

孤岛微电网自适应虚拟阻抗控制策略

叶佳卓¹, 杨力¹, 伍诗雨¹, 周朝霞¹, 陈希华²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;
2. 湖南省电力公司长沙电力局, 湖南 长沙 410015)

摘要:受到馈线阻抗不匹配等因素的影响,孤岛微电网在传统的下垂控制下难以按照下垂系数合理分配负载无功功率。为了提高孤岛微电网无功功率分配精度,本文提出一种自适应虚拟阻抗控制策略。该策略根据由通信获取的无功功率参考值自适应调整虚拟阻抗的大小,以补偿馈线间电压降的不匹配,从而实现精确的无功功率均分。该策略不需要测量馈线阻抗参数且对通信的可靠性要求不高。当自适应虚拟阻抗在当前负载条件下已经调节完成时,即使通信中断也能实现精确的无功功率均分。若通信中断时负载发生变化,无功分配精度会降低,但仍优于传统的下垂控制策略。在 Matlab/Simulink 中建立了 20 kV·A 微电网模型,通过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;下垂控制;无功功率均分;自适应虚拟阻抗

DOI: 10.12067/ATEEE1809009 **文章编号:** 1003-3076(2019)12-0001-09 **中图分类号:** TM464

1 引言

为满足日益增长的电力需求,减轻输电系统压力并纳入更多可再生能源,近年来分布式发电(Distributed Generation, DG)技术得到了快速发展。作为分布式电源的有效载体,微电网可利用本地能量管理系统(Energy Management System, EMS)有效协调不同类型的分布式电源,是分布式能源接入电力系统的重要途径。微电网系统既可并网运行也能在孤岛模式下运行,从而提高了供电的质量和可靠性^[1,2]。

当微电网以孤岛模式运行时,每个 DG 单元能够按照其额定值的比例共同承担负载功率。为了实现此目标,微电网广泛采用模拟传统电力系统同步发电机特性的电压频率幅值下垂控制方法^[3]。由于微电网系统在稳态下具有统一的频率,下垂控制可以实现有功功率的精确均分。但是在馈线阻抗不匹配等因素的影响下,传统的下垂控制通常会使各 DG 单元无功功率分配出现偏差,易造成逆变器过流,甚至影响系统稳定性和电

能质量^[4]。为了提高无功功率分配精度,解决孤岛微电网无功功率均分难题,国内外学者进行了广泛研究。

文献[5]利用微电网馈线参数,修改无功下垂项,能实现合理的功率分配结果,但线路的阻抗参数一般难以精确获得。文献[6]提出了一种基于不同时间尺度的分层控制策略,利用增大下垂系数的一次控制提高功率均分的精度同时二次控制提高系统电压和频率质量。另外下垂控制中常利用虚拟阻抗技术改善线路的阻抗特性,提高无功功率分配精度^[7]。文献[8,9]以传统虚拟阻抗控制为基础,增加自适应项,减少馈线阻抗不匹配对系统无功功率分配的影响。然而以上方法都只是提高了无功功率分配精度,而无法消除误差,达到精确的无功均分。

此外,在不降低可靠性的前提下,也可利用通信手段增强下垂控制的性能并实现无功均分。文献[10,11]在逆变器的控制中引入低频同步信号,通过无功补偿机制和电压恢复机制改善无功分配精度并保证电压质量。但该方法对通信要求很高且易受到负荷变化的影响。文献[12]则是利用通信获取

收稿日期: 2018-09-06
基金项目: 国家自然科学基金项目(51877073)、湖南省重点研发计划项目(2017SK2182)
作者简介: 叶佳卓(1965-),男,湖南籍,副教授,研究方向为电力电子与电力传动;
杨力(1995-),男,安徽籍,硕士研究生,研究方向为微电网控制技术。

馈线阻抗大小,用于设计虚拟阻抗以补偿馈线阻抗差异从而实现无功功率均分。然而该方法采用谐波注入法估算馈线阻抗,降低了微电网的电能质量且不适用于长馈线和更高功率水平。文献[13,14]利用通信获取相邻电源的功率信息而自适应调节虚拟阻抗大小,实现负荷功率的合理分配。然而各分布式电源通过通信彼此互联降低了系统的可靠性且对于通信的依赖性较高。

针对以上问题,本文在传统下垂控制方法的基础上提出一种自适应虚拟阻抗控制策略以实现精确的无功功率均分。该策略利用通信获取逆变器的无功功率参考值,以此作为给定参考信号自适应调整虚拟阻抗的大小以补偿馈线间电压降的不匹配,从而间接控制逆变器的无功功率输出,使得各 DG 单元能够均分系统的无功功率负荷。该策略不需要获知馈线阻抗参数,且对通信可靠性要求不高。通信故障也不会对本策略的控制效果造成太大影响。

2 孤岛微电网传统下垂控制

2.1 孤岛微电网结构与下垂控制方程

本文主要考虑低电压配电水平下运行的微电网,孤岛微电网结构如图1所示。每个 DG 单元通过馈线连接至公共母线,所有连接到母线上的负载等效为一个集中负载。重点研究基本有功功率和无功功率均分问题,因此只考虑线性负载。每个 DG 单元都由一个直流电源,一个三相逆变器和一个 LC 滤波器组成。为了减少有功和无功功率耦合,通常会在 DG 单元的输出接口加上一个物理或虚拟电感器^[1,4],馈线阻抗包括了接口电感,隔离变压器以及馈电电缆的阻抗。

微电网逆变器采用下垂控制方法,控制结构如图2所示。根据采集到的电容电压和馈线电流,计算出逆变器输出的有功功率和无功功率,再由下垂方程得到逆变器的参考输出电压 u_{i_ref} 。其中有功频率和无功-电压幅值下垂方程为:

$$\begin{cases} \omega_{i_ref} = \omega_{i0} - D_{P_i} P_i \\ U_{i_ref} = U_{i0} - D_{Q_i} Q_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω_{i_ref} 和 U_{i_ref} 分别为 DG i 逆变器参考输出电压的频率和幅值; ω_{i0} 、 U_{i0} 分别为 DG i 空载输出电压的频率和幅值; P_i 和 Q_i 分别为 DG i 单元经滤波后实际输出的有功功率与无功功率; D_{P_i} 、 D_{Q_i} 分别为有功和无功下垂系数。

另外,微电网可通过二次控制来改善下垂控制

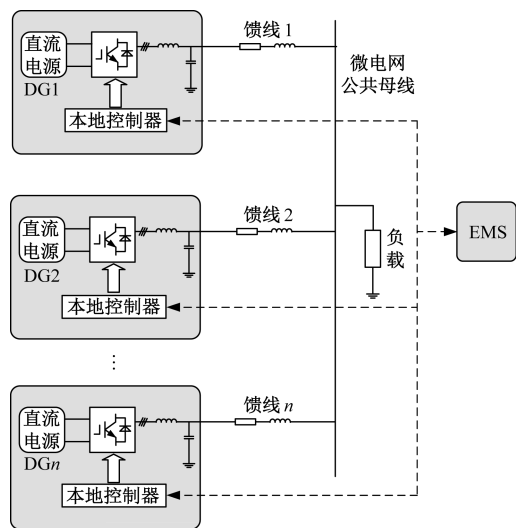


图1 孤岛微电网结构

Fig. 1 Structure diagram of island microgrid

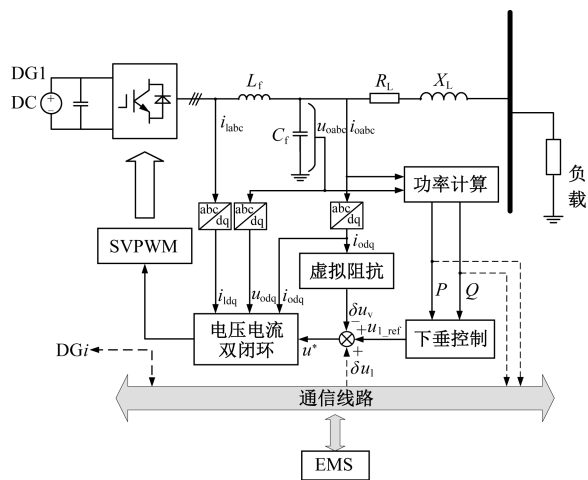


图2 微电网逆变器控制结构

Fig. 2 Structure of microgrid inverter controller

效果,提高系统的频率和电压质量^[6,15]。图2中的 δu_1 即 EMS 发送给 DG1 的电压二次调节信号。

2.2 传统下垂控制下负载功率分配机理

2.2.1 有功功率分配

当微电网稳定运行时,系统内所有逆变器具有相同的运行频率:

$$\omega_{1_ref} = \omega_{2_ref} = \dots = \omega_{n_ref} = \omega \quad (2)$$

同时,微电网各 DG 单元逆变器设置为相同的空载电压频率和幅值:

$$\begin{cases} \omega_{10} = \omega_{20} = \dots = \omega_{n0} = \omega_0 \\ U_{10} = U_{20} = \dots = U_{n0} = U_0 \end{cases} \quad (3)$$

则根据式(1)可得:

$$D_{P1} P_1 = D_{P2} P_2 = \dots = D_{Pn} P_n \quad (4)$$

且当负载变化时有:

$$D_{p1}\Delta P_1 = D_{p2}\Delta P_2 = \dots = D_{pn}\Delta P_n = \Delta\omega \quad (5)$$

式中, $\Delta\omega$ 为负载发生变化时系统电压频率的变化量; ΔP_1 、 ΔP_2 、 ΔP_n 则分别为各逆变器输出有功功率的变化量。因此, 传统下垂控制下每个 DG 单元逆变器可以按照各自的有功下垂系数合理承担系统的有功功率负荷。

2.2.2 无功功率分配

与有功功率分配原理相同, 由式(1)可知, 若要满足:

$$\begin{cases} D_{q1}Q_1 = D_{q2}Q_2 = \dots = D_{qn}Q_n \\ D_{q1}\Delta Q_1 = D_{q2}\Delta Q_2 = \dots = D_{qn}\Delta Q_n \end{cases} \quad (6)$$

需使得:

$$U_{1_ref} = U_{2_ref} = \dots = U_{n_ref} \quad (7)$$

式中, ΔQ_1 、 ΔQ_2 、 ΔQ_n 分别为各逆变器输出无功功率的变化量。但在微电网中, 由于各个馈线的阻抗值不匹配, 各 DG 单元与公共母线间的馈线电压降不相等。故每个 DG 单元逆变器输出电压也难以相等。

馈线阻抗电压降可近似为:

$$\Delta U \approx \frac{XQ + RP}{U_0} \quad (8)$$

式中, X 和 R 分别表示馈线阻抗的电抗值与电阻值; P 、 Q 分别为流过馈线的有功功率和无功功率; U_0 为系统空载电压幅值。则 DG i 的输出电压可表示为:

$$U_i = U_{pcc} + \frac{X_i Q_i + R_i P_i}{U_0} \quad (9)$$

式中, U_{pcc} 为微电网母线电压。

以无功下垂系数相等的两台逆变器为例, 忽略馈线电阻大小, 由式(1)和式(9)可以分别得到逆变器和馈线的电压无功特性, 如图3所示。从图3中可以看到, 当馈线阻抗不匹配时($X_1 > X_2$), $Q_2 > Q_1$, 两台 DG 单元输出的无功功率不相等。同时, 增大下垂系数(D_q 增大为 D'_q)可以减少无功功率偏差, 但是无功偏差依然存在且会造成公共母线电压降低, 影响微电网系统的稳定性。因此, 传统下垂控制下, 各 DG 单元难以按照各自无功下垂系数均分系统的无功功率负荷。

3 自适应虚拟阻抗控制策略

3.1 馈线电压降分析

在孤岛微电网中, 馈线阻抗不匹配导致馈线间的电压降不相等, 从而造成了各 DG 单元无功功率

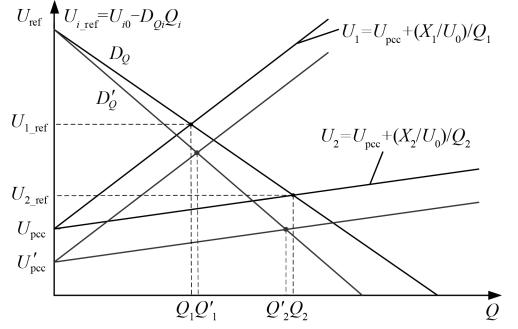


图3 DG单元无功功率分配结果

Fig. 3 Reactive power distribution of two DG units

分配不均。因而可通过分析馈线电压降来讨论微电网无功功率分配不均问题。

以两个 DG 单元并联运行的微电网为例, 其结构如图4所示。

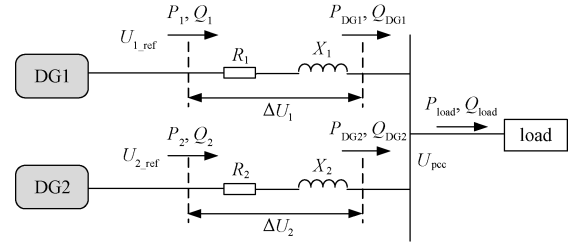


图4 两 DG 单元并联微电网模型

Fig. 4 Model of microgrid with two DG units

图4中馈线1和馈线2上的电压降可分别近似为:

$$\Delta U_1 \approx \frac{X_1 Q_1 + R_1 P_1}{U_0} \quad (10)$$

$$\Delta U_2 \approx \frac{X_2 Q_2 + R_2 P_2}{U_0} \quad (11)$$

馈线间的阻抗差为:

$$\Delta X = X_1 - X_2 \quad (12)$$

$$\Delta R = R_1 - R_2 \quad (13)$$

以 DG2 及馈线 2 为参考, 考虑到式(12)和式(13), 图4中的微电网结构可等效为如图5所示的简化模型。图5中, X 和 R 分别为馈线2的电抗值与电阻值; R_v 和 X_v 为 DG1 控制器中可能引入的虚拟阻抗, δU_v 为虚拟阻抗上的电压降; U_{1_ref} 和 U_{2_ref} 分别为下垂控制器所产生的参考输出电压。若不考虑虚拟阻抗, 稳态运行时可认为两个 DG 单元的输出电压分别与下垂控制器的参考电压 U_{1_ref} 、 U_{2_ref} 相同。由式(10)可得:

适应虚拟阻抗调节期间, 每个 DG 单元输出无功功率的瞬变不会引起参考值 Q^* 的变化。除非负载发生变化, 否则 Q^* 一般会保持恒定值不变。因此, K_v 一旦开始针对当前负载进行调整, 只要负载不变, 即使通信中断, 最终也能实现准确的无功功率均分。若通信中断时, 负载发生了变化, 无功功率分配精度也仍优于传统的下垂控制, 关于这部分原理将在 3.3 节进行详细分析。

考虑到若以 DG1 为参考, DG2 之外的网络也可等效为类似图 5 所示的结构, 因此相同的分析也可应用于 DG2 中。实际上, 对于包含三个或更多 DG 单元的微电网, 通常按照与 DG1 相同的方式来设计每个 DG 单元的自适应虚拟阻抗控制器。

3.3 自适应虚拟阻抗变量对工作点灵敏度分析

发生通信故障时, 由于 Q^* 会保持最近值不变, 自适应虚拟阻抗稳定后也将保持为当前值不再变化。通信故障后, 若负载工作点不变, 则无功功率分配误差为 0。若之后工作点发生了变化, 则自适应虚拟阻抗变量 K_v 将不再适应新的负载情况, 无功功率分配就会出现一定误差。将 K_v 为适应新的工作点应作出的变化量定义为 K_v 对工作点变化的灵敏度 S_v 。

由式(22)可得:

$$K_v \approx -\frac{\Delta X + \Delta R(P/Q)}{1 + (P/Q)} \quad (23)$$

由式(23)可知, K_v 的大小与 P/Q 的比值有关, 因此任何具有相同 P/Q (相同功率因数) 的工作点对应的 K_v 也相同。定义 K_{PQ} 为 P/Q 的比值 P/Q , 在工作点附近有:

$$K_v \approx K_{v0} + \left. \frac{\partial K_v}{\partial K_{PQ}} \right|_{K_{PQ0}} \Delta K_{PQ} \quad (24)$$

式中, K_{v0} 为某工作点上的虚拟阻抗变量; K_{PQ0} 则为该工作点对应的 PQ 比值。式(24)中 K_v 表达式的斜率即 K_v 对于该工作点的灵敏度, 为:

$$\begin{aligned} S_v &= \left. \frac{\partial}{\partial K_{PQ}} \left(\frac{\Delta X + \Delta R K_{PQ}}{1 + K_{PQ}} \right) \right|_{K_{PQ0}} \\ &= \frac{-(1 + K_{PQ0})\Delta R + (\Delta X + \Delta R K_{PQ0})}{(1 + K_{PQ0})^2} \end{aligned} \quad (25)$$

以馈线 1 和馈线 2 的阻抗分别为 $0.8 + j1.130\Omega$ 与 $1.3 + j2.07\Omega$ 为例, 考察 K_v 对工作点的敏感度大小, 其中 $\Delta X = 0.94\Omega$, $\Delta R = 0.5\Omega$ 。如图 7 所示, K_{PQ} 越大 (功率因数 PF 越大) 则 K_v 的敏感度越小。当 $PF > 0.74$ 时, $|S_v| < 0.1$, 且当 K_{PQ} 从 2 变化到 20

(PF 由 0.89 变化到 0.998) 时, K_v 仅从 -0.646Ω 变化到 -0.521Ω 。为了检验不同的阻抗比对 K_v 灵敏度的影响, 将 ΔX 固定为 0.94Ω , 分别取 5 组不同 ΔR 值, 得到 S_v 的变化曲线如图 8 所示。图 8 的结果再次验证了高 K_{PQ} 值 (高功率因数) 对应低灵敏度的规律。例如当 $K_{PQ} > 1.65$ ($K_{PQ} = 1.65$ 时, $PF = 0.85$) 时, $|S_v|$ 始终都低于 0.1。

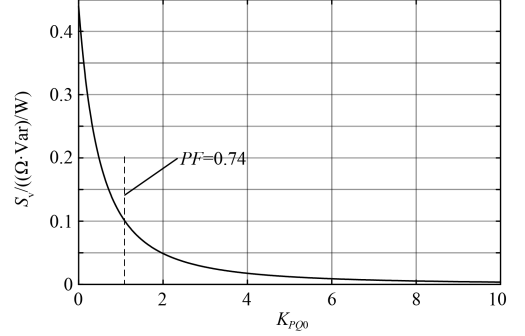


图 7 K_v 对于工作点的敏感度

Fig. 7 Sensitivity of K_v to operating point

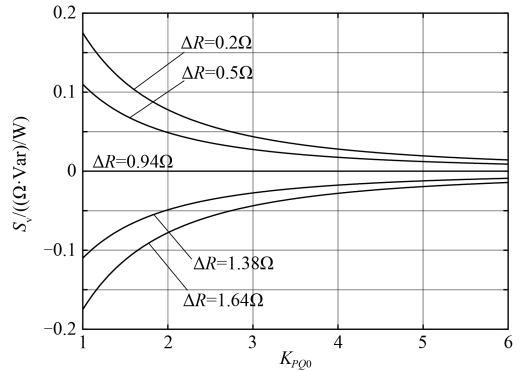


图 8 固定 ΔX 时 S_v 关于工作点的函数曲线

Fig. 8 Function image of S_v on working point with fixed ΔX

由以上分析可知, 当负载功率因数较高时, 自适应虚拟阻抗变量 K_v 对工作点变化的敏感度很低。而微电网中为了维持电压稳定, 保证电压质量, 逆变器功率因数通常要高于 0.85。因此, 发生通信故障后, 即使负载发生了变化, 由于 K_v 的低灵敏度特性, K_v 为适应新的负载所需要调整的幅度很小。所以系统无功功率分配误差仍能保持在很小的范围内。

4 仿真验证及结果

为了验证所提控制策略的可行性与有效性, 在 Matlab/Simulink 中建立了三个 DG 单元并联的孤岛微电网仿真系统进行仿真实验。仿真系统结构如图 9 所示, 系统各参数如表 1 所示。每个 DG 单元逆变

器都设置为相同的额定值和滤波器参数,并选择差异较为显著的三组馈线阻抗,系统负载设置的功率因数变化范围为 0.8~0.95。

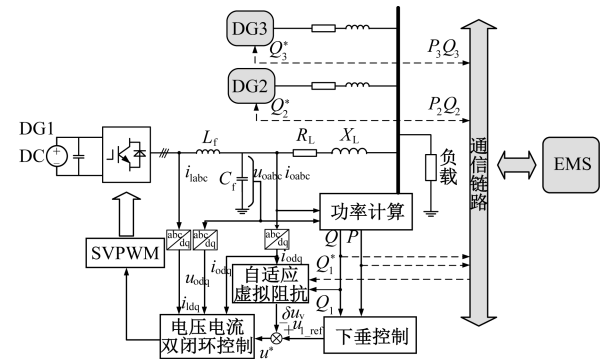


图9 仿真系统结构
Fig. 9 Simulation system structure

表1 仿真系统参数

参数	数值
直流侧电压 U_d/V	1000
空载电压 U_0/V	380
滤波电感/mH	12
滤波电容/ μF	80
逆变器开关频率/kHz	10
频率下垂系数/ $(rad/(s \cdot W))$	0.001
电压下垂系数/ $(V \cdot Var^{-1})$	0.0025
馈线1阻抗/ Ω	$0.8+j1.130$
馈线2阻抗/ Ω	$1.3+j1.416$
馈线3阻抗/ Ω	$1.0+j2.456$
负载1 P_{L1}/W	12000
负载1 Q_{L1}/Var	9000
负载2 P_{L2}/W	9000
负载2 Q_{L2}/Var	3000
积分常数/ $(rad \cdot s^{-1})$	0.016

4.1 传统下垂控制下微电网功率分配结果

在没有增加自适应虚拟控制器的传统下垂控制方法下,微电网各DG单元的功率分配情况如图10所示。由图10可知,孤岛微电网在传统下垂控制下,负载不变或变化时,负载有功功率都可以按照下垂系数在DG单元间进行合理分配,达到有功功率均分,而负载无功功率分配则会出现偏差。为评估所提控制器的控制效果,定义无功功率分配误差为:

$$Q_{er,i} = \frac{Q_i - Q_i^*}{Q_i^*} \times 100\%$$

(26)

式中, Q_i 为 DGi 的实际无功功率; Q_i^* 为 DGi 按额定值比例应当承担的负载无功功率大小。

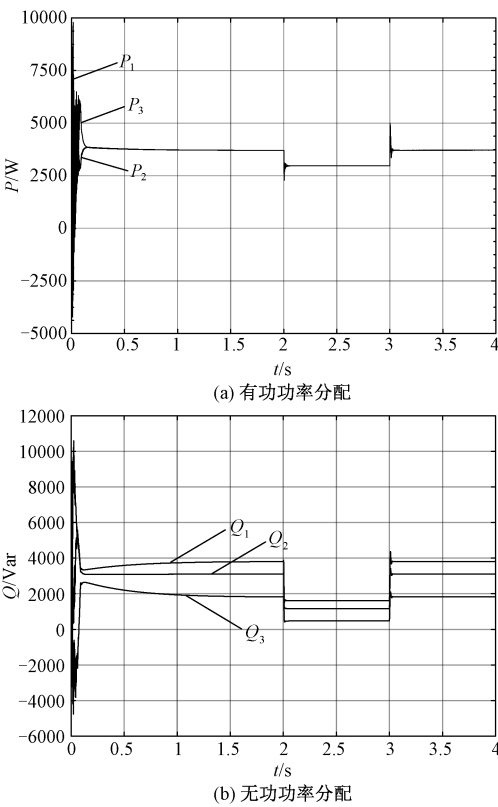


图10 传统下垂控制下微电网功率分配
Fig. 10 Microgrid power allocation under conventional droop control

由图10(b)可知,在较高负载下,DG1、DG2、DG3的无功功率分配误差分别为30.8%、6.7%和-37.4%,较低负载下则分别为49.6%、7.1%和-56.6%,无功分配精度很低。

4.2 自适应虚拟阻抗控制策略的控制效果

施加自适应虚拟阻抗控制器后,微电网负荷功率的分配结果如图11所示。系统在 $t=0.5s$ 时启动自适应虚拟控制器,如图11(b)所示,0.2s内无功功率分配误差即降为零,负载变化也没有影响无功分配精度。并且控制器的调节过程对每个DG单元的有功功率输出只有小幅的瞬态影响,如图11(a)所示。

另外,以a相为例,两种不同控制方法下各逆变器的输出线电流如图12所示。由图12可知,所提自适应虚拟阻抗控制下微电网各DG单元逆变器具有相同的输出线电流,而传统下垂控制下各单元逆变器的输出线电流则不平衡。所提自适应虚拟阻抗控制策略能够实现精准的负载电流均分。

仿真期间自适应虚拟阻抗变量的变化过程如图13所示。由图13可知,一旦自适应虚拟阻抗变量

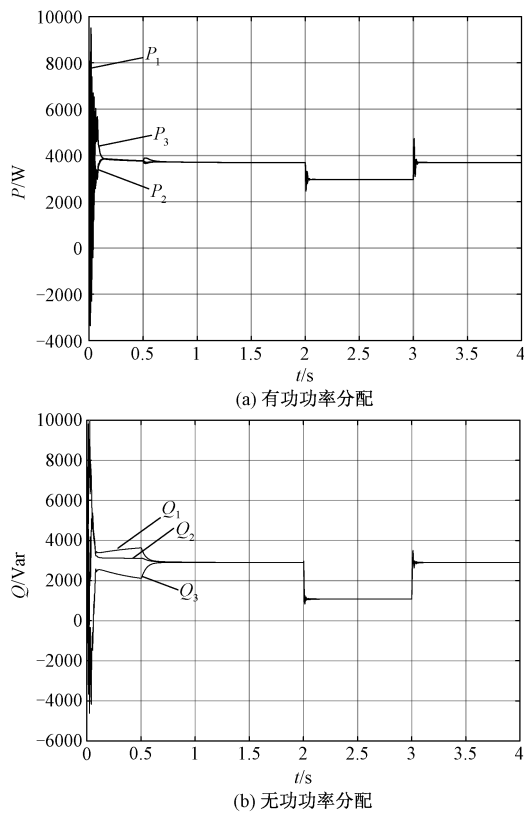


图 11 自适应虚拟阻抗控制下微电网功率分配
Fig. 11 Microgrid power allocation under adaptive virtual impedance control

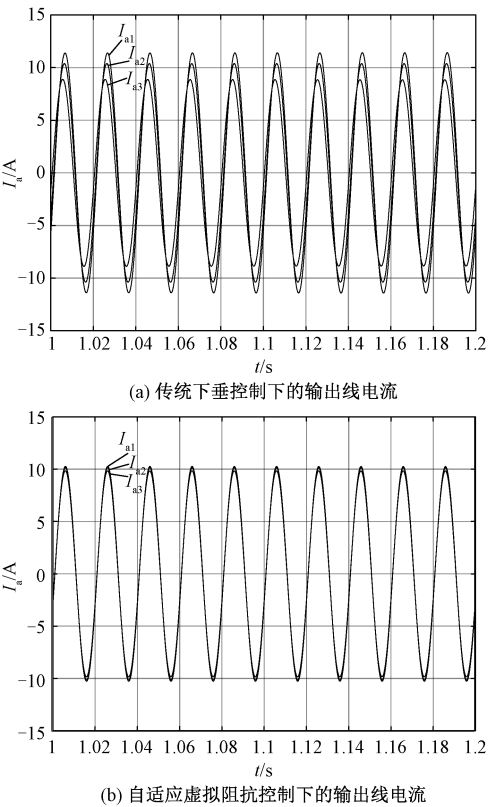


图 12 各逆变器输出线电流
Fig. 12 Inverters output line current

K_v 根据当前的负载调节完成,即可保持稳定值不变,若负载发生了变化, K_v 也只需小幅度的变化调整即可迅速适应新的负载。由此可以验证虚拟阻抗变量对负载工作点的敏感度很低。

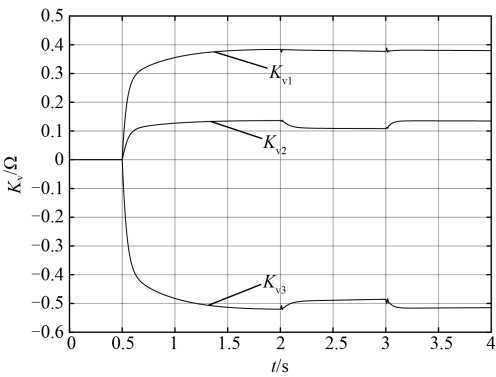


图 13 自适应虚拟阻抗变量的变化
Fig. 13 Adaptive virtual impedance variable change

4.3 通信故障对控制器的影响

$t=2s$ 时发生通信故障,控制器接收单元检测到通信故障后发出超时信号禁用控制器,使得虚拟阻抗变量保持为故障前的值, $t=3s$ 时通信恢复。仿真结果如图 14 所示。从图 14 中可知,当负载不变时,通信故障不会对控制器的性能造成影响,控制器仍可实现精确的无功功率均分。当 $t=2.5s$ 时系统负载发生变化,负载功率因数由 0.8 变化到 0.95,此时 DG1、DG2、和 DG3 的无功功率分配误差分别为 -0.7% 、 -3.5% 、 4.3% ,远小于传统下垂控制下的 49.6% 、 7.1% 和 -56.6% 。由此可以验证,即使通信故障后负载发生变化,无功分配误差也能维持较小的范围内。最后, $t=3s$ 时通信恢复,无功功率分配误差便很快消失,系统重新实现负载无功功率均分。

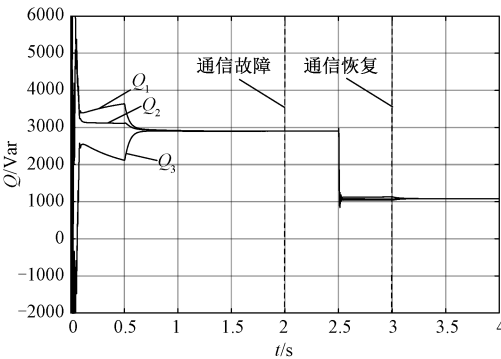


图 14 自适应虚拟阻抗控制下通信故障时无功功率分配
Fig. 14 Reactive power distribution in communication failure under adaptive virtual impedance control

图15显示了通信故障时传统的集中式二次控制方法下系统无功功率分配结果。 $t=1\text{s}$ 时微电网启动二次调节系统,无功功率很快达到均分。而 $t=2\text{s}$ 发生通信故障后,无论此时负载是否变化,系统无功功率分配均立刻出现了很大的误差。恢复通信后,系统才重又达到无功功率均分。因此传统的集中式二次控制方法虽也能实现较为精确的无功功率均分,但是对通信的可靠性要求很高。

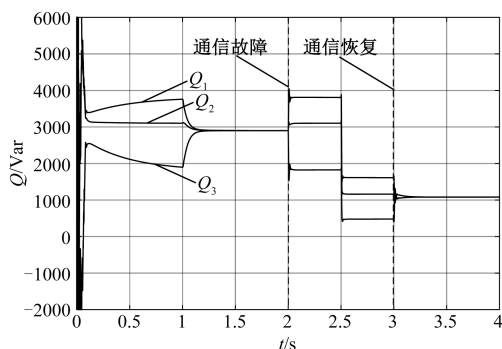


图15 传统集中式二次控制下通信故障时无功功率分配

Fig. 15 Reactive power distribution in communication failure under adaptive virtual impedance control

5 结论

本文首先分析了孤岛微电网在传统下垂控制方法下的功率分配机理。针对微电网难以按照下垂系数均分负载无功功率的原因,提出了一种自适应虚拟阻抗控制策略。该策略以下垂控制方法为基础,引入虚拟阻抗控制,根据由通信获取的逆变器无功功率参考值自适应调整虚拟阻抗大小,补偿馈线阻抗压降不匹配对无功分配的影响,能够实现精确的无功功率均分。控制策略不需要获取馈线阻抗参数,各DG单元仅与EMS进行简单的低带宽低速率通信,保留了下垂控制作为分散控制方式的优点。此外通过分析控制器参数对负载工作点的灵敏度,得知当负载功率因数较高时,通信中断后的负载变化也不会对无功分配精度造成太大影响。因此该策略对通信的可靠性要求不高。最后在Simulink中建立了孤岛微电网仿真模型,通过数字仿真结果验证了控制策略的有效性和可行性。

参考文献 (References):

[1] Sun Yao, Hou Xiaochao, Yang Jian, et al. New perspectives on droop control in AC microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (7): 5741-

5745.

- [2] 朱永强, 贾利虎, 王银顺 (Zhu Yongqiang, Jia Lihu, Wang Yinshun). 微电网结构设计的基本原则 (Basic design principles for micro-grid architecture) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (9): 44-49, 63.
- [3] 谷青发, 王杰 (Gu Qingfa, Wang Jie). 逆变型微网下垂控制器参数选择和稳定性分析 (Droop controller parameter selection and stability analysis for inverter-interfaced microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (7): 34-40.
- [4] He Jinwei, Li Yunwei. Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47 (6): 2525-2538.
- [5] 张庆海, 彭楚武, 陈燕东, 等 (Zhang Qinghai, Peng Chuwu, Chen Yandong, et al.). 一种微电网多逆变器并联运行控制策略 (A control strategy for parallel operation of multi-inverters in microgrid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (25): 126-132, 18.
- [6] 鲍薇, 胡学浩, 李光辉, 等 (Bao Wei, Hu Xuehao, Li Guanghui, et al.). 提高负荷功率均分和电能质量的微电网分层控制 (Hierarchical control of microgrid to improve power sharing and power quality) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (34): 106-114, 18.
- [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] 刘尧, 林超, 陈滔, 等 (Liu Yao, Lin Chao, Chen Tao, et al.). 基于自适应虚拟阻抗的交流微电网无功功率—电压控制策略 (Reactive power-voltage control strategy of AC microgrid based on adaptive virtual impedance) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2017, 41 (5): 16-21, 133.
- [9] 朱一昕, 卓放, 王丰, 等 (Zhu Yixin, Zhuo Fang, Wang Feng, et al.). 用于微电网无功均衡控制的虚拟阻抗优化方法 (Virtual impedance optimization method for microgrid reactive power sharing control) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (17): 4552-4564.
- [10] 韩华, 刘尧, 孙尧, 等 (Han Hua, Liu Yao, Sun Yao, et al.). 一种微电网无功均分的改进控制策略 (An

- improved control strategy for reactive power sharing in microgrids) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (16): 2639-2648.
- [11] He Jinwei, Li Yunwei. An enhanced microgrid load demand sharing strategy [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (9): 3984-3995.
- [12] He Jinwei, Li Yunwei, Guerrero Josep M, et al. An islanding microgrid power sharing approach using enhanced virtual impedance control scheme [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (11): 5272-5282.
- [13] 郭倩, 林燎源, 武宏彦, 等 (Guo Qian, Lin Li-aoyuan, Wu Hongyan, et al.). 考虑自适应虚拟阻抗的微电网分布式功率控制策略 (Distributed power control strategy for microgrids considering adaptive virtual impedance) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2016, 40 (19): 23-29.
- [14] Mahmood Hisham, Michaelson Dennis, Jiang Jin. Accurate reactive power sharing in an islanded microgrid using adaptive virtual impedances [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (3): 1605-1617.
- [15] Mansour Soha, Marei Mostafa I, Sattar Ahmed A. Decentralized secondary control for frequency restoration of microgrids with VF and PQ droop controlled inverters [A]. 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference [C]. 2017. 1170-1176.

Adaptive virtual impedance control strategy for island microgrid

YE Jia-zhuo¹, YANG Li¹, WU Shi-yu¹, ZHOU Zhao-xia¹, CHEN Xi-hua²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Changsha Electrical Power Bureau, Hunan Electric Power Company, Changsha 410015, China)

Abstract: In the island microgrid, due to factors such as line impedance mismatch, the traditional droop control is difficult to reasonably distribute reactive power according to the droop coefficient. In order to improve the reactive power distribution accuracy of island microgrid, an adaptive virtual impedance control strategy is proposed in this paper. The strategy adaptively adjusts the magnitude of the virtual impedance according to the reactive power reference value obtained by the communication to compensate for the mismatch of the voltage drop between the feeders, thereby achieving accurate reactive power sharing. This strategy does not require measurement of the feeder impedance parameter and high reliability of communication. When the adaptive virtual impedance has been adjusted under given load conditions, accurate reactive power sharing can be achieved even if communication is interrupted. If the load changes when the communication is interrupted, the reactive power distribution accuracy will be reduced, but it is still superior to the traditional droop control strategy. The 20kV·A microgrid model is established in Matlab/Simulink. The simulation results verify the effectiveness and feasibility of the proposed control strategy.

Key words: microgrid; droop control; reactive power sharing; adaptive virtual impedance