

具备带不平衡负载功能的虚拟同步机控制策略

魏亚龙¹,唐启迪¹,王林^{1,2},王瑞¹,黄辉¹,肖飞¹

(1. 西安许继电力电子技术有限公司, 陕西 西安 710075;
2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要:当虚拟同步机(VSG)孤岛运行时,不平衡负载的接入会导致其输出电压不平衡。首先分析了不平衡负载条件下VSG输出电压不平衡的机理,提出了基于PR和PI复合控制的VSG电压环路控制方法;其次,考虑到VSG输出电流的 d,q 轴分量在负载不平衡时含有二倍频波动分量,导致VSG定子电气方程输出电压的 d,q 轴指令呈现二倍频波动,提出采用电压环PI调节器输出电流指令作为定子电气方程的电流输入;再次,针对不平衡负载条件下有功功率和无功功率含有二倍频分量问题,提出一种采用电压环PI调节器输出电流指令的功率直流分量提取方法;最后,仿真和实验结果证明了所提方案的有效性。

关键词:虚拟同步机;不平衡负载;PI和PR复合控制;改进定子电气方程

中图分类号:TM761 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22092

Virtual Synchronous Generator Control Strategy with Unbalanced Load

WEI Yalong¹, TANG Qidi¹, WANG Lin^{1,2}, WANG Rui¹, HUANG Hui¹, XIAO Fei¹

(1. Xi'an XJ Power Electronics Technology Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China;
2. Xuji Group Co., Ltd., Xuchang 461000, Henan, China)

Abstract: When the virtual synchronous generator (VSG) is running in island mode, unbalanced load will lead to unbalanced output voltage of VSG. To solve this problem, the principle of VSG output voltage with unbalanced load was analyzed firstly, and the VSG voltage loop controller based on proportion resonant (PR) and proportional integral (PI) was proposed. Secondly, since that the VSG output current of d,q axis component contains second harmonic when the load is unbalanced, and the output d,q axis voltage command of VSG stator electrical equation contains the second harmonic component, the voltage loop PI regulator output current command was proposed to be used as the current input of the stator electrical equation. Thirdly, since the problem that the active power and reactive power contain double frequency component under the unbalanced load, a power calculation method using the output current command of voltage loop PI regulator was proposed. Finally, simulation and experimental results show the effectiveness of the proposed scheme.

Key words: virtual synchronous generator (VSG); unbalanced load; PI and PR composite control; improved stator electrical equation

随着电网中新能源渗透率的提高,电力系统电力电子化趋势不可阻挡。相比于传统同步发电机,电力电子设备通常缺乏惯量和阻尼,因此其大量接入电网会进一步降低电网的旋转备用,从而威胁电网的安全稳定运行^[1-3]。VSG控制因其调频调压特性、转动惯量以及电压源特性受到广泛关注^[3-8]。VSG具备双模式运行功能,既可离网运行,也可并网运行,且可实现两者之间的无

缝切换。但是,VSG离网运行时通常需要带不平衡负载,而不平衡负载的接入会导致其输出电压出现严重的不平衡,使得敏感负载无法正常工作。因此,研究VSG在不平衡负载条件下的控制方法具有重要意义。

对于VSG在带不平衡负载工况下的离网运行控制方法,文献[9]采用输出电流的正负序分量实现虚拟阻抗压降,提出只需将负序阻抗控制为0,

基金项目:国家自然科学基金(51777159)

作者简介:魏亚龙(1991—),男,硕士,中级工程师,Email:wei_yal@163.com

即可实现VSG输出线电压平衡;文献[10]采用电压分序控制实现机端负序电压抑制,并利用虚拟阻抗技术,补偿输电线路阻抗产生的负序压降。但文献[9-10]都采用了正负序分离,此方法较为繁琐。文献[11]采用PI和PR复合控制实现微网逆变器输出电压负序分量的抑制,但仅考虑了电压外环,并未考虑到负载不平衡对输出有功功率和无功功率的影响;文献[12-13]中,电压外环同样采用PI和PR复合控制实现单台VSG在不平衡负载工况下输出电压平衡,但虚拟阻抗实现环节和有无功功率直流分量提取环节均采用了滤波器,但并网/多机并联时,控制环路中的滤波器会导致VSG稳定性变差;文献[14]提出了一种适用于三相四线制逆变器并联的改进分序虚拟阻抗下垂控制方法,其基于二次广义积分构造虚拟阻抗,实现正负零序阻抗的匹配,实现功率分配,但同样采用了分序算法和滤波器,使得系统较为复杂,不易工程化。综上所述,目前对于VSG带不平衡负载工况,上述文献不同程度采用了分序控制和滤波器,导致系统实现较为复杂,且控制环路中的滤波器对系统的稳定性造成了不良影响。

本文针对VSG带不平衡负载展开研究。首先,详细分析了不平衡负载工况下VSG输出电压不平衡的机理,采用PI和PR复合控制技术实现了机端电压的平衡控制;其次,针对不平衡负载条件下传统定子电气方程输出电压指令波动的问题,提出了一种改进的定子电气方程,可避免环路中引入低通滤波器和正负序分离算法,有效降低了系统的复杂程度,易于工程化实现。然后,针对VSG带不平衡负载时输出功率含有二倍频波动分量的问题,提出了一种采用电压外环PI输出电流指令的有功、无功功率直流分量提取方法。最后,搭建Matlab/Simulink仿真模型和50 kW T型三电平储能变流器硬件实验平台,验证了所提方案的正确性和有效性。

1 VSG 输出电压不平衡机理分析

VSG拓扑结构如图1所示,采用T型三电平拓扑。其中, u_{dc} 为直流母线电压; u_{oa}, u_{ob}, u_{oc} 为逆变器桥口输出三相电压; L 为滤波电感; C 为滤波电容; Z_s 为电网阻抗; u_a, u_b, u_c 为VSG输出三相电压; z_a, z_b, z_c 为三相负载; u_{ga}, u_{gb}, u_{gc} 为三相电网电压。

负载大小或者类型不一致是导致三相逆变器输出电压不平衡的主要原因^[15]。当图1所示的

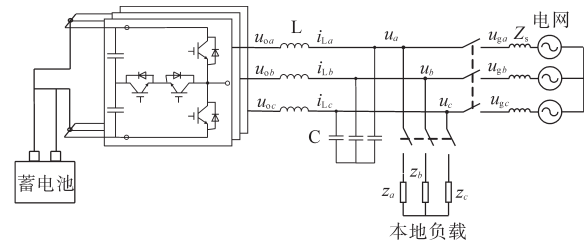


图1 VSG主电路拓扑

Fig.1 Main circuit topology of VSG

VSG负载不平衡时,导致其输出三相电压 u_a, u_b, u_c 也不平衡。

根据对称分量法,任意三相不平衡可分解为平衡对称的三组分量,即正序、负序、零序分量。在不考虑谐波的情况下,逆变器输出三相不平衡电压可表示为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = U_{mp} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_p) \\ \cos(\omega t + \theta_p - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \theta_p + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} + U_{mN} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_N) \\ \cos(\omega t + \theta_N + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \theta_N - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} + U_{m0} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_0) \\ \cos(\omega t + \theta_0) \\ \cos(\omega t + \theta_0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: U_{mp}, U_{mN}, U_{m0} 分别为VSG输出正序、负序、零序电压峰值; $\theta_p, \theta_N, \theta_0$ 分别为正序、负序、零序电压初始相位。

通常VSG的控制采用 $d-q$ 坐标系下电压电流双闭环控制方法,因此对式(1)进行 dq 变换,则VSG输出电压的 d, q 轴电压分量可表示为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = T_{abcdq} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = U_{mp} \begin{bmatrix} \cos\theta_p \\ -\sin\theta_p \\ 0 \end{bmatrix} + U_{mN} \begin{bmatrix} \cos(2\omega t + \theta_N) \\ -\sin(2\omega t + \theta_N) \\ 0 \end{bmatrix} + U_{m0} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cos(\omega t + \theta_0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中

$$T_{abcdq} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于VSG采用三相三线制T型三电平拓扑,故不考虑零序分量,即 $U_{m0}=0$ 。因此,VSG输出电

压的 d, q 轴分量为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = U_{mp} \begin{bmatrix} \cos\theta_p \\ -\sin\theta_p \end{bmatrix} + U_{mN} \begin{bmatrix} \cos(2\omega t + \theta_N) \\ -\sin(2\omega t + \theta_N) \end{bmatrix} \quad (4)$$

由此可见, VSG 输出电压含有负序分量时, 其 d, q 轴电压分量含有二倍频波动分量, 若能通过特定的控制方法消除二倍频波动, 则可实现 VSG 输出电压平衡。

2 传统 VSG 控制策略

虚拟同步发电机模型中包括定子电气方程、励磁控制器、转子运动方程和原动机调节, 其数学模型如下式所示:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D\Delta\omega = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ u_d = E_d - Ri_d + \omega Li_q \\ u_q = E_q - Ri_q - \omega Li_d \end{cases} \quad (5)$$

式中: ω 为虚拟同步发电机的角速度; ω_0 为虚拟同步发电机的额定角速度; J 为虚拟同步发电机的转动惯量; T_m, T_e 分别为虚拟同步发电机的机械转矩和电磁转矩; P_m, P_e 分别为虚拟同步发电机的机械功率和电磁功率; D 为阻尼系数; R, L 分别为虚拟同步发电机的定子电阻和定子电感; $E_d, E_q, u_d, u_q, i_d, i_q$ 分别为虚拟同步发电机三相内电势、机端电压、定子电流 d, q 轴分量; δ 为虚拟同步发电机的功角, 即内电势与机端电压相位差。

虚拟同步发电机模型的机械转矩 T_m 由原动机调节计算得到, 内电势 E_d 由励磁控制器计算得到, 其中原动机的机械转矩为

$$T_m = \frac{P_{ref} - k_f(\omega - \omega_0)}{\omega} \quad (6)$$

式中: k_f 为调频系数; P_{ref} 为有功功率指令。

励磁控制器的表达式为

$$E_d = E_0 + (k_{PQ} + \frac{k_{IQ}}{s})(Q_{ref} - Q) - k_u(u_{ref} - u_m) \quad (7)$$

式中: E_0 为空载内电势; k_{PQ}, k_{IQ} 为无功功率闭环 PI 参数; Q_{ref} 为无功功率参考; Q 为虚拟同步发电机无功功率; k_u 为调压系数; u_{ref} 为机端参考电压; u_m 为机端电压幅值。

3 不平衡电压控制策略

3.1 PI 和 PR 复合控制

本文采用了基于 $d-q$ 坐标系的电容电压外环和电感电流内环的双闭环控制方法。以 d 轴为

例, 若不考虑控制延时及采样延时, 电压电流双闭环控制框图如图 2 所示。图中 L, C 分别为主电路滤波电感、滤波电容; $u_{d,ref}$ 为 d 轴电压给定; u_d 为逆变器输出 d 轴电压; i_d 为逆变器输出 d 轴电流; $i_{Ld,ref}$ 为逆变器滤波电感电流参考值, i_{Ld} 为逆变器滤波电感电流反馈值; $G_1(s)$ 为电流环控制器, $G_V(s)$ 为电压环控制器; K_{PWM} 为逆变器增益。

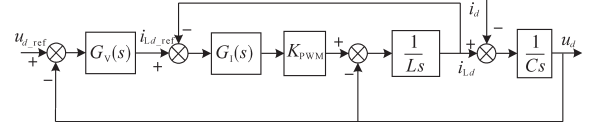


图 2 d 轴电压电流双闭环控制框图

Fig.2 Block diagram of d -axis voltage and current double closed-loop control

图 2 中, 电流控制器传递函数为

$$G_1(s) = K_{PI} + \frac{K_{II}}{s} \quad (8)$$

式中: K_{PI} 为电流环比例系数; K_{II} 为电流环积分系数。

电压控制器传递函数为

$$G_V(s) = K_{PV} + \frac{K_{IV}}{s} \quad (9)$$

式中: K_{PV} 为电压环比例系数; K_{IV} 为电压环积分系数。

由图 2 及式(8)、式(9)可得, 以 $i_{Ld,ref}$ 为输入, i_{Ld} 为输出的电流传递函数为

$$i_{Ld} = \frac{K_{PWM}CsG_1(s)}{LCs^2 + K_{PWM}CsG_1(s) + 1} i_{Ld,ref} - \frac{1}{LCs^2 + K_{PWM}CsG_1(s) + 1} i_d \quad (10)$$

由式(8)~式(10)可得到以 $u_{d,ref}$ 为输入, u_d 为输出的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{K_{PWM}G_1(s)G_V(s)}{LCs^2 + K_{PWM}G_1(s)Cs + 1} \quad (11)$$

由式(11)可得到加入二次 PR 控制后, 以 $u_{d,ref}$ 为输入, u_d 为输出的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{K_{PWM}G_1(s)[G_V(s) + G_{PR}(s)]}{LCs^2 + K_{PWM}G_1(s)Cs + 1} \quad (12)$$

其中

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_R\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2} \quad (13)$$

式中: $G_{PR}(s)$ 为准 PR 控制器传递函数。

针对具备带不平衡负载功能的 50 kW T 型三电平 VSG 系统, 取 $K_{PWM} = \sqrt{3}/2$, 滤波电感参数 $L = 1 \text{ mH}$, $C = 60 \text{ } \mu\text{F}$, 电压外环 PI 参数 $K_{PV} = 1, K_{IV} = 100$,

电流内环PI参数, $K_{pi}=8, K_{ii}=300$, 电压外环PR参数, $K_p=1, K_R=50, \omega_c=8, \omega_0=200\pi$ 。据此画出PI控制器和PI和PR复合控制器对应的开环传递函数 $G(s)$ 伯德图, 如图3所示。

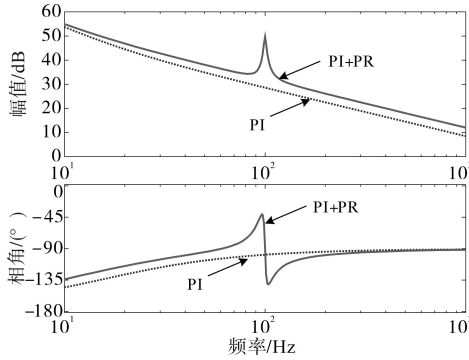


图3 d轴电压电流双闭环频率特性

Fig.3 Frequency characteristics of d -axis voltage and current double closed-loop

由图3可知,电压环采用PI调节器时,VSG输出电压的 d, q 轴分量为直流量,开环幅值特性具有无穷大增益,可实现对 d, q 轴电压的无差控制,但无法实现对 d, q 轴电压直流分量的无差控制;采用PR调节器后,在 d, q 轴电压分量为二倍频(100 Hz)波动时,开环幅值特性具有无穷大增益,可实现对VSG输出电压负序分量的无差控制。确保当VSG定子电气方程输出电压环 d, q 轴电压给定为直流量时,实现对VSG输出电压负序分量的抑制。

3.2 改进定子电气方程

传统VSG定子电气方程采用VSG输出 d, q 轴电流作为定子电气方程的输入^[16],然而当负载不平衡时,VSG输出的 d, q 轴电流中含二倍频交流分量,导致定子电气方程输出电压指令同样呈现二倍频波动,进一步加剧了VSG机端电压的不平衡度。因

此,这里提出一种改进的定子电气方程实现方法。其原理为:电压环采用PI和PR复合控制的方法,其中PI控制器用于实现 d, q 轴电压分量中直流分量的无差跟踪,PR控制器用于实现二倍频交流分量的无差跟踪。考虑到稳态时电感电流 d, q 轴分量和电压外环输出 d, q 轴电流指令是相同的,因此可将电压环输出电流指令直接作为定子电气方程的电流输入。另外,当VSG稳态时,PI输出电感电流指令 $i_{d_ref_PI}$ 和 $i_{q_ref_PI}$ 是直流量,PR控制器输出电感 $i_{d_ref_PR}$ 和 $i_{q_ref_PR}$ 是二倍频交流量。基于该特性,可将 $i_{d_ref_PI}$ 和 $i_{q_ref_PI}$ 作为定子电气方程的电流输入,从而确保定子电气方程输出 d, q 轴电压指令是直流量。即

$$\begin{cases} i_{d_ref_PI} = (E_d - Ri_{d_ref_PI} + \omega Li_{q_ref_PI} - u_d)G_{PI}(s) \\ i_{q_ref_PI} = (E_q - Ri_{q_ref_PI} + \omega Li_{d_ref_PI} - u_q)G_{PI}(s) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $G_{PI}(s)$ 为PI控制器传递函数。

$$\begin{cases} i_{d_ref_PR} = (E_d - Ri_{d_ref_PR} + \omega Li_{q_ref_PR} - u_d)G_{PR}(s) \\ i_{q_ref_PR} = (E_q - Ri_{q_ref_PR} + \omega Li_{d_ref_PR} - u_q)G_{PR}(s) \end{cases} \quad (15)$$

当负载不平衡时,VSG输出功率呈现出二倍频波动,表现为一个直流分量叠加了一个二倍频波动的交流分量^[17],然而VSG转子运动方程和励磁控制环路中有功和无功功率必须是直流量。类似地,可根据电压环PI调节器输出电流指令 $i_{d_ref_PI}$ 和 $i_{q_ref_PI}$ 计算有功和无功功率直流量:

$$\begin{cases} P = 3(u_d i_{d_ref_PI} + u_q i_{q_ref_PI})/2 \\ Q = 3(-u_d i_{q_ref_PI} + u_q i_{d_ref_PI})/2 \end{cases} \quad (16)$$

综上所述,可得到如图4所示的具备带不平衡负载功能的VSG控制框图,该控制策略同样满足并网工况。值得注意的是:在并网时,需去除图4中的PR控制器。

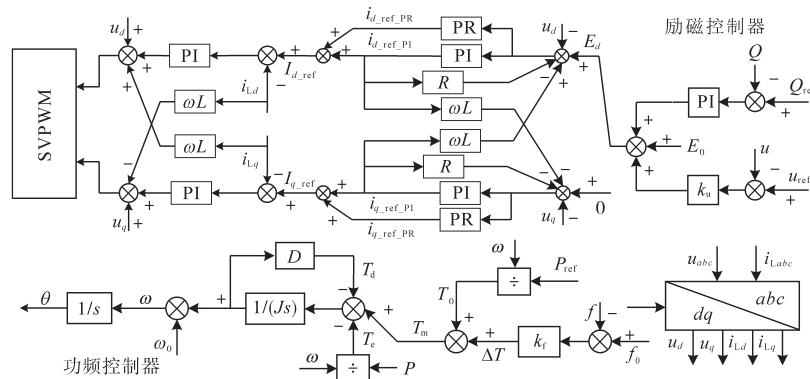


图4 VSG控制策略

Fig.4 Principle of VSG

3.3 改进的定子电气方程特性分析

图2中,仅考虑电压环采用PI控制,当加入

改进的定子电气方程后,改进方案的控制框图如图5所示。

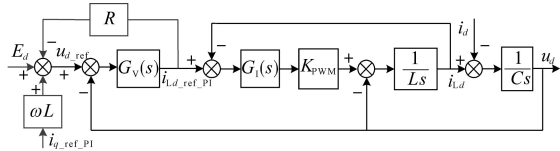


图5 加入改进定子电气方程的d轴环路控制框图

Fig.5 Block diagram of d-axis loop control with improved stator electrical equation

为了简化分析,不考虑虚拟同步发电机的定子电感,只考虑定子电阻。由图5及式(10)、式(11)、式(14),可知,以 E_d 为输入, u_d 为输出的电压电流双闭环传递函数为

$$u_d = K_{PWM} G_V(s) G_I(s) E_d / \{ (LCR G_V(s) + LC) s^2 + [K_{PWM} C R G_V(s) G_I(s) + K_{PWM} C G_I(s)] s + R G_V(s) + K_{PWM} G_V(s) G_I(s) + 1 \} \quad (17)$$

据此分别得到不同定子电阻值下系统的闭环伯德图和电压阶跃响应曲线,如图6、图7所示。

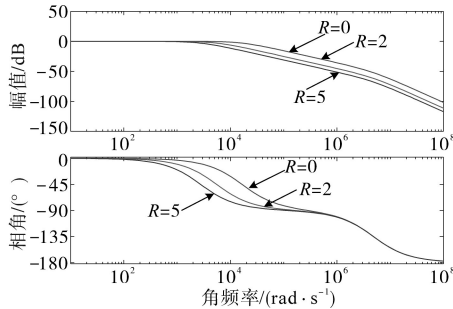


图6 闭环系统伯德图

Fig.6 Closed-loop Bode diagram

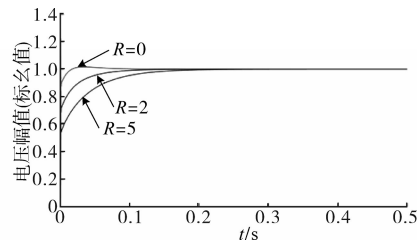


图7 电压阶跃响应曲线

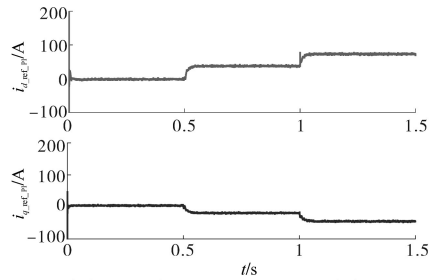
Fig.7 Step response curves of voltage

由图6可知,随着定子电阻 R 的增大,系统带宽降低,响应速度变慢。从图7所示的系统阶跃响应曲线也可得到相同的结论。因此,本文中改进的虚拟同步发电机定子电气方程中的定子电阻 R 的取值要综合考虑系统的动静态特性,必要时可通过增大电压外环比例参数提高系统动态性能。

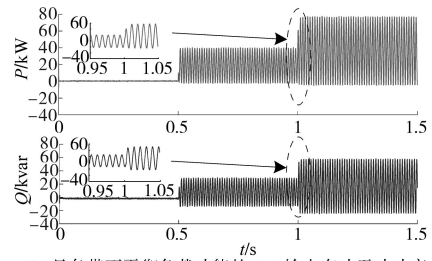
4 仿真验证

为验证本文提出的不平衡负载条件下VSG控制方案的可行性,在Matlab/Simulink中搭建了仿真模型,对离网带不平衡负载工况进行仿真验证,其仿真工况为:0~0.5 s,空载运行;0.5~1 s,AB

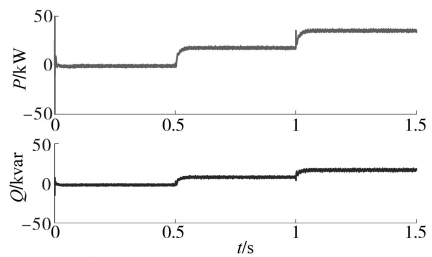
相间投入 $6 \Omega + 0.01 \text{ H}$ 负载;1~1.5 s,再投入 $6 \Omega + 0.01 \text{ H}$ 负载。仿真结果如图8所示。



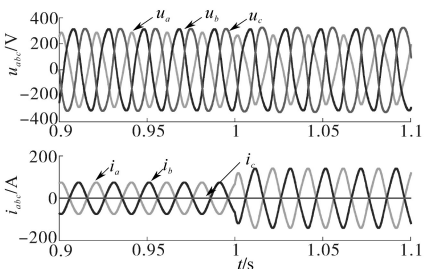
(a) 具备带不平衡负载功能的VSG电流指令直流分量



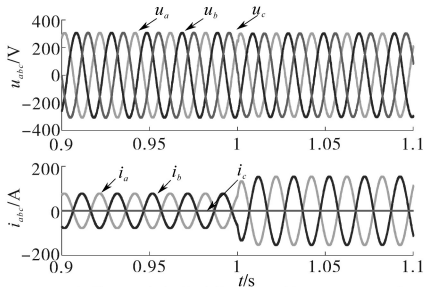
(b) 具备带不平衡负载功能的VSG输出有功无功功率



(c) 具备带不平衡负载功能的有功无功功率直流分量



(d) 传统VSG输出电压电流波形



(e) 具备带不平衡负载功能的VSG输出电压电流波形

图8 具备带不平衡负载功能的VSG仿真波形

Fig.8 VSG simulation waveforms with unbalanced load function

由图8a可知,电压外环PI输出 d, q 轴电流指令在稳态时无波动,可确保定子电气方程输出 d, q

轴电压指令无波动。由图8b、图8c可知,采用本文提出的新型功率计算方法可实现VSG输出功率中直流分量的提取,从而确保有功无功环路输出频率和励磁电压为直流量。由图8d、图8e可知,传统VSG带不平衡负载时电压电流波形均出现严重的畸变现象,采用本文提出的VSG控制策略可实现带百分百不平衡负载,输出电压波形平滑无畸变。

5 实验验证

实验采用50 kW T型三电平储能变流器实验平台,对前文所提出的控制方法进行实验验证,相关参数如下:直流母线电压650 V,额定线电压400 V,开关频率16 kHz,滤波电感0.25 mH,滤波电容20 μF,转动惯量1 kg·m²,阻尼系数D=20,定子电阻0.1 Ω,定子电感10 mH,阻尼电阻0.5 Ω。

实验工况:50 kW VSG离网运行,分别针对加入改进前、后的VSG离网输出电压进行对比实验,实验中带约15 kW的单相负载,实验结果如图9所示。实验时未带隔离变压器,负载直接挂在ab相间。

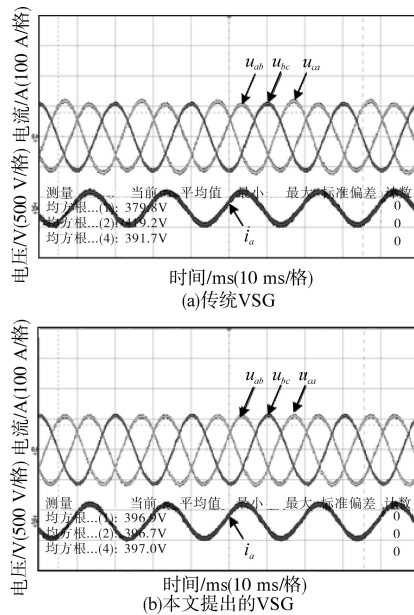


图9 不平衡负载条件下VSG实验波形

Fig.9 Experimental waveforms of VSG with unbalance load

图9a所示为传统VSG输出三相线电压和a相电流波形。图9b为本文提出的具备带不平衡负载功能的VSG输出三相线电压和a相电流波形。由图9a可知,传统VSG ab相间带不平衡负载后, u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} 依次为379 V, 391 V, 419 V,线电压不平衡,因此,传统VSG不具备带不平衡负载

的能力,不平衡负载会导致VSG输出电压不平衡;而采用本文提出的新型VSG算法后,如图9b所示, u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} 依次变为396 V, 396 V, 397 V,输出电压平衡。

6 结论

本文提出了一种适用于不平衡负载工况的VSG控制策略,主要结论如下:

- 1)该控制策略电压外环采用了PI和PR的复合控制方法,可实现电压外环给定为恒定值时VSG输出电压d,q轴分量不含二倍频波动量,从而消除VSG输出负序电压分量;
- 2)提出一种改进的定子电气方程实现方法,确保定子电气方程输出电压指令为直流量;
- 3)提出了一种改进的功率计算方法,确保VSG控制环路的有功功率和无功功率为直流量;
- 4)Matlab/Simulink仿真及实验均验证了所提控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 胡安平,杨波,潘鹏鹏,等.基于电力电子接口的储能系统惯性特征研究[J].中国电机工程学报,2018,38(17):4999-5008,5297.
Hu Anping, Yang Bo, Pan Pengpeng, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4999-5008, 5297.
- [2] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
Shu Yinbiao, Zhang Zhigang, Guo Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [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,2015,39(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, 39(21): 165-175.
- [4] Wei Yalong, Zhang Hui, Song Qiong, et al. Control strategy for parallel-operated virtual synchronous generators[C]/International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). Hefei, China: IEEE, 2016: 2015-2021.
- [5] 柴建云,赵杨阳,孙旭东,等.虚拟同步发电机技术在风力发电系统中的应用与展望[J].电力系统自动化,2018,42(9):17-25,68.
Chai Jianyun, Zhao Yangyang, Sun Xudong, et al. Application and prospect of virtual synchronous generator in wind power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 17-25, 68.

- [6] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-349.
Zhong Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-349.
- [7] 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): 349-360.
Lü Zhipeng, Sheng Wanxing, Liu Haitao, *et al.* Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-360.
- [8] 魏亚龙, 张辉, 孙凯, 等. 基于虚拟功率的虚拟同步发电机预同步方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 124-129, 178.
Wei Yalong, Zhang Hui, Sun Kai, *et al.* Pre-synchronization method of virtual synchronous generator using virtual power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 124-129, 178.
- [9] 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]. 中国电机工程学报, 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.
- [10] 胡海林, 蔡少文, 万晓凤, 等. 孤岛微网虚拟同步发电机不平衡电压控制策略[J]. 电力电子技术, 2019, 53(3): 34-37, 67.
Hu Hailin, Cai Shaowen, Wan Xiaofeng, *et al.* Unbalanced voltage control strategy of virtual synchronous generator in islanded microgrid[J]. Power Electronics, 2019, 53(3): 34-37, 67.
- [11] 韦微, 茹心芹, 石伟. 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.
Wei Wei, Ru Xinqin, Shi Wei, *et al.* Control strategy of micro grid inverter under unbalanced load conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 76-82.
- [12] 石荣亮, 张兴, 胡超. 不平衡负载下虚拟同步发电机的运行控制策略[J]. 太阳能学报, 2017, 38(11): 2964-2971.
Shi Rongliang, Zhang Xing, Hu Chao, *et al.* The virtual synchronous generator operation control strategy under unbalanced load conditions[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(11): 2964-2971.
- [13] 石荣亮, 张兴, 刘芳, 等. 不平衡与非线性混合负载下的虚拟同步发电机控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6086-6095.
Shi Rongliang, Zhang Xing, Liu Fang, *et al.* A control strategy for unbalanced and nonlinear mixed loads of virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6086-6095.
- [14] 陈杰, 赵冰, 陈新, 等. 不平衡负载条件下三相四线制并联逆变器的下垂控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(20): 4790-4801.
Chen Jie, Zhao Bing, Chen Xin, *et al.* Droop control of three-phase four-wire parallel inverters under unbalanced load condition[J]. transactions of china electrotechnical society, 2018, 33(20): 4790-4801.
- [15] 孙驰, 马伟明, 鲁军勇. 三相逆变器输出电压不平衡的产生机理分析及其矫正[J]. 中国电机工程学报, 2006(21): 57-64.
Sun Chi, Ma Weiming, Lu Junyong. Analysis of the unsymmetrical output voltages distortion mechanism of three-phase inverter and its corrections[J]. Proceedings of the CSEE, 2006(21): 57-64.
- [16] 宋琼, 张辉, 孙凯, 等. 多微源独立微网中虚拟同步发电机的改进型转动惯量自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 412-424.
Song Qiong, Zhang Hui, Sun Kai, *et al.* Improved adaptive control of inertia for virtual synchronous generators in islanding micro-grid with multiple distributed generation units[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 412-424.
- [17] 肖湘宁, 陈萌. 不平衡电压下虚拟同步发电机功率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 193-200.
Xiao Xiangning, Chen Meng. Power control of virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 193-200.

收稿日期:2020-06-28

修改稿日期:2020-08-13