

孤岛微网中 VSG 并联运行功率精确分配控制策略

周宁博¹, 叶佳卓¹, 邓双喜¹, 樊承阳¹, 罗盎捷², 周朝霞¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;
2. 长沙轨道交通运营有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 孤岛微网中,使用 VSG 控制策略控制逆变器,可以有效增加系统惯性与阻尼,提高孤岛微网系统稳定性。多 VSG 并联运行时不能按下垂系数精确分配无功功率。针对此问题,本文提出了一种基于分布式二次控制器的电压补偿策略。通过分布式二次控制器获取各 VSG 无功功率值,根据所需无功功率大小,自适应调整 VSG 定子电抗值,间接控制逆变器无功出力实际值,达到无功功率精确分配的目标。此控制策略不需要线路阻抗信息,在网络通讯故障的情况下仍具有较强鲁棒性,且在实际应用中可降低对通信网络带宽需求。同时给出了并联运行 VSG 参数匹配方法。最后在 Matlab/Simulink 中搭建了三台 VSG 并联仿真模型,仿真结果验证了所提控制策略的有效性和可行性。

关键词: 微电网; 虚拟同步发电机; 无功功率均分; 分布式二次控制

DOI: 10. 12067/ATEEE1909027 **文章编号:** 1003-3076(2020)08-0047-09 **中图分类号:** TM464

1 引言

随着我国对电力需求的增长以及能源与环境形势愈加严峻,以新能源为主的多种分布式电源配合储能设备、电能变换装置等组成的微电网发展较快。其可独立运行为本地负载提供电能,也可与大电网连接互为支撑运行提高电能质量和供电可靠性^[1,2]。但通常这种微网没有旋转动能,系统惯性小,同时分布式电源出力具有波动性,当系统功率出现波动时,系统频率可能会发生振荡,不能保证微电网的稳定性。为提高此类系统频率稳定性,模拟同步发电机输出外特性的虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术被提出,通过引入转子方程使逆变器在机理和外特性上模拟同步发电机^[3,4]。在实际独立微网中,通常需要多台 VSG 并联运行,但各分布式电源的容量、等效输出阻抗、线路阻抗通常均存在差异,使得各分布式电源输出功率不能按容量分配产生环流,过大的环流将影响系统的稳定运行,因此对于微网中多 VSG 并联运行功率合理分配的研究具有重要意义^[5,6]。

针对此问题,多种方法被提出来实现并联分布式电源的功率合理分配。文献[7]将虚拟阻抗引入传统下垂控制,分析了系统电抗与系统环流的关系,通过调节系统阻抗大小实现功率精确分配。文献[8]通过自适应改变下垂系数的方法减小功率分配误差,但是只能平均分配功率,不能按各 VSG 容量比例分配。文献[9]研究了分段控制的方法,首先用传统下垂控制,然后用同步补偿,实现无功功率均分,但会对有功功率均分产生不良影响。文献[10]采用中心控制器向本地控制器发送电压偏差信号的二次控制方法,但该方法对通信要求较高。文献[11]则是采用基于电压补偿的控制方法,通过构造积分器消除了系统阻抗不匹配对无功分配的影响。

本文针对 VSG 并联运行功率分配问题,分析得到 VSG 功率按容量比例均分的条件,在分层控制的基础上,提出一种基于改变 VSG 定子电抗的电压补偿二次控制策略以实现无功功率均分,根据当前系统所需无功功率,调节 VSG 定子电抗,补偿线路阻抗不匹配所产生的压降差。所提控制策略不需要线路阻抗信息,可降低对通信网络带宽和可靠性要求,

收稿日期: 2019-09-11
基金项目: 国家自然科学基金项目(51507028)、湖南省重点研发计划项目(2017SK2182)
作者简介: 周宁博(1996-),男,河南籍,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动;
叶佳卓(1965-),男,湖南籍,教授级高级工程师,研究方向为电力电子与电力传动(通讯作者)。

$$U_i = \frac{U_{iref} + \frac{n_i U_{PCC}^2}{X_i}}{1 + \frac{n_i U_{PCC}}{X_i}} \quad (7)$$

分析式(7)可知,只有在各 VSG 馈线阻抗匹配时,即 n_i/X_i 相等时,各 VSG 输出电压才相等,无功功率才能根据下垂系数被合理分配。

2.3 改进无功功率控制

馈线电压降可表示为^[15]:

$$\Delta U_i = \frac{P_i R_i + Q_i X_i}{U_{PCC}} \quad (8)$$

式中, R_i 和 X_i 分别为第 i 台 VSG 馈线电阻值和电抗值。

两台 VSG 并联运行时,馈线压降差为:

$$\begin{aligned} \Delta U^* &= \Delta U_1 - \Delta U_2 \\ &= \frac{P_1 R_1 - P_2 R_2 + Q_1 X_1 - Q_2 X_2}{U_{PCC}} \end{aligned} \quad (9)$$

则 VSG1 的馈线压降可由 VSG2 的馈线压降及两馈线压降差 ΔU^* 表示为:

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 + \Delta U^* \quad (10)$$

当两台 VSG 额定有功功率之比、额定无功功率之比及容量之比为 N , 即:

$$P_1 : P_2 = Q_1 : Q_2 = S_1 : S_2 = N \quad (11)$$

两台 VSG 并联运行系统结构图如图 3 所示, VSG1 的馈线电阻值和电抗值可分解为 $R_2/N + (R_1 - R_2/N)$ 和 $X_2/N + (X_1 - X_2/N)$, 则 VSG1 的馈线压降 ΔU_1 可由与 VSG2 馈线阻抗的匹配值 R_2/N 、 X_2/N 上的压降 ΔU_2 和 $R_1 - R_2/N$ 、 $X_1 - X_2/N$ 上的压降 ΔU^* 组成,而 ΔU^* 则是引起各 VSG 之间功率环流的原因。

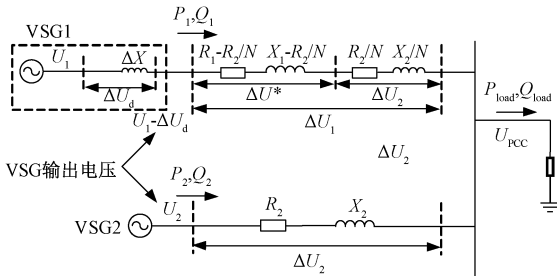


图3 两台 VSG 并联运行系统结构图

Fig.3 Structure diagram of two VSG parallel operation systems

各 VSG 输出电压可表示为:

$$\begin{cases} U_1 = U_{PCC} + \Delta U_2 + \Delta U^* \\ U_2 = U_{PCC} + \Delta U_2 \end{cases} \quad (12)$$

若通过改变 VSG 定子电抗可以补偿由于阻抗不匹配引起的电压降,即令:

$$U_1 = U_{PCC} + \Delta U_2 + \Delta U^* + \Delta U_d \quad (13)$$

使得:

$$\Delta U^* + \Delta U_d = 0 \quad (14)$$

则式(13)可简化为:

$$U_1 = U_{PCC} + \Delta U_2 \quad (15)$$

如图 3 虚线框中所示,则补偿后两 VSG 的输出电压值相等。对于多个 VSG 并联运行时,分别改变定子电抗进行电压补偿。若能随负载改变而改变虚拟定子电抗,使得系统稳定后达到 $\Delta U_d = -\Delta U^*$, 则可实现各 VSG 输出端口处电压相等,从而达到系统所需无功功率按各 VSG 容量比精确分配。

由式(14)可得:

$$\Delta U^* = -\Delta U_d = -\frac{P_1 \Delta R + Q_1 \Delta X}{U_{PCC}} \quad (16)$$

式中, ΔR 和 ΔX 分别为应补偿的电阻值和电抗值。

为了简化分析设计,令 $\Delta R = 0$, 结合式(9)可化简式(16)为:

$$\Delta X = \frac{P_1 R_1 - P_2 R_2 + Q_1 X_1 - Q_2 X_2}{Q_1} \quad (17)$$

通过分析式(17)可知,对于任意确定的馈线阻抗值以及各 VSG 输出有功及无功功率,均能找到一个使式(17)满足的 ΔX 。因此,通过设置 ΔX 值便可解决馈线电压降不等造成的输出电压不等的问题,实现无功功率按容量比例精确分配。

可根据实际所需无功功率值,使二次控制器自适应调整 ΔX 值至满足式(17),间接控制逆变器无功出力实际值,达到无功功率精确分配的目标。

2.4 二次控制器设计

为了获取所需无功参考信号 Q_{iref} , 采用分布式二次控制器,使得各 VSG 可以独立调节馈线压降,以达到无功功率精确分配的目的。

在分布式二次控制器设计中,采用离散一致性算法构成观测器,根据 VSG 容量分配无功功率,构造相应目标函数,选取各 VSG 实测无功功率值与其额定值之比作为一致性算法的状态变量,从而获得各 VSG 无功功率参考值,作为二次控制器输入变量。

当系统含有 y 个 VSG 时,离散一致性算法可表示成如下形式^[16]:

$$w_i(k+1) = \sum_{j=1}^{j=y} l_{ij}(k) w_j(k) \quad (18)$$

式中, w_i 为第 i 台 VSG 对应节点的一致性状态变量; j 为第 j 台 VSG; l_{ij} 为状态转移矩阵中的元素; k 为迭代序列值, $i=1,2,\dots,y$; $j=1,2,\dots,y$ 。

以矩阵形式表示为:

$$\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{L}(k) \mathbf{W}(k) \quad (19)$$

式中, $\mathbf{L}(k)$ 为系统状态转移矩阵; $\mathbf{W}(k+1)$ 和 $\mathbf{W}(k)$ 分别为 $k+1$ 与第 k 次迭代系统的状态向量。当系统通信拓扑结构满足生成树要求时, 每一个节点均与其他节点有联系, 系统一致收敛, 各节点状态变量值相等^[16]。

按照并联运行的各 VSG 容量设置状态变量为:

$$w_i = \frac{Q_i}{Q_i^*} \quad (20)$$

式中, Q_i 为第 i 台 VSG 输出无功功率实际值; Q_i^* 为第 i 台 VSG 无功功率额定值。

以 3 台 VSG 并联运行为例, 当 3 台 VSG 的通信网络两两双向连接时, 根据文献[16]中所述方法, 此时各 VSG 给相邻 VSG 提供无功功率信息, 此时 $\mathbf{L}(k)$ 为:

$$\mathbf{L}(k) = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

二次控制中, 各 VSG 的二次控制器利用网络获得全局状态变量值, 根据式(18)和式(20)原理更新求取各 VSG 无功功率参考信号 Q_{iref} , 具体计算如下:

$$Q_{iref}(k+1) = w_i(k+1) Q_i^* \quad (22)$$

分布式二次控制器输出的参考值 ΔX 取:

$$\Delta X = k_p \Delta Q_i^* + k_i \int \Delta Q_i^* dt \quad (23)$$

其中

$$\Delta Q_i^* = Q_{iref} - Q_i \quad (24)$$

式中, k_p 为偏差比例系数; k_i 为积分系数; Q_{iref} 和 Q_i 分别为第 i 台 VSG 无功参考值和实际无功输出。二次控制器结构如图 4 所示。

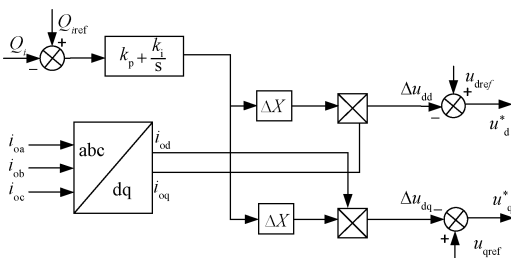


图 4 二次控制器结构图

Fig.4 Secondary controller structure

加入二次控制器后的 VSG 并联系统结构图如图 5 所示。

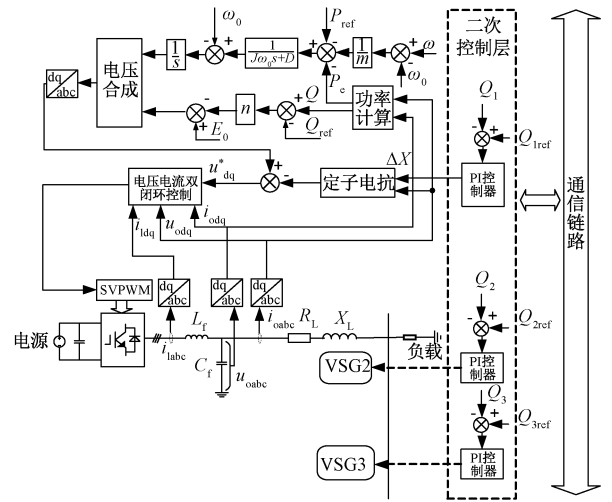


图 5 含分布式二次控制器 VSG 并联系统结构图

Fig.5 Structure diagram of a distributed secondary controller VSG parallel system

2.5 并联 VSG 参数设计方法

并联运行 VSG 系统参数的匹配是以有功功率和无功功率均以 VSG 容量比值均分为前提^[17]。以两台 VSG 为例进行分析。

由式(1)可知, 对其中转子方程在时域内线性化处理表示为:

$$J \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \Delta P_m - \Delta P_e - D \Delta \omega \quad (25)$$

当系统稳定运行后:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = 0 \quad (26)$$

将式(26)代入式(25)可得:

$$J \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = -D \Delta \omega \quad (27)$$

$$\frac{J}{D} = -\Delta t \quad (28)$$

分析式(28)可知, 当系统参数满足式(29)时, 并联运行的各 VSG 具有相同的响应时间, 可以实现系统的平滑过渡, 如果参数不匹配, 在系统功率分配过程中可能会出现误差, 因此两台并联运行的 VSG 参数应满足式(29)。

$$\frac{J_1}{D_1} = \frac{J_2}{D_2} \quad (29)$$

式中, J_1 和 J_2 分别为 VSG1 和 VSG2 的转动惯量; D_1 和 D_2 分别为 VSG1 和 VSG2 的阻尼系数。

由于有功功率控制中包含 VSG 系统参数, 对转子方程进行分析, 将式(1)中转子方程变换至频域可得:

$$\begin{cases} Js\omega = \frac{P_m}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega_0} - D\Delta\omega \\ \Delta\omega = \omega - \omega_0 \\ s\theta = \omega \end{cases} \quad (30)$$

式中, θ 为 VSG 输出电压相角值。

由式(30)可得:

$$\theta(s) = \frac{1}{s} \left(\frac{P_m - P_e}{\omega_0} \frac{1}{Js + D} + \omega_0 \right) \quad (31)$$

根据有功功率均分条件,稳态时,各 VSG 输出电压相角值相等,即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\theta_1(t) - \theta_2(t)] = 0 \quad (32)$$

利用终值定理表示稳态时相角差为:

$$\lim_{s \rightarrow 0} [s\theta_1(s) - s\theta_2(s)] = 0 \quad (33)$$

式中, θ_1 和 θ_2 分别为 VSG1 和 VSG2 输出电压相角值。

将式(31)代入式(33)可得:

$$\frac{P_{m1} - P_{e1}}{J_1 s + D_1} = \frac{P_{m2} - P_{e2}}{J_2 s + D_2} \quad (34)$$

当两台 VSG 额定有功功率之比、额定无功功率之比及容量之比为 N ,即:

$$P_1 : P_2 = Q_1 : Q_2 = S_1 : S_2 = N \quad (35)$$

根据上文所述稳态时功率分配条件可知要使式(34)成立则 VSG 参数应满足式(36):

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{D_1}{D_2} = N \quad (36)$$

结合式(6),并联运行 VSG 功率按各自容量分配的参数匹配原则为:

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{J_1}{J_2} = \frac{D_1}{D_2} = N \quad (37)$$

对于多台 VSG 并联运行的情况,为实现有功功率和无功功率按 VSG 容量比分配,需要满足转动惯量 J 和阻尼系数 D 与 VSG 容量成正比, P - f 和 Q - U 下垂系数与 VSG 容量成反比。

3 仿真分析

为验证所提控制策略可行性及效果,以 3 台 VSG 并联运行为例,系统结构如图 5 所示,各 VSG 经 LC 滤波器和线路连接至 PCC 处共同为负载供电。直流侧电压设为 1 kV,交流侧线电压为 380 V,频率为 50 Hz。3 台 VSG 容量比为 3:2:1。线路阻抗 $Z_1 = 1.1 + j0.027 \Omega$, $Z_2 = 0.8 + j0.045 \Omega$, $Z_3 = 1.4 + j0.072 \Omega$ 。负载 1 为所需有功功率 10 kW、无功功率 4 kVar 的负荷,负载 2 为所需有功功率 2 kW、无功

功率 2 kVar 的负荷。二次控制器中 k_p 为 10, k_i 为 0.01。在 Matlab/Simulink 中搭建对应仿真模型进行仿真实验。并联运行 VSG 仿真模型参数如表 1 所示。

表 1 VSG 模型参数

Tab.1 VSG model parameters

参数	VSG1	VSG2	VSG3
额定有功功率 P_i /kW	6	4	2
额定无功功率 Q_i /kVar	3	2	1
有功下垂系数 m_i	2e-5	4e-5	6e-5
无功下垂系数 n_i	2.5e-3	5e-3	7.5e-3
虚拟转动惯量 J_i	0.6	0.4	0.2
阻尼因子 D_i	24	16	8

3.1 传统控制策略下仿真分析

为评估功率均分程度,定义有功功率和无功功率分配误差分别为:

$$\begin{cases} \Delta P_{i,j} = P_i - N_{i,j} P_j \\ \Delta Q_{i,j} = Q_i - N_{i,j} Q_j \end{cases} \quad (38)$$

式中, $N_{i,j}$ 为两台 VSG 容量比;有功功率和无功功率分配误差 $\Delta P_{i,j}$ 、 $\Delta Q_{i,j}$ 绝对值越小则功率分配越精确。

传统控制作用下,各 VSG 输出功率波形如图 6 所示。初始情况下负载 1 和负载 2 同时投入,在 1.5 s 时切除负载 2,由图 6(a) 和图 6(b) 可知,各 VSG 有功功率可稳定输出, VSG1 和 VSG2 有功功率分配误差 $\Delta P_{1,2}$ 在负载变化时有所波动,稳定时接近 0,可知负载变化前后有功功率在传统控制策略下可以不受线路阻抗影响实现按容量比分配。

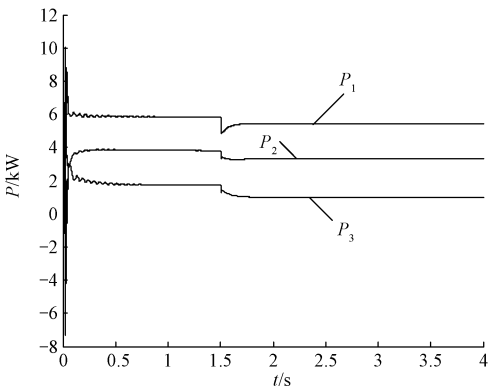
由图 6(c) 和图 6(d) 可知,无功功率同样可达到稳定输出,但在负载变化前后, VSG1 和 VSG2 无功功率分配误差 $\Delta Q_{1,2}$ 稳态时分别约为 1.1 kVar 和 0.7 kVar,误差较大。VSG1 和 VSG2 之间的无功功率由于线路阻抗不匹配不能精确按容量比分配。

3.2 改进无功功率控制仿真分析

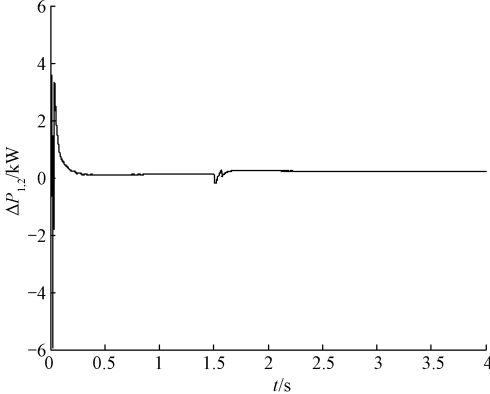
采用改进控制策略后,各 VSG 输出功率波形如图 7 所示。由图 7(b) 和图 7(d) 可知在系统稳定后有有功功率和无功功率均按各 VSG 容量比精确分配。初始情况下负载 1 和负载 2 同时投入,在 $t = 1.5$ s 时切除负载 2,负载变化对各 VSG 功率输出影响很小,各 VSG 可快速调节输出功率,达到新的稳定状态,实现功率精确分配。

3.3 通讯故障情况下仿真分析

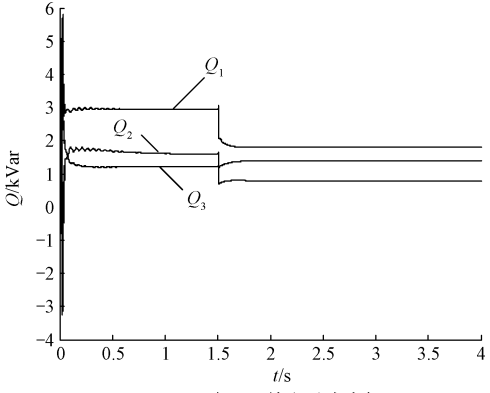
通讯故障时,控制器依据检测单元发出的故障信号禁止改变 ΔX 值,本地控制器保持前一刻



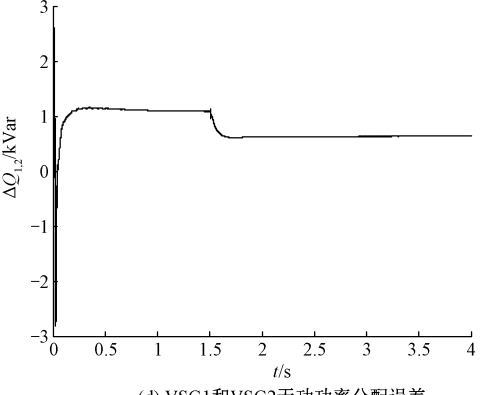
(a) 各VSG输出有功功率



(b) VSG1和VSG2有功功率分配误差



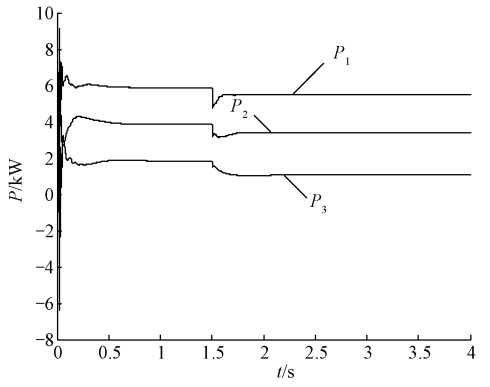
(c) 各VSG输出无功功率



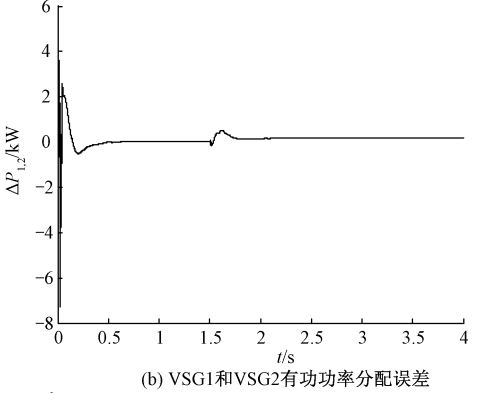
(d) VSG1和VSG2无功功率分配误差

图 6 传统控制策略下控制效果

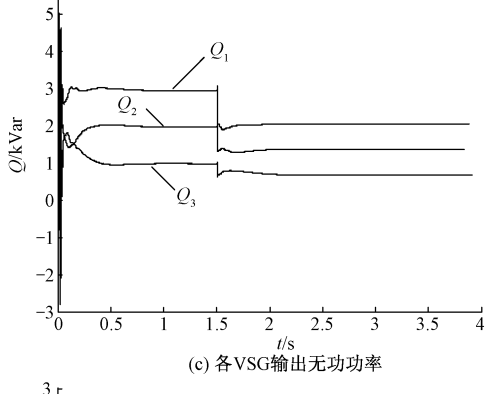
Fig.6 Control effect under traditional control strategy



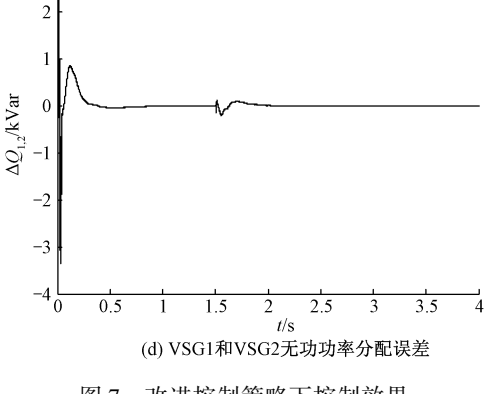
(a) 各VSG输出有功功率



(b) VSG1和VSG2有功功率分配误差



(c) 各VSG输出无功功率



(d) VSG1和VSG2无功功率分配误差

图 7 改进控制策略下控制效果

Fig.7 Control effect under improved control strategy

ΔX 值不变。图 8 所示为通讯故障情况下各 VSG 输出无功功率值。图 9 为通讯状态图,控制信号为 1 表示通讯正常,控制信号为 0 表示通讯故障。

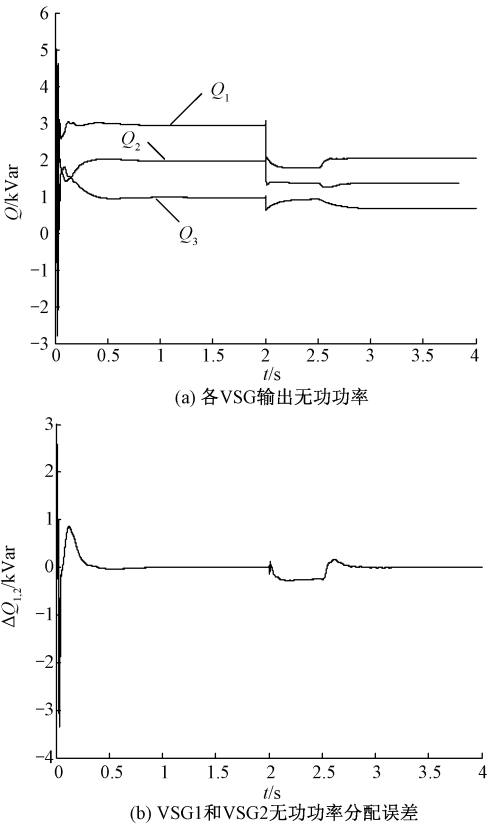


图 8 改进控制策略通讯故障时控制效果
Fig.8 Improve control effect of control strategy communication failure

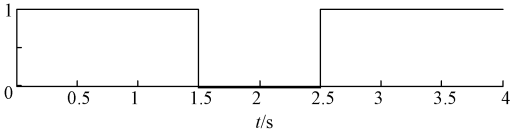


图 9 通讯状态图
Fig.9 Communication status diagram

通讯正常时二次控制器向一次控制器传送 ΔX 值,若通讯故障,一次控制器保留前一时刻 ΔX 值。 $t=1.5\text{ s}$ 时通讯故障, ΔX 已完成调整,负载保持不变,各 VSG 仍按容量比输出无功功率。 $t=2\text{ s}$ 时负载改变,所需无功功率从 6 kVar 调整至 4 kVar,此时各 VSG 输出无功功率随之调整,由于 ΔX 值未随之改变,功率分配出现了一定程度的误差,与传统 VSG 控制策略相比,由图 8(b) 和图 6(d) 可知,负载相同时,即使在通讯故障情况下,所提改进控制策略功率分配效果仍优于传统 VSG 控制,误差仅为传统

控制的 1/5,仍可减小并联 VSG 系统阻抗不匹配对无功功率分配的影响。 $t=2.5\text{ s}$ 时通讯恢复,系统迅速调整 ΔX 值达到新的稳定状态,各 VSG 输出无功功率再次实现按容量比精确分配。

图 10 显示了传统集中式二次控制策略通讯故障时 VSG1 与 VSG2 无功功率分配误差。由图 10(a) 可知, $t=1.5\text{ s}$ 时通讯中断,VSG1 与 VSG2 输出无功功率立即出现很大误差。 $t=2\text{ s}$ 时切除负载 2,各 VSG 随之调整输出无功功率值,稳定后仍存在较大误差。图 10(b) 显示了通讯中断后及通讯恢复后 VSG1 与 VSG2 输出无功功率误差。 $t=1.5\text{ s}$ 时通讯中断,负载未改变,VSG1 与 VSG2 输出无功功率立即产生误差。 $t=2.5\text{ s}$ 时通讯恢复,此时各 VSG 的无功功率输出产生很大波动且经过较长时间才能重新达到稳定状态。与本文所提控制策略相比,传统集中式二次控制对通信可靠性要求较高,在通讯故障时失去控制效果,且通讯恢复时会使系统产生较大波动。故本文所提控制策略具有更好的控制性能,在通讯故障情况下仍能改善无功功率分配效果。

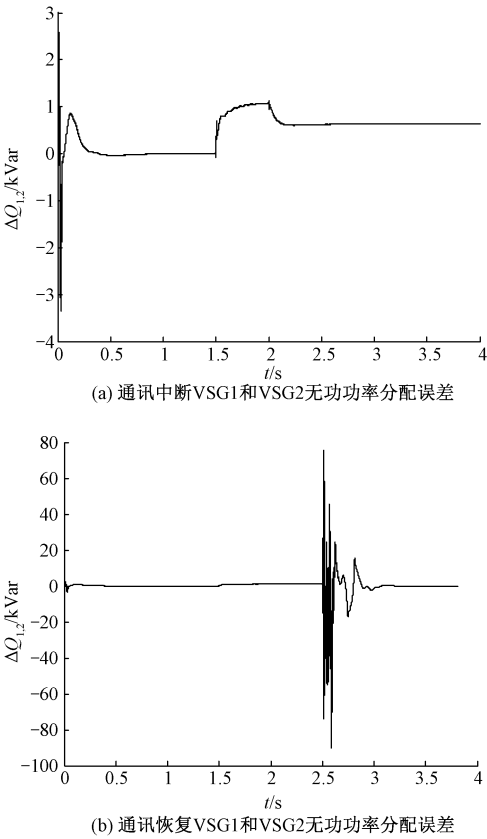


图 10 集中式二次补偿控制策略通讯故障时控制效果
Fig.10 Control effect of centralized secondary compensation control strategy communication failure

4 结论

本文对孤岛微网中 VSG 并联运行功率分配问题进行了相关研究,提出一种无功功率精确分配的控制策略。所提控制策略基于传统下垂控制功率分配机理,利用分布式二次控制器自动调整各 VSG 定子电抗值,在馈线阻抗不匹配的情况下实现系统所需无功功率按各 VSG 容量比精确均分,且在网络故障情况下仍能有效减小无功功率分配误差。实际应用中,相对于传统式集中控制,该控制策略降低了通信带宽及可靠性的要求。通过数学推导给出了并联运行各 VSG 的参数匹配方法,确保负载变化时系统的平滑过渡以及稳态时无功功率的精确分配。以 3 台 VSG 并联为例进行仿真,由 Matlab/Simulink 仿真结果可知,应用本文所提改进控制策略,独立微网系统可稳定运行,各 VSG 可以按容量比精确分配无功功率。

参考文献 (References):

[1] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等 (Lv Zhipeng, Sheng Wanxing, Zhong Qingchang, et al.). 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用 (Virtual synchronous generator and its application in microgrid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (16): 2591-2603.

[2] 王晓寰, 张敏霞, 张纯江, 等 (Wang Xiaohuan, Zhang Minxia, Zhang Chunjiang, et al.). 基于自适应下垂控制的多机逆变器双模式运行及平滑切换研究 (Study on two-modes operation and seamless transfer of multi-inverter based on adaptive droop control strategy) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (3): 17-25.

[3] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等 (Zheng Tianwen, Chen Laijun, Chen Tianyi, et al.). 虚拟同步发电机技术及展望 (Review and prospect of virtual synchronous generator technologies) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (21): 165-175.

[4] 杜燕, 赵韩广, 张显创, 等 (Du Yan, Zhao Hanguang, Zhang Xianchuang, et al.). 一种无锁相环动态阻尼的虚拟同步发电机 (Virtual synchronous generator adopting dynamic damping without frequency detection) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (7): 10-19.

[5] 罗莹莹 (Luo Yingying). 多机并联 VSG 的功率分配控制策略研究 (Research on the control strategy of power sharing for multi-parallel VSG inverters) [D]. 北京:

华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2018.

[6] 叶哲琳, 侯凯, 何安然, 等 (Ye Zhelin, Hou Kai, He Anran, et al.). 孤网中虚拟同步发电机并联均流控制策略 (Average-current control strategy of parallel VSGs in isolated system) [J]. 电气传动 (Electric Drive), 2018, 48 (9): 72-76.

[7] 谢永流, 程志江, 李永东, 等 (Xie Yongliu, Cheng Zhijiang, Li Yongdong, et al.). 引入虚拟阻抗的并联逆变器新型下垂控制策略 (New droop control strategy for parallel inverter with virtual impedance) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (3): 22-25, 61.

[8] Zhang Bo, Li Dongxue, Wang Yuke, et al. Self-adaptable reactive power-voltage controller for virtual synchronous generators [J]. The Journal of Engineering, 2019, (16): 2969-2973.

[9] He Jinwei, Li Yunwei. An enhanced microgrid load demand sharing strategy [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (9): 3984-3995.

[10] 郭倩, 林燎源, 武宏彦, 等 (Guo Qian, Lin Liaoyuan, Wu Hongyan, et al.). 一种改进的分布式电源无功功率精确分配下垂控制策略 (An improved droop control strategy for accurate reactive power sharing among distributed generators) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (15): 30-34, 74.

[11] 袁健, 杨伟 (Yuan Jian, Yang Wei). 独立微网中多虚拟同步机功率精确分配控制策略 (Accurate power sharing control strategy of multiple virtual synchronous generators in independent micro-grid) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2019, 47 (4): 35-42.

[12] 黄媛, 罗安, 陈燕东, 等 (Huang Yuan, Luo An, Chen Yandong, et al.). 一种三阶广义积分交叉对消电流反馈控制的多逆变器并联控制策略 (A current feedback control strategy for parallel operation of multi-inverters using third-order general-integrator crossover cancellation method) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (28): 4855-4864.

[13] 叶佳卓, 杨力, 伍诗雨, 等 (Ye Jiazhao, Yang Li, Wu Shiyu, et al.). 孤岛微电网自适应虚拟阻抗控制策略 (Adaptive virtual impedance control strategy for island microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (12): 1-9.

[14] Yan Xiangwu, Mohamed Sara Y A, Li Dongxue, et al. Parallel operation of virtual synchronous generators and

synchronous generators in a microgrid [J]. The Journal of Engineering, 2019, (16): 2635-2642.

[15] 高长璧 (Gao Changbi). 使用自适应虚拟阻抗的孤岛微网无功均分控制 (Reactive power sharing control using adaptive virtual impedances in islanded microgrid) [J]. 电气传动 (Electric Drive), 2017, 47 (10): 42-47.

[16] 吴丽珍, 雷艾虎, 郝晓弘 (Wu Lizhen, Lei Aihu, Hao Xiaohong). 孤岛微电网电压和频率网络化分层控制 (Voltage and frequency networked hierarchical control for islanded microgrids) [J]. 控制工程 (Control Engineering of China), 2019, 26 (1): 162-169.

[17] 张波, 颜湘武, 黄毅斌, 等 (Zhang Bo, Yan Xiangwu, Huang Yibin, et al.). 虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法 (Stability control and inertia matching method of multi-parallel virtual synchronous generators) [J]. 电工技术学报 (Transaction of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (10): 42-52.

Accurate power distribution control strategy for VSG parallel operation in island microgrid

ZHOU Ning-bo¹, YE Jia-zhuo¹, DENG Shuang-xi¹, FAN Cheng-yang¹,
LUO Ang-jie², ZHOU Zhao-xia¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Changsha Metro Operation Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: In the island microgrid, using the VSG control strategy to control the inverter can effectively increase the inertia and damping of the system and improve the stability of the island microgrid system. When multiple VSGs are operated in parallel, the reactive power cannot be accurately distributed by the drooping coefficient. Aiming at this problem, this paper proposes a voltage compensation strategy based on distributed quadratic controller. The distributed secondary controller obtains the reactive power value of each VSG, adaptively adjusts the VSG stator reactance value according to the required reactive power, and indirectly controls the actual value of the reactive power output of the inverter to achieve the goal of accurate reactive power distribution. This control strategy does not require line impedance information and is robust in the event of network communication failure, and in practical applications, the bandwidth requirement for the communication network can be reduced. At the same time, the matching method of VSG parameters in parallel operation is given. Finally, three VSG parallel simulation models are built in Matlab/Simulink. The simulation results verify the effectiveness and feasibility of the proposed control strategy.

Key words: microgrid; virtual synchronous generator; reactive power equalization; distributed quadratic control