

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.09.015

多微网系统二次频率控制策略研究*

林艳艳¹, 肖宏飞^{1*}, 陈磊磊², 吴晨曦¹, 钱浩¹

(1 杭州电子科技大学 自动化研究所, 浙江 杭州 310018;

2 天地电研(北京)科技有限公司 杭州分公司, 浙江 杭州 310007)

摘要:针对多微网系统频率控制问题,对微网能量平衡控制、二次频率调整及联络线功率控制等进行了研究,提出了多微网系统二次频率控制策略。按所提控制策略,通过微网中心控制器进行二次频率调整,根据系统频率偏差和联络线功率偏差确定各微网需要调节的功率总量,并按一定的原则分配至调频 DG,各 DG 调整出力将微网频率调整至目标值,并将联络线功率恢复至计划值;以两微网系统为例,对单网内发生负荷波动及双网同时发生负荷波动的情况进行了仿真。研究结果表明,所提控制策略可在系统发生负荷波动时快速恢复联络线功率,同时保证微网系统频率的稳定。

关键词:多微网系统;二次调频;微网中心控制器;联络线;微网控制误差

中图分类号:TM727.2⁺2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)09-1109-06

Secondary frequency control for multi-microgrid system

LIN Yan-yan¹, XIAO Hong-fei¹, CHEN Lei-lei², WU Chen-xi¹, QIAN Hao¹

(1. Institute of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Beijing T&D Power Research Co., Ltd., Hangzhou Branch, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Aiming at the problem of frequency regulation for multi-microgrid system, power balance, secondary frequency regulation and tie-line power control were studied. A novel secondary frequency control strategy was proposed. A microgrid central controller(MGCC) was designed to undertake the task of frequency regulation. According to deviations of system frequency and tie-line power, the expected total power was calculated, which was allocated to the DGs taking part in the secondary frequency regulation. The DGs adjust their outputs to balance the system power vacancy. Simulation studies were performed on a double-microgrid system. Load fluctuations in one microgrid and in both microgrids were carried out respectively on the test system. The results indicate that the proposed control strategy can help to recover the tie-line power to the planned value and maintain the frequency stable.

Key words: multi-microgrid system; secondary frequency regulation; microgrid central controller; tie-line; microgrid control error

0 引言

随着常规化石能源的急剧减少和环境问题的日益突出,各国都加紧了可再生能源及清洁能源应用研究的步伐。微网以整合可再生能源、就地消纳负荷的优势逐渐引起关注。并且随着分布式电源接入容量及类

型的增加,多微网联合运行或将成为普遍的模式,微网间的功率平衡及频率稳定成为其可靠运行的重要保障^[1-2]。

目前多微网系统的功率平衡及频率控制以长期能量平衡控制为主要研究内容,其目标是对各微网及各微电源进行最优功率运行点设定^[3-7],该内容属于经济调度范畴,类似于电力系统的三次调频。对于微网的

收稿日期:2015-05-11

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51407052)

作者简介:林艳艳(1990-),女,浙江台州人,硕士研究生,主要从事微电网频率控制、分布式发电技术方面的研究。E-mail:243095023@qq.com

通信联系人:肖宏飞,女,博士,副教授。E-mail:xiaohf@hdu.edu.cn

优化调度,也可采用多代理系统(multi-agent system, MAS)的平台实现^[8-9]。MAS 具有良好的集中-分散特性,以自治、通信、可协调性等特点在诸多领域得以应用,但在多微网系统的应用并不多。而关于多微网系统的二次频率调整,无论是在集中控制模式下还是在 MAS 平台下,进行研究的文献都较少。

单微网二次调频以频率偏差作为 DG 输入量进行调整^[10-12],采用分散控制模式。而多微网系统二次调频除控制系统频率外还兼顾联络线功率,属于集中控制模式。文献[13]对此进行了有意义的探索,通过控制系统频差及联络线功率偏差,调整调频电源的出力。由于其在调整过程中每个微网只设置一个调频电源,致使电源输出功率变化显著,导致联络线功率及微网系统频率产生较大波动。

本研究针对多微网系统的二次频率调整展开研究,针对对象与单微网存在较大差异这一问题,采用多个下垂控制的电源参与调频,结合集中调度与分散控制的优势。

1 多微网系统结构与能量控制过程

1.1 系统结构

本研究中多微网系统采用馈线式并联连接模式,系统总体结构如图 1 所示。

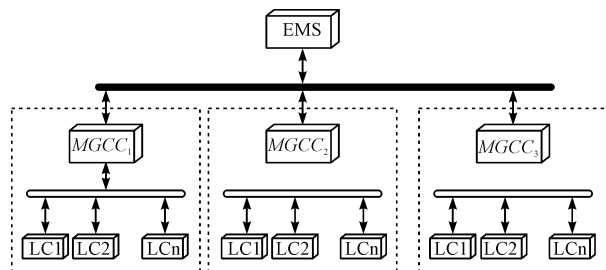


图 1 互联微网系统总体结构

该模式首先由雅典国立科技大学提出^[14],共包括 3 个层次:

(1) 上层控制。主要管理微网间的功率平衡及其与公用电网间的功率流动,从电压等级来看,涉及中压的公用电网。这部分功能主要依靠能量管理系统(energy management system, EMS)实现。

(2) 中间层控制。属于微网内部的功率平衡控制,面向低压微网,解决电源参考值设置问题。这部分功能主要依靠微网中心控制器(microgrid central controller, MGCC)实现。

(3) 底层控制。面向发电单元、储能单元及负荷单元,各单元的功率控制器(local controller, LC)接收中间

层指令,输出/吸收指定的功率或指定的电压及频率。

1.2 能量控制过程

从微网长期运行来看,EMS 可以将负荷变动、实时电价、可再生能源输出波动等因素协调考虑,保证微网系统长期功率平衡,在实现频率稳定的目标下经济地运行。MGCC 则负责微网系统的动态响应,完成微网的协调控制、执行 EMS 指令、调整微网内部电源及负荷的功能,实现微网短期功率平衡以稳定微网频率和电压。这一过程中,MGCC 需要采用适合的控制策略来保证电能质量,实现与主网的预同步。局部控制则是通过 Vf 控制、PQ 控制、下垂控制等控制策略来调节微源的输出特性,使其在最大程度利用可再生能源的前提下完成频率的一次调节。本研究针对中间层的 MGCC 提出二次频率控制策略。

2 二次频率的控制目标与控制策略

2.1 控制目标

对于互联电力系统,频率和联络线功率变化均为重点监控量^[15-16]。在多微网的联合运行中也应重点考核这两个参数。此处,定义微网系统控制偏差(microgrid control error, MGCE)。根据考核目标的不同,MGCE 可以考虑 3 种计算方式:

(1) 考核频率指标,实现稳定的频率控制。控制目标为 $\Delta f_i = 0$,则 MGCE 的表达式为:

$$MGCE_i = K_i \Delta f_i \quad (1)$$

式中: K_i —微网 i 的频率偏移系数, $\text{kW} \cdot \text{H}^{-1}$,其值与微网结构及运行状态有关。

这种控制方式下有功功率平衡将按 $\Delta f_i = 0$ 的方向进行调节,各微网频率偏差均为 0 时调频结束。该控制目标可有效保证频率稳定,但无法恢复联络线功率。

(2) 考核联络线功率,实现恒定的联络线功率控制。控制目标为 $\Delta P_{T,i} = 0$,则 MGCE 表达式为:

$$MGCE_i = \Delta P_{T,i} \quad (2)$$

式中: $\Delta P_{T,i}$ —微网 i 的联络线功率计划值与实际值偏差。

在这种控制方式下,各微网内部有功功率平衡按 $\Delta P_{T,i} = 0$ 的方向进行调节。该控制目标可使调频结束后联络线功率维持在计划值,但无法恢复各微网的频率偏差。

(3) 同时控制联络线功率和频率。MGCE 表达式为:

$$MGCE_i = K_i \Delta f_i + \Delta P_{T,i} \quad (3)$$

该方式兼顾了第一、二种方式的优点,在调频结束

时既能恢复各微网频率偏差,也能使联络线功率维持在计划值。对于多微网系统而言,每个微网可能隶属于不同的经济实体,安装的电源容量、类型相差较大,各网内功率平衡控制自由度较大,频率存在明显差异,且联络线功率也需明确核算。第三种方式除保证频率的稳定,还可在紧急情况下实现微网间的相互增援,并在临时支援后将联络线功率恢复至计划值。本研究采用第三种控制目标。

2.2 控制策略

现以两微网系统为例说明二次调频策略。在频率-联络线功率控制目标下,MGCC 根据系统频率偏差和联络线功率偏差确定各微网需要调节的功率总量,并按一定的原则分配各 DG,如图 2 所示。

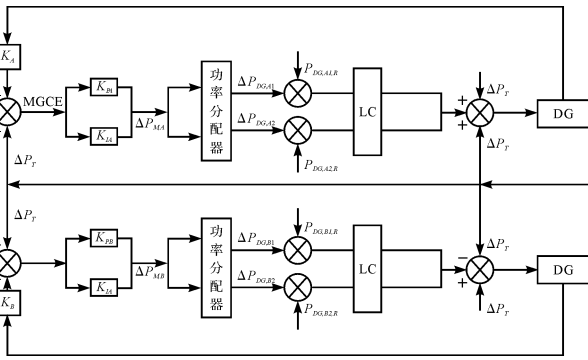


图2 两微网系统频率控制

图中: K_A, K_B —微网A、B的频率偏移系数; $\Delta P_{M,A}, \Delta P_{M,B}$ —各网调节功率总量; $\Delta P_{DG,A1}, \Delta P_{DG,A2}, \Delta P_{DG,B1}, \Delta P_{DG,B2}$ —DG调节功率; $P_{DG,A1}, P_{DG,A2}, P_{DG,B1}, P_{DG,B2}$ —DG功率参考值; $\Delta P_{LA}, \Delta P_{LB}$ —微网内部负荷波动; ΔP_T —联络线功率计划值与实际值偏差,对于两网互联的情形, $\Delta P_{T,A} = -\Delta P_{T,B}$

MGCC 首先采集微网实时数据计算频率偏差及联络线功率偏差生成 MGCE,然后将 MGCE 转化成相应的微网调节功率总量。此处采用积分环节以消除稳态时频率和联络线功率偏差。考虑到系统的初始响应速度,加入比例环节,其调频方程式为:

$$K_{I,i} \int \text{MGCE}_i dt + K_{P,i} \text{MGCE}_i + \Delta P_{M,i} = 0 \quad i = A, B \quad (4)$$

式中: $K_{P,i}, K_{I,i}$ —各微网 PI 控制器的比例、积分系数。

由于包含了积差项,在调频过程结束时,有:

$$\Delta f_i = 0, \Delta P_{T,i} = 0 \quad (5)$$

在调整过程中,微网中心控制器进一步将调节功率分配至调频机组:

$$\Delta P_{DG,i,j} = \alpha_j \Delta P_{M,i} \quad (6)$$

式中: $\Delta P_{DG,i,j}$ —微网*i*内参与二次频率调整的第*j*个电

源的功率调整量; α_j —其功率分配系数。

在电力系统中,参与二次调频的发电机功率调整也采用类似的分配系数,但其值根据经济调度的基点功率确定,且基点功率取决于等微增原则的经济调度结果,是在既定的机组组合情况下优化火电机组的出力。然而微网电源类型较多,除旋转电机外还存在较多的静止电源,并且微网的应用是以整合分散的发电资源、最大限度地利用可再生能源为目的。如果存在利用自然能源发电的电源,则优先考虑,此后再考虑易于调度的、利用非可再生能源发电的电源。因此传统意义上的等微增分配原则不能直接应用。研究中将自然变动电源满发,采用 PQ 控制;将易于控制的储能装置作为参与二次调频的电源,采用下垂控制。在频率的二次调整中,保持各调频电源的出力调整量均匀分配,最易行的方式便是按各自容量进行分配,即:

$$\alpha_j = \frac{P_{DG,j,N}}{\sum_{j \in J} P_{DG,j,N}} \quad (7)$$

式中: J —微网内参与二次调频的电源集合。

根据现有的设计思想,本研究将各电源的下垂系数设计成与容量成反比。为加快电源的调整速度,当前有功功率不平衡量也可计入调整范围,其分配的原则仍依据电源的容量,则式(6)变为:

$$\Delta P_{DG,i,j} = \alpha_j \left(\sum_j P_{DG,j,ref} - \sum_j P_{DG,j} + \Delta P_{M,i} \right) \quad (8)$$

电源功率偏差的引入,相当于增大了输入信号的偏差,有利于缩短系统暂态过程,快速进入稳定。

3 DG 的控制

在频率二次调整中,MGCC 生成 DG 新的功率参考值,DG 据此调整输出功率完成一次调频。研究中 DG 采用下垂控制策略。为清晰起见,本研究只给出一个 DG 及其控制系统结构框图,如图 3 所示。

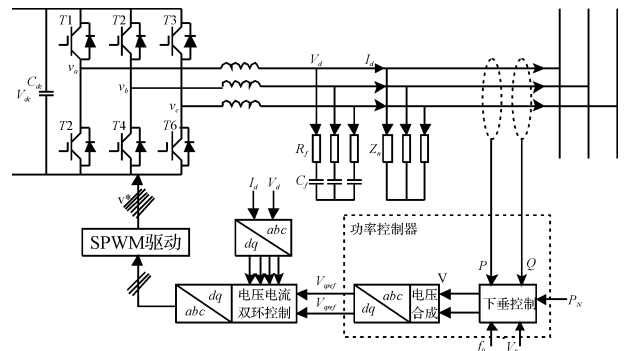


图3 DG下垂控制结构图

该控制系统主要由电压电流控制器和功率控制器

组成。功率控制器检测到 DG 逆变单元的输出功率,经过下垂控制、电压合成环节生成 dq 轴电压参考值 V_{dref} 、 V_{qref} 。电压电流控制器为双闭环结构,外环为电压控制,内环为电流控制。该环节生成 DG 逆变器的 SPWM 驱动信号,双环控制系统结构如图 4 所示。

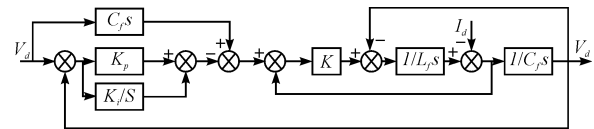


图 4 电压电流双闭环控制系统结构图

该系统的传递函数为:

$$V_d = \frac{KC_f s^2 + KK_p s + KK_i}{L_f C_f s^3 + KC_f s^2 + (1 + KK_p)s + KK_i} V_d^* - \frac{L_f s^2}{L_f C_f s^3 + KC_f s^2 + (1 + KK_p)s + KK_i} I_d \quad (3)$$

式中: V_d^* 、 V_d — 逆变器电压参考值和实际值; I_d — 滤波器输出电流; C_f 、 L_f — 滤波电容和滤波电感; K — 电流控制器增益系数; K_p 、 K_i — 电压环 PI 控制器的比例、积分系数。

当频率为 50 Hz 时,幅值偏差为 0.705,相角偏差为 3.96°,系统是稳定的。

系统的频率响应曲线如图 5 所示。

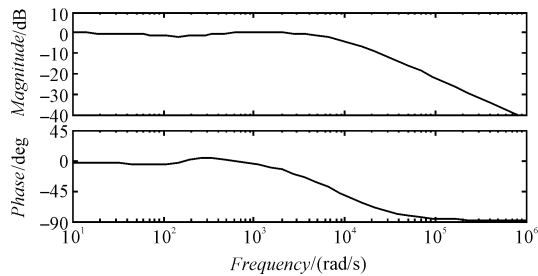


图 5 电压环频域响应曲线

4 仿真研究

利用 PSCAD 软件建立两微网系统模型并进行仿真,验证所提频率控制策略的有效性。各微网额定电压为 0.38 kV,额定频率为 50 Hz。每个微网具备两个可调度 DG,用以模拟储能单元;一个不可调度 DG,用以模拟自然变动电源。每个可调度 DG 都带有 1 个邻近负荷,远端负荷 4、7 分别位于微网 A、B 的交流馈线,初始运行时不投入。微网间以阻性电缆连接。

两微网系统结构示意图如图 6 所示。

4 个可调度 DG 均以直流源模拟,其逆变器采用下垂控制。由于不可控 DG 的输出功率具有随机性、不稳定性,类似于负荷特性,本研究将其与负荷功率合并考虑,作为等值负荷处理。鉴于篇幅,仅列出 DG 的下垂系数及部分控制系统参数,如表 1 所示。

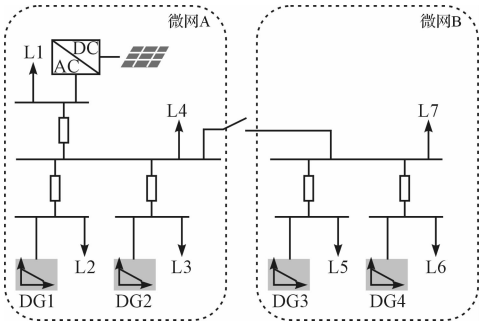


图 6 两微网系统结构示意图

表 1 电源下垂系数及部分系统运行参数

微网 A		微网 B	
K_p	1.00	K_p	0.75
K_i	0.20	K_i	0.20
K_A	$20 \text{ kW} \cdot \text{Hz}^{-1}$	K_B	$20 \text{ kW} \cdot \text{Hz}^{-1}$
m_1	$0.0013 \text{ Hz} \cdot \text{kW}^{-1}$	m_3	$0.0020 \text{ Hz} \cdot \text{kW}^{-1}$
m_2	$0.0020 \text{ Hz} \cdot \text{kW}^{-1}$	m_4	$0.0016 \text{ Hz} \cdot \text{kW}^{-1}$

仿真中主要验证 4 个问题:

- (1) 系统频率能否恢复至目标值或额定值;
- (2) 联络线功率能否恢复至计划值;
- (3) 频率调整过程中微网能否互相支援;
- (4) 调频结束后各微网能否承担各自负荷波动。

针对以上目标,将在两种情形下进行仿真:单微网内发生负荷波动、两微网同时发生负荷波动。通常第一种情形较多发生,而严格时间尺度上的多负荷同时变动的概率是比较少的。本研究将对第二种情形也进行模拟用以分析极端情况。

4.1 单微网内负荷波动

在初始运行状态系统频率为 49.985 Hz,联络线功率为 30.95k W,由微网 A 至微网 B。2 s 时 L4 投入运行,其功率为 33 kW。3 s 时启动微网中心控制器进行二次频率调节,系统频率、联络线功率及 DG 出力变化如图 7 所示。

考核图 7 可知,负荷突增导致频率迅速下降。在 2 s~3 s 过程中,各微网 DG 增加输出以响应系统功率缺额。由于参与一次调频的 DG 采用下垂控制,在达到稳态时存在频率偏差。各 DG 有功功率增量分别:10.9 kW、7.15 kW、7.13 kW、8.77 kW,与下垂系数基本成反比。B 网支援 A 网短时功率缺额,以避免 A 网功率缺额过大导致频率过度下降。这一过程中 DG 的响应类似于安装调速器的旋转电机的反应。MGCC 不参与该控制过程。

3 s 时系统启动二次调频,A 网的 DG1、DG2 增加出力直至承担本网全部的负荷变化,而 B 网的电源 DG3、DG4 减少出力直至退出一次调频所增加的出力。各 DG

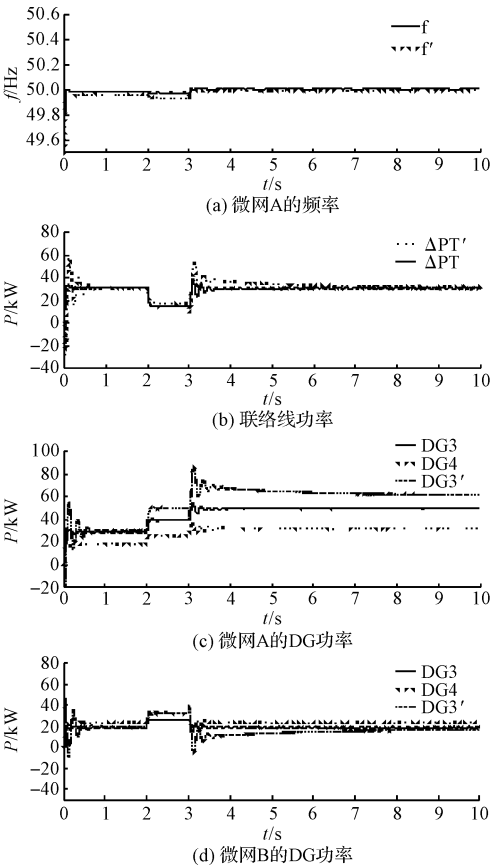


图7 单微网内负荷波动的仿真结果

出力增量为:10 kW、6.47 kW、-7.11 kW、-9.1 kW,A网 DG 功率增量与 B 网 DG 退出的功率相当。

联络线功率变化更为清晰的反映了这一过程。2 s 时联络线功率由原来的 30.95 kW 减少至 14.86 kW(由于网损,联络线功率减少量与电源减少量存在少许偏差),说明系统功率由 B 网流入 A 网,临时支援 A 网功率缺额。3 s 启动二次调频后,联络线功率回至计划值。可见在单网负荷波动的情形下,本研究的控制策略是有效的。

研究中同时采用文献[13]所提策略进行对比分析。图7中带上角标“'”的曲线为相同运行条件下采用文献[13]控制策略的仿真结果。由于不参与调频的 DG 输出功率不变,未在图形中展示。显然,文献[13]在每个微网内只设置一个二次调频电源,在调整过程中全部的功率缺额由其承担,导致出力剧烈变化,并且联络线功率和频率波动幅值均比多个机组调频的情形明显增大。

值得注意的是,二次调频属于集中控制的过程。如果发生通信中断,则二次调频无法进行,系统只能进行一次调频。对于采用下垂控制的微网系统,DG 间无需通讯即可进行独立的输出功率控制,系统仍可保持稳定运行,但不能进行联络线的功率调整,调频结束

时各微网会有较大的频率偏差,此时相当于算例中 2 s~3 s 的频率响应过程。

4.2 两微网同时发生负荷波动

本研究改变近端负荷数据,进行新运行状态下的仿真。1 s 时投入远端负荷 4、7,功率分别为 68.17 kW、34.70 kW,2 s 时启动二次调频,仿真结果如图 8 所示。

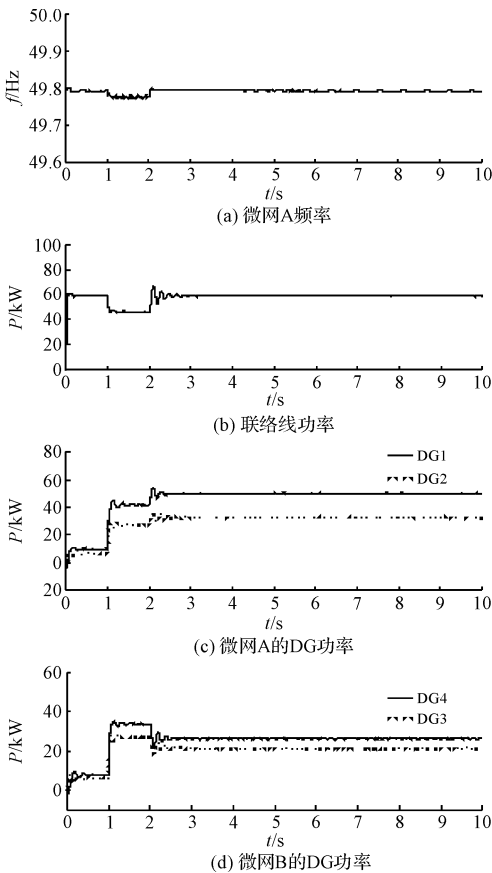


图8 两微网负荷同时发生波动的仿真结果

由于负荷突增,系统频率在 1 s 迅速下降,各 DG 均增加输出以避免更大的频率波动。由于两微网同时发生负荷变化,频率下降较多,至 49.95 Hz。相对而言,A 网负荷增幅更大,DG1、DG2 输出增量仅用于满足本网负荷变化。而 DG3、DG4 除满足自身负荷增幅外,还有富余临时支援 A 网,联络线功率由 59.30 kW 降至 46.17 kW。

4 个 DG 的功率增量如表 2 所示。

表2 DG 功率增量(单位:kW)

功率增量	总量	供 L4 的部分	供 L7 的部分
$\Delta P_{DG1,1}$	31.95	31.95	0.00
$\Delta P_{DG2,1}$	21.12	21.12	0.00
$\Delta P_{DG3,1}$	21.03	6.12	14.91
$\Delta P_{DG4,1}$	26.11	7.96	18.15
$\Delta P_{DG1,2}$	8.55	8.55	0.00
$\Delta P_{DG2,2}$	5.50	5.50	0.00
$\Delta P_{DG3,2}$	-6.12	-6.12	0.00
$\Delta P_{DG4,2}$	8.55	8.55	0.00

因 DG1、DG2 在一次频率调整中的功率增量小于其区域内负荷的增量,在频率的二次调整中需要再度增加输出来满足其负荷需求,分别为 8.55 kW、5.50 kW,两次调整总功率增量为 40.5 kW、26.62 kW,与负荷 4 的增量(68.17 kW)基本一致。相应地,在二次调整中 DG3、DG4 不再承担 A 网的负荷波动,减少输出,其功率值分别回落至 20.98 kW、26.17 kW,较一次调整结束时有所降低,但较负荷变化前有所增加,总增量分别为 14.91 kW、18.42 kW,满足负荷 7 的功率增量(34.7 kW)。联络线功率也恢复至负荷发生变化前的水平。

从理论来讲,在频率的两次调整中,各 DG 的功率增量与下垂系数成反比。但是在仿真中所用逆变器及电缆均存在等值阻抗,导致各 DG 的功率增量与下垂系数并不严格成反比(误差约为 0.5%~1.7%)。同时由于网损的存在,致使在两次频率调整中系统总发电功率增量与总负荷功率增量存在少许偏差,联络线功率的调整也略有偏差。

5 结束语

本研究探讨了多微网系统频率调整问题,提出了多微网系统的二次频率控制策略。研究中采用多个下垂控制的电源参与调频,结合了集中调度与分散控制的优势,由微网中心控制器统一计算调频电源的调整量并将其发送至 DG 控制器,各电源按指令值自主调整出力。这种基于集中-分散控制思想的策略可同时进行联络线功率和系统频率控制,将微网系统频率调整至目标值,并将联络线功率恢复至计划值。研究表明,按所提控制策略,在调频结束时各微网只承担自身区域的负荷变化,不与其他微网的调整发生混淆。同时,MGCC 负责微网二次频率控制,生成 DG 输出功率调整量的参考值,不影响各微网内 DG 的底层控制策略,可与现有的 DG 控制策略实现平滑对接。

参考文献(References):

- [1] 李 鹏,张雪松,赵 波,等.多微网多并网点结构微网设计和模式切换控制策略[J].电力系统自动化,2015,39(9):172-178.
- [2] 周念成,金 明,王强钢,等.串联和并联结构的多微网系统分层协调控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(12):13-19.

- [3] RUA D, LOPES P J A, RUELA J. Communications uncertainties in isolated multi-microgrid control systems[C]// International Conference on Power Systems Computation Conference(PSCC), wroclaw: IEEE,2014:1-7.
- [4] SOFLA, M A, KING R. Control method for multi-microgrid systems in smart grid environment-Stability, optimization and smart demand participation[C]// International Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington: IEEE,2011:1-5.
- [5] 周永智,吴 浩,李怡宁,等.基于 MCS-PSO 算法的邻近海岛多微网动态调度[J].电力系统自动化,2014,38(9):204-210.
- [6] 江润洲,邱晓燕,李 丹,等.含储能系统的多微网智能配电系统经济运行[J].电网技术,2013,37(12):3596-3602.
- [7] 徐意婷,艾 芊.基于全景理论的多微网聚合优化运行[J].电力系统保护与控制,2015,43(16):50-56.
- [8] KUMARNUNNA H S V S, DOOLLA S. Multi agent based distributed energy resource management for intelligent microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013,60(4):1678-1687.
- [9] 丁 明,马 凯,毕 锐.基于多代理系统的多微网能量协调控制[J].电力系统保护与控制,2013,41(24):1-8.
- [10] 张明锐,杜志超,黎 娜,等.高压微网孤岛运行时频率稳定控制策略研究[J].中国电机工程学报,2012,32(25):20-26.
- [11] 王成山,高 菲,李 鹏,等.低压微网控制策略研究[J].中国电机工程学报,2012,32(25):2-8.
- [12] 邵明燕,刘瑞叶,吕殿君.微网孤立运行时的调频策略研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(5):60-65.
- [13] A. HASIB CHOWOHVRY, MD. ASADVZ-ZAMAN. Load frequency control of multi-microgrid using energy storage system[C]// The 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), Dhaka: IEEE, 2014,548-551.
- [14] JINWEI LI, JIANHUI SU, YONG SHI, et al. Microgrid Secondary Frequency Control Method Based on Life Optimization of Energy Storage Units[C]// Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), Shanghai, IEEE,2014:1143-1147.
- [15] 颜 伟,赵瑞锋,赵 霞,等.自动发电控制中控制策略的研究发展综述[J].电力系统保护与控制,2013,41(8):149-155.
- [16] 谭 涛,姜 杰,何 潜,等.省级电网 AGC 控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(16):63-66.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

林艳艳,肖宏飞,陈磊磊,等.多微网系统二次频率控制策略研究[J].机电工程,2016,33(9):1109-1114.

LIN Yan-yan, XIAO Hong-fei, CHEN Lei-lei, et al. Secondary frequency control for multi-microgrid system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(9):1109-1114.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>