

孤岛微电网逆变器不平衡负载下的控制策略

陈强,章心因,吕千云

(南京工程学院 电力工程学院,江苏 南京 211167)

摘要:提出一种孤岛微电网逆变器在不平衡负载下的控制策略,采用分序网络解耦控制,在虚拟同步发电机(VSG)控制的基础上引入自适应负序补偿环。对三相负载不平衡下的电路进行分析,得到逆变器分序网络等效电路和逆变器间负序环流产生机理。通过分序网络解耦控制得到电压环参考电压各序分量,引入分序网络虚拟阻抗改进逆变器各序输出阻抗。正序网络采用VSG控制实现正序调频调压和电流的自主分配,负序网络加入负序补偿环抑制微电网三相电压负序分量。详细分析了微电网电压负序分量与负序补偿系数和逆变器输出电流负序分量的关系。负序补偿环采用自适应控制,在实现微电网三相电压平衡的同时根据逆变器额定容量自主分配输出电流负序分量。建模仿真结果验证了所提控制策略的有效性。

关键词:不平衡负载;孤岛微电网;逆变器;分序网络解耦控制;虚拟同步发电机;自适应负序补偿环

中图分类号:TM 712;TM 464

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202102003

0 引言

伴随新能源分布式发电的发展,由本地负载、分布式电源和储能装置等组成的微电网受到越来越多关注^[1-3]。孤岛微电网系统中以电力电子为接口的逆变器并联运行多采用传统下垂控制,不具备类似同步发电机保持电力系统稳定所具有的旋转惯性和阻尼分量等特性,抗负载扰动调频能力差,为了使得微电网逆变器获得类似同步发电机的工作机理和外特性以提高微电网的稳定运行能力,虚拟同步发电机(VSG)被提出,直流侧储能单元被虚拟成同步发电机的转动惯量,根据同步发电机的机械方程和电磁方程设计逆变器的控制策略^[4-6]。

文献[7-8]对VSG控制和传统下垂控制进行了比较分析,其中文献[8]进一步提出了一种广义下垂控制策略,可灵活设计有功控制环以适应并离网不同需求。文献[9-10]提出基于VSG控制的多逆变器独立微电网控制,其中文献[9]在转动惯量中引入频率变化量形成转动惯量自适应控制,并给出频率跟踪系数、转动惯量和阻尼系数等参数的整定,文献[10]基于状态空间分析调节虚拟定子电抗,实现振荡阻尼和暂态有功的合理分配,通过反向电压下垂特性和交流母线电压预估,实现无功分配。

以上研究是在三相负载平衡的工况下进行的,微电网中通常含有大量三相不平衡负载,独立离网运行时易导致微电网三相电压不平衡^[11]。当公共连接点处三相电压严重不平衡时,感应电机、电力电子装置会工作异常甚至损坏。电能质量国家标准规定

电力系统电压不平衡度允许值为2%,短时不平衡度不超过4%^[12]。为了保证微电网在不平衡负载下正常运行,需对微电网三相电压不平衡进行抑制。三相不平衡负载工况下,三相四桥臂拓扑是一个较为有效的拓扑结构,中线引入其中一个桥臂,以实现三相桥式逆变电路的单相电路解耦控制。文献[13-14]采用三相四桥臂拓扑,其中文献[13]提出一种3次谐波注入与第四桥臂闭环控制结合的改进方法,文献[14]提出基于序网络模型的VSG控制策略,但三相四桥臂拓扑增加了系统的复杂度和硬件成本,降低了可靠性。文献[15]提出基于模型预测控制优化价值函数的分散式控制,并引入干扰模型,但实现较为复杂。文献[16-19]采用下垂控制和虚拟阻抗环,文献[20]基于粒子群优化算法实现孤岛微电网电压不平衡抑制,均通过互联通信线实现分层控制,但互联通信线会影响并联系统的稳定和可靠,且不利于系统扩展。

本文在VSG控制的基础上引入自适应负序补偿环,采用分序网络解耦控制得到电压环参考电压的各序分量,利用分序网络虚拟阻抗改进逆变器输出阻抗。正序网络采用VSG控制,负序网络采用自适应负序补偿控制。通过MATLAB/Simulink建模并进行仿真分析,结果说明所提控制策略能有效抑制不平衡负载引起的微电网三相电压不平衡,抑制环流,实现逆变器之间的各序电流精确分配。

1 VSG控制模型

图1为基于VSG的孤岛微电网逆变器控制拓扑结构图,由VSG控制、电压外环控制、电流内环控制和空间矢量脉宽调制(SVPWM)组成。图中, P 和 Q 分别为逆变器输出有功和无功; U_{dc} 为直流储能电池

收稿日期:2020-07-24;修回日期:2020-12-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577086)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577086)

电压; L 和 C 分别为滤波电感和电容; u_{ref} 为电压环参考电压; u_{inv} 为逆变桥输出电压; u_o 和 i_o 分别为逆变器输出电压和电流; i_L 为滤波电感电流; Z_l 为逆变器与公共连接点之间的线路阻抗; Z_{bl} 为三相平衡负载; Z_{ul} 为三相不平衡负载。

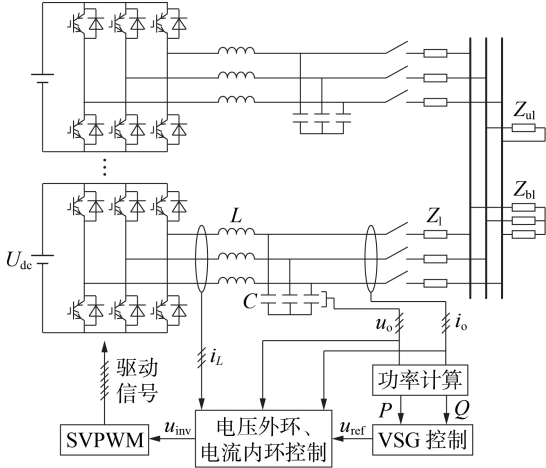


图1 基于VSG的孤岛微电网逆变器主电路拓扑

Fig.1 Main circuit topology of inverters for islanded microgrid based on VSG

根据同步发电机的转子运动方程以及转矩与功率的关系, VSG模拟同步发电机转子转动特性并引入转动惯量和阻尼, 得到有功-频率控制方程为:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega_0} - \frac{P}{\omega_0} - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

其中, J 为转动惯量; P_m 为机械功率; ω 为实际电角速度; ω_0 为给定电角速度; θ 为电角度; D 为阻尼系数。

为模拟同步发电机的一次调频特性, 在VSG有功控制中加入虚拟频率自动调节, P_m 由给定有功功率和自动频率调节器组成, 即:

$$P_m = P_{ref} + k_\omega(\omega_0 - \omega) \quad (2)$$

其中, P_{ref} 为给定有功功率; k_ω 为有功调差系数。

由式(1)和式(2)可以得到有功与频率的稳态关系为:

$$\frac{\omega - \omega_0}{P_{ref} - P} = \frac{1}{D\omega_0 + k_\omega} \quad (3)$$

模拟同步发电机励磁调节功能, 根据无功-电压下垂特性, VSG输出的参考电压幅值 U^* 为:

$$U^* = U_0 + n_Q(Q_{ref} - Q) \quad (4)$$

其中, U_0 为额定电压, 表征VSG空载机端电压; n_Q 为无功调节系数; Q_{ref} 为给定无功功率。

在 dq 坐标系 ($\alpha\beta$ 坐标系与其夹角为 θ) 下, u_{ref} 的 d 、 q 轴分量为:

$$\begin{cases} u_{refd} = U^* \\ u_{refq} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

2 三相负载不平衡下的分析

忽略耦合扰动量, d 轴电压与电流双闭环控制框图如图2所示。图中, $G_v(s)$ 、 $G_i(s)$ 分别为电压环、电流环PI调节器; i_{refd} 为 d 轴电流环参考值; K_{pwm} 为逆变桥增益。

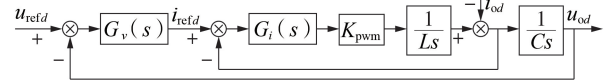


图2 d 轴电压与电流双闭环控制框图

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

电压与电流双闭环控制传递函数 $G(s)$ 、 u_o 的 d 轴分量 $u_{od}(s)$ 和输出阻抗 $Z_o(s)$ 的表达式分别为:

$$G(s) = \frac{G_i(s)G_v(s)}{LCs^2 + G_i(s)G_v(s) + G_i(s)Cs} \quad (6)$$

$$u_{od}(s) = G(s)u_{refd} - Z_o(s)i_{od}(s) \quad (7)$$

$$Z_o(s) = \frac{Ls + G_i(s)}{LCs^2 + G_i(s)G_v(s) + G_i(s)Cs} \quad (8)$$

三相不平衡量可分解为正序、负序2组三相平衡分量, 电压与电流双闭环控制在正序 dq 坐标系实现, u_o 在正序 dq 坐标系下的 d 轴分量表达式为:

$$u_{o(pd)}(s) = u_{o(pd)}^p(s) + u_{o(pd)}^n(s) \quad (9)$$

$$u_{o(pd)}^p(s) = G(s)u_{ref(pd)}^p(s) - Z_o^p(s)i_{o(pd)}^p(s) \quad (10)$$

$$u_{o(pd)}^n(s) = -Z_o^n(s)i_{o(pd)}^n(s) \quad (11)$$

同理可得 u_o 在正序 dq 坐标系下的 q 轴分量表达式为:

$$u_{o(pq)}(s) = u_{o(pq)}^p(s) + u_{o(pq)}^n(s) \quad (12)$$

$$u_{o(pq)}^p(s) = G(s)u_{ref(pq)}^p(s) - Z_o^p(s)i_{o(pq)}^p(s) \quad (13)$$

$$u_{o(pq)}^n(s) = -Z_o^n(s)i_{o(pq)}^n(s) \quad (14)$$

其中, 上标 p 、 n 分别表示物理量的正、负序分量, 下标 (pd) 、 (pq) 分别表示物理量在正序 dq 坐标系下的 d 、 q 轴分量, 如 $u_{o(pd)}^p$ 表示 u_o 的正序分量 u_o^p 在正序 dq 坐标系下的 d 轴分量, 后文其他物理量含义均类似; $u_{ref}^p = u_{ref}$; $Z_o^p = Z_o^n = Z_o$ 。

根据上述分析和对称分量理论, 逆变器分序网络等效电路如图3所示, 将负载等效为电流源。图中, V_{pec} 为微电网三相电压; $i_{o\Sigma}$ 为负荷电流; 下标 x 、 y 分别表示并联的第 x 、 y 台逆变器。根据等效电路, 不平衡负载引起的 i_o 三相不平衡会导致 u_o 和 V_{pec} 的三相不平衡。

逆变器间环流会影响逆变器输出性能, 甚至导致逆变器过流故障。已有较多文献研究正序环

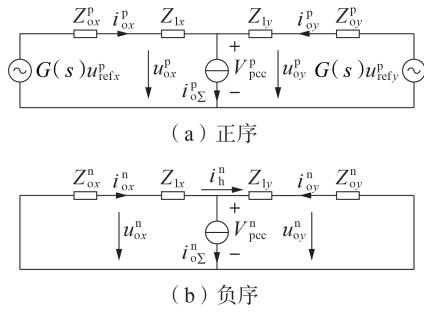


图3 逆变器分序网络等效电路

Fig.3 Sequential network equivalent circuit of inverter

流,因此本文不再赘述,下面对负序环流进行分析。为便于分析,在2台逆变器并联孤岛微电网中分析逆变器间负序环流。

根据图3(b)可得:

$$V_{pcc}^n = -(Z_{lx} + Z_{ox}^n)i_{ox}^n = -(Z_{ly} + Z_{oy}^n)i_{oy}^n \quad (15)$$

令第 x 、 y 台逆变器的容量之比为 m ,则负序环流 i_h^n 为:

$$i_h^n = \frac{1}{m+1}i_{ox}^n - \frac{m}{m+1}i_{oy}^n = -\frac{[(Z_{ly} + Z_{oy}^n) - m(Z_{lx} + Z_{ox}^n)]V_{pcc}^n}{(m+1)(Z_{lx} + Z_{ox}^n)(Z_{ly} + Z_{oy}^n)} \quad (16)$$

i_h^n 受负序输出阻抗和 V_{pcc}^n 的影响。增大负序输出阻抗使其与逆变器容量相匹配可有效抑制 i_h^n ,但负序输出阻抗增大会导致 V_{pcc}^n 增大反过来影响微电网电能质量和加大负序环流,因此逆变器输出控制需既能有效抑制负序环流又能抑制 V_{pcc}^n 。

3 分序网络解耦控制

从以上分析可知,不分序网控制策略的逆变器正、负序输出阻抗相等,难以兼顾正、负序分量的不同控制需求,负载不平衡时较难达到理想控制效果。根据图3的分序网络等效电路,为了改进逆变器输出特性,提升孤岛微电网带不平衡负载的能力,本文采用分序网络解耦控制策略,在正、负序网络分别对正、负序分量进行解耦控制,得到电压环参考电压的各序分量,然后在正序 dq 坐标系下进行叠加。根据各序环流产生机理不同,为了改善逆变器的输出特性,引入分序网络虚拟阻抗,正、负序网络分别加入正、负序虚拟阻抗以改进逆变器各序输出阻抗,进而抑制逆变器之间的环流,提高各逆变器负序输出电流的分配效果。

本文将三相正、负序分量分离到正、负序 dq 坐标系下,正、负序分量分离方法已有较多文献阐述,本文不再赘述。

正序控制采用第1节中的VSG控制,引入正序虚拟阻抗 $Z_v^p = R_v^p + j\omega L_v^p$,为提高VSG下垂特性, Z_v^p 取值偏感性,与滤波电路和 Z_l 构成的等效线路阻抗呈

现较强的感性。外环参考电压正序分量 u_{ref}^p 的正序 d 、 q 轴分量为:

$$\begin{cases} u_{ref(pd)}^p = -L_v^p \frac{di_{o(pd)}^p}{dt} - R_v^p i_{o(pd)}^p + \omega L_v^p i_{o(pq)}^p + U^* \\ u_{ref(pq)}^p = -L_v^p \frac{di_{o(pq)}^p}{dt} - R_v^p i_{o(pq)}^p - \omega L_v^p i_{o(pd)}^p \end{cases} \quad (17)$$

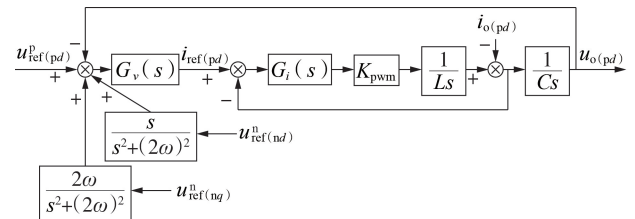
根据分序网络解耦控制原理,正序VSG控制功率环控制对象为仅由正序电压、电流分量作用产生的有功 P^p 和无功 Q^p ,即:

$$\begin{bmatrix} P^p \\ Q^p \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{o(pd)}^p & u_{o(pq)}^p \\ u_{o(pq)}^p & -u_{o(pd)}^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{o(pd)}^p \\ i_{o(pq)}^p \end{bmatrix} \quad (18)$$

三相不平衡会导致微电网三相电压负序分量的产生,因此负序控制就是抑制微电网三相电压负序分量和逆变器间的负序环流。负序外环参考电压为0V叠加负序虚拟阻抗环。为了提高逆变器负序环流的抑制能力,根据式(16),引入纯电阻性负序虚拟阻抗 $Z_v^n = R_v^n$ 。外环参考电压负序分量为:

$$u_{ref}^n = -R_v^n i_o^n \quad (19)$$

正序 d 轴下系统控制框图调整为图4。图中,下标 (nd) 、 (nq) 分别表示物理量在负序 dq 坐标系下的 d 、 q 轴分量,如 $u_{ref(nd)}^n$ 为 u_{ref}^n 的负序分量 u_{ref}^n 在负序 dq 坐标系下的 d 轴分量,后文其他物理量含义均类似。 $u_{ref(nd)}^n$ 和 $u_{ref(nq)}^n$ 分别乘以 $\cos(2\omega t)$ 和 $\sin(2\omega t)$ 累加作用于正序 d 轴。

图4 正序 d 轴控制框图Fig.4 Control block diagram of positive d -axis

正序和负序输出阻抗调整为:

$$Z_o^p(s) = \frac{Ls + G_i(s)}{LCs^2 + G_i(s)G_v(s) + G_i(s)Cs} + (L_v^p s + R_v^p)G(s) \quad (20)$$

$$Z_o^n(s) = \frac{Ls + G_i(s)}{LCs^2 + G_i(s)G_v(s) + G_i(s)Cs} + R_v^n G(s) \quad (21)$$

为了抑制正序环流,实现逆变器正序电流根据容量精确分配,根据式(3)、式(4)、式(10)和式(13),本文相关参数与逆变器额定容量 S_0 之间的关系为:

$$\frac{S_{0x}}{S_{0y}} = \frac{Z_{vy}^p}{Z_{vx}^p} = \frac{k_{ax}}{k_{ay}} = \frac{D_x}{D_y} = \frac{n_{Qy}}{n_{Qx}} \quad (22)$$

4 自适应负序补偿环

由式(21)可知,负序虚拟阻抗的引入虽然能够

有效抑制环流并实现负序电流的可控分配,但会导致负序输出阻抗的增大,加大逆变器负序输出电压,使得微电网公共连接点三相电压不平衡度超标,因此本文引入负序补偿环来抑制逆变器负序输出电压以保证微电网三相电压的平衡度符合国家标准。根据图3(b),可以通过调整逆变器输出的负序电压以实现负序电压的补偿,负序外环参考电压加入负序补偿环,其表达式为:

$$U_c = -V_{pcc}^n k_c \quad (23)$$

其中, k_c 为负序补偿系数。

u_{ref}^n 调整为:

$$u_{ref}^n = -R_v^n i_o^n + U_c \quad (24)$$

又根据 $u_o^n - V_{pcc}^n = Z_l i_o^n$, 则 Z_o^n 调整为:

$$Z_o^n(s) = \frac{Ls + G_i(s)}{(1 + k_c G(s))(Ls^2 + G_i(s)G_v(s) + G_i(s)Cs)} + \frac{(R_v^n - k_c Z_l)G(s)}{1 + k_c G(s)} \quad (25)$$

根据式(11)和式(14),通过阻抗分析得到负序补偿环的效果,阻抗分析取附录中表A1中逆变器VSG₁的参数。正序dq坐标系下,负序分量的闭环输出阻抗 Z_o^n 的波特图如图5所示。在频率为负序分量波动频率100 Hz的情况下,当 $k_c = 0$ (即未采用负序补偿环)时 Z_o^n 的幅值增益为9.74 dB,即幅值约为3.07 Ω ,会导致 u_o^n 较大,使得 V_{pcc}^n 超过国家标准规定的范围,而 k_c 越大则 Z_o^n 的幅值增益越低。当 $k_c = 5$ 时 Z_o^n 的幅值增益为-9.42 dB,即幅值约为0.338 Ω ,负序电流为VSG₁额定电流时 u_o^n 幅值仅为4 V,可抑制 V_{pcc}^n 在国标要求的范围内。以上阻抗分析验证了加入负序补偿环的有效性。

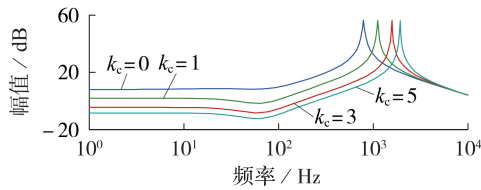


图5 正序dq坐标系下负序分量输出阻抗的波特图

Fig.5 Bode diagram of output impedance of negative sequence components in positive sequence dq coordinate system

系统的开关频率和采样控制频率相同且远大于负序分量的脉动频率,本文所提电压与电流双闭环控制逆变器输出电压负序分量的稳态误差可等效为0,稳态下 V_{pcc}^n 为:

$$V_{pcc}^n = -\frac{R_v^n + Z_l}{1 + k_c} i_o^n \quad (26)$$

由式(26)可知, V_{pcc}^n 的幅值与 i_o^n 的幅值成正比,另一方面 k_c 增大则 V_{pcc}^n 的幅值减小,但 k_c 过大会降低 R_v^n 的作用并影响负序电流的分配控制效果。为了进

一步抑制负序电压并实现 i_o^n 的精确分配,负序补偿环采用自适应控制,即:

$$k_c = k_{ic} |i_o^n| \quad (27)$$

其中, k_{ic} 为自适应补偿系数。 i_o^n 增大必然导致 i_o^n 增大,但 k_c 也同步增大,起到了抑制 V_{pcc}^n 的效果,同时对 k_{ic} 的值进行限定,能有效保证负序电流的分配精度。

分析逆变器之间负序电流的分配,根据式(26)可得:

$$\frac{R_{vx}^n + Z_{lx}}{1 + k_{icx} |i_{ox}^n|} i_{ox}^n = \frac{R_{vy}^n + Z_{ly}}{1 + k_{icy} |i_{oy}^n|} i_{oy}^n \quad (28)$$

根据逆变器容量设定 R_v^n 和 k_{ic} , $R_v^n \gg Z_l$,为了简化分析,忽略 Z_l 的影响,则 R_v^n 和 k_{ic} 与 S_0 之间的关系为:

$$\frac{S_{0x}}{S_{0y}} = \frac{k_{icy}}{k_{icx}} = \frac{R_{vy}^n}{R_{vx}^n} \quad (29)$$

根据国家标准的規定, $|V_{pcc}^n|$ 须满足:

$$|V_{pcc}^n| \leq |V_{pcc}^p| \times 2\% \quad (30)$$

设定 k_{ic} 参数时, $|V_{pcc}^p|$ 取值为三相额定电压幅值 U_0 , $|i_o^n|$ 取值为逆变额定输出电流幅值 I_0 ,可得 k_{ic} 的取值范围为:

$$k_{ic} \geq \frac{|R_v^n + Z_l|}{0.02 U_0} - \frac{1}{I_0} \quad (31)$$

考虑到逆变器并联投运和负载突变等工况下逆变器输出电流突变的影响, k_{ic} 实际取值略大于式(31)不等号右边的值。

综上所述,基于VSG和自适应负序补偿的逆变器分序网络解耦控制策略如附录中图A1所示。

5 仿真实验

为了验证本文所提出的控制策略的有效性,在MATLAB/Simulink平台搭建如图6所示的2台逆变器并联孤岛微电网系统,仿真参数见附录中表A1。

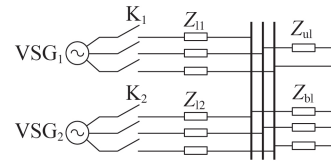


图6 逆变器并联孤岛微电网系统

Fig.6 System of islanded microgrid with parallel inverters

首先,对三相负载不平衡下有无负序补偿环的微电网三相电压进行对比分析,微电网三相电压不平衡度可由式(32)得到。

$$\varepsilon_u = \frac{\sqrt{(V_{pcc}^n(nd)}^2 + (V_{pcc}^n(nq))^2}}{\sqrt{(V_{pcc}^p(pd)}^2 + (V_{pcc}^p(pq))^2}} \quad (32)$$

图7为有无负序补偿环下2台逆变器并联运行微电网的三相电压对比波形,单相 Z_{bl} 为 $20\ \Omega$, Z_{ul} 为 $20\ \Omega$ 。由图可见,0.7 s前未采用负序补偿环, ε_u 在3%~4%之间,不满足国家标准要求;0.7 s时控制系统加入负序补偿环, $\varepsilon_u < 2\%$,满足国家标准要求。由此可知,采用负序补偿环能有效抑制微电网三相电压不平衡度,改善微电网电能质量。

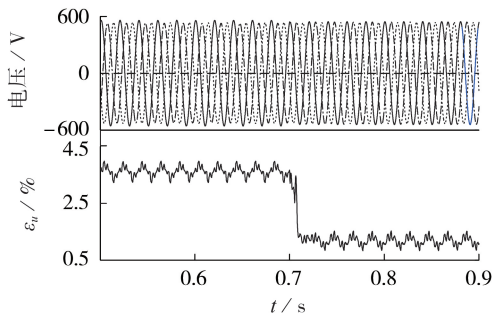


图7 有无负序补偿环时微电网三相电压对比

Fig.7 Comparison of three-phase voltage of microgrid between with and without negative sequence compensation loop

为了验证控制策略的动态特性,逆变器并联投运和负荷跳变下的动态波形如图8所示。0.15 s前VSG₁单独运行,0.15 s时VSG₂并联投运;0.7 s前单相 Z_{bl} 为 $30\ \Omega$, Z_{ul} 为 $40\ \Omega$;0.7 s时单相 Z_{bl} 瞬时跳变为 $20\ \Omega$, Z_{ul} 瞬时跳变为 $20\ \Omega$ 。VSG₂投运和负载突变时微电网三相电压有短时波动,整个过程中 ε_u 控制在4%以内,其他时间 ε_u 控制在2%以内,满足国家标准要求。

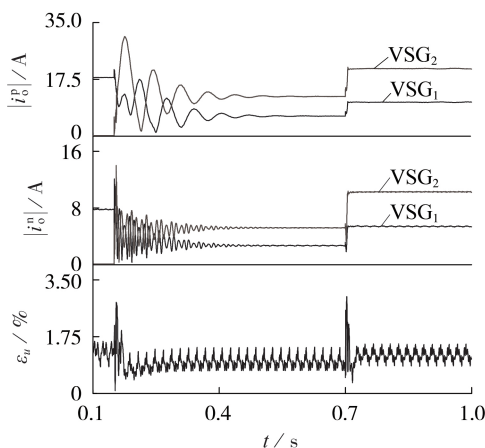


图8 逆变器并联投运和负荷跳变下的动态波形

Fig.8 Dynamic waveforms of inverter under parallel operation and load hopping

由图8可以看出,逆变器并联投运对逆变器间电流分配的影响非常大,本文所提控制策略能较快地实现输出电流的稳定分配,负荷跳变时逆变器输出电流平稳跃变,表明本文所提控制策略具有良

好的动态性能。

图9为图8中0.9~1.0 s逆变器输出电流各序分量稳态波形。可见电流波形平稳,逆变器间各序电流同频同相。

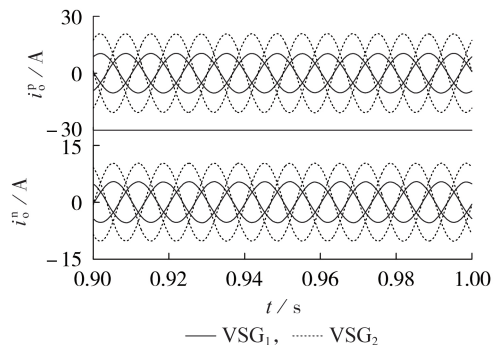


图9 逆变器输出电流正、负序稳态波形

Fig.9 Steady-state waveforms of positive and negative sequence output current of inverter

根据图8,得到两逆变器输出电流正、负序稳态幅值对比如表1所示。可见各序电流分配比值满足设定要求,且由图9可知两逆变器输出各序电流同频同相,验证了本文所提控制策略能够抑制逆变器间的环流,实现逆变器输出电流正序、负序分量的精确分配。

表1 输出电流对比

Table 1 Comparison of output currents

时刻	参数	稳态幅值 / A		实际比值	设定比值	比值误差 / %
		VSG ₁	VSG ₂			
0.7 s前	i_o^p	6.08	12.15	0.5004	0.5	0.08
	i_o^n	2.65	5.17	0.5126	0.5	2.52
0.7 s后	i_o^p	10.35	20.75	0.4988	0.5	0.24
	i_o^n	5.35	10.24	0.5225	0.5	4.50

注:比值误差=|实际比值-设定比值|÷设定比值×100%。

为了验证 k_{ic} 对微电网三相电压不平衡度和负序电流分配的影响,参照图8的工况,VSG₁的 k_{ic} 调整为0.9,VSG₂的 k_{ic} 调整为0.45,微电网三相电压不平衡度如图10所示,负序输出电流对比如表2所示。可见 k_{ic} 的增大会使得 ε_u 降低,但同时会降低负序电流的分配精度。

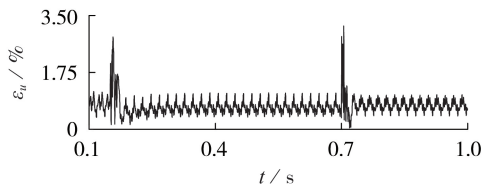


图10 k_{ic} 调整后逆变器并联投运和负荷跳变下微电网三相电压不平衡度

Fig.10 Three-phase voltage unbalance degree of microgrid under parallel inverter operation and load hopping after k_{ic} adjustment

表2 k_{ic} 调整后负序输出电流对比Table 2 Comparison of negative sequence output current after k_{ic} adjustment

时刻	i_o^n 稳态幅值 / A		实际 比值	设定 比值	比值 误差 / %
	VSG ₁	VSG ₂			
0.7 s 前	2.68	5.15	0.5204	0.5	4.08
0.7 s 后	5.48	10.13	0.5410	0.5	8.20

6 结论

本文对不平衡负载孤岛微电网多逆变器运行下微电网三相电压不平衡抑制和各序电流分配进行了深入研究。分析得到逆变器分序网络的等效电路和逆变器间负序环流的产生机理。根据各序环流产生和输出电流分配机理不同,采用分序网虚拟阻抗改进逆变器各序输出阻抗,通过分序网解耦控制得到电压环参考电压的各序分量,在正序 dq 坐标系下进行叠加,经电压与电流双闭环控制得到逆变器输出电压。正序网络采用VSG控制实现正序调频调压和电流的分配,负序网络下通过自适应负序补偿环实现微电网负序电压的抑制和逆变器负序输出电流的分配。在MATLAB/Simulink平台建立模型进行仿真验证,结果表明,在本文所提控制策略下,不平衡负载下孤岛微电网电能质量完全达标,逆变器输出电流的各序分量能够得到精确分配。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] MAHMOUD M S, AZHERHUSAIN S, ABIDO M A. Modeling and control of microgrid: an overview[J]. Journal of the Franklin Institute, 2014, 351: 2822-2859.
- [2] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on microgrid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [3] 苏宏升, 江昆, 杨祯, 等. 基于虚拟同步发电机的微网频率与电压综合控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 21-28.
SU Hongsheng, JIANG Kun, YANG Zhen, et al. Comprehensive control strategy of microgrid frequency and voltage based on virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 21-28.
- [4] ZHONG Q, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [5] 杨赞, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 125-131.
YANG Yun, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.
- [6] BEVRANI H, ISE T, MIURA Y. Virtual synchronous generators: a survey and new perspectives[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2014, 54: 244-254.
- [7] LIU Jia, MIURA Y, ISE T. Comparison of dynamic character-

istics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.

- [8] MENG Xin, LIU Jinjun, LIU Zeng. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.
- [9] 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): 412-423.
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): 412-423.
- [10] LIU Jia, MIURA Y, BEVRANI H, et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2268-2277.
- [11] LIU Quanwei, TAO Yong, LIU Xunhao, et al. Voltage unbalance and harmonics compensation for islanded microgrid inverters[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(5): 1055-1063.
- [12] 国家技术监督局. 电能质量三相电压允许不平衡度: GB/T 15543—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] 陈铁涵, 郭鸿浩, 陈杰, 等. 中频三相四桥臂逆变器控制策略不平衡负载状态相量模型分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(9): 1912-1923.
CHEN Yihan, GUO Honghao, CHEN Jie, et al. Analysis on control strategies for unsymmetrical state of medium frequency three phase four leg inverter based on vector model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(9): 1912-1923.
- [14] 张鸿博, 蔡晓峰, 杨向真. 基于三相四桥臂逆变器的虚拟同步发电机分序控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1291-1299.
ZHANG Hongbo, CAI Xiaofeng, YANG Xiangzhen. Sequence decomposition control strategy for virtual synchronous generator based on three-phase four-leg inverter[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1291-1299.
- [15] LIU Jia, MIURA Y, ISE T. Cost-function-based microgrid decentralized control of unbalance and harmonics for simultaneous bus voltage compensation and current sharing[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 7397-7410.
- [16] 吴丽珍, 王晓婷, 郝晓弘, 等. 孤岛微电网电压不平衡网络化分层补偿方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 137-144.
WU Lizhen, WANG Xiaoting, HAO Xiaohong, et al. Networked hierarchical approach for voltage unbalance compensation in island microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 137-144.
- [17] HAN Yang, SHEN Pan, ZHAO Xin, et al. An enhanced power sharing scheme for voltage unbalance and harmonics compensation in an islanded AC microgrid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(3): 1037-1050.
- [18] MENG Lexuan, ZHAO Xin, TANG Fen, et al. Distributed voltage unbalance compensation in islanded microgrids by using a dynamic consensus algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 827-838.
- [19] SAVAGHEBI M, JALILIAN A, VASQUEZ J C, et al. Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 797-807.
- [20] 赖纪东, 谢天月, 苏建徽, 等. 基于粒子群优化算法的孤岛微电网电压不平衡补偿协调控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 121-129.

LAI Jidong, XIE Tianyue, SU Jianhui, et al. Coordinated control of voltage unbalance compensation in islanded microgrid based on particle swarm optimization algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 121-129.

作者简介:

陈 强(1981—),男,江西黎川人,副教授,博士,主要研究方向为分布式发电与微电网技术(E-mail: qchen1019@foxmail.com);



陈 强

章心因(1978—),男,江苏溧阳人,副教授,博士,主要研究方向为风力发电、电力电子技术及应用(E-mail: zhang_xinyin@126.com);

吕千云(1976—),男,浙江丽水人,教授,博士,主要研究方向为电能质量以及人工智能在电力系统中的应用(E-mail: ganyun_lv@njit.edu.cn)。

(编辑 李莉)

Control strategy of inverter for islanded microgrid with unbalanced load

CHEN Qiang, ZHANG Xinyin, LÜ Ganyun

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: A control strategy of inverter for islanded microgrid with unbalanced load is proposed, which adopts the sequence network decoupling control and introduces adaptive negative sequence compensation loop based on VSG(Virtual Synchronous Generator) control. Based on analyzing the circuit with unbalanced three-phase load, the sequence network equivalent circuit of inverter and the generating mechanism of negative sequence circulation between inverters are obtained. Sequence network decoupling control is employed to obtain each sequence component of reference voltage of voltage loop, and sequence network virtual impedance is added to improve each sequence output impedance of inverter. VSG control is used in positive sequence network to realize positive sequence frequency and voltage regulation and current autonomous distribution, and negative sequence compensation loop is adopted in negative sequence network to suppress the negative sequence component of three-phase voltage of microgrid. The relationship among the negative sequence component of microgrid voltage, the negative sequence compensation coefficient and the negative sequence component of output current of inverter is analyzed in detail. The adaptive control is used in negative sequence compensation loop to realize three-phase voltage balance of microgrid and the independent distribution of negative sequence component of output current according to the inverter rated capacity. Modeling simulative results verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: unbalanced load; islanded microgrid; electric inverters; sequence network decoupling control; virtual synchronous generator; adaptive negative sequence compensation loop

附录

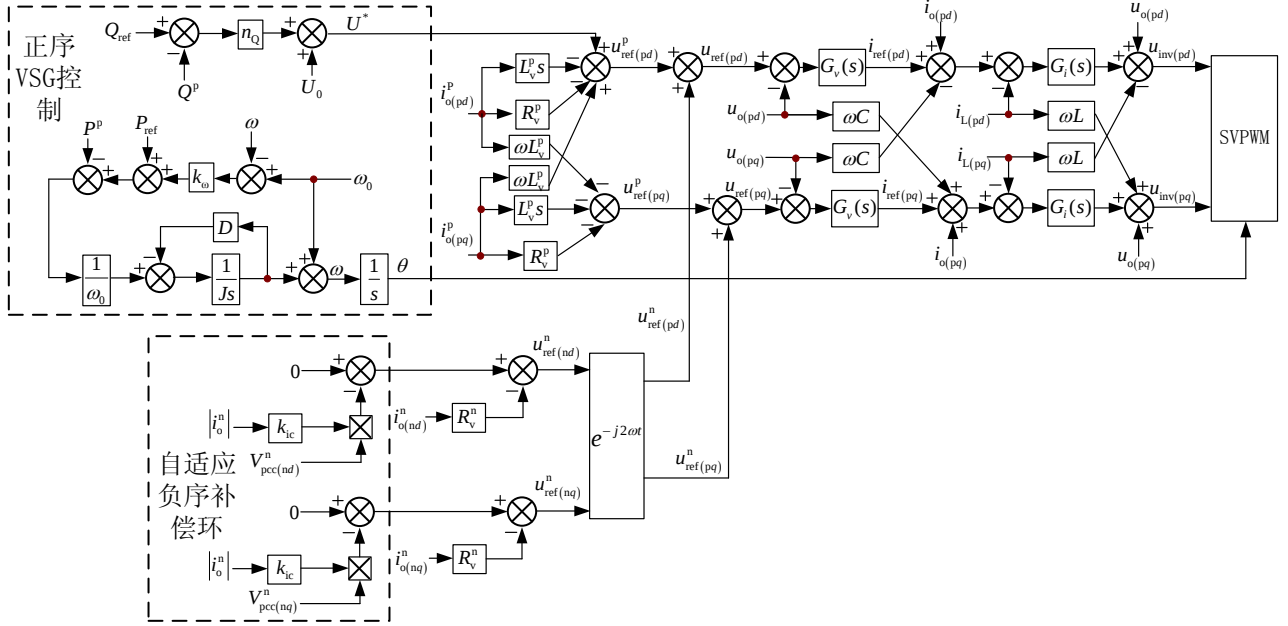


图 A1 基于 VSG 和自适应负序补偿的逆变器分序网络解耦控制策略

Fig.A1 Sequence network decoupling control strategy of inverter based on VSG and adaptive negative sequence compensation loop

表 A1 仿真参数

Table A1 Simulation parameters

参数	取值	
	VSG ₁	VSG ₂
L/mH	4	2
$C/\mu\text{F}$	10	20
R_v^p/Ω	0.3	0.15
L_v^p/mH	3	1.5
R_v^n/Ω	2.5	1.25
k_{ic}	0.5	0.25
$Z_l/\text{m}\Omega$	$40+j\omega\times 0.03$	$30+j\omega\times 0.02$
$J/(\text{kg m}^2)$	0.2	0.4
D	2.5	5
P_{ref}/kW	5	10
k_ω	4 000	8 000
Q_{ref}/kvar	2.5	5
n_Q	0.002	0.001
开关频率 f/kHz	10	
U_{dc}/V	750	
U_0/V	311	
$\omega_0/(\text{rad s}^{-1})$	100π	