

不平衡电压下利用降阶谐振控制器的 新型 VSG 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: 针对虚拟同步发电机(VSG)在电网电压不平衡条件下逆变器输出电流存在严重畸变和有功、无功功率存在振荡等问题,利用比例积分降阶谐振(PI-ROR)控制器对传统不平衡电压下 VSG 控制策略进行改进。PI-ROR 控制器不需进行电流、电压正负序分离计算就可实现对负序分量的无差控制,因而可将正序、负序电流放到同一 dq 轴上进行统一控制,与传统的正负序分别控制相比,不仅降低了电流环控制结构的复杂程度还避免了大量正负分离计算带来的控制延时。通过仿真证明 PI-ROR 控制器与恒有功、恒无功及电流平衡 3 种控制目标结合,可改善 VSG 在不平衡电压条件下的稳态、暂态性能。

关键词: 虚拟同步发电机; 降阶谐振控制器; 不平衡电压; 统一控制

中图分类号: TM 761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)08-0063-05

doi: 10.12177/emca.2020.075

VSG Control Strategy Under Unbalanced Voltage Improved by Reduced Order Resonant Controller

DANG Ke, TIAN Yong

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

Abstract: In view of the serious distortion of the output current of the inverter and the oscillation of the active and reactive power of the virtual synchronous generator (VSG) under the unbalanced power grid voltage, the proportion integral plus reduced order resonant (PI-ROR) controller is used to improve the traditional VSG control strategy under the unbalanced voltage. PI-ROR controller can realize the no-difference control of negative sequence component without the separation calculation of positive and negative sequences of current and voltage, so it can put the positive sequence and negative sequence currents on the same dq axis for unified control. Compared with the traditional positive and negative sequences controller, it not only reduces the complexity of current loop control structure, but also avoids the control delay caused by a large number of positive and negative separation calculation. Finally, the simulation results show that the PI-ROR controller can improve the steady- and transient-state performance of VSG under unbalanced voltage condition when considering the three control objectives of constant active power, constant reactive power and current balance.

Key words: virtual synchronous generator; reduced order resonant controller; unbalanced voltage; unified control

0 引言

近年来,化石燃料危机、气候变暖及环境破坏

等问题日益严重,以太阳能、风能为代表的新能源发电因具有低碳环保等优点而得到迅速发展^[1]。然而,新能源发电具有波动性及不可控性,而且多

收稿日期: 2020-03-23; 收到修改稿日期: 2020-06-09

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。

经过电力电子逆变器接入电网,并不具备传统火发电机组的调频调压能力。随着分布式电源在电力系统的比重不断上升,传统的旋转备用容量和转动惯量相对减少,给电力系统安全运行带来的威胁不容小觑^[2]。

为了降低分布式电源带给电力系统的诸多干扰实现新能源友好并网,国内外学者提出了虚拟同步发电机(VSG)技术^[3],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,使分布式电源模拟同步发电机的外特性运行。通过 VSG 技术,分布式电源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,可在一定程度上抑制逆变器输出功率以及频率振荡^[4]。文献[5]阐述了光伏虚拟同步机建模方法,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了 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,提高了 VSG 动态响应速度。

目前,电网正常运行时的 VSG 技术已经较为成熟,而研究电网电压不平衡下的 VSG 控制策略则较少。文献[8]利用线路参数计算正序电流参考指令,实现了三相并网电流平衡控制,线路参数的不准确性影响控制效果。文献[9]在文献[8]的基础上又增加了抑制有功功率和无功功率脉动 2 种控制目标,并给出了相应的电流参考指令,但过多的正负序分离计算会导致控制延时。文献[10]通过动态电压补偿来消除负序电流和峰值电流,以达到三相电流平衡的目的。文献[11]提出一种计算不平衡电压补偿系数的方法,具有频率支撑和改善电流质量的作用。文献[12]针对储能 VSG 系统提出一种基于电压相位补偿的电压前馈控制策略,抑制负序电流。以三相电流平衡为目标的单一控制目标无法适应多场合的控制需求。

在电压不平衡条件下原有的 VSG 控制方法通常采用正负序电流分别控制,这增加了控制结构的复杂程度且需要大量相序分离计算。为了解决该问题,本文利用比例积分降阶谐振(PI-ROR)控制器对 VSG 控制系统进行改进。根据抑制有功、无功功率 2 倍频波动和抑制负序电流 3 种控制目标计算出相应的负序电流参考指令。将

ROR 控制器与 PI 控制器并联构成 PI-ROR 控制器改进 VSG 控制结构中的电流环,实现正负序电流的统一控制。最后,通过 MATLAB/Simulink 仿真证明了所提控制策略的有效性。

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点处的有功、无功功率生成逆变器输出电压矢量信号,经过正弦脉宽调制(SPWM)后产生相应的脉冲控制逆变器开关。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_{pec} 为并网公共点处的电压。

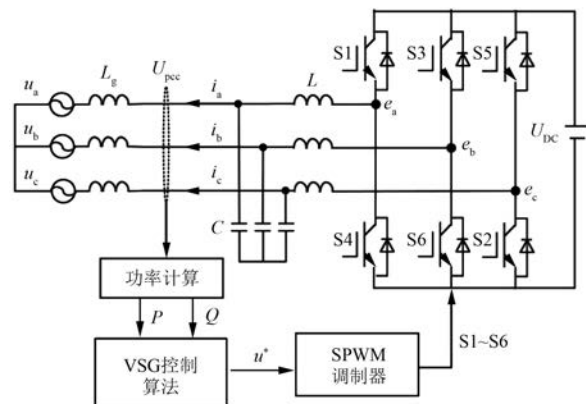


图 1 VSG 电路拓扑结构

VSG 控制算法由功频、励磁 2 个环节组成,如图 2 所示。图 2 中, P_e 为电磁功率; P 和 P_{ref} 分别为有功功率的实际值和参考值; K_f 和 K_q 为有功、无功下垂系数; J 和 D 分别为转动惯量和阻尼系数; ω 和 ω_0 为分别为电气角速度和电网同步角速度; U_m 为并网逆变器输出电压幅值; Q_{ref} 和 Q 分

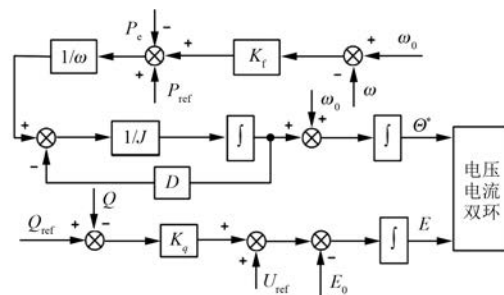


图 2 VSG 技术原理

别为无功功率参考值和实际值。

功频环节生成的功角 θ 和励磁环节生成的幅值 E 经过式(1)生成三相电压参考值,再通过电压电流双环控制得到控制信号。

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \sin \theta \\ E \sin(\theta - 2\pi/3) \\ E \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

2 不平衡电压下 VSG 控制策略

2.1 传统 VSG 控制策略

VSG 算法虽然可直接输出电压参考指令,然而直接电压式 VSG 控制无法保证电流波形质量,一般在 VSG 算法后接入电流内环控制,如图 3 所示。其中, U_d 和 U_q 分别为电网电压在旋转坐标系下 d 轴分量和 q 轴分量; I_d 和 I_q 分别为并网电流在旋转坐标系下 d 轴分量和 q 轴分量; P 为比例控制, PI 为比例积分控制,避免了双积分控制器使回路产生振荡。

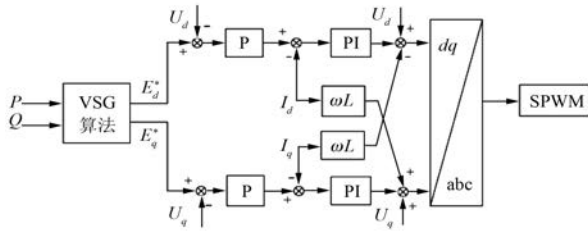


图3 VSG控制结构

当电网电压出现不平衡现象时,并网逆变器输出电流会含有负序分量,只采用传统的比例积分(PI)控制器无法跟踪负序分量,为了控制负序电流分量一般采用较为复杂的正、负序双电流环控制结构^[13],如图4所示。

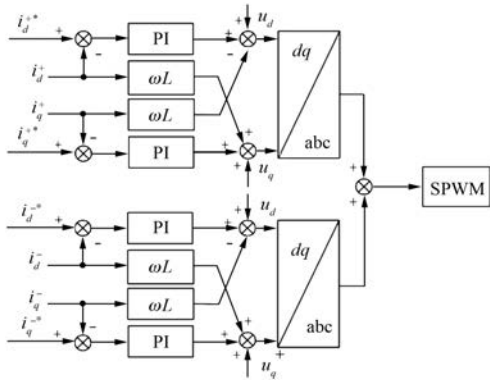


图4 正负序电流分别控制策略

该策略在正序电流环控制基础上又加入负序电流控制,在电网电压不平衡期间有一定效果,但诸多的正负序分离运算使控制系统的计算量大大增加,影响暂态控制效果,较多的PI控制器增加了控制系统的复杂性。而一阶谐振控制器能够对负序分量准确控制,因此在电流环PI控制器后嵌入一阶谐振控制器构成PI-ROR控制器对传统不平衡电压下VSG控制策略加以改进。ROR的传递函数^[14]如下:

$$G^{\text{ROR}}(s) = \frac{k\omega_j}{s - j\omega_0 + \omega_j} \quad (2)$$

式中: k 为增益系数; ω_j 为截止角频率,一般取 10 rad/s ; ω_0 为谐振角频率。

图5为ROR控制器传递函数的伯德图。可以看出,ROR对负序分量的幅值增益较大,因而可对负序分量准确控制。

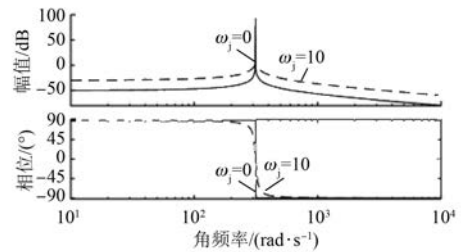


图5 ROR控制器传递函数的伯德图

2.2 基于PI-ROR的新型VSG控制系统

与传统的并网逆变器类似,电网电压不平衡时VSG受电网电压负序分量的影响导致输出的有功、无功功率出现二倍频波动^[15]。

$$\begin{cases} P = P_0 + P_{c2} \cos(2\omega t) + P_{s2} \sin(2\omega t) \\ Q = Q_0 + Q_{c2} \cos(2\omega t) + Q_{s2} \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_0 和 Q_0 为有功、无功功率平均值;其他项为波动项的幅值。

参数 P_0 、 Q_0 、 P_{c2} 、 Q_{c2} 、 P_{s2} 、 Q_{s2} 具体值如下:

$$\begin{cases} P_0 = 1.5(U_d^+ I_d^+ + U_q^+ I_q^+ + U_d^- I_d^- + U_q^- I_q^-) \\ Q_0 = 1.5(U_q^+ I_d^+ - U_d^+ I_q^+ + U_q^- I_d^- - U_d^- I_q^-) \\ P_{c2} = 1.5(U_d^- I_d^+ + U_q^- I_q^+ + U_d^+ I_d^- + U_q^+ I_q^-) \\ Q_{c2} = 1.5(U_q^- I_d^+ - U_d^- I_q^+ + U_q^+ I_d^- - U_d^+ I_q^-) \\ P_{s2} = 1.5(U_q^- I_d^+ - U_d^- I_q^+ - U_q^+ I_d^- + U_d^+ I_q^-) \\ Q_{s2} = 1.5(-U_d^- I_d^+ - U_q^- I_q^+ + U_d^+ I_d^- + U_q^+ I_q^-) \end{cases} \quad (4)$$

式中:上标“+”和“-”分别代表正序分量和负序分量。

根据式(4)可得到不同控制目标下负序电流参考值。

目标一,扼制负序电流,即 $I_d^- = I_q^- = 0$ 。

目标二,扼制无功波动,令 Q_{c2} 和 Q_{s2} 为 0,由式(4)得出:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} u_d^- i_d^+ + u_q^- i_q^+ & u_d^- i_q^+ - u_q^- i_d^+ \\ u_q^- i_d^+ - u_d^- i_q^+ & u_d^- i_d^+ + u_q^- i_q^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d^+ \\ u_q^+ \end{bmatrix} \\ K = (u_d^+)^2 + (u_q^+)^2 \end{cases} \quad (5)$$

目标 3,扼制有功波动,令 P_{c2} 和 P_{s2} 为 0,由式(4)得出:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} -u_d^- i_d^+ - u_q^- i_q^+ & u_q^- i_d^+ - u_d^- i_q^+ \\ u_d^- i_q^+ - u_q^- i_d^+ & -u_d^- i_d^+ - u_q^- i_q^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d^+ \\ u_q^+ \end{bmatrix} \\ K = (u_d^+)^2 + (u_q^+)^2 \end{cases} \quad (6)$$

基于 PI-ROR 控制器的 VSG 不平衡电压控制策略如图 6 所示。在电网电压不平衡期间 VSG 输出有功、无功功率存在 2 倍频振荡,反馈到 VSG 算法后经功频、励磁环节后会产生错误的电压参考指令,因而将其用有功、无功功率的平均值 P_0 、 Q_0 来代替。ROR 控制器可对负序分量准确控制,故电流正、负序参考值可直接相加得到电流参考值后在同一个电流环控制,无需正、负序电流环分别控制再相加,简化了电流环控制结构又避免对电流进行正负序分离计算。ROR 控制器传递函数包含 j ,其含义为逆时针旋转 90° ,可利用两相静止坐标系 $\alpha\beta$ 轴相差 90° 来实现,即 $x_\alpha = jx_\beta$,故负序电流参考值需要进行坐标变换。在旋转坐标系下,负序分量以和正序分量相同的角频率反向

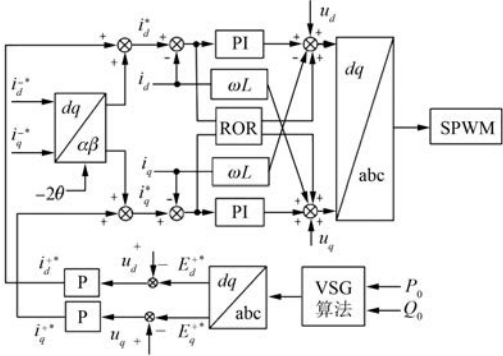


图 6 基于 PI-ROR 控制器的控制策略

旋转,因此在坐标变换时所需的相角为正序的负 2 倍。

3 仿真实验

3.1 仿真工况

为了证明 PI-ROR 控制器在电网电压不平衡下对负序电流分量的精准控制效果,利用仿真软件 MATLAB/Simulink 搭建如图 1 的 VSG 并网仿真模型。设置的不平衡故障为电网 A 相电压幅值跌落 50%,先对本文所提不平衡电压下 VSG 控制策略的有效性进行验证,再与传统的正负序电流分别控制策略进行暂态响应对比。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/F	40^{-6}
逆变器开关频率/kHz	10
额定有功功率/kW	25
额定无功功率/var	0

3.2 仿真结果

图 7 为基于 PI-ROR 控制器的 VSG 不平衡电压控制策略与传统 VSG 控制策略的对比。由图 7 可知,本文所提策略可实现对电网负序分量的精准控制,在电网电压不平衡的条件下使逆变器实现了 3 种控制目标。

图 7(a)为抑制负序电流控制目标下的三相电流波形图。电网正常工作下并网电流幅值为 54 A,故障发生后 A 相电流和 C 相电流幅值明显增大,峰值可达到 110 A,B 相电流幅值减小至 45 A,如此大的电流定会触发保护装置引起并网逆变器跳闸。并且,三相电流出现严重畸变,总谐波畸变率(THD)为 7.9%,已经超出了国家规定的标准值 5%。采用本文所提策略,实现了三相电流平衡,最大电流幅值为 65 A,THD 为 1.2%。

图 7(b)为抑制有功波动控制目标下的有功功率波形图。故障前逆变器输出有功功率为 25 kW,故障后有功功率存在振荡,最大幅值为 50 kW。采用本文所提策略,有功功率在 24 kW 和 26 kW 之间波动。

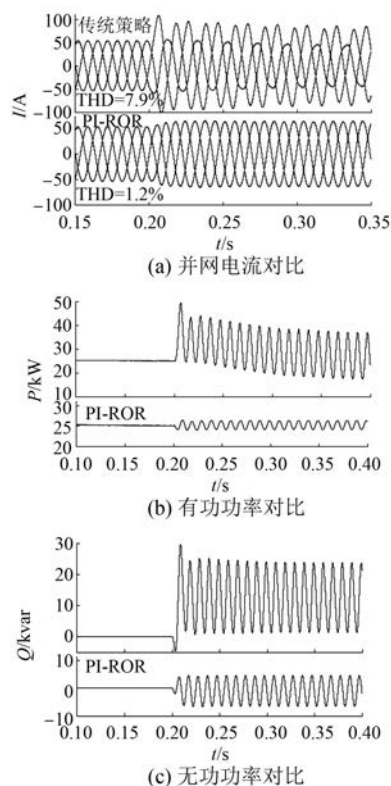


图7 3种控制目标仿真波形

图7(c)为抑制无功波动控制目标下的无功功率波形图。电网电压平衡时逆变器输出无功功率为0 var,故障发生后无功功率骤升而且大幅度波动,最大值达到2.9 kvar。采用本文所提策略,无功功率仅在0.5 kvar和-0.6 kvar之间变化。

以逆变器输出无功曲线为例,阐述VSG参数的影响。在电网电压不平衡条件下,有功、无功功率的平均值经功频、励磁环节生成电压参考值,然而功频模块含有转动惯量 J ,使得该环节具有一定惯性因而响应速度较慢,再加上相序分离计算带来的控制延迟导致在电压跌落瞬间无功功率经较长的波动过程才趋于稳定,如图8(a)虚线部分所示。PI-ROR控制器无需相序分离计算从而提高了电流环动态响应速度,可在一定程度上弥补转动惯量带来的缺陷,故电压跌落瞬间无功功率波动时间较短,如图8(b)虚线部分所示。

4 结 语

本文对电网电压不平衡下VSG并网逆变器进行分析,与传统的光伏并网相似,存在有功、无

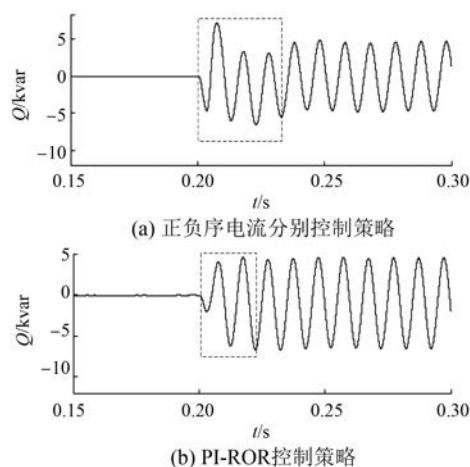


图8 动态性能对比

功功率2倍频振荡和并网电流畸变等问题,利用PI-ROR控制器可对传统不平衡电压下VSG控制策略进行改进。得出结论如下:

(1) 采用PI-ROR控制器可实现对正负序电流统一控制,降低了电流环控制结构的复杂程度,同时避免电流正负序分离计算带来的控制延迟,提高了VSG的暂态性能。

(2) 因为电网正常运行时不含负序分量,所以PI-ROR控制器只有PI环节工作;在电压不平衡时PI环节和ROR环节共同工作,无需进行切换。

【参考文献】

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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.

(下转第86页)