

不平衡电压下虚拟同步发电机功率控制策略

肖湘宁, 陈 萌

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 通过对电网电压不平衡下虚拟同步发电机输出功率的分析, 提出了基于静止坐标系的功率控制策略, 在不需要锁相环的情况下, 利用负序电压控制分别对有功、无功功率振荡或三相电流不平衡进行抑制, 既保证了虚拟同步发电机电压控制的电压源性质和惯性特性, 又能够使分布式电源根据不同需求输出恒定的有功、无功功率或三相平衡电流。利用 PSCAD/EMTDC 软件仿真及基于 RTDS 的实时数字物理闭环实验, 验证了所提控制策略的有效性, 并对各控制策略的特性进行了量化分析。

关键词: 分布式电源; 虚拟同步发电机; 不平衡电网电压; 功率振荡; 正序和负序分量; 功率控制

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.026

0 引言

能源和环境问题的日益突出促使传统垂直一体化的电网结构面临深刻变革, 以光伏、风电等可再生能源为核心的分布式电源 DG(Distributed Generator)将在新一代电网中扮演越来越重要的角色^[1]。目前, 大多数 DG 都需要通过 DC/AC 逆变器接入电网, 而为了实现对这类电力电子逆变电源的灵活控制, 先后提出了基于电流调节的 PQ 控制策略以及具备孤岛运行能力的 V/f 和下垂控制策略^[2]。

随着电网中 DG 渗透率的提高, 电力电子接口低惯性和欠阻尼的特点将给系统的稳定运行带来负面影响^[3-4]。为解决此问题, 借鉴传统电力系统同步发电机运行方式, 有学者提出虚拟同步发电机^[3-5]VSG(Virtual Synchronous Generator)的控制策略, 即通过合适的控制算法, 使逆变电源具有同步发电机的运行特性, 特别是具有惯性和阻尼特性。VSG 能够有效地提高电网对 DG 的消纳能力, 因而得到了国内外的广泛关注。文献[4]详细研究了 VSG 在微电网中的应用, 讨论了参数扰动对控制性能的影响, 以及惯性和阻尼系数的整定方法, 并设计了 VSG 的无缝切换控制策略。文献[5]进一步利用小信号模型对 VSG 功率控制环的解耦特性进行了分析, 并在此基础上给出了 VSG 控制参数的设计方法。除此之外, 有关文献还对 VSG 频率控制^[6]以及 VSG 在新能源发电^[7]和柔性直流输电^[8]中的应用等方面进行了研究。但是, 上述研究均在电网电压对称的前提下进行。

与传统电压源换流器 VSC(Voltage Source Converter)的控制方式类似, 当电网电压由于不对称负载、扰动或系统故障而出现三相不平衡时, 负序分量的出现会导致 VSG 输出电流不平衡, 严重恶化系统电流质量, 同时输出功率中将出现 2 倍频的振荡^[9-10], 一方面有功功率振荡与 VSG 直流电压波动对应, 会使交流系统产生谐波并可能引起直流过电压; 另一方面, 不平衡电网电压会使风机电磁转矩产生波动, 影响风机正常运行, 而该波动与输出无功功率的振荡对应^[11]。因此, 对不平衡电网下 VSG 输出电流和功率的合理控制对维持系统稳定运行具有重要意义。针对该问题, 文献[12]针对不同的应用场景提出了 5 种电流指令的生成方法, 以实现对 DG 输出有功功率的灵活控制。而针对 VSC 输出功率和电流质量问题, 文献[13]提出了一种加权控制方法, 通过改变调节系数使控制目标在输出恒定功率和消除谐波电流之间实现折中。在保证输出电流正弦的条件下, 文献[14]基于 dq 旋转坐标系提出了功率振荡控制策略, 给出了 3 种控制目标下的电流指令计算方法, 并同样利用加权思想实现了控制目标的整合。然而, 上述控制方法均基于电流源型控制的 VSC, 若直接将其应用于电压源型控制的 VSG 将使 VSG 失去模拟同步发电机的意义^[15]。文献[16]基于虚拟阻抗法提出了不平衡与非线性混合负载下 VSG 的控制策略, 能够降低输出电压的谐波含量和不平衡度, 实现不平衡负载的均分, 但是并未涉及电网电压不平衡条件下的功率振荡和电流不平衡问题。文献[15]基于负序电流抑制方法, 使 VSG 能够在电网不平衡时输出三相平衡电流。类似地, 文献[17]设计了 dq 坐标下的功率抑制策略, 利用线路方程将 VSG 电压输出转化为电流正负序参考, 实现有功或无功功率的恒定输出, 但是线路参数的不准确及不平衡电压下锁相环 PLL(Phase Locked Loop)特性的恶化

收稿日期: 2017-01-12; 修回日期: 2017-06-14

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015AA-050603); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2016XS01)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2015AA050603) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2016XS01)

会影响控制系统的动态特性,同时旋转坐标变换及较复杂的电流指令计算方法将增加控制结构的复杂程度,且计算量较大。因此,如何消除功率振荡、实现 VSG 恒定功率输出等问题还有待进一步讨论。

本文首先对基于 VSG 的逆变电源控制策略进行了介绍,在此基础上提出了一种适用于电网电压不平衡的基于静止坐标系下负序电压控制的 VSG 功率控制策略,无需锁相环,控制结构及指令计算方法简单。给出了相应控制目标下的负序电压参考指令计算方法,在保持 VSG 电压源型控制的性质和惯性特性的前提下,使输出有功、无功功率保持恒定或三相电流平衡。利用 PSCAD/EMTDC 及基于 RTDS 的实时数字物理闭环实验对所提控制方法的有效性进行了验证,并对各控制策略进行了量化分析。

1 VSG 的实现原理

通过在 VSG 控制中嵌入同步发电机方程可以使 DG 表现出同步发电机的特性。VSG 的基本原理可由图 1 说明。图中 VSG 的拓扑结构由 VSC 和 LC 滤波器组成,其中 $V_{T1} \sim V_{T6}$ 为 IGBT 开关管; R_f, L_f, C_f 分别为滤波器等效电阻、滤波电感和滤波电容;VSC 直流电源为 DG 及储能单元, U_{dc} 和 C_{dc} 分别为等效直流电源及直流电容;VSG 经公共耦合点(PCC)与电网进行能量交换,其中 R_g 和 L_g 分别为电网等效电阻和电感。

VSG 的控制主要包括三部分:有功-频率控制、无功-电压控制和参考电压生成。其中有功-频率控制主要模拟同步发电机的转子运动方程,数学模型如下^[18-20]:

$$\begin{cases} P_{ref}-P-K_D(\omega-\omega_{grid})=2Hd\omega/dt \\ d\theta/dt=\omega \end{cases} \tag{1}$$

其中, P_{ref} 和 P 分别为 VSG 有功功率参考值和实际值; ω 和 ω_{grid} 分别为虚拟转子角频率和电网角频率,后者可通过锁相环得到; K_D 和 H 分别为阻尼系数和惯性常数,同步发电机通过机械转子动能提供保持系统稳定所必需的惯性,而对于 VSG 则需要利用储能系统在动态过程中吸收和输出能量,以提供必要的虚拟惯性; θ 为 VSG 相位角。无功-电压控制的数学模型如下:

$$E=E_0+\frac{k_v}{s}(Q_{ref}-Q) \tag{2}$$

其中, E_0 和 E 分别为 VSG 空载电势和输出电势幅值; Q_{ref} 和 Q 分别为无功功率参考值和实际值; k_v 为积分系数。

利用式(1)、(2)得到的 VSG 相位角和输出电势参考值可进一步根据式(3)生成三相电压参考,用于脉宽调制(PWM)得到 IGBT 的触发脉冲 $g_1 \sim g_6$ 。

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

2 电网电压不平衡时 VSG 数学模型

考虑图 1 所示的三相三线制系统,当电网电压不对称时,系统中出现负序分量。此时,利用 Clark 变化,VSG 输出电压、电流可以表示为^[21]:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha^+ + u_\alpha^- \\ u_\beta^+ + u_\beta^- \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_{g\alpha} \\ i_{g\beta} \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{g\alpha}^+ + i_{g\alpha}^- \\ i_{g\beta}^+ + i_{g\beta}^- \end{bmatrix} \end{cases} \tag{4}$$

$$T_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

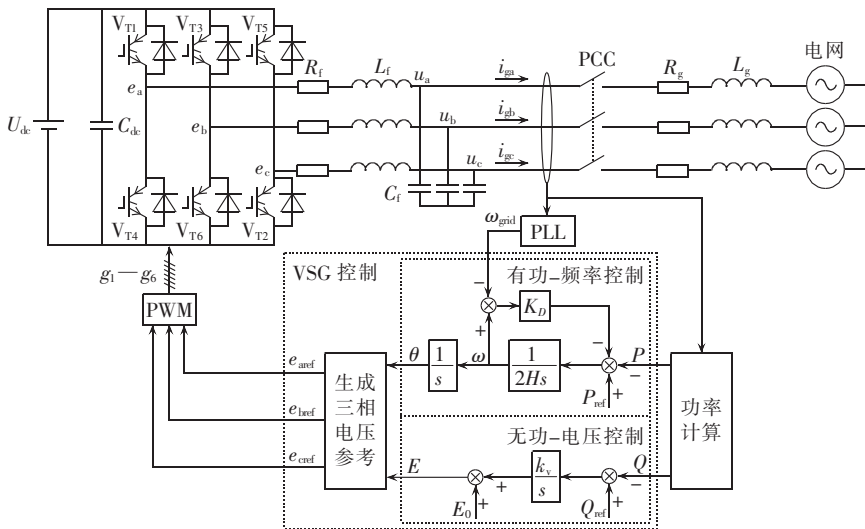


图 1 VSG 基本原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of VSG

其中,下标 α 、 β 表示电压、电流在两相静止坐标系中的分量;上标 +、- 表示对应量的正序、负序分量。

根据瞬时功率理论,VSG 向电网注入的瞬时功率可以表示为:

$$\begin{cases} p = u_{\alpha} i_{g\alpha} + u_{\beta} i_{g\beta} \\ q = u_{\beta} i_{g\alpha} - u_{\alpha} i_{g\beta} \end{cases} \quad (6)$$

将式(4)代入式(6)可将功率分解为平均分量和波动分量两部分,即:

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \bar{p} = u_{\alpha}^+ i_{g\alpha}^+ + u_{\alpha}^- i_{g\alpha}^- + u_{\beta}^+ i_{g\beta}^+ + u_{\beta}^- i_{g\beta}^- \\ \bar{q} = u_{\beta}^+ i_{g\alpha}^+ + u_{\beta}^- i_{g\alpha}^- - u_{\alpha}^+ i_{g\beta}^+ - u_{\alpha}^- i_{g\beta}^- \\ \tilde{p} = u_{\alpha}^+ i_{g\alpha}^- + u_{\alpha}^- i_{g\alpha}^+ + u_{\beta}^+ i_{g\beta}^- + u_{\beta}^- i_{g\beta}^+ \\ \tilde{q} = u_{\beta}^+ i_{g\alpha}^- + u_{\beta}^- i_{g\alpha}^+ - u_{\alpha}^+ i_{g\beta}^- - u_{\alpha}^- i_{g\beta}^+ \end{cases} \quad (8)$$

其中,顶标 $-$ 、 $\sim$ 分别表示功率的平均分量和波动分量。进一步可将功率的波动分量分解为 2 倍频的正弦和余弦分量,如下所示:

$$\begin{aligned} \tilde{p} &= P_{s2} \sin(2\omega t) + P_{c2} \cos(2\omega t) \\ P_{s2} &= (u_{\alpha}^+ i_{g\alpha}^- + u_{\alpha}^- i_{g\alpha}^+ + u_{\beta}^+ i_{g\beta}^- + u_{\beta}^- i_{g\beta}^+) \sin(2\omega t) + \\ &\quad (u_{\alpha}^+ i_{g\beta}^- + u_{\beta}^+ i_{g\alpha}^- - u_{\alpha}^- i_{g\beta}^+ - u_{\beta}^- i_{g\alpha}^+) \cos(2\omega t) \\ P_{c2} &= (u_{\alpha}^+ i_{g\alpha}^- + u_{\alpha}^- i_{g\alpha}^+ + u_{\beta}^+ i_{g\beta}^- + u_{\beta}^- i_{g\beta}^+) \cos(2\omega t) - \\ &\quad (u_{\alpha}^+ i_{g\beta}^- + u_{\beta}^+ i_{g\alpha}^- - u_{\alpha}^- i_{g\beta}^+ - u_{\beta}^- i_{g\alpha}^+) \sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \tilde{q} &= Q_{s2} \sin(2\omega t) + Q_{c2} \cos(2\omega t) \\ Q_{s2} &= (u_{\beta}^+ i_{g\alpha}^- + u_{\beta}^- i_{g\alpha}^+ - u_{\alpha}^+ i_{g\beta}^- - u_{\alpha}^- i_{g\beta}^+) \sin(2\omega t) + \\ &\quad (u_{\alpha}^+ i_{g\alpha}^- + u_{\beta}^+ i_{g\beta}^- - u_{\beta}^- i_{g\alpha}^+ - u_{\alpha}^- i_{g\beta}^+) \cos(2\omega t) \\ Q_{c2} &= (u_{\beta}^+ i_{g\alpha}^- + u_{\beta}^- i_{g\alpha}^+ - u_{\alpha}^+ i_{g\beta}^- - u_{\alpha}^- i_{g\beta}^+) \cos(2\omega t) - \\ &\quad (u_{\alpha}^+ i_{g\alpha}^- + u_{\beta}^+ i_{g\beta}^- - u_{\beta}^- i_{g\alpha}^+ - u_{\alpha}^- i_{g\beta}^+) \sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, P_{s2} 和 P_{c2} 为有功功率波动分量的幅值; Q_{s2} 和 Q_{c2} 为无功功率波动分量的幅值。根据式(9)、(10)可知,当电网电压不平衡时,VSG 输出有功和无功功率波动分量均由 2 倍频率的正弦和余弦分量组成,而其幅值受电压正、负序分量的影响。本文所提控制策略中,电压正序分量由正序 VSG 控制得到以保证输出功率平均分量的无差跟踪及惯性特性。因此,

通过电压负序分量的控制能够改变 VSG 输出功率波动分量中正、余弦分量的幅值,进而实现对功率波动分量的控制。当有功波动分量中的正、余弦分量幅值为零时,可以实现恒有功功率输出;当无功波动分量中的正、余弦分量幅值为零时,可以实现恒无功功率输出。

3 VSG 功率控制策略

所提出的基于两相静止坐标系的 VSG 控制策略如图 2 所示。分别提取电压、电流的正负序分量用于 VSG 控制,生成电压的正负序参考后经过 Clark 反变换转换为三相电压参考。正序电压参考如下:

$$\begin{cases} e_{\alpha\text{ref}}^+ = \sqrt{\frac{3}{2}} E^+ \sin\theta \\ e_{\beta\text{ref}}^+ = -\sqrt{\frac{3}{2}} E^+ \cos\theta \end{cases} \quad (11)$$

该控制策略保留了 VSG 电压源型控制的性质和惯性特性,同时,通过对负序分量的控制可以实现对功率振荡的调节,以满足不同的应用要求。

该控制策略需首先提取电压、电流的正负序分量。根据对称分量法可知:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_a^+ \\ F_b^+ \\ F_c^+ \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} F_a^- \\ F_b^- \\ F_c^- \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, F 代表电压 u 或电流 i_g ; $a = e^{j(2\pi/3)}$ 。对式(12)两端同时左乘 Clark 变换矩阵可得:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_{\alpha}^+ \\ F_{\beta}^+ \end{bmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -b \\ b & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{\alpha} \\ F_{\beta} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} F_{\alpha}^- \\ F_{\beta}^- \end{bmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & b \\ -b & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{\alpha} \\ F_{\beta} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $b = e^{-j(\pi/2)}$, 表示 90° 的滞后因子。因此,可利用二阶广义积分正交信号发生器 SOGI-QSG(Second-

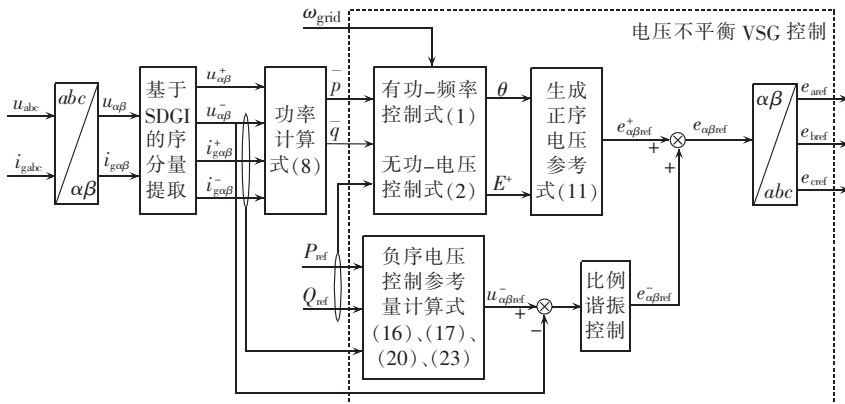


图 2 电压不平衡下的 VSG 控制策略

Fig.2 VSG control strategy under unbalanced voltage

Order Generalized Integrator Quadrature Signal Generator)分离正负序分量^[22]。SOGI-QSG 的结构如图 3 所示,图中 k 为比例增益, ω' 为谐振频率。可以证明,输出信号 qF' 始终滞后 F 90° 。文献[22]已经对 SOGI 的设计进行了较详尽的研究。本文可根据式(9)~(11)得到负序电容电压参考值,用于功率振荡的调节。下面讨论不同应用需求下指令值的计算方法。

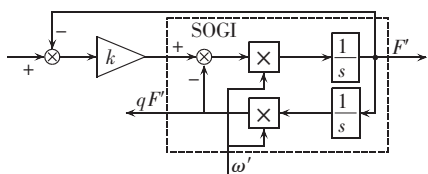


图 3 SOGI-QSG 结构框图

Fig.3 Block diagram of SOGI-QSG structure

a. 有功功率振荡控制。

在保证 VSG 输出电流正弦的条件下,有功功率振荡和无功功率振荡不能同时消除。当要求输出有功功率恒定时,有功功率波动分量的幅值为 0,即如式(14)所示。

$$\begin{cases} \bar{p} = P_{\text{ref}} \\ \bar{q} = Q_{\text{ref}} \\ P_{s2} = P_{c2} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)与式(9)、(10)联立得到:

$$\begin{bmatrix} i_{g\alpha}^+ & i_{g\beta}^+ & i_{g\alpha}^- & i_{g\beta}^- \\ -i_{g\beta}^+ & i_{g\alpha}^+ & -i_{g\beta}^- & i_{g\alpha}^- \\ i_{g\alpha}^- & i_{g\beta}^- & i_{g\alpha}^+ & i_{g\beta}^+ \\ i_{g\beta}^- & -i_{g\alpha}^- & -i_{g\beta}^+ & i_{g\alpha}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha}^+ \\ u_{\beta}^+ \\ u_{\alpha}^- \\ u_{\beta}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\text{ref}} \\ Q_{\text{ref}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

解得:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}^- \\ u_{\beta}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{i_{g\alpha}^-}{M} & -\frac{i_{g\beta}^-}{N} \\ -\frac{i_{g\beta}^-}{M} & \frac{i_{g\alpha}^-}{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\text{ref}} \\ Q_{\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{cases} M = (i_{g\alpha}^+)^2 + (i_{g\beta}^+)^2 - (i_{g\alpha}^-)^2 - (i_{g\beta}^-)^2 \\ N = (i_{g\alpha}^+)^2 + (i_{g\beta}^+)^2 + (i_{g\alpha}^-)^2 + (i_{g\beta}^-)^2 \end{cases} \quad (17)$$

b. 无功功率振荡控制。

与式(15)类似,当要求输出无功功率恒定时,无功功率波动分量的幅值为 0,因此有:

$$\begin{cases} \bar{p} = P_{\text{ref}} \\ \bar{q} = Q_{\text{ref}} \\ Q_{s2} = Q_{c2} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

将式(18)与式(9)、(11)联立得到:

$$\begin{bmatrix} i_{g\alpha}^+ & i_{g\beta}^+ & i_{g\alpha}^- & i_{g\beta}^- \\ -i_{g\beta}^+ & i_{g\alpha}^+ & -i_{g\beta}^- & i_{g\alpha}^- \\ -i_{g\beta}^- & i_{g\alpha}^- & -i_{g\beta}^+ & i_{g\alpha}^+ \\ i_{g\alpha}^- & i_{g\beta}^- & -i_{g\alpha}^+ & -i_{g\beta}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha}^+ \\ u_{\beta}^+ \\ u_{\alpha}^- \\ u_{\beta}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\text{ref}} \\ Q_{\text{ref}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

解得:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}^- \\ u_{\beta}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{i_{g\alpha}^-}{N} & \frac{i_{g\beta}^-}{M} \\ \frac{i_{g\beta}^-}{N} & -\frac{i_{g\alpha}^-}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\text{ref}} \\ Q_{\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

c. 平衡电流控制。

当要求 VSG 输出电流为正弦三相平衡时,有功和无功功率的振荡均不能消除。此时,在保证 VSG 输出功率的平均分量与指令值一致的同时,要求输出电流的负序分量为 0,即有:

$$\begin{cases} \bar{p} = P_{\text{ref}} \\ \bar{q} = Q_{\text{ref}} \\ i_{g\alpha}^- = i_{g\beta}^- = 0 \end{cases} \quad (21)$$

当电流负序分量为 0 时,逆变器出口电压和滤波电容电压负序分量相等,即满足:

$$\begin{cases} e_{\alpha}^- = u_{\alpha}^- \\ e_{\beta}^- = u_{\beta}^- \end{cases} \quad (22)$$

因此,可基于滤波器的负序数学模型设定电容电压负序分量的参考值为:

$$\begin{cases} u_{\alpha}^- = u_{\alpha}^- + R_{\text{f}} i_{g\alpha}^- - \omega L_{\text{f}} i_{g\beta}^- \\ u_{\beta}^- = u_{\beta}^- + R_{\text{f}} i_{g\beta}^- + \omega L_{\text{f}} i_{g\alpha}^- \end{cases} \quad (23)$$

4 仿真及实时数字物理闭环实验分析

在 PSCAD/EMTDC 软件中对图 1 所示的 30kW VSG 系统进行了仿真分析。系统参数如下:额定电压 $U_{\text{N}} = 380\text{V}$,额定频率 $f_{\text{N}} = 50\text{Hz}$,电网等效电阻 $R_{\text{g}} = 0.1\Omega$,电网等效电感 $L_{\text{g}} = 3.2\text{mH}$,滤波电感等效电阻 $R_{\text{f}} = 0.1\Omega$,滤波电感 $L_{\text{f}} = 3.2\text{mH}$,滤波电容 $C_{\text{f}} = 7.9\mu\text{F}$,直流电容 $C_{\text{dc}} = 4000\mu\text{F}$ 。仿真开始时,电网电压三相对称,VSG 输出有功和无功功率分别为 0.8 p.u.、0.6 p.u.。 $t = 5\text{s}$ 时,电网 a 相电压暂降为 10%,持续 3s 后恢复正常。此时 VSG 控制对电压不平衡的响应如图 4 所示。当电网电压不平衡时,三相电流同样出现不平衡,其中 b 相电流幅值降低而另两相幅值增加以保证输出功率的平均分量与指令值相同。同时,VSG 输出功率和直流电压中出现 2 倍频率的波动分量。在不平衡出现的瞬间,由于 a 相电压降低,导致无功功率激增,体现了 VSG 对电压的支撑作用。

图 5 为本文所提不平衡控制策略的仿真波形(各子图中从上至下分别对应恒有功功率控制、恒无功功率控制、平衡电流控制)。同时,为了量化不同控制策略的响应特性及对 PCC 电压和电流的影响,对功率波动百分数 λ_x 和 PCC 不平衡度 ε_y 进行计算,公式如式(24)所示,具体结果如表 1 所示。

$$\begin{cases} \lambda_x = \frac{\tilde{x}_{\text{m}}}{x} \times 100\% = \frac{x_{\text{m}} - \bar{x}}{\bar{x}} \times 100\% & x = p, q \\ \varepsilon_y = \sqrt{\frac{(y_{\text{d}}^-)^2 + (y_{\text{q}}^-)^2}{(y_{\text{d}}^+)^2 + (y_{\text{q}}^+)^2}} \times 100\% & y = u, i_{\text{g}} \end{cases} \quad (24)$$

其中,下标 d, q 分别表示对应变量的 d, q 轴分量。

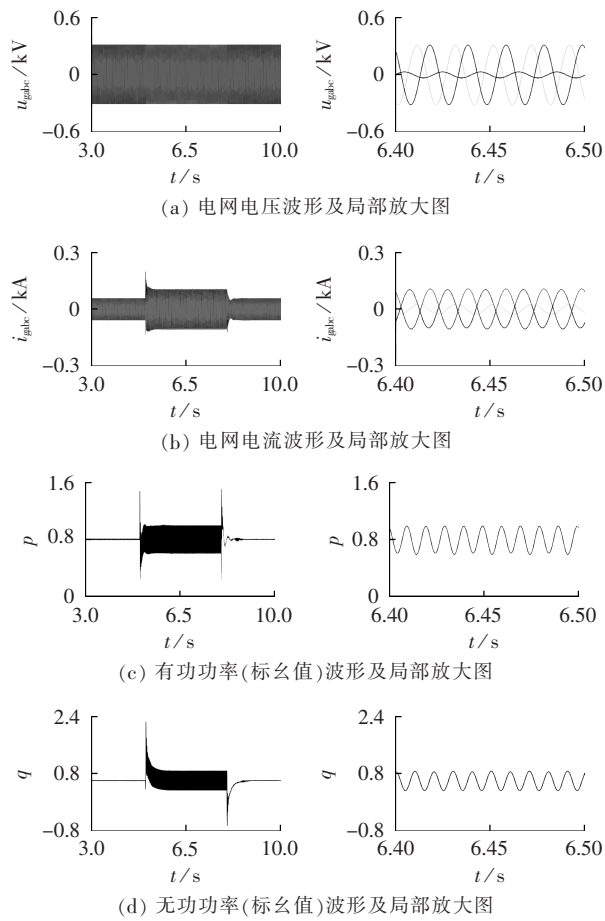


图 4 传统 VSG 控制对电网电压不平衡的响应
Fig.4 Responses of traditional VSG to unbalanced grid voltage

根据图 5,对不同控制策略下 VSG 的响应情况进行说明。

a. 恒有功功率控制。

在这种控制策略下,仍然出现三相电流不平衡及 2 倍频率的无功功率波动分量,但是有功功率振荡得到抑制。尽管如此,由表 1 可以看出,与传统 VSG 控制比较可以看出,无功功率波动及电流不平衡度显著减小。

b. 恒无功功率控制。

与恒有功功率控制相反,在这种控制目标下,有功功率中出现 2 倍频率的波动分量而无功功率能够保持不变。另外,该策略仍不具备平衡三相电流的能力。然而此时有功功率波动百分数增大,同时相比于恒有功功率控制,电流不平衡度增加。

c. 平衡电流控制。

该控制策略能够在电网电压不平衡时保持 VSG 输出三相电流平衡,提高了 VSG 输出电流的质量,同时与其他控制策略相比减小了不平衡条件下的电流幅值。但是,这造成有功和无功功率中同时出现 2 倍频的波动分量。可以看出,此时功率波动的幅值与恒功率控制下相比有所减小,这是由于波动量被

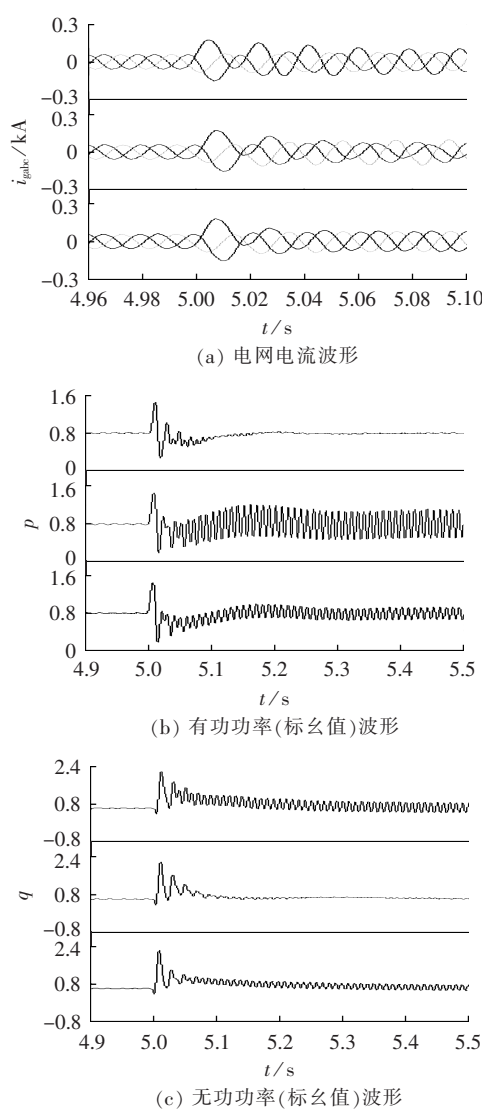


图 5 不平衡控制策略的 VSG 仿真波形
Fig.5 Simulative waveforms of VSG with imbalance control strategy

表 1 不同控制策略量化指标

Table 1 Quantitative indexes of different control modes

控制策略	$\lambda_p/\%$	$\lambda_q/\%$	$\varepsilon_u/\%$	$\varepsilon_i/\%$
传统控制	24.56	44.68	17.75	63.25
恒有功控制	—	37.41	28.75	27.60
恒无功控制	36.46	—	42.10	37.15
平衡电流控制	16.95	22.64	34.70	—

分成有功和无功功率波动分量两部分。

此外,表 1 表明该 3 种控制策略均导致 PCC 电压不平衡度升高,恒有功功率升高幅度最小,恒无功功率升高幅度最大。

为了进一步证明所提控制策略的正确性,在实验室中搭建了基于 RTDS 的实时数字物理闭环实验平台。DSP 采用 TI 公司的 TMS320F2808。利用上位机可以实现对系统监控和有关控制参数输入,图 6 为采用不同控制策略下 VSG 输出功率和电流的实

验波形(各子图中从左到右分别对应传统控制、恒有功功率控制、恒无功功率控制、平衡电流控制)。可见所提出的 3 种控制策略能够实现各自的控制目标,即恒有功、恒无功和平衡电流输出。这与仿真结果一致。

此外,针对不同的电网等效电感,对所提 VSG

控制策略进行了验证,以恒有功功率控制为例,电网等效电感 L_g 分别为 0.1 mH、0.3 mH 和 0.5 mH(分别对应子图中的左、中、右图)时的 RTDS 实时数字物理闭环实验结果如图 7 所示。与图 6 比较,较小的电网等效电感使暂态冲击增大,但均能实现对输出有功功率波动的抑制,表明所提控制策略对不同的

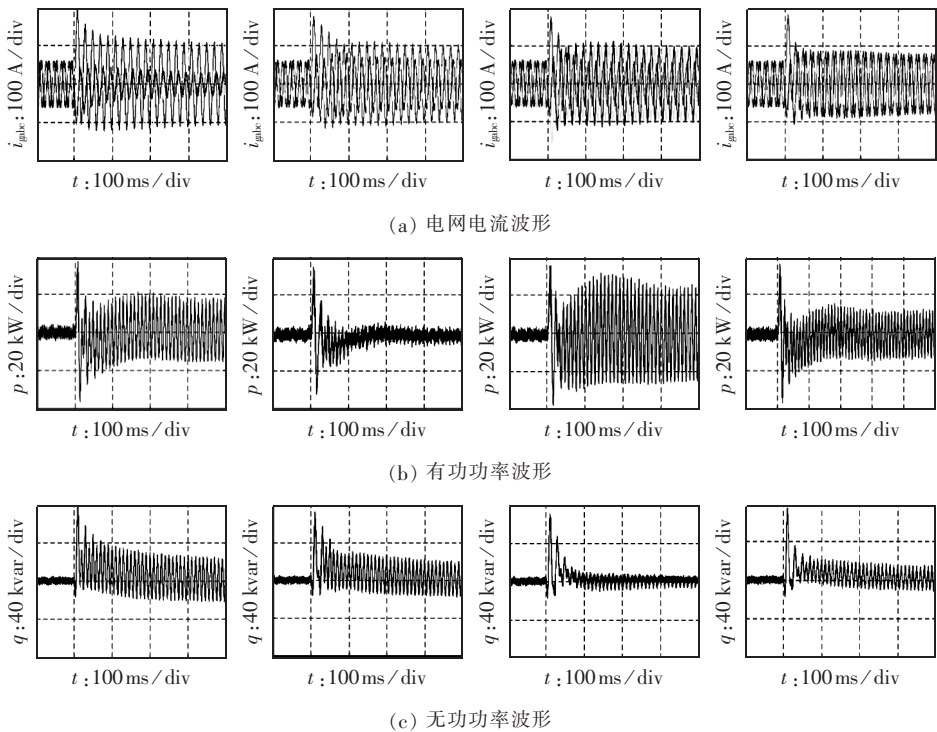


图 6 不平衡控制策略下的 VSG 实验波形

Fig.6 Experimental waveforms of VSG with imbalance control strategy

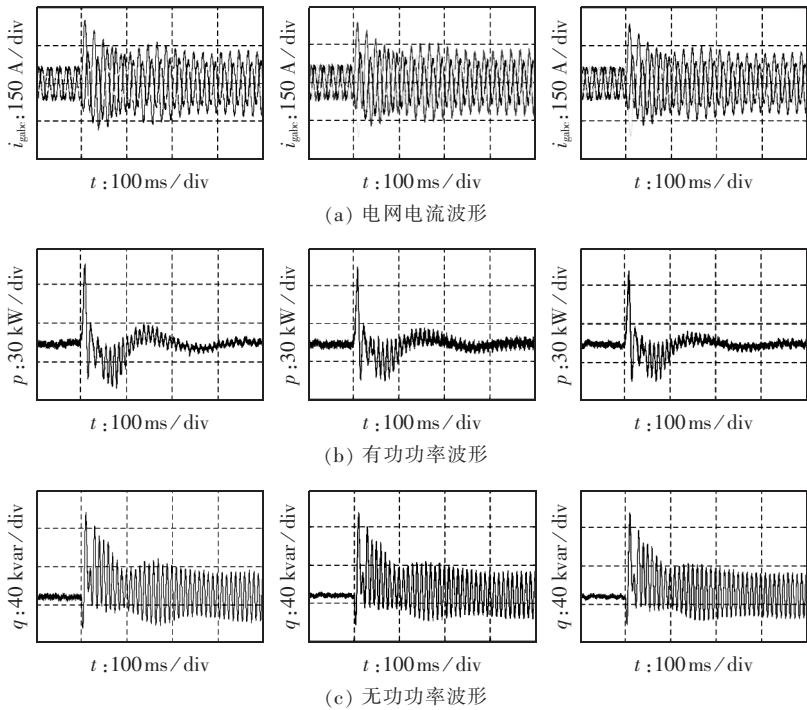


图 7 不同电网等效电感下所提恒有功控制策略的实验波形

Fig.7 Experimental waveforms of constant active-power control mode for different equivalent grid inductances

电网等效电感具有较好的适应性。

5 结论

本文提出了一种适用于电网三相不平衡条件下的VSG控制策略,主要结论如下。

a. 该策略在VSG控制中进一步实现了负序电压控制。基于不平衡电压下VSG的模型给出了负序电压参考值的计算方法,通过采用不同的负序电压参考值,可以实现恒有功功率、恒无功功率和三相电流平衡3种控制目标,能够满足不同的应用需求。

b. 该控制策略基于两相静止坐标系提取VSG输出电压、电流的正负序分量,不需要锁相环且并不依赖电网电压不平衡类型和成因,同时能够保留VSG电压源型控制的性质和惯性特性。

c. PSCAD/EMTDC仿真及基于RTDS的实时数字物理闭环实验证明了所提控制策略的有效性。

参考文献:

- [1] 肖湘宁. 新一代电网中多源多变换复杂交直流系统的基础问题[J]. 电工技术学报,2015,30(15):1-14.
XIAO Xiangning. Basic problems of the new complex AC-DC power grid with multiple energy resources and multiple conversions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015,30(15):1-14.
- [2] 张宸宇,梅军,郑建勇,等. 一种适用于低压微电网的改进型下垂控制器[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):53-59.
ZHANG Chenyu,MEI Jun,ZHENG Jianyong,et al. Improved droop controller for low-voltage microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):53-59.
- [3] ZHONG Q C,GEORGE W. Synchronverters:inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(4):1259-1267.
- [4] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2591-2603.
LÜ Zhipeng,SHENG Wanxing,ZHONG Qingchang,et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2591-2603.
- [5] 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.
- [6] 杨向真,苏建徽,丁明,等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术,2010,34(1):164-168.
YANG Xiangzhen,SU Jianhui,DING Ming,et al. Research on frequency control for microgrid in islanded operation[J]. Power System Technology,2010,34(1):164-148.
- [7] WANG S,HU J,YUAN X. Virtual synchronous control for grid-connected DFIG-based wind turbines[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2015,3(4):932-944.
- [8] GUAN M,PAN W,ZHANG J,et al. Synchronous generator emulation control strategy for Voltage Source Converter(VSC) stations[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(6):3093-3101.
- [9] 王晓刚,肖立业. 不平衡情况下基于电压正反馈的孤岛检测方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):104-108.
WANG Xiaogang,XIAO Liye. Islanding detection method based on voltage positive feedback in unbalance condition[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):104-108.
- [10] NEVES F A S,CARRASCO M,DAVID F M,et al. Unbalanced grid fault ride-through control for single-stage photovoltaic inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2016,31(4):3338-3347.
- [11] NIAN H,SONG Y,ZHOU P,et al. Improved directed power control of a wind turbine driven doubly fed induction generator during transient grid voltage unbalance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2011,26(3):976-986.
- [12] 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.
- [13] 郭小强,张学,卢志刚,等. 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,et al. 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.
- [14] ROOZBEH K,DONALD G,BRENDAN P M. Control of active and reactive power ripple to mitigate unbalanced grid voltages[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2016,52(2):1660-1668.
- [15] 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.
- [16] 石荣亮,张兴,刘芳,等. 不平衡和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.
- [17] ZHENG T,CHEN L,ZHANG H,et al. Control strategy for suppressing power oscillation of virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage[C]//International Conference on Renewable Power Generation. Beijing,China:IET,2015:1-5.
- [18] GAO F,IRAVANI M R. A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(2):850-859.
- [19] 刘世林,文劭宇,高文根,等. 基于飞轮储能的并网风电功率综合调控策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):34-39.
LIU Shilin,WEN Jinyu,GAO Wengen,et al. FESS-based comprehensive control of grid-connecting wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):34-39.

- [20] ZHONG Q C, NGUYEN P L, MA Z, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [21] 郭小强, 刘文钊, 王宝程, 等. 光伏并网逆变器不平衡故障穿越限流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5155-5162.
GUO Xiaoqiang, LIU Wenzhao, WANG Baocheng, et al. Fault ride through control of PV grid-connected inverter with current-limited capability under unbalanced grid voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5155-5162.
- [22] PEDRO R, ALVARO L, IGNACIO C, et al. Multiresonant frequency-

locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 127-138.

作者简介:



肖湘宁

肖湘宁(1953—),男,北京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统中的电力电子技术(E-mail:xxn@ncepu.edu.cn);
陈萌(1991—),男,山东淄博人,博士研究生,主要研究方向为微电网稳定控制(E-mail:chen_free@126.com)。

Power control of virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage

XIAO Xiangning, CHEN Meng

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The output power of virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage is analyzed and a power control strategy based on the stationary frame is proposed, which, without the phase locked loop, applies the negative-sequence voltage control to suppress the active-power oscillation, reactive-power oscillation and unbalanced three-phase currents respectively for ensuring the voltage-source nature and inertia property of the virtual synchronous generators and for enabling the distributed generation to output constant active-power, constant reactive-power or balanced three-phase currents as required. The effectiveness of the proposed control strategy is verified by PSCAD/EMTDC simulations and RTDS-based real-time digital-physical closed-loop experiments, and the features of its different control modes are quantitatively analyzed.

Key words: distributed power generation; virtual synchronous generator; unbalanced grid voltage; power oscillation; positive and negative sequence components; power control

(上接第184页 continued from page 184)

Microgrid economy and stability coordinated optimization considering randomness of renewable energy resource

YANG Jian¹, TANG Fei¹, LIAO Qingfen¹, ZHU Xuedong¹, YAN Bingke²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: Because of the high penetration rate of renewable energy, the stable operation of microgrid is seriously affected. The method of scenarios generation and reduction is applied to build and solve the model of renewable energy randomness. Based on the droop control theory, ITAE index is used to realize the fast judgment of microgrid stability. A strategy considering the randomness of renewable energy sources is proposed to coordinate the economy optimization and stability optimization of microgrid. Results of MATLAB/Simulink simulation verify the correctness and effectiveness of the proposed model and method.

Key words: microgrid; renewable energy; ITAE index; coordinated optimization of economy and stability