad (2)$$

其中

$$e_{abc} = E_m \cos(\theta - 2\pi/3) \quad (3)$$

式中: L, R 分别为VSG的滤波电感和电枢电阻; i_{1abc} 为VSG输出二次侧电流; e_{abc} 为内电势; E_m 为暂态电势的幅值。

逆变器二次侧的瞬时功率平均值如下式:

$$\begin{cases} P = 1.5(u_d i_{1d} + u_q i_{1q}) \\ Q = 1.5(u_q i_{1d} - u_d i_{1q}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: P, Q 分别为逆变器二次侧的瞬时有功功率、瞬时无功功率的平均值; u_d, u_q 分别为同步发电机机端电压 u_{abc} 的 d, q 轴分量; i_{1d}, i_{1q} 分别为同步发电机机端电流 i_{1abc} 的 d, q 轴分量。

根据式(1)所示的转子运动方程,在VSG中加入功频调节,可对应下式所示的有功-频率控制:

$$P_m = P_{ref} + K_p(\omega_0 - \omega) \quad (5)$$

式中: P_{ref} 为有功功率的给定值; K_p 为调差系数。

对于图1中所示的励磁调节,可对应下式所示的无功-电压下垂控制:

$$E_m = E_0 + K_q(Q_{ref} - Q) \quad (6)$$

式中: E_0 为额定电压幅值; K_q 为无功电压下垂系数; Q_{ref} 为无功功率参考值。

将经电压电流双环控制得到的电压 U_{mabc} 由空间矢量脉宽调制(SVPWM)输入到VSG本体模型中,实现VSG的整体控制。

1.2 不对称三相电压矢量分析

当微电网孤岛运行时,会存在大量不平衡负荷,将会导致三相输出电压出现不对称的现象,输出电压主要由正序分量、负序分量和零序分量构成, u_{abc} 的矢量表达式如下式^[9-10]:

$$\mathbf{u}_{abc} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \mathbf{u}_{abc}^+ + \mathbf{u}_{abc}^- + \mathbf{u}_{abc}^0 \quad (7)$$

式中: $\mathbf{u}_{abc}^+, \mathbf{u}_{abc}^-, \mathbf{u}_{abc}^0$ 分别为三相电压的正序分量、负序分量和零序分量。

由于系统采用的是三相三线制,因此忽略零序分量的存在, $\mathbf{u}_{abc}$ 可表示为

$$\mathbf{u}_{abc} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \mathbf{u}_{abc}^+ + \mathbf{u}_{abc}^- \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{u}_{abc}^+ = \begin{bmatrix} u_a^+ \\ u_b^+ \\ u_c^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{u}_{abc}^- = \begin{bmatrix} u_a^- \\ u_b^- \\ u_c^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$a = e^{j2\pi/3} \quad (11)$$

式中: a 为超前 120° 的移相算子。

2 带不平衡负载时的控制策略分析

2.1 改进后的电压环控制策略

2.1.1 二阶广义积分器工作原理

为得到 $\alpha\beta$ 坐标系下的正、负序分量,将式(9)、式(10)进行变换,得到下式:

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta}^+ = \begin{bmatrix} u_\alpha^+ \\ u_\beta^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} \mathbf{u}_{\alpha\beta} \quad (12)$$

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta}^- = \begin{bmatrix} u_\alpha^- \\ u_\beta^- \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} \mathbf{u}_{\alpha\beta} \quad (13)$$

其中

$$q = e^{-j\pi/2}$$

式中: $\mathbf{u}_{\alpha\beta}$ 为两相静止坐标系下的输出电压; q 为滞后 90° 的移相算子。

采用SOGI可以实现 90° 的移相运算并自动滤除高次谐波。图2为SOGI的基本原理图。

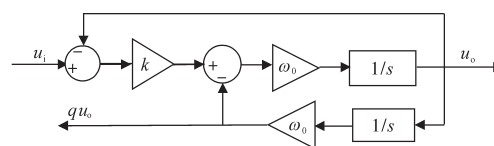


图2 SOGI原理框图

Fig.2 SOGI schematic diagram

图2中,输出信号 u_o 和输入信号 u_i 相位相同,而输出信号 qu_o 相位滞后 90° ,所以 u_o 和 qu_o 为两个相互正交的信号。从图2中可得到SOGI的传递函数为

$$\begin{cases} D(s) = \frac{u_o(s)}{u_i(s)} = \frac{k\omega_0 s}{s^2 + k\omega_0 s + \omega_0^2} \\ Q(s) = \frac{qu_o(s)}{u_i(s)} = \frac{k\omega_0^2}{s^2 + k\omega_0 s + \omega_0^2} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $qu_o(s)$ 为移相信号; k 为阻尼系数,一般取值为1.414。

2.1.2 改进的双二阶广义积分器

在三相电压对称的状态下,为提取出输出电压的幅值、相位以及频率信息,可以采用同步旋转坐标系锁相环(synchronous reference frame-phase locked loop, SRF-PLL),其原理如图3所示。将输出电压 $\mathbf{u}_{abc}$ 经Park变换后得到两相旋转坐标系下的 d, q 轴分量 u_d, u_q ,再通过PI控制环节和输入的前馈项 ω_a 经计算得到输出频率并反馈到系统中,完成锁相。

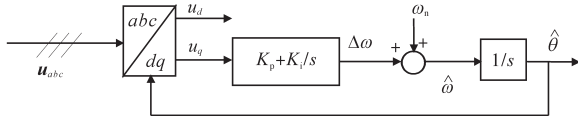


图3 SRF-PLL原理框图

Fig.3 SRF-PLL schematic diagram

而在三相电压不对称的情况下,传统的SRF-PLL无法满足提取出电压正、负序分量的要求,难以实现精确锁相和快速检测的要求。在负序电压环引入一种改进后控制策略RDSOGI-PLL,通过引入一个可调节系数 λ ,能够准确提取出虚拟同步机带不平衡负载时的正负序电压分量、基波相位、频率等信息,最终实现输出电压平衡的控制目标。

图4为RDSOGI-PLL结构图,RDSOGI-PLL由双二阶广义积分器的正负序分量计算模块(revised dual second-order generalized integrator positive negative sequence calculator,RDSOGI-PNSC)和SRF-PLL构成,用RDSOGI-PNSC消除直流分量以及分离出正、负序分量,得到两相静止坐标系下的电压 u_a^+ 和 u_a^- ,再通过SRF-PLL将 u_a^+ 、 u_a^- 经Park变换得到 d,q 轴分量 u_d^+ 和 u_q^+ ,使 $u_q^+=0$,从而完成锁相,提取出输出三相电压相位和频率的信息。将检测到的频率 $\hat{\omega}$ 反馈到RDSOGI-PNSC中作为中心角频率,实现锁相环对频率的自适应。 ω_n 作为前馈项,加快锁相环与电网的同步速度。

将SOGI和PNSC组成部分记为SOGI-PNSC,

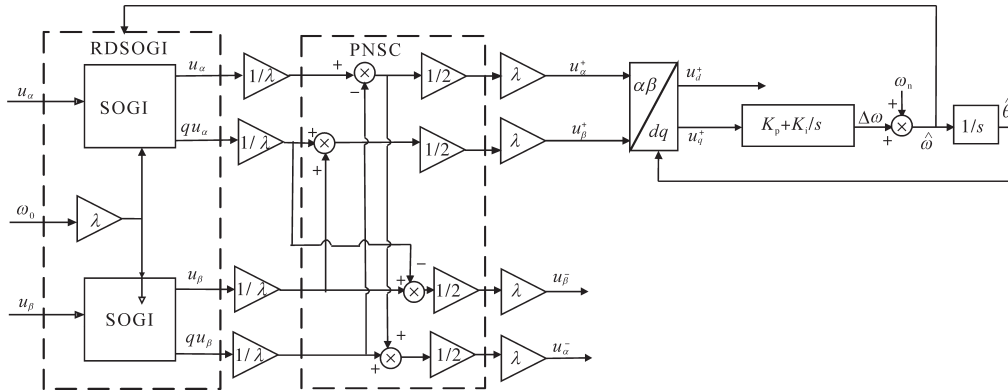
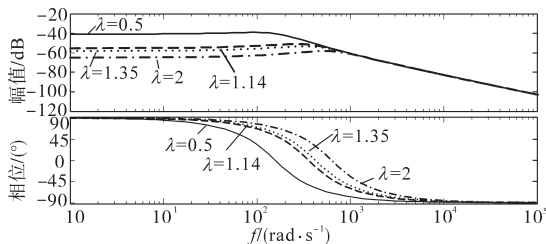


图4 RDSOGI-PLL结构框图

Fig.4 RDSOGI-PLL structure diagram

图5 不同 λ 值时的幅频特性曲线图Fig.5 Amplitude frequency characteristic curves of different λ values

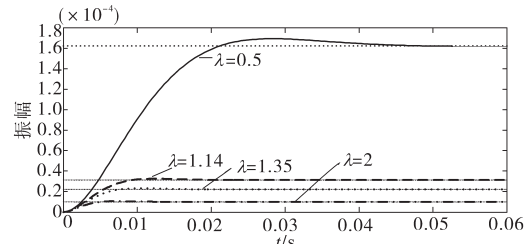
由图4可知SOGI-PNSC的传递函数为

$$\begin{cases} H^+(s) = \frac{u_{\alpha\beta}^+(s)}{qu_{\alpha\beta}(s)} = \frac{k\omega_0(s + j\omega_0)}{2(s^2 + k\omega_0s + \omega_0^2)} \\ H^-(s) = \frac{u_{\alpha\beta}^-(s)}{qu_{\alpha\beta}(s)} = \frac{k\omega_0(s - j\omega_0)}{2(s^2 + k\omega_0s + \omega_0^2)} \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可知,当分子 $s - j\omega_0 = 0$ 时,系统有零点且振荡频率始终为 ω_0 ,在式(15)的基础上引入一个可调节的系数 λ ,得到下式:

$$\begin{cases} H^{+1}(s) = \frac{k(s + j\omega_0)}{2[s^2 + k\lambda\omega_0s + (\lambda\omega_0)^2]} \\ H^{-1}(s) = \frac{k(s - j\omega_0)}{2[s^2 + k\lambda\omega_0s + (\lambda\omega_0)^2]} \end{cases} \quad (16)$$

图5和图6分别为当 k 值相同时,不同 λ 值时的幅频特性曲线图和阶跃响应曲线图。由图5可知,式(16)中的传递函数受 λ 值的影响,当 λ 值越小时,系统的带宽越小,系统的滤波性能越好,且对直流分量的衰减能力更强;由图6可知,当 λ 值越大时,系统的响应速度越快,超调量越大,系统的稳定性越好。由于 k 的取值为1.414,根据二阶传递函数的系统最大超调量计算公式 $\sigma\% = \exp[-\frac{\pi k \lambda}{2} / \sqrt{1 - (\frac{\lambda k}{2})^2}]$ 可知, λ 的取值范围为 $0 \leq \lambda \leq 1.414$,结合实验时的 K_p, K_i 参数的选取,当 $\lambda = 1.35$ 时,系统的滤波、稳定性等性能达到最优状态,因此选取 $\lambda = 1.35$ 。

图6 不同 λ 值时的阶跃响应曲线Fig.6 Step response curves of different λ values

2.2 带虚拟阻抗的不平衡电流控制策略

为实现较快的动态响应并减少输出电流波形的畸变,在电流分序控制中加入虚拟阻抗可以增加虚拟同步机的等效输出阻抗。带虚拟阻抗的电流控制环如图7所示。图中,参考电压环采用PI调节器,实现电压的无差追踪,电流内环采用P控制来调节。 i_{1dp}^+, i_{1qp}^+ 为输出三相电流dq坐标系下的正序分量; E_{dp}^+, E_{qp}^+ 为参考电压dq坐标系下的正序分量; u_{dp}^+, u_{qp}^+ 为输出三相电压dq坐标系下的正序分量; i_{1dn}^-, i_{1qn}^- 为输出三相电流dq坐标系下的负序分量; L, C 分别为逆变器一次侧的滤波电感和滤波电容; ω 为系统输出角频率; u_{vcdp}^+, u_{vcqp}^+ 分别为虚拟阻抗的d,q轴分量,其计算公式如下式所示:

$$\begin{bmatrix} u_{vcdp}^+ \\ u_{vcqp}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_v & -\omega L_v \\ R_v & \omega L_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1dp}^+ \\ i_{1qp}^+ \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: R_v, L_v 分别为虚拟电阻和虚拟电感。

为使负载侧输出电流三相对称,输出电流中只含有正序电流分量,采用一种基于dq坐标系的电流控制策略,达到输出电流中仅含正序电流的控制目标。通过RDSOGI-PLL控制策略,已经获得了准确的电压幅值 E_m 、相角 θ 以及电压参考值 E ,将图7中的负序电流设置为0即可实现三相输出电流平衡的目标^[11-12]。

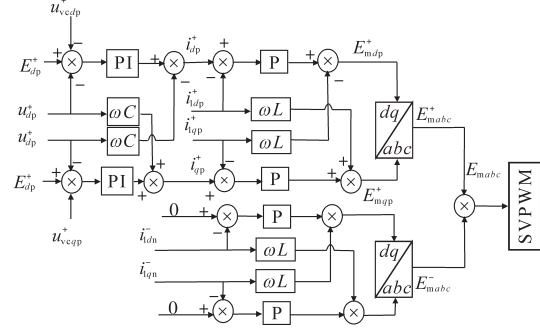


图7 带虚拟阻抗的电流分序控制环结构图

Fig.7 Diagram of current sequence control ring with virtual impedance

2.3 改进后的带不平衡负载的VSG控制策略

改进后的带不平衡负载的VSG控制框图如图8所示,输出电压 u_{abc} 、 i_{1abc} 经Clark变换后得到 $u_{\alpha\beta}$ 和 $i_{1\alpha\beta}$,输出电压、电流(u_{abc}, i_{1abc})即为负载侧的网侧电压、电流(e_{gabc}, i_{gabc})。通过RDSOGI-PLL负序电压控制策略分离得到正、负序电压 u_{dq}^+, u_{dq}^- 和正、负序电流 i_{1dq}^+, i_{1dq}^- 。将 $u_{dq}^+, u_{dq}^-, i_{1dq}^+, i_{1dq}^-$ 代入式(4)进行功率计算后得到瞬时平均功率 P, Q ,通过有功-频率控制和无功-电压控制得到电角度 θ 、电压 E_m ,将其代入参考电压计算式(3)得到参考电压 e_{abc} ,然后将 $e_{abc}, u_{dq}^+, i_{1dq}^+, i_{1dq}^-$ 及虚拟阻抗电压 u_{vcdq}^+ 经带虚拟阻抗的电流分序控制环得到 E_{mabc} ,由SVPWM得到6个触发脉冲注入VSG本体模型。

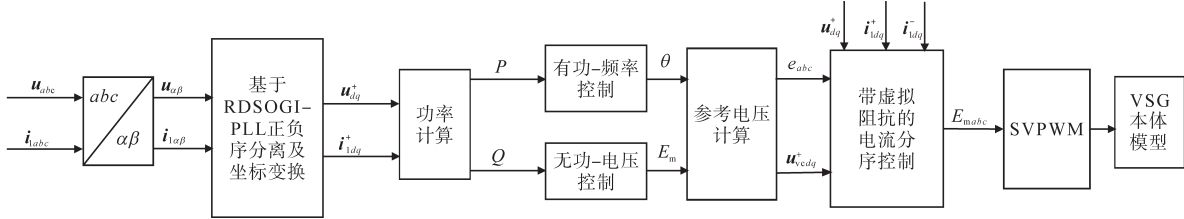


图8 带不平衡负载的VSG控制框图

Fig.8 VSG control block diagram with unbalanced load

3 仿真验证及分析

在Matlab/Simulink的软件环境下对改进后的虚拟同步机带不平衡负载控制策略做仿真试验,带对称负载 $R=10\ \Omega$,不平衡工况为图1所示A点和C点间负载前端跨接电阻 $R_L=10\ \Omega$ 。其控制框图见图8,主要参数为:直流电压 $V_{dc}=700\text{ V}$,滤波电感 $L=7.3\text{ mH}$, $C=2.5\ \mu\text{F}$,线路电阻 $R=10\ \Omega$,转动惯量 $J=3.14\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,阻尼 $D=200$,电压无功下垂系数 $K_q=0.002$,调差系数 $K_p=2\times 10^{-5}$,虚拟阻抗 $L_v=4\text{ mH}$,虚拟电阻 $R_v=0.4\ \Omega$ 。

仿真总时长设置为0.5 s,在0~0.2 s的时间内,系统三相平衡正常工作;0.2 s时,投入不平衡

负载;0.2~0.5 s为系统三相不平衡状态。图9a、图9b分别为传统虚拟同步控制的仿真结果与改进后虚拟同步控制策略的仿真结果。

从图9a中可看出,当系统所带三相负载平衡时,输出的电网电压幅值约为310 V,输出电流幅值为21.5 A;当所带三相负载不平衡时,电压、电流都出现明显畸变,输出三相电压出现不平衡,幅值为414 V,输出电流幅值随输出电压发生变化,幅值显著增加,达到72.2 A,为正常电流的336%,对系统及变流设备有很大的损害。

从图9b中可以看出,当 $t=0.2\text{ s}$ 时投入不平衡负荷,输出负载端三相电压 e_{gabc} 和三相电流 i_{gabc} 的幅值经过短暂的变化之后,又恢复平衡,三相电

压的幅值固定在311 V左右,三相电流的幅值固定在22 A左右,能够达到正常的电压、电流值,对系统起到一定的保护作用。

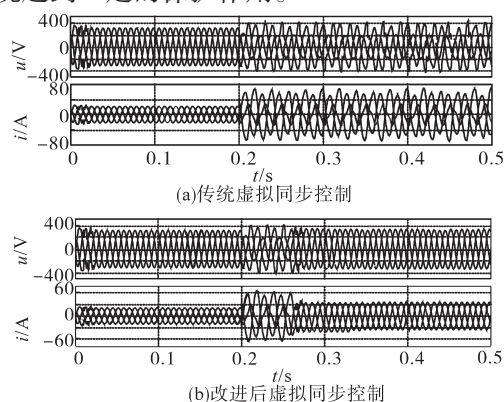


图9 传统VSG控制与改进后VSG控制对比

Fig.9 Comparison of traditional and improved VSG control

图10、图11分别为输出A相电压、电流的傅里叶分析。因三相电压电流对称,所以仅对其中一相进行分析即可。从图10、图11可以看出,改进

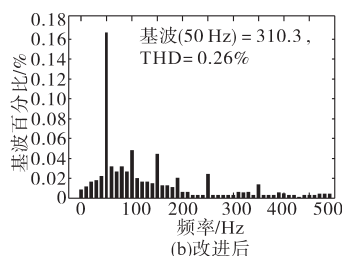
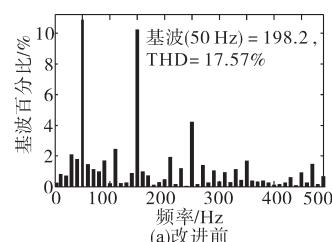


图10 输出A相电压波形谐波分析

Fig.10 Output A phase voltage waveform harmonic analysis

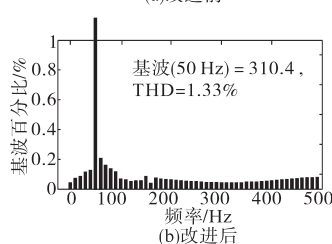
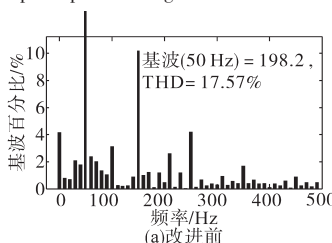


图11 输出A相电流波形谐波分析

Fig.11 Output A phase current waveform harmonic analysis

后的虚拟同步控制策略对输出电压、电流的直流分量有一定的衰减作用,且在改进后对奇数次谐波有明显的抑制作用,输出电压的THD由17.57%降为0.26%,输出电流的THD由17.57%降为1.33%。

图12~图14分别是运用RDSOGI-PLL控制策略分离出的输出电压电流的正负序分量、输出电压频率、基波相位的仿真结果。从图12可以看出,改进后的虚拟同步控制策略可以准确提取出电压正负序幅值为311 V左右、电流正负序幅值为22 A;从图13可以看出,伴随着电压和电流的变化,频率也会发生变化。改进前频率的波形在加入不平衡负载后,始终难以保持稳定;而改进后系统输出频率在经过一段时间的扰动后,最终在 $t=0.4$ s时稳定在50 Hz左右;从图14可以看出,相角的峰值固定在6 rad左右。由此可见,改进后的虚拟同步控制可以准确提取正、负序电压的幅值、频率以及相位信息。

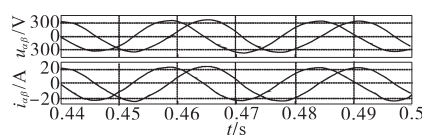


图12 正负序电压、电流分量

Fig.12 Component of positive and negative sequence voltage and current

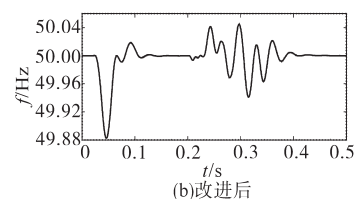
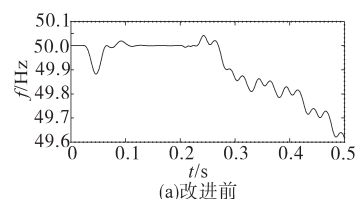


图13 输出电压频率波形

Fig.13 Output voltage frequency waveform

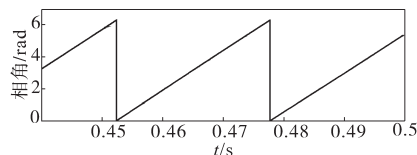


图14 基波相位

Fig.14 Fundamental wave phase

4 硬件在环实验

为进一步验证仿真实验的可行性和充分性,在硬件在环(hardware in the loop, HIL)仿真测试

系统对改进后的VSG控制策略进行实验验证,搭建实验平台的原理框图如图15所示。



图15 HIL实验原理框图

Fig.15 HIL experimental principle block diagram

通过StarSim HIL软件从Simulink中导入主电路和控制电路的模型,再通过Modeling Tech将输出三相电压、电流的波形显示在示波器上,仿真工况和参数设置与Matlab/Simulink平台设置一致,得出实验结果如图16~图19所示。

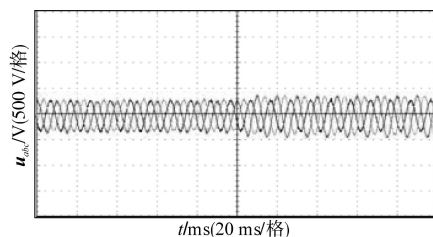


图16 传统VSG控制输出电压波形

Fig.16 Traditional VSG control output voltage waveforms

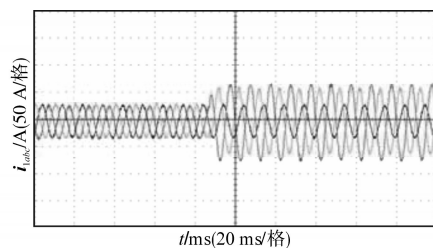


图17 传统VSG控制输出电流波形

Fig.17 Traditional VSG control output current waveforms

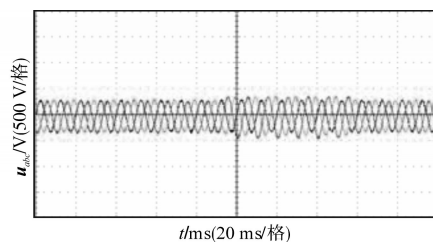


图18 改进后VSG控制输出电压波形

Fig.18 Improved VSG control output voltage waveforms

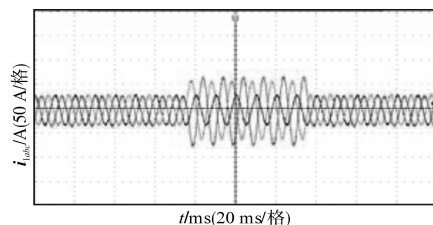


图19 改进后VSG控制输出电流波形

Fig.19 Improved VSG control output current waveforms

对比传统VSG控制策略和改进后VSG控制策略的图形可知,改进后的VSG电压、电流环控制策略实现了当VSG带不对称负荷时,输出三相

电压、电流的平衡, u_{abc}, i_{abc} 在加入不平衡负载后60 ms左右的时间输出三相平衡电压、电流,实验结果与Matlab/Simulink仿真平台保持一致,进一步验证了文章所提控制策略的充分性。

5 结论

当微电网运行时存在大量的不平衡负荷,传统VSG控制策略并不能对机端电压进行直接控制,会影响微网运行的安全稳定性,且对微电网供电电压的质量有很大影响。文章提出一种改进后的虚拟同步控制策略,电压环控制是通过在DSOGI中引入一个可调节参数 λ ,准确提取出了电压的正负序分量、频率以及相位信息;电流控制采用一种基于 dq 坐标系的分序控制,使输出不对称电流达到三相平衡,即当微电网存在不平衡工况时,输出了三相平衡电压、电流以及稳定的输出频率,且具有一定的谐波抑制效果,验证了改进后虚拟同步控制策略的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 曾正,邵伟华,李辉,等. 孤岛微网中虚拟同步发电机不平衡电压控制[J]. 中国电机工程报,2017,37(2):372-381.
Zeng Zheng, Shao Weihua, Li Hui, et al. Unbalanced voltage control of virtual synchronous generator in islanded micro-grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 372-381.
- [2] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程报,2014,34(1):57-70.
Yang Xinfu, Su Jian, Li Zhipeng, et al. Overview on microgrid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [3] 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(21):165-175.
Zheng Tianwen, Chen Laijun, Chen Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(21): 165-175.
- [4] 张倩. 不平衡工况下虚拟同步发电机控制策略研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.
Zhang Qian. Research on control strategy of virtual synchronous generator under unbalanced condition[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [5] 韦婷,黄彦全,李辉,等. 基于改进SOGI的三相正序电流的提取[J]. 电气自动化,2020,42(1):33-36.
Wei Ting, Huang Yanquan, Li Hui, et al. Extraction of three-phase positive sequence current based on modified SOGI[J]. Electrical Automation, 2020, 42(1): 33-36.
- [6] 谢门喜,朱灿焰,杨勇. SRF-PLL环内应用二阶广义积分器的不平衡电压锁相方法[J]. 电气工程学报,2017,12(9):16-21.
Xie Menxi, Zhu Canyan, Yang Yong. An unbalanced voltage

(下转第58页)

- method of power transformer operation and maintenance texts based on deep semantic learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4162-4172.
- [7] 冯斌, 张又文, 唐昕, 等. 基于 BiLSTM-Attention 神经网络的电力设备缺陷文本挖掘[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(S1): 1-10.
- Feng Bin, Zhang Youwen, Tang Xin, *et al.* Power equipment defect record text mining based on BiLSTM-Attention neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 1-10.
- [8] Mikolov T, Sutskever I, Chen K, *et al.* Distributed representations of words and phrases and their compositionality[C]//Proceedings of the 26th International Conference on Neural Information Processing Systems, 2013, 2: 3111-3119.
- [9] Manning C D, Surdeanu M, Bauer J, *et al.* The Stanford CoreNLP natural language processing toolkit[C]// Meeting of the Association for Computational Linguistics: System Demonstrations, 2014.
- [10] 徐菲菲, 冯东升. 文本词向量与预训练语言模型研究[J]. 上海电力大学学报, 2020, 36(4): 320-328.
- Xu Feifei, Feng Dongsheng. A survey of research on word vectors and pretrained language models[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2020, 36(4): 320-328.
- [11] Peters M E, Neumann M, Iyyer M, *et al.* Deep contextualized word representations[C]//Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics. Stroudsburg, PA: Association for Computational Linguistics, 2018: 2227-2237.
- [12] Devlin J, Chang Mingwei, Lee K, *et al.* BERT: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding[C]//Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics. Stroudsburg, PA: Association for Computational Linguistics, 2019: 4171-4186.
- [13] 蒋晨, 王渊, 胡俊华, 等. 基于深度学习的电力实体信息识别方法[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2141-2149.
- Jiang Chen, Wang Yuan, Hu Junhua, *et al.* Power entity information recognition method based on deep learning[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2141-2149.
- [14] 陈蕾, 郑伟彦, 余慧华, 等. 基于 BERT 的电网调度语音识别语言模型研究[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 2955-2961.
- Chen Lei, Zheng Weiyan, Yu Huihua, *et al.* Research on language model for speech recognition of power grid dispatching based on BERT[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 2955-2961.
- [15] Sun Y, Wang S, Li Y, *et al.* ERNIE 2.0: A continual pre-training framework for language understanding[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2020, 34(5): 8968-8975.
- [16] 罗泉. 基于深度学习的自然语言处理研究综述[J]. 智能计算与应用, 2020, 10(4): 133-137.
- Luo Xiao. A survey of natural language processing based on deep learning[J]. Intelligent Computer and Application, 2020, 10(4): 133-137.
- 收稿日期: 2021-01-13
修改稿日期: 2021-03-09

收稿日期:2021-01-13

修改稿日期:2021-03-09

(上接第51页)

- phase-locking method using a second order generalized integrator in SRF-PLL ring[J]. Journal of Electric Engineering, 2017, 12(9):16-21.
- [7] 黄倩,袁旭峰,陈明洋,等.基于DSOGI的不平衡负载补偿策略研究[J].电测与仪表,2021(3):126-130.
- Huang Qian, Yuan Xufeng, Chen Mingyang, *et al.* Research on unbalanced load compensation strategy based on DSOGI[J]. Electrical Measurement Instrumentation, 2021(3):126-130.
- [8] 张辉,张瑞雪.非线性负载下虚拟同步发电机的控制策略[J].电气传动,2019,49(10):48-50.
- Zhang Hui, Zhang Ruixue. Control strategy for the nonlinear load of virtual synchronous generator[J]. Electric Drive, 2019, 49(10):48-50.
- [9] Golestan S, Guerrero J M, Charehpetian G B. Five approaches to deal with problem of DC offset in phase-locked transactions loop algorithms: design considerations and performance evaluations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 648-661.
- [10] Freijedo F D, Yepes A G, Lopez O, *et al.* Three-phase pll with fast postfault retracking and steady state rejection of voltage unbalance and harmonics by means of lead compensation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(1):85-97.
- [11] D'Arco S, Suul J A, Fosfo O B. Control system tuning and stability analysis of virtual synchronous machines[C]//2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013.
- [12] D'Arco S, Suul J A. Equivalence of virtual synchronous machines and frequency-droops for converter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1):394-395.
-
- 收稿日期:2021-01-04
修改稿日期:2021-01-25

收稿日期:2021-01-04

修改稿日期:2021-01-25