

DOI: 10.7667/PSPC180392

电网不平衡下虚拟同步发电机功率-电流协调控制策略

杨明, 高龙将, 王海星, 杜少通, 李冰锋

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术通过模拟同步发电机运行机理, 在理想电网条件下能够使分布式电源友好接入电网。然而, 在不平衡电网电压下, 则会出现输出功率振荡、电流不平衡等问题。为克服这些问题, 提出了一种基于静止坐标系下虚拟同步发电机功率-电流协调控制策略。该控制策略根据瞬时功率理论计算负序电流参考值, 建立了恒定有功、无功及电流平衡3个控制目标的统一解析表达式, 实现功率-电流的协调控制, 提高了系统运行性能。最后仿真结果验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 虚拟同步发电机; 不平衡电网电压; 瞬时功率; 负序电流; 协调控制

Coordinate control of power and current for virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage

YANG Ming, GAO Longjiang, WANG Haixing, DU Shaotong, LI Bingfeng

(School of Electrical Engineering & Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The technology of virtual synchronous generator can simulate the operation mechanism of the synchronous generator, which can make distributed generation friendly connect to power grid under balanced condition. However, when the grid voltage becomes unbalanced, it will lead to rippled power and unbalanced three-phase current. To overcome this difficulty, a coordinate control of power and current for virtual synchronous generator based on the stationary frame is proposed. The instantaneous power theory is employed to compute the reference negative-sequence current command, which suppresses the active-power oscillation, reactive-power oscillation and balanced current respectively. The unified analytic formula of the control target is established to achieve the coordinate control of power and current, which enhances the operation performance of the system. Finally, the simulation results verify the effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61703144 and No. U1804143) and Key Science and Technology Project of Colleges and Universities of Henan Education Department (No. 17A470010 and No. 18A470003)

Key words: virtual synchronous generator; unbalanced grid voltage; instantaneous power; negative-sequence current; coordinate control

0 引言

近年来, 由于环境污染、能源短缺等问题日益突显, 为解决这些问题, 可再生能源(太阳能、风能等)为代表的分布式发电技术发展越来越迅速。然而, 随着分布式电源渗透率的不断提高, 意味着传统同步发电机的所占容量逐渐降低, 这会对电力系统的安全稳定性带来严重挑战。因此, 分布式电

源发电技术的任务不能只是简单地向电网提供电能, 其自身还应具备一定的电网电压幅值和频率调节的能力, 使其能够让电网设备安全稳定运行。相比而言, 传统的同步发电机自身具有能够参与到电网电压幅值和频率调节的功能, 若能使并网逆变器具有同步发电机的这些优势, 使分布式电源友好接入电网, 则能提高分布式发电系统的安全稳定性^[1-3]。

因此, 有学者提出了虚拟同步发电机(VSG)技术, 能够使VSG模拟同步发电机运行机理。文献[4]等提出了VISMA方案, 该方案主要模拟了同步发电机的外特性, 是直接控制输出电流的电流型VSG, 无法控制系统的电压和频率。为弥补此缺陷,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61703144, U1804143); 河南省教育厅高等学校重点科研项目资助(17A470010, 18A470003)

文献[5-6]提出了外特性为电压源的电压控制型VSG, 它的本质是主要考虑有功-频率、无功-电压的关系, 为系统提供稳定的频率和电压支撑, 在渗透率较高的电网环境下应用广泛^[7-8]。

上述研究均在电网电压三相平衡条件下进行, 然而实际电网中常会因短路故障、电压跌落、谐波畸变等因素的影响而出现不平衡电网电压或畸变谐波电网电压。在这种情况下, VSG 会出现输出有功、无功功率振荡及电流不平衡等问题^[9]。文献[10]提出了有功/无功控制、平衡正序控制等 5 种控制方法, 以实现分布式电源在不同环境下的应用。文献[11]利用平衡电流与恒定功率时电流之间的关系进行修正值的跟踪控制, 达到功率恒定的效果, 但计算方法复杂, 实现困难。文献[12]通过抑制并网电流中的负序分量, 使 VSG 能够在不平衡电网下输出三相平衡电流, 但并未提及功率振荡的控制方法。文献[13]提出的电压前馈策略, 虽然可解决功率振荡问题, 但其所采用的电压相位补偿却需要精确计算角度, 否则将失去其控制意义。文献[14]提出的负序电压控制策略, 并未详细给出控制器的设计, 而且当电网中含有畸变电压时其控制策略将失效。因此, 在不平衡电网条件下, 在保持 VSG 特有性能的前提下, 实现抑制输出功率振荡及并网电流平衡等问题还需要进一步研究。

本文以 VSG 在不平衡电网电压条件下, 分析了输出功率振荡、并网电流不平衡的原因及瞬时功率量与瞬时负序电流量之间的关系, 提出了一种基于静止坐标系下 VSG 功率-电流协调控制策略, 该控制策略根据瞬时功率计算负序电流参考值, 建立了恒定有功、无功及电流平衡 3 个控制目标的统一解析表达式, 实现功率-电流的协调控制, 以满足不同电力系统的需求。

1 不平衡电网下 VSG 分析

1.1 VSG 基本原理

VSG 的本质是通过控制策略来模拟同步发电机的运行机理, 从而使并网逆变器具有同步发电机的优势。VSG 的主电路拓扑如图 1 所示, 其中: V_{T1} — V_{T6} 组成三相逆变桥; L_i 和 R_i 为逆变器侧电感和电阻; C_f 为滤波电容; L_g 和 R_g 为并网侧电感和电阻。逆变器桥臂中点电压 e_a 、 e_b 和 e_c 模拟同步发电机的内电势, 逆变器侧电感 L_i 和 R_i 分别模拟同步发电机的同步电感和定子绕组电阻^[5]。

VSG 的控制结构如图 2 所示, 有功环和无功环分别模拟同步发电机的调频特性和调压特性。VSG 的有功环和无功环的数学方程为

$$\frac{P_{\text{set}}}{\omega_n} - \frac{P_c}{\omega} + D_p(\omega_n - \omega) = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

$$Q_{\text{set}} - Q_c + D_q(V_{\text{ref}} - V_n) = K \frac{dE}{dt} \quad (2)$$

式中: P_{set} 和 Q_{set} 为输出有功和无功功率参考值; D_p 为有功-频率下垂系数; D_q 为无功-电压下垂系数; ω 为 VSG 的角频率; ω_n 为额定角频率; V_{ref} 为额定电压; V_n 为输出电压; K 为积分系数; J 为虚拟转动惯量^[15-16]。

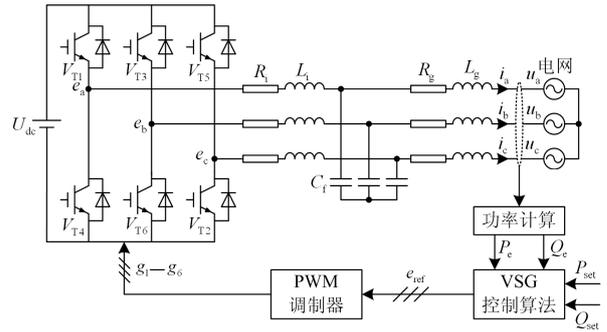


图 1 VSG 的主电路拓扑和控制结构

Fig. 1 Topology and control scheme of the VSG

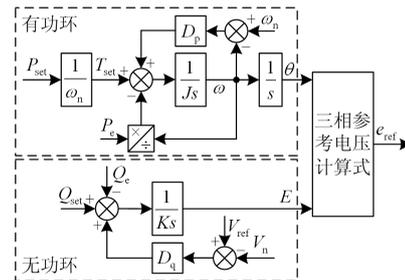


图 2 VSG 的控制框图

Fig. 2 Control diagram of the VSG

有功环是通过有功功率参考值与实际值的差值实现虚拟机械转矩的输出, 从而调节逆变器侧输出电压相位角 θ , 无功环是通过无功功率参考值与实际值的差值调整逆变器侧电压幅值 E , 利用电压幅值 E 和相位角 θ 合成逆变器侧参考电压 e_{ref} , 可得逆变器侧参考电压的表达式为

$$\begin{cases} e_{\text{aref}} = E \sin \theta \\ e_{\text{bref}} = E \sin(\theta - 2\pi/3) \\ e_{\text{cref}} = E \sin(\theta + 2\pi/3) \end{cases} \quad (3)$$

1.2 功率流分析

当 VSG 在不平衡电网电压下运行时, 其输出功率和电流会受到并网点电压的强烈影响。与传统的并网逆变器类似, VSG 的负序电压分量也会出现在不平衡电网电压中, 这会影响到输出功率及电流波

形质量, 下面简述这些问题存在的原因。

设三相电网电压 u_a 、 u_b 、 u_c 为

$$\begin{bmatrix} u_a & u_b & u_c \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} u_m^+ \sin(\omega t + \theta_p) + u_m^- \sin(-\omega t + \theta_n) \\ u_m^+ \sin(\omega t - 120^\circ + \theta_p) + u_m^- \sin(-\omega t - 120^\circ + \theta_n) \\ u_m^+ \sin(\omega t + 120^\circ + \theta_p) + u_m^- \sin(-\omega t + 120^\circ + \theta_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: u_m^+ 和 θ_p 分别为正序电网电压的幅值和相位; u_m^- 和 θ_n 分别为负序电网电压的幅值和相位; ω 为电网电压的角频率。

将式(4)进行 Clarke 变换后, 可得到静止坐标系下电网电压 u_α 和 u_β , 如式(5)。

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha^+ + u_\beta^+ \\ u_\alpha^- + u_\beta^- \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, 电网电压正序和负序分量分别为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha^+ \\ u_\beta^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_m^+ \sin(\omega t + \theta_p) \\ -u_m^+ \cos(\omega t + \theta_p) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_\alpha^- \\ u_\beta^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_m^- \sin(\omega t + \theta_n) \\ -u_m^- \cos(\omega t + \theta_n) \end{bmatrix}$$

根据瞬时功率定义^[17], 瞬时有功和无功功率可表示为

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, i_α 和 i_β 为静止坐标系下并网电流分量。

综上可得瞬时有功和无功功率在静止坐标系下的表达式为

$$\begin{cases} P(t) = P_0 + P_{c2} \cos(2\omega t) + P_{s2} \sin(2\omega t) \\ Q(t) = Q_0 + Q_{c2} \cos(2\omega t) + Q_{s2} \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_0 = 1.5(u_\alpha^+ i_\alpha^+ + u_\beta^+ i_\beta^+ + u_\alpha^- i_\alpha^- + u_\beta^- i_\beta^-) \\ P_{c2} = 1.5[k_1 \cos(2\omega t) - k_2 \sin(2\omega t)] \\ P_{s2} = 1.5[k_1 \sin(2\omega t) + k_2 \cos(2\omega t)] \\ Q_0 = 1.5(-u_\alpha^+ i_\beta^+ + u_\beta^+ i_\alpha^+ - u_\alpha^- i_\beta^- + u_\beta^- i_\alpha^-) \\ Q_{c2} = 1.5[k_3 \cos(2\omega t) - k_4 \sin(2\omega t)] \\ Q_{s2} = 1.5[k_3 \sin(2\omega t) + k_4 \cos(2\omega t)] \end{cases} \quad (8)$$

式中, 系数 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 分别表示为

$$\begin{cases} k_1 = u_\alpha^+ i_\alpha^- + u_\beta^+ i_\beta^- + u_\alpha^- i_\alpha^+ + u_\beta^- i_\beta^+ \\ k_2 = u_\alpha^+ i_\beta^- - u_\beta^+ i_\alpha^- - u_\alpha^- i_\beta^+ + u_\beta^- i_\alpha^+ \\ k_3 = -u_\alpha^+ i_\beta^- + u_\beta^+ i_\alpha^- - u_\alpha^- i_\beta^+ + u_\beta^- i_\alpha^+ \\ k_4 = u_\alpha^+ i_\alpha^- + u_\beta^+ i_\beta^- - u_\alpha^- i_\alpha^+ - u_\beta^- i_\beta^+ \end{cases}$$

从式(7)可以看出在不平衡电网电压下, 由于负序电压和负序电流不等于零, 使输出功率产生了二倍频振荡分量及输出电流不平衡。从式(8)可得出若要用 4 个自由度(i_α^+ 、 i_β^+ 、 i_α^- 、 i_β^-)来控制 6 个自由变量(P_0 、 P_{s2} 、 P_{c2} 、 Q_0 、 Q_{s2} 、 Q_{c2})来实现抑制功率振荡和电流平衡的控制目标很难同时实现。

2 VSG 功率-电流协调控制

对于传统的逆变器, 通常根据式(8)计算出相应的电流参考值便可实现恒定有功、恒定无功以及平衡电流控制。本文在不影响正序电流的情况下, 只计算负序电流参考值。

1) 恒定有功控制

恒定有功控制的控制目标在于获得恒定的有功功率, 正如前文所述, 为了获得恒定有功功率, 需要消除有功功率二倍频并且消除有功功率的波动分量, 即满足 $P_{s2} = P_{c2} = 0$, 根据式(8)可得

$$\begin{cases} P_0 = 1.5(u_\alpha^+ i_\alpha^+ + u_\beta^+ i_\beta^+ + u_\alpha^- i_\alpha^- + u_\beta^- i_\beta^-) \\ Q_0 = 1.5(-u_\alpha^+ i_\beta^+ + u_\beta^+ i_\alpha^+ - u_\alpha^- i_\beta^- + u_\beta^- i_\alpha^-) \\ P_{s2} = 0, P_{c2} = 0, \text{ 即 } k_1 = k_2 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)可以看出为了抑制有功功率振荡, 可对正序电流和负序电流分别进行控制, 但是为了不影响正序电流, 此处只对负序电流进行控制, 可取得相似控制效果, 且方法简单。由式(9)求得负序电流控制指令为

$$\begin{cases} i_{\alpha\text{ref}}^- = -u_\alpha^- P_0 / d_1 + u_\beta^- Q_0 / d_2 \\ i_{\beta\text{ref}}^- = -u_\beta^- P_0 / d_1 - u_\alpha^- Q_0 / d_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中:

$$\begin{cases} d_1 = 1.5[(u_\alpha^+)^2 + (u_\beta^+)^2 - (u_\alpha^-)^2 - (u_\beta^-)^2] \neq 0 \\ d_2 = 1.5[(u_\alpha^+)^2 + (u_\beta^+)^2 + (u_\alpha^-)^2 + (u_\beta^-)^2] \neq 0 \end{cases}$$

2) 恒定无功控制

与恒定有功控制类似, 恒定无功控制为获得恒定无功功率需消除无功功率二倍频振荡分量, 此时满足 $Q_{s2} = Q_{c2} = 0$, 根据式(8)可得

$$\begin{cases} P_0 = 1.5(u_\alpha^+ i_\alpha^+ + u_\beta^+ i_\beta^+ + u_\alpha^- i_\alpha^- + u_\beta^- i_\beta^-) \\ Q_0 = 1.5(-u_\alpha^+ i_\beta^+ + u_\beta^+ i_\alpha^+ - u_\alpha^- i_\beta^- + u_\beta^- i_\alpha^-) \\ Q_{s2} = 0, Q_{c2} = 0, \text{ 即 } k_3 = k_4 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可以求得负序电流控制指令为

$$\begin{cases} i_{\alpha\text{ref}}^- = u_\alpha^- P_0 / d_2 - u_\beta^- Q_0 / d_1 \\ i_{\beta\text{ref}}^- = u_\beta^- P_0 / d_2 + u_\alpha^- Q_0 / d_1 \end{cases} \quad (12)$$

3) 平衡电流控制

为了获得三相平衡电流，平衡电流控制只需要消除电流负序分量，满足

$$\vec{i}_{\alpha\beta\text{ref}}^- = \vec{i}_{\beta\text{ref}}^- = 0 \quad (13)$$

通过分析上述 3 种控制可知，因负序电流参考值的不同，很难同时实现 3 种控制。因此，实际应用中需要根据不同的需求，综合考虑功率振荡和并网电流质量对电网的影响，基于此提出一种静止坐标系下 VSG 功率-电流协调控制策略。

2.1 功率-电流协调控制

在不平衡电网电压下，VSG 瞬时有功及无功功率振荡均由两倍电网频率的正弦和余弦分量组成，电流的正负序分量大小影响着功率振荡幅值。在不影响正序电流情况下，可以通过控制并网电流的负序分量来改变 VSG 输出功率振荡中正弦和余弦分量的幅值大小，进而实现对功率振荡的控制。由图 1 可得 VSG 的电磁方程为

$$L \frac{di_{\text{abc}}}{dt} = e_{\text{abc}} - u_{\text{abc}} - Ri_{\text{abc}} \quad (14)$$

式中， L 和 R 分别为从逆变器到电网之间的总电感和总电阻。

系统控制结构如图 3 所示，先通过采样获得电网电压 u_{abc} 和并网电流 i_{abc} ，将 u_{abc} 进行 Clarke 变换并经过基于复数滤波器的正、负序分量提取模块^[18]得到 $u_{\alpha\beta}^+$ 和 $u_{\alpha\beta}^-$ ，再将 $u_{\alpha\beta}^+$ 、 $u_{\alpha\beta}^-$ 、 P_0 、 Q_0 和 λ 经过式 (15) 和式 (16) 获得负序电流参考值 $i_{\alpha\beta\text{ref}}^-$ ，与反馈电流信号 $i_{\alpha\beta}^-$ 比较得到误差信号送入电流环控制器得到

电感电压 $L \frac{di_{\alpha\beta}^-}{dt}$ ，此处忽略寄生电阻 R 的作用。根据式 (14) 可得到逆变器侧负序参考电压，与正序逆变器侧电压调制信号叠加可得参考电压调制信号，最后通过 SVPWM 调制得到开关驱动信号实现并网运行。

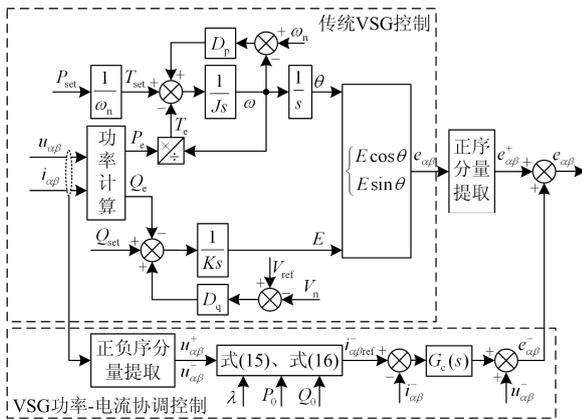


图 3 VSG 功率-电流协调控制策略

Fig. 3 Coordinate control scheme of power and current for VSG

本文所提出的基于静止坐标系下 VSG 功率-电流协调控制策略，无需锁相环，控制结构简单。在不影响正序电流的情况下，该控制策略根据瞬时功率计算负序电流参考值，建立了恒定有功、无功及电流平衡 3 个控制目标的统一解析表达式，实现功率-电流的协调控制，将式 (10)、式 (12) 和式 (13) 相结合，可得恒定有功、恒定无功及电流平衡控制的负序电流参考值表达式为

$$\vec{i}_{\alpha\beta\text{ref}}^- = \frac{2P_0}{3} \cdot \frac{\lambda u_{\alpha}^-}{(u_{\alpha}^+)^2 + (u_{\beta}^+)^2 + \lambda[(u_{\alpha}^-)^2 + (u_{\beta}^-)^2]} - \frac{2Q_0}{3} \cdot \frac{\lambda u_{\beta}^-}{(u_{\alpha}^+)^2 + (u_{\beta}^+)^2 - \lambda[(u_{\alpha}^-)^2 + (u_{\beta}^-)^2]} \quad (15)$$

$$\vec{i}_{\beta\text{ref}}^- = \frac{2P_0}{3} \cdot \frac{\lambda u_{\beta}^-}{(u_{\alpha}^+)^2 + (u_{\beta}^+)^2 + \lambda[(u_{\alpha}^-)^2 + (u_{\beta}^-)^2]} + \frac{2Q_0}{3} \cdot \frac{\lambda u_{\alpha}^-}{(u_{\alpha}^+)^2 + (u_{\beta}^+)^2 - \lambda[(u_{\alpha}^-)^2 + (u_{\beta}^-)^2]} \quad (16)$$

式中， λ 表示调节系数。

式 (15) 和式 (16) 中，当 $\lambda = -1$ 时可以实现恒定有功控制。当 $\lambda = 1$ 时可以实现恒定无功控制。 $\lambda = 0$ 时可以实现平衡电流控制。为了实现有功功率、无功功率-电流的协调控制，结合上述 3 种控制，将 λ 定义在连续区间内，取值范围是 $-1 \leq \lambda \leq 1$ ，通过调节 λ 的值可以实现具有功率-电流连续调节功能的协调控制。

2.2 控制器设计

本文采用静止坐标系控制策略，在设计电流环控制器时，由于 α 、 β 轴电流环对称，则其电流环控制器设计相同，因此下面将只对 α 轴进行分析，电流环控制结构如图 4 所示。

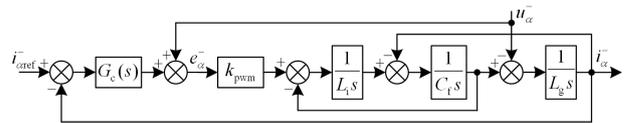


图 4 电流环控制框图

Fig. 4 Control diagram of current-loop

在低频条件下，LCL 滤波器的频率特性几乎与 L 滤波器相同，忽略其中电容的作用。故在设计控制器时，将 LCL 滤波器等效为 $L_T = L_{it} + L_g$ 的单 L 滤波器来考虑。为单 L 滤波器的电流环开环传递函数为一阶系统，本文采用准谐振补偿器，该控制器的传递函数表达式为

$$G_{\text{PR}} = k_p + k_r \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (17)$$

若要实现对含有波动的电流控制指令进行稳态和动态调节, 亦可以使用准降阶谐振补偿器的控制器, 该控制器的传递函数表达式为

$$G_{\text{PIR}} = k_p + \frac{k_r \omega_c}{s - j\omega_0 + \omega_c} \quad (18)$$

式中, k_p 、 k_r 、 ω_c 及 ω_0 分别为准降阶谐振补偿器的比例系数、谐振系数、控制器带宽及谐振角频率。因控制器中存在复数 j , 为复数域控制器, 控制器的实现有一定困难。可采用图 5 所示的方法进行实现。

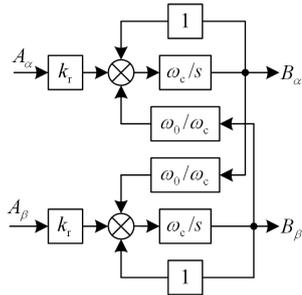
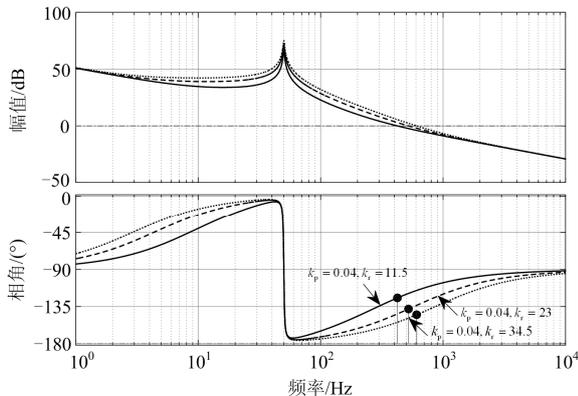


图 5 准降阶谐振补偿器的具体实现

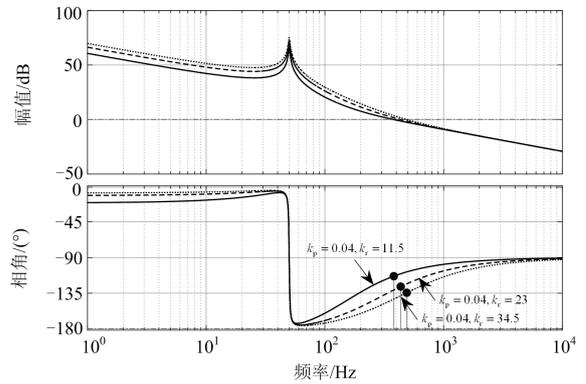
Fig. 5 Implementation of the reduced order quasi-resonant compensator

对于电流环控制器的实现问题, 以及控制器对系统稳定性问题相关文献给出了详细的设计和实现依据^[19-21], 此处不再赘述。图 6 绘制了基于静止坐标系下准谐振补偿器和准降阶谐振补偿器的电流环开环传递函数伯德图。

如图 6 所示, 当控制器的 k_p 、 k_r 、 ω_c 及 ω_0 的参数设定值相同时, 准谐振补偿器的控制器控制效果与准降阶谐振补偿器的控制器控制效果基本相同。当准谐振补偿器的控制器参数 $k_p=0.04$ 、 $k_r=11.5$ 时, 其截止频率和相位裕度分别为 423 Hz 和 55.5°, 电流环能够获得满意的稳态和动态性能。



(a) 准PR控制器参数 k_r 改变时



(b) 准降阶谐振控制器参数 k_r 改变时

图 6 电流环开环传递函数伯德图

Fig. 6 Open-loop Bode plot of current-loop

3 仿真分析

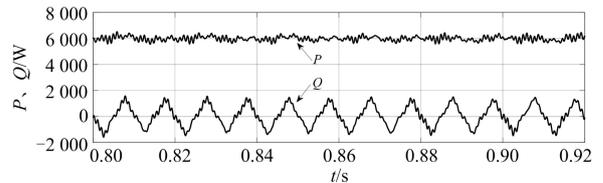
为了验证本文所提控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 软件环境下搭建了如图 3 所示的 VSG 功率-电流协调控制的仿真模型, 其仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型参数

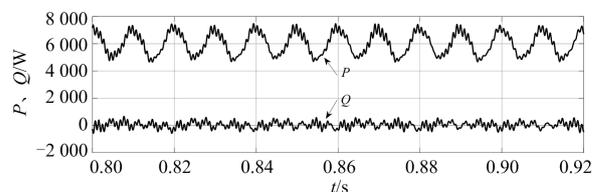
Table 1 Parameters of simulation model

参数名称	取值及单位
直流电源 U_{dc}	700 V
线电压有效值	380 V
逆变器侧电感 L_i	3.2 mH
并网侧电感 L_g	3.2 mH
滤波电容 C_f	5.5 μ F
逆变器开关频率 f_{sw}	10 kHz
有功参考值 P_{ref}	6 kW
无功参考值 Q_{ref}	0 var

对 VSG 在不平衡电网电压下的控制策略进行了仿真验证, 电网电压的设定值为: A 相电压跌落到额定电网电压 70%, BC 相电压仍维持在额定电网电压。



(a) $\lambda=-1$ 时恒定有功控制



(b) $\lambda=1$ 时恒定无功控制

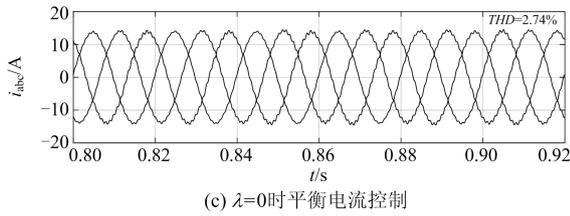


图 7 $\lambda=-1, 1$ 及 0 时的仿真结果

Fig. 7 Simulation results with $\lambda=-1, 1$ or 0

在不平衡电网电压条件下，图 7(a)为恒定有功控制的仿真结果，有功功率的波动峰值减小为 0.4 kW 左右，无功功率存在波动，波动峰值约为 1.8 kvar；图 7(b)为恒定无功控制的仿真结果，无功功率的波动峰值减小为 0.4 kW 左右，有功功率存在波动，波动峰值约为 1.6 kW；图 7(c)为平衡电流控制的仿真结果，电流幅值为 13.4 A，且电流谐波畸变率 $THD=2.74\%$ ，满足分布式发电系统的电流谐波畸变率不能超过 5% 的标准。

图 8 为 $-1 \leq \lambda \leq 0$ 时的仿真结果，可以从图中看出，随着调节系数 λ 的逐渐增加，三相并网电流在静止坐标系下的幅值逐渐从不平衡状态过度到平衡状态，有功功率振荡幅值逐渐增大，而无功功率振荡幅值逐渐减小。图 9 为 $0 \leq \lambda \leq 1$ 的仿真结果，随着调节系数 λ 的增加，功率振荡幅值大小的变动与图 8 仿真结果相同，不同的是并网电流幅值逐渐从不平衡状态过度到平衡状态。仿真结果验证了本文所提控制策略具有良好的动态性能。因此，通过改变调节系数 λ 的大小，便可实现输出功率-电流的协调控制，以满足不同电力系统的要求。

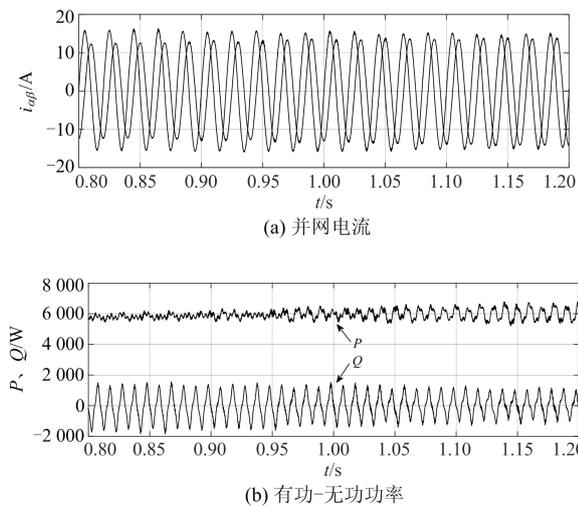


图 8 $-1 \leq \lambda \leq 0$ 时的仿真结果

Fig. 8 Simulation results with $-1 \leq \lambda \leq 0$

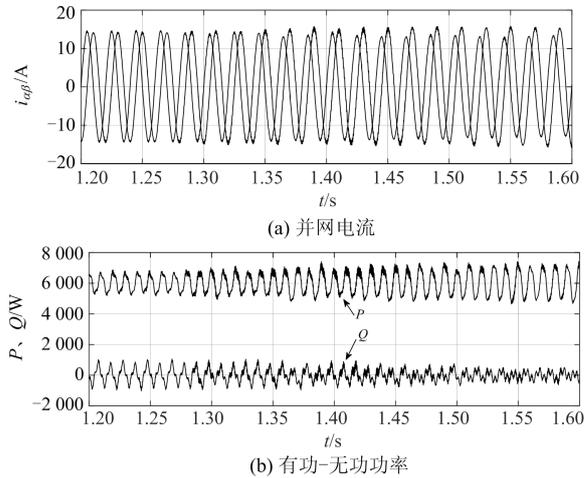


图 9 $0 \leq \lambda \leq 1$ 时的仿真结果

Fig. 9 Simulation results with $0 \leq \lambda \leq 1$

4 结论

本文提出的不平衡电网下基于静止坐标系下虚拟同步发电机功率-电流协调控制策略。根据瞬时功率计算负序电流参考值，建立了恒定有功、无功及电流平衡 3 个控制目标的统一解析表达式，实现功率-电流的协调控制，提高了系统运行性能。该控制策略无需锁相环、控制结构简单，能根据不同的电网需求实现不同的控制目标。仿真结果验证了本文所提方案的有效性。

参考文献

- [1] BLAABJERG F, TEODORESCU R, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [2] AKTARUJAMAN M, HAQUE M E, MUTTAQI K M, et al. Control stabilization of multiple distributed generation[C] // Power Engineering Conference, 2007 AUPEC 2007 Australasian Universities, December 9-12, 2007, Perth, WA, Australia: 1-5.
- [3] LIU Ju, YANG Dongjun, YAO Wei, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 429-437. DOI: 10.1186/s41601-017-0070-0.
- [4] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine[C] // Proceedings of 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, October 9-11, 2007, Barcelona, Spain: 1-6.
- [5] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 89-93.
- DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianhui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2009, 33(8): 89-93.
- [6] ZHONG Q, WEISS G. Synchronverter: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [7] 王思耕, 葛宝明, 毕大强. 基于虚拟同步发电机的风电场并网控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 49-54.
WANG Sigeng, GE Baoming, BI Daqiang. Control strategies of grid-connected wind farm based on virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 49-54.
- [8] 祝钧, 李瑞生, 毋炳鑫, 等. 交直流混合微电网接口变换器虚拟同步发电机控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 28-34.
ZHU Jun, LI Ruisheng, WU Bingxin, et al. Virtual synchronous generator operation of interlinking converter between AC and DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 28-34.
- [9] 朱晓荣, 刘世鹏, 张海宁, 等. 不平衡电网电压下光伏并网逆变器滑膜直接电压/功率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 133-140.
ZHU Xiaorong, LIU Shipeng, ZHANG Haining, et al. Sliding mode control based direct voltage/power control strategy for PV grid connected inverter under grid voltage[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 133-140.
- [10] PEDRO R, ADRIAN V T, REMUS T, et al. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2583-2592.
- [11] 万晓凤, 胡海林, 余运俊, 等. 电网电压不平衡时的改进虚拟同步机控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3573-3581.
WAN Xiaofeng, HU Hailin, YU Yunjun, et al. An improved control strategy for virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage condition[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3573-3581.
- [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): 904-909.
CHEN Tianyi, CHEN Laijun, WANG Yuchen, et al. Balanced current control of virtual synchronous generator considering unbalanced grid voltage[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 904-909.
- [13] 何安然, 侯凯, 王小红, 等. 不对称条件下的储能虚拟同步发电机低电压穿越控制技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 122-127.
HE Anran, HOU Kai, WANG Xiaohong, et al. A low voltage ride through control technique for energy storage virtual synchronous generator under asymmetric condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 122-127.
- [14] 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.
- [15] 吴恒, 阮新波, 杨东升, 等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6508-6518.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng, et al. Modeling of the power loop and parameter design of virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6508-6518.
- [16] 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): 336-348.
ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-348.
- [17] DEPENBROCK M, STAUDT V, WREDE H. A theoretical investigation of original and modified instantaneous power theory applied to four-wire systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(4): 1160-1168.
- [18] 郭小强, 张学, 卢志刚. 不平衡电网电压下光伏并网逆变器功率/电流质量协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 346-353.
GUO Xiaoqiang, ZHANG Xue, LU Zhigang. Coordinate control of power and current quality for grid-connected PV inverters under unbalanced grid voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 346-353.
- [19] 赵新, 金新民, 周飞, 等. 采用降阶谐振调节器的并网逆变器锁频环技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 38-44.
ZHAO Xin, JIN Xinmin, ZHOU Fei, et al. A frequency-locked loop technology of grid-connected inverters based on the reduced order resonant controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 38-44.
- [20] 叶吉亮, 李岚, 刘海震, 等. 电网电压不平衡及谐波状态下的并网逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 113-119.
YE Jiliang, LI Lan, LIU Haizhen, et al. Control strategy of grid-connected inverter under unbalanced and harmonic voltage condition[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 113-119.
- [21] 屈克庆, 李文旗, 赵晋斌, 等. 孤岛微网不平衡负荷下控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 8-14.
QU Keqing, LI Wenqi, ZHAO Jinbin, et al. Islanded microgrid control strategy under unbalanced loads[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 8-14.

收稿日期: 2018-04-07; 修回日期: 2018-07-11

作者简介:

杨明(1982—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新能源并网发电系统等; E-mail: yangming0391@163.com

高龙将(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网发电系统; E-mail: gaolongjiang7@163.com

王海星(1971—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为特种电机及其控制。E-mail: 714091990@qq.com

(编辑 周金梅)