

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191486

# 微电网群频率调整的分层协调控制策略

李咸善<sup>1</sup>, 董鑫<sup>1</sup>, 程杉<sup>1</sup>, 陈铁<sup>2</sup>

(1. 湖北省新能源微电网协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;  
2. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 针对分属于不同经营主体的微电网组成的微电网群, 各微电网的经营目标、调频资源或调频能力等存在差异。为了使微电网群的频率调整达到调频任务的有序分担、调频费用的有序分摊以及调频经济性的有序达成等要求, 分析了孤岛微电网群调频备用容量配备应遵循的规则, 提出了微电网群频率调整的双层协调控制策略。第一层, 各微电网中央控制器 MGCC 在微电网内部实施基于联络线功率偏差 TBC 的经济性调频控制, 承担微电网自身有功变化所引发的调频任务, 恢复系统频率和消除联络线交换功率偏差。当受扰微电网调频能力不足时, 向上层微电网群中央控制器 MGGCC 申请微电网群互济频率调整辅助服务。第二层, MGGCC 在微电网群层面实施基于恒频 FFC 的经济性调频控制, 恢复系统频率。该策略可实现分属于不同经营主体的微电网群的频率调整控制的有序性和经济性。在频率分层调整过程中, 各微电网承担自身扰动所引发的频率调整所产生的费用, 包括自我调整和互济调整费用。算例结果验证了所提控制策略的有效性。该策略思想可为微电网群的设计、组网、运行与控制等工作提供参考借鉴。

**关键词:** 微电网群; 频率调整; 微电网控制偏差; 分层协调控制; 调频辅助服务

## Hierarchical coordinated control strategy for frequency adjustment of microgrid groups

LI Xianshan<sup>1</sup>, DONG Xin<sup>1</sup>, CHENG Shan<sup>1</sup>, CHEN Tie<sup>2</sup>

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Micro-Grid (China Three Gorges University),  
Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded  
Hydropower Station (China Three Gorges University), Yichang 443002, China)

**Abstract:** In a micro-grid group consisting of Microgrid (MGs) owned by different separate entities, there are differences in the operating goals, frequency modulation resources or capabilities of each MG. There is a requirement for the orderly sharing of frequency modulation tasks and cost fee, and for the orderly achievement of frequency modulation economic efficiency. The reserve capacity allocation rules for an islanded micro-grid group are analyzed and a strategy of hierarchical coordination control for frequency adjustment of the micro-grid group is proposed in this paper. In the first layer, the Micro-Grid Central Controller (MGCC) conducts economical frequency modulation based on Tie-line Load Frequency Bias Control (TBC), undertaking the frequency modulation tasks caused by the power change of the MG itself, to restore the system frequency, and eliminate the tie-line exchange power errors. In the case of an inadequacy of the frequency adjustment of the MG, a frequency adjustment auxiliary service is delivered to the upper Micro-Grid Group Central Controller (MGGCC). In the second layer, the MGGCC conducts an economical frequency modulation based on constant-frequency control FFC in the micro-grid group to restore the system frequency. This strategy can achieve the orderliness and economic efficiency of the frequency adjustment of the micro-grid group owned by separate entities. In the process of frequency layered adjustment, each MG undertakes the frequency modulation costs caused by the power change of the MG itself, including self-adjustment and mutual adjustment costs. Numerical results show the effectiveness of the control strategy. This strategy can provide a reference for the design, networking, operation and control of a micro-grid group.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607105) and Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2016CFA097).

**Key words:** micro-grid group; frequency adjustment; microgrid control bias; hierarchical coordination control; frequency adjustment auxiliary service

## 0 引言

微电网工程的大力发展,更多微电网聚集起来形成了微电网群系统,以集群的形式互联互通运行。当微电网群并网运行时,其频率及电压可以得到大电网的支撑;当微电网群孤岛运行时,其电压和频率必须由其自身来支撑<sup>[1-3]</sup>。本文重点研究孤岛运行的微电网群频率调整控制问题。

微电网(群)的有功功率波动,或源荷波动,不仅来自常规负荷的实际值偏离其预测值而产生的负荷波动,还来自风光等不可控电源的实际出力偏离其预测值而产生的电源出力有功波动<sup>[4]</sup>,因而独立微电网(群)调频任务繁重。

微电网群中,每个微电网的调频备用容量和调频成本各异,并随着工况的变化而变化。因而,在微电网群运行过程中,各个微电网的调频能力及调频成本会出现差异。微电网集群运行,可通过微电网之间的互联互通,提高微电网群的抗干扰能力,弥补某些微电网调频能力不足的问题。但在设计建设阶段,微电网群必须在整体上配备有足够的调频备用容量,这是在运行中实施微电网群频率调整控制的前提。

微电网群中的多个微电网分属不同的经营主体,各自追求自身利益最大化。在频率调整过程中,每个微电网需要应对来自内部和外部的功率扰动所引发的频率调整的任务分担、费用分摊以及调频经济性的达成等问题;微电网群则需要关注整个系统的频率质量指标、调频任务的划分与调度、调频费用的分摊和调频经济性的实现等问题。为了兼顾个体和整体利益,微电网群调频控制的有序性显得至关重要。

在微电网中,风光等不可控电源一般工作于最大功率捕捉状态,以实现新能源的完全消纳,因此不参与系统的频率调整<sup>[5]</sup>。微电网的调频电源主要由柴油机、微型燃气轮机等可控电源承担。这些化石型能源发电,除了一次能源的成本外,还要支出其环境惩罚费用等。因而,调频成本是微电网(群)调频需要考虑的一个重要因素。根据经济性调频思想,应按照调频成本排序投入或退出调频电源,有序实现微电网(群)调频的经济性。

孤岛微电网群在正常运行情况下,通过微电网内部发电和微电网之间联络线计划交换功率的互济,共同支撑微电网系统的负荷需求。在微电网群中,任一微电网内发生源荷波动,都会破坏整个系统的功率平衡,引起系统频率的变动,微电网群中所有具有一次调频能力的微电源都将参与一次调

频,以平衡系统的有功波动<sup>[5-8]</sup>。一次调频结束后,系统频率产生了偏差,联络线交换功率产生了偏差。为了恢复系统的频率,并使联络线交换功率回到计划值,每个微电网应承担自身的有功波动,能力不足时,应申请互济调频服务。因而,微电网群的频率调整控制涉及到调频任务的划分与调度、调频费用的分摊以及经济性调频安排等,需要对微电网群实施频率调整的协调控制,以实现调频任务的有序分担、调频费用的有序分摊和调频经济性的有序达成。基于上述目标需求,本文提出了微电网群频率调整的分层协调控制策略。

目前,对于微电网群频率调整的有序协调控制研究较少。已有的相关研究主要体现在3个方面:

1) 大部分文献的研究集中在微电网群的优化调度与能量管理的特征分析、分层调度、市场交易等方面;2) 传统大电网互联多区域 AGC 控制技术已较为成熟,并得到广泛应用;3) 少量文献进行了微电网(群)频率调整控制的研究等。

1) 微电网群的优化调度与能量管理的特征分析、分层调度、市场交易等研究方面的代表性成果。

文献[2-3,9]分析了微电网群的运行特征与技术特征。文献[10]通过 MG 间功率互济降低了微网群运行成本,但未充分结合微电网群特点制定互济时的辅助服务机制。文献[11-12]将微电网群优化调度分为群级与子微网级双层优化。文献[13-15]提出了基于多代理的微电网群自主协同运行分层优化调度模式。文献[16-18]建立了微电网群内的电力市场交易框架,确保了微电网群内各个子微网间的电能合理流通。这些研究成果体现了微电网群实施分层能量调度与管理的可行性。

2) 传统大电网互联多区域 AGC 控制技术。

文献[19-20]详细介绍了在传统大电网中互联多区域控制区自动发电控制 AGC 控制模式,包括:定频率控制(Flat Frequency Control, FFC)、定交换功率控制(Flat Tie-line Control, FTC)以及联络线功率频率偏差控制(Tie-line load frequency Bias Control, TBC),传统互联电网中的区域控制方式对于微电网群频率控制有一定的借鉴意义。

3) 微电网(群)频率调整控制的研究成果。

对于微电网(群)频率控制研究主要集中在单微电网频率控制策略研究以及改进下垂控制等方面。文献[21-24]针对微电网频率调整提出了多种优化下垂控制策略。文献[25]建立了计及经济型的微电网二次调频模型,在恢复频率的同时保证了经济效益,实现了频率最优调节。目前针对微电网群的频率协调控制策略研究尚不完善,亟需建立针对微电网群

特点的频率调整控制策略。

针对分属于不同经营主体的微电网组成的微电网群的频率调整, 本文提出了基于联络线功率偏差控制 TBC 的微电网自愈频率调整和基于恒频控制 FFC 的微电网群互济频率调整辅助服务相结合的微电网群频率调整的分层协调控制策略。在微电网层, 各微电网中央控制器实施基于 TBC 的经济性调频控制, 承担微电网自身有功变化, 恢复系统频率和消除联络线交换功率偏差; 当微电网调频能力不足时, 向上层中央控制器申请微电网群互济频率调整辅助服务; 在微电网群层, 微电网群中央控制器实施基于 FFC 的经济性调频控制, 恢复系统频率。该策略可有效实现微电网群调频任务的有序分担、调频费用的有序分摊和经济性调频的有序达成。

## 1 微电网群分层调频策略思想

### 1.1 微电网群的调频容量配备规则及调频要求

#### 1.1.1 微电网群的调频容量配备规则分析

在微电网群中, 每个微电网配备的调频备用容量的大小和调频成本各异, 并随着运行工况的变化而变化, 使得各个微电网的调频能力及调频成本出现差异。这种差异体现在两个方面: 一是单个微电网的调频备用容量会随着运行工况的变化而变化, 导致其应对有功扰动的调频能力发生变化; 二是在任意工况下, 各个微电网调频能力会出现差异。对于单个微电网, 如果其调频能力不足, 则体现为其不能完全承担自身有功的变化, 需要其他微电网的支持; 对于微电网群, 如果其调频容量不足, 则会导致系统性调频的崩溃。

为了达到整个微电网群的调频要求, 发挥微电网群互联互通的优势, 在微电网群的设计建设阶段, 一般选用柴油发电机或燃气轮机等可控微源作为其调频备用容量, 其调频备用容量的配备应遵循下列规则:

1) 在条件允许的情况下, 参考大电网备用容量的配备规则, 各个微电网应尽量配备足够的调频备用。

2) 整个微电网群必须配备足够的调频备用, 以弥补某些微电网的调频备用配备不足的问题。

3) 微电网群中, 必须具有至少一个调频备用充足的主调频微电网, 能够支撑微电网群的调频需求。其调频备用容量应为微电网群总备用需求减去其他非主调频微电网的调频配备容量之和。

在设计建设阶段, 微电网群必须在整体上配备有足够的调频备用容量, 这是在运行中实施微电网群频率调整控制的前提。

#### 1.1.2 微电网群的频率调整要求

微电网集群运行时, 可通过微电网之间的互联互通, 提高微电网群的抗干扰能力, 弥补某些微电网调频能力不足的问题。为了兼顾个体和整体利益, 保证系统的频率质量和经济运行, 微电网群调频控制的有序性显得至关重要, 即在调频过程中, 需要划清每个微电网应承担的调频任务; 微电网群应具备调频辅助服务机制的支撑, 在受扰微电网自身调频能力不足时, 可通过微电网之间的互济调频辅助服务完成余下的调频任务; 在调频任务执行过程中, 应做到调频经济性的达成。微电网群的频率调整要求可总结为调频任务的有序分担、调频费用的有序分摊和调频经济性的有序达成, 具体包括以下几个方面:

1) 受扰微电网应承担自身有功波动所引发的调频任务和调频费用, 并实现调频的经济性。

2) 微电网群应具有互济调频辅助服务支撑平台和协调调度机制, 在受扰微电网调频能力不足时, 安排增援微电网提供互济调频服务, 增援微电网按提供的调频服务获得调频服务收益。

3) 受扰微电网调频能力不足时, 申请微电网群的互济调频辅助服务所产生的费用, 由受扰微电网自行承担。

4) 微电网群的主调频微电网, 应作为整个系统的最后调频保障, 确保系统调频目标的达成。

### 1.2 微电网群调频的分层协调控制策略

基于微电网群的调频备用容量配备规则, 综合考虑微电网群的频率调整要求, 针对分属于不同经营主体的微电网组成的微电网群的频率调整, 提出了基于 TBC 模式的微电网自愈频率调整与基于 FFC 模式的微电网之间互济频率调整相结合的微电网群频率调整分层协调控制模式, 以实现微电网群调频任务的有序分担、调频费用的有序分摊和调频经济性的有序达成。

#### 1.2.1 第一层频率调整控制: 基于 TBC 模式的微电网自愈经济性频率调整

微电网群正常运行时, 系统频率一般为额定值附近允许变化范围内, 微电网之间联络线上基于交换协议传输计划功率。当某一微电网内发生有功波动时, 系统频率产生偏移, 微电网群的每个微电网均参与一次调频而使联络线产生无意交换功率, 从而使交换功率偏离计划值产生联络线功率偏差。为了遵守微电网间联络线功率协议, 分清调频任务的分担及调频费用的分摊, 在二次调频时, 各微电网宜采用联络线功率偏差控制的调频模式, 即 TBC 模式(Tie Line Bias Frequency Control), 并由微电网控

制中心 MGCC(Microgrid Control Center)实施 TBC 调节控制, 如式(1)所示, 定义为微电网群的第一层调频。

$$|\text{MGCE}_i| = |\Delta P_{Ti} + B_i \Delta f| < \varepsilon \quad (1)$$

式中:  $\text{MGCE}_i$  (Microgrid Control Error) 为微电网  $\text{MG}_i$  的控制误差;  $\Delta P_{Ti}$  为  $\text{MG}_i$  与其邻接微电网之间的联络线交换功率偏差;  $\Delta f$  为系统频率误差;  $B_i$  为偏差系数;  $\varepsilon$  为接近于零的较小正数。

第一层基于 TBC 调节的主旨思想是受扰微电网通过二次调频承担自身有功的变化, 从而保持各联络线功率计划值不变, 并恢复系统频率。

在第一层调频过程中, MGCC 按照微网内部调频电源的成本由低到高的顺序投入调频电源, 或由高到低的顺序退出调频电源, 有序实现微电网调频的经济性。

如果受扰微电网由于自身调频能力不足, 不能完全承担自身有功的变化, 就要向微电网群控制中心发出互济频率调整辅助服务申请, 由微电网群控制中心实施第二层频率调整控制。

### 1.2.2 第二层频率调整控制: 基于 FFC 的微电网互济频率调整辅助服务

在第一层频率调整的基础上, 微电网群控制中心 MGGCC(Micro-grid Group Control Center)接受来自调整能力不足的受扰微电网发来的互济频率调整申请, 进行微电网群层面上的频率调整协调控制。MGGCC 安排具有经济性调整能力的其他微电网支援能力不足受扰微电网的调频, 这一互济调频控制定义为微电网群的第二层频率调整。增援微电网和受援微电网之间的联络线上, 除了要流过计划功率外, 还要流过互济调整功率, 因而参与第二层调整的微电网的联络线功率要松开原有的联络线计划功率限制, 允许叠加于计划功率之上的互济功率流过, 即将原有的 TBC 控制模式切换到以恒频控制为目标的 FFC 控制模式, 如式(2)所示。

$$|\text{MGCE}| = |B \Delta f| < \varepsilon \quad (2)$$

第二层频率调整, 实际上是由受援微电网和增援微电网结对组成二次调频执行系统, 由增援微电网承担受援微电网的剩余功率误差, 互济调频功率通过两网之间的虚拟联络线(实际互济功率流经的路径可能不止一条联络线, 合起来称为虚拟联络线)传输, 两网分别记录输出的调节功率和接受的调节功率。对于不参与第二层调节的互济功率过路微电网, 其过路的互济功率只是路过, 除了网损外, 没有额外引起联络线功率误差, 并不影响其与邻接微电网交易计划值的执行。

当第二层频率调整完成后, 系统频率得到了恢复, 参与第二层调整的微电网调整其联络线计划功率值到第二层调频完成后的联络线交换功率值, 并将频率控制模式由 FFC 切换回 TBC 模式, 以准备下一个调度周期调频任务的执行。

## 2 微电网群分层调频控制系统

本文提出的微电网群频率调整的分层协调控制策略, 需要相应的微电网群调频分层协调控制系统来调度实现。

### 2.1 微电网群的调频分层协调控制系统架构

图 1 所示为微电网群频率调整的分层协调控制系统结构示意图。通过该控制系统实现信息的传输与管理以及频率调整的分层协调有序控制。

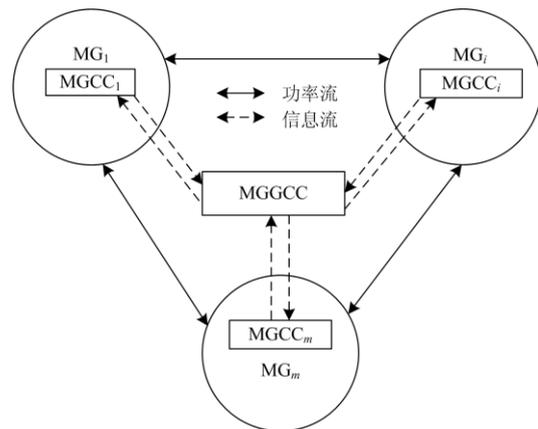


图 1 微电网群频率分层协调控制系统结构

Fig. 1 Hierarchical coordinated frequency control structure of microgrid group

图 1 中, 每个微电网设置有微电网控制中心 MGCC, 在微电网群中设置一个微电网群控制中心 MGGCC, 形成分布式与集中式相结合的分层控制方式, 通过 MGCC 功能和 MGGCC 功能的协调配合实现微电网群频率调整的分层协调控制。

### 2.2 MGCC 频率调整控制功能

微电网控制中心 MGCC 主要实现四个功能。

#### 1) 微电网本地信息管理及上传

① 本地信息管理。按照一定的时间周期, 进行微电网的本地信息收集与管理, 包括微电网的各调频机组的功率调节能力和调节成本, 及自愈调整能力不足时的互济调整请求信号的形成。

② 上传信息。按照一定的时间周期, MGCC 将各微网的相关信息上传给 MGGCC, 包括微电网的功率调节能力和调节报价, 及自愈调整能力不足时的互济调整请求信号。

## 2) 执行本地 TBC 自愈经济性频率调整功能

判断来自微电网自身的功率扰动, 当有功增加时, MGCC 按照成本由低到高的顺序安排调频机组增发功率; 当有功减小时, 则按照成本由高到低的顺序安排调频机组减发功率, 直到完全承担自身功率变化量、系统频率恢复和联络线功率偏差消除。

如果微电网调频能力不足, 不能完全承担自身功率变化, 则向上级 MGGCC 申请微电网群互济频率调整辅助服务。

## 3) MGCC 与 MGGCC 配合下的互济经济频率调整

① 受援互济调整响应。当受扰微网自愈调整能力不足并向 MGGCC 发出互济调整请求信号后, MGGCC 会向该受扰微网 MGCC 下发增援互济调整信号, 该 MGCC 要将该子微网的频率调整模式由 TBC 模式切换到 FFC 模式, 并与增援微电网结对执行第二层 FFC 频率调整。互济调频过程中, 受援微电网 MGCC 记录受援功率, 以备后面的费用结算用, 即申请微电网群的互济调频辅助服务所产生的费用, 由受扰微电网自行承担。

② 增援互济调整响应。当本微电网功率调整能力富裕并有来自 MGGCC 下发的增援互济调整指令信号后, 该 MGCC 要将该子微网的频率调整模式由 TBC 模式切换到 FFC 模式, 并与受援微电网结对执行第二层 FFC 频率调整。互济调频过程中, 增援微电网 MGCC 按照自身内部微源成本的高低安排调节功率的增减, 并记录增援功率, 以备后面的费用结算用。

## 4) 本地 MGCC 控制系统的复位

当一个调频周期完成后, 系统恢复到正常运行, MGCC 将自身调频模式恢复到 TBC 模式, 并在下一个调度周期, 执行自身的各个功能。

## 2.3 MGGCC 频率调整控制功能

微电网群控制中心 MGGCC 与各微电网控制中心 MGCC 联合实现微网群的频率调整。MGGCC 主要实现各个微电网信息的收集与管理、互济调频辅助服务调度等功能。

### 1) 接收信息及其管理

按照一定的时间周期, 接收来自各个子微网 MGCC 上传的相关信息, 包括各子微网的功率调节能力和调节报价, 以及自愈调整能力不足微电网发来的互济调整请求信号, 并按照调频辅助服务报价信息进行功率调节能力的排序。

### 2) 互济调频辅助服务调度

MGGCC 接收来自受援微电网 MGCC 上传的互济调整请求信号, 按照系统中各子微网的调节能力

及其报价信息, 根据成本经济性原则, 选择具有调节能力的微电网作为增援微电网, 并给受援微电网和增援微电网下发参与互济频率调整指令信号, 联合受援和增援微电网, 实施第二层基于 FFC 的恒频调整控制。

### 3) MGGCC 控制系统复位

当一个调频周期完成后, 微电网群系统恢复到正常运行, MGGCC 复位系统指令, 并在下一个调度周期执行 MGGCC 的各个功能。

## 3 微电网群分层调频控制模型及控制流程

根据本文的微电网群分层调频控制策略, 建立微电网群的分层调频控制模型及控制流程。

### 3.1 基于 TBC 的微电网自愈频率调整控制模型及控制流程

#### 1) 基于 TBC 的微电网自愈频率调整控制模型

每一个微电网均装设 TBC 控制器, 实施基于联络线功率偏差控制的频率调整, 控制模式如式(1)所示。该方式需同时检测系统的频率偏差  $\Delta f$  和联络线交换功率偏差  $\Delta P_{Ti}$ 。代入式(1)计算微电网控制误差  $MGCE_i$ , 并根据  $\Delta f$  和  $\Delta P_{Ti}$  的符号判断是否本微电网内有功发生变化, 若是, 则由该微电网按照成本大小顺序选择调频机组做出相应的响应, 跟踪有功的变化。控制的任务是完全承担自身有功的变化, 恢复系统的频率, 消除联络线交换功率偏差, 使联络线交换功率恢复到计划值。TBC 控制只对微电网自身的有功变化起作用, 而对其他微电网的有功变化不起作用。

每个微电网的有功变化值  $\Delta P_i$ 、联络线功率偏差  $\Delta P_{Ti}$  以及微电网群系统的频率偏差  $\Delta f$ , 符合式(3)一式(5)所示的计算式。

$$\begin{cases} \Delta P_i = -(K_{MGi} \Delta f + \Delta P_{Ti}) & i = 1, L, m \\ \Delta P_{Ti} = \sum_{j=1}^m \Delta P_{Tij} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{Ti} = -\Delta P_i + \frac{K_{MGi} \sum_{j=1}^m \Delta P_j}{K_{MMG}} \\ K_{MMG} = \sum_{i=1}^m K_{MGi} \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta f = -\sum_{i=1}^m \Delta P_i / K_{MMG} \quad (5)$$

式中:  $K_{MGi}$  为微电网  $MG_i$  当前工况下总的功频调节效应系数;  $K_{MMG}$  为微电网群当前工况下总的功频调节效应系数;  $m$  为微电网群中所含微电网的个数;  $\Delta P_{Tij}$  为  $MG_i$  与邻接微电网  $MG_j$  之间的联络线交换

功率偏差。

比较式(1)和式(3)，当式(1)中偏差系数  $B_i$  与式(3)的  $K_{MGi}$  相等时，微电网控制误差  $MGCE_i$  实际上反映了微电网有功功率变化的大小，通过 TBC 二次调频使得  $|MGCE| < \varepsilon$ ，实际上也就是受扰微电网完全承担了自身有功的变化量。

通过测得的  $\Delta P_{Ti}$  和  $\Delta f$  的符号可以判断功率扰动是否发生在微电网内。当  $\Delta P_{Ti}$  和  $\Delta f$  同号时，说明功率扰动发生在网内，该微电网为受扰微电网， $\Delta P_i$  即为功率扰动的大小，并依据  $\Delta P_i$  按照经济性原则安排调频机组进行二次调频功率调节，以完全承担  $\Delta P_i$ ；当  $\Delta P_{Ti}$  和  $\Delta f$  异号时，说明功率扰动发生在网外，该微电网为无扰微电网，计算的  $MGCE_i$  也很小，无扰微电网的 TBC 控制器不动作。

二次调频过程中，由于受扰微电网调频机组调节功率  $\Delta P_{MGi}$  的加入，使得受扰微电网的有功偏差、联络线功率偏差及系统频率偏差发生变化，如式(6)和式(7)所示。

随着二次调频的进行，各受扰微电网的  $\Delta P_{MGi}$  逐步逼近其  $\Delta P_i$ ，各受扰微电网联络线功率偏差  $\Delta P_{Ti}$  和微电网群系统频率偏差  $\Delta f$  逐步趋近于零，使得式(1)所表示的 TBC 调节误差满足式(1)，系统频率恢复，联络线交换功率偏差消除，TBC 二次调频结束，系统恢复正常运行。

$$\Delta P_{Ti} = (\Delta P_{MGi} - \Delta P_i) - \frac{K_{MGi} \sum_{j=1}^m (\Delta P_{MGj} - \Delta P_j)}{K_{MMG}} \quad (6)$$

$$\Delta f = - \sum_{i=1}^m (\Delta P_i - \Delta P_{MGi}) / K_{MGG} \quad (7)$$

当某一个受扰微电网  $MG_i$  的调频能力不足时，不能完全承担自身有功的变化，假设其他受扰微电网能够完全承担自身有功的变化，则在第一层 TBC 控制结束后，系统频率不能恢复到要求值，联络线功率偏差依然存在，联络线潮流符合如式(8)一式(10)所示的计算式。

$$\begin{cases} \Delta f' = -(\Delta P_i - \Delta P_{MGi}) / K'_{MGG} \\ K'_{MGG} = \sum_{i=1}^m K'_{MGi} \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta P'_{Ti} = \frac{(K'_{MMG} - K'_{MGi})}{K'_{MMG}} (\Delta P_{MGi} - \Delta P_i) \quad (9)$$

$$\Delta P'_{Tj} = - \frac{K'_{MGj} (\Delta P_{MGi} - \Delta P_i)}{K'_{MMG}} \quad (10)$$

式中：第一层控制结束后，每个微电网能够参与一

次调频的机组可能发生了变化，对应的调频系数变为  $K'_{MGi}$ ，相应的微电网群的调频系数变为  $K'_{MGG}$ 。这时，系统的剩余有功扰动量为  $(\Delta P_i - \Delta P_{MGi})$ ，继续由微电网群的所有微电网通过一次调频来进行支撑，系统频率偏差变为  $\Delta f'$ ，调频能力不足微电网的联络线功率偏差为  $\Delta P'_{Ti}$ ，其他微电网的联络线功率偏差为  $\Delta P'_{Tj}$ ，需要进一步实施第二层调频控制，以恢复系统频率和消除联络线偏差。

2) 基于 TBC 的微电网自愈频率调整控制流程

图2为基于 TBC 的微电网自愈频率调整控制流程图。当  $MG_i$  内发生有功波动时，系统频率及联络线功率发生波动，此时  $MG_i$  内实施 TBC<sub>i</sub> 控制进行经济调频。

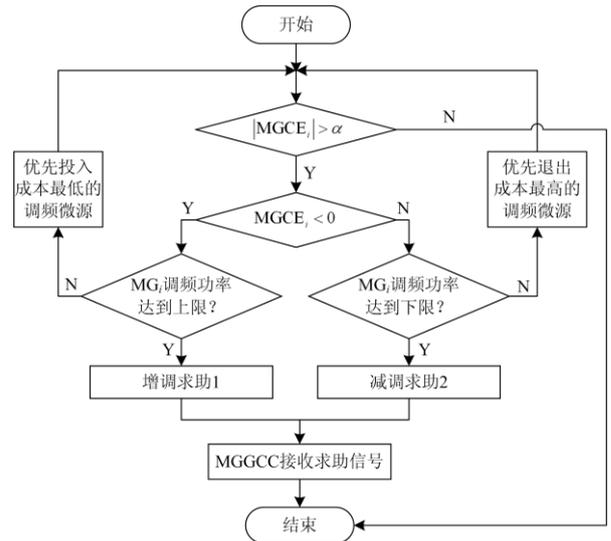


图2 微电网经济 TBC 调频控制流程

Fig. 2 Microgrid economical TBC control

① 若  $MG_i$  内部的调频容量充足时，按照经济性调频原则，顺序投入调频容量，直到  $|MGCE| < \varepsilon$ ， $MG_i$  完全承担了自身有功的变化，系统频率恢复到要求值， $MG_i$  的联络线交换功率偏差减少为零，其交换功率回到计划值，微网群系统恢复正常运行。

② 若  $MG_i$  内部的调频容量不足时，投入自身全部调频容量，仍无法满足  $|MGCE| < \varepsilon$ ， $MG_i$  不能完全承担自身有功的变化，系统频率得不到恢复，各联络线交换功率仍有偏差，联络线交换功率不能回到计划值。这时，由  $MGCC_i$  向上层  $MGGCC$  请求调频辅助服务而进入到第二层频率调整。

3.2 基于 FFC 的微电网群互济频率调整辅助服务控制模型及控制流程

1) 基于 FFC 的微电网群频率调整控制模型

在第一层调度的基础上, 如果某一受扰微电网  $MG_i$  的调频能力不足, 通过 TBC 调整后, 还存在剩余功率扰动量  $(\Delta P_i - \Delta P_{MG_i})$ , 需要进一步实施第二层 FFC 调整, 通过 MGGCC 协调, 选择微电网  $MG_j$  与  $MG_i$  配对, 实施 FFC 控制, 控制模式如式(2)所示。由  $MG_j$  调频机组增发功率  $\Delta P_{MG_j}$  来进行调整, 调整过程中, 相关变量符合式(11)一式(14)所示的计算式, 式中,  $\Delta P_{Ti}$ 、 $\Delta P_{Tj}$ 、 $\Delta P_{Tk}$  分别为受援微电网、增援微电网和普通微电网的联络线功率偏差。随着 FFC 二次调频的进行, 增援调频功率  $\Delta P_{MG_j}$  逐步逼近  $(\Delta P_i - \Delta P_{MG_i})$ , 各  $\Delta P_{Tk}$  和  $\Delta f''$  逐步趋近于零, 使得式(2)所示的 FFC 调节误差  $|MGCE| = |B\Delta f| < \varepsilon$  成立, 系统频率恢复, 系统恢复正常运行。但 FFC 调频结束后,  $\Delta P_{Ti}'' = \Delta P_{Tj}'' = (\Delta P_{MG_i} - \Delta P_i)$ , 说明  $MG_i$  的剩余功率扰动量  $(\Delta P_i - \Delta P_{MG_i})$  由  $MG_j$  通过联络线提供, 这时, 两者之间的联络线功率计划值需调整为原有计划值叠加上  $(\Delta P_i - \Delta P_{MG_i})$ 。

$$\begin{cases} \Delta f'' = -(\Delta P_i - \Delta P_{MG_i} - \Delta P_{MG_j}) / K_{MGG}'' \\ K_{MGG}'' = \sum_{i=1}^m K_{MG_i}'' \end{cases} \quad (11)$$

$$\Delta P_{Ti}'' = (\Delta P_{MG_i} - \Delta P_i) - \frac{K_{MG_i}''}{K_{MMG}''} (\Delta P_{MG_j} + \Delta P_{MG_i} - \Delta P_i) \quad (12)$$

$$\Delta P_{Tj}'' = \Delta P_{MG_j} - \frac{K_{MG_j}'' (\Delta P_{MG_j} + \Delta P_{MG_i} - \Delta P_i)}{K_{MMG}''} \quad (13)$$

$$\Delta P_{Tk}'' = -\frac{K_{MG_k}'' (\Delta P_{MG_j} + \Delta P_{MG_i} - \Delta P_i)}{K_{MMG}''} \quad (14)$$

2) 基于 FFC 的微电网群互济频率调整辅助服务控制流程

MGGCC 接收到  $MGCC_i$  的辅助服务申请后, 根据经济性调频原则, 选择能够提供调频辅助服务的微电网  $MG_j$  参与辅助调频服务, 对  $MG_i$  剩余有功变化实施远方支撑。 $MGCC_j$  按照经济性调频原则, 在  $MG_j$  内部选择安排投入调频容量, 若  $MG_j$  的调频容量不够, MGGCC 继续选择下一个  $MG_k$ , 直到系统频率恢复。最后的目标是平衡第一层调频后剩余的有功变化, 恢复系统频率到要求范围内。图 3 和图 4 所示分别为基于 FFC 的微电网群互济频率调整辅助服务控制流程图和控制系统信息流示意图。

① MGGCC 收到来自  $MGCC_i$  的调频辅助申请, 根据经济性调频原则选择安排其他微电网  $MG_j$

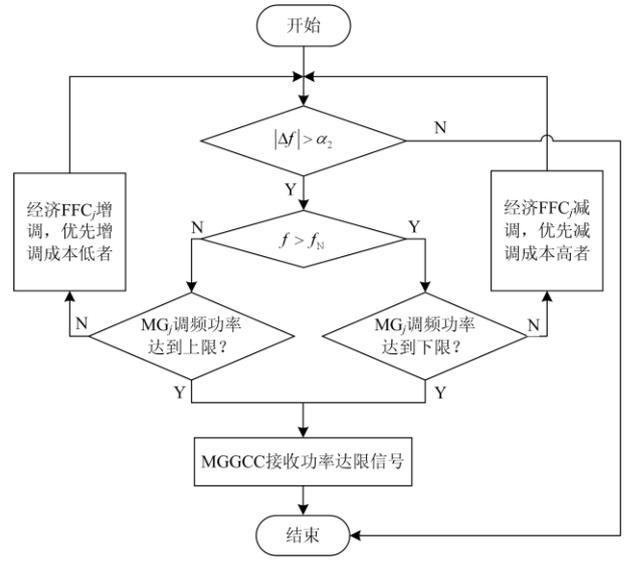


图 3 微电网群经济 FFC 调频控制流程

Fig. 3 Microgrid group economical FFC control

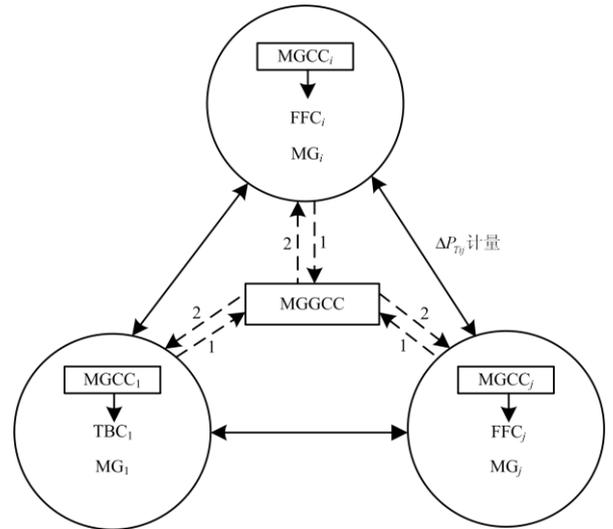


图 4 微电网群 FFC 控制信息流示意图

Fig. 4 Information stream of microgrid group FFC control

对需要调频辅助服务的微电网  $MG_i$  进行远方调频。

② 子微网  $MG_i$  和  $MG_j$  切换到  $FFC_i$  和  $FFC_j$  控制调频, 两者配对实施恒频 FFC 调节控制。

③  $MGCC_i$  记录  $\Delta P_{Tij}$ ,  $MGCC_j$  记录  $\Delta P_{Tji}$ , 并校验联络线上功率是否越限, 当越限时取最大传输功率作为交换功率, 以此作为调频辅助服务的费用结算依据。对于不参与第二层调节的互济功率过路微电网, 其过路的互济功率只是路过, 输入输出相等, 并不影响其与周围微电网交易计划值的执行。

④ 若  $MG_j$  的调频容量不够, MGGCC 继续选择下一个  $MG_k$ , 直到系统频率恢复至要求值。

### 3.3 基于 TBC、FFC 的微电网群双层调频控制流程

图 5 所示为微电网群分层调频控制流程。

1) 当孤岛微电网群正常运行时, 各微电网 MGCC 控制器周期性执行本地信息的收集管理并上传, 微网群 MGGCC 周期性接收各 MGCC 上传的信息并管理, 处于准备状态。

2) 第一层频率调整: 执行如图 2 所示的基于 TBC 的微网自愈频率调整, 由 MGCC 控制完成。

3) 第二层频率调整: 执行如图 3 和图 4 所示的基于 FFC 的微电网群频率调整辅助服务, 由 MGGCC 调度 MGCC 完成。

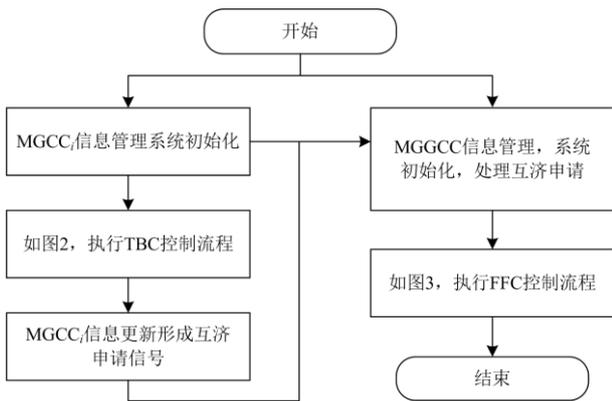


图 5 微电网群频率分层调整总流程

Fig. 5 General flow of microgrid group frequency hierarchical adjustment

## 4 仿真算例

### 4.1 算例参数

参考 CERTS 微电网结构<sup>[26]</sup>, 建立算例微电网群模型如图 6 所示, 由三个微电网 MG1、MG2 和 MG3 互联组成。

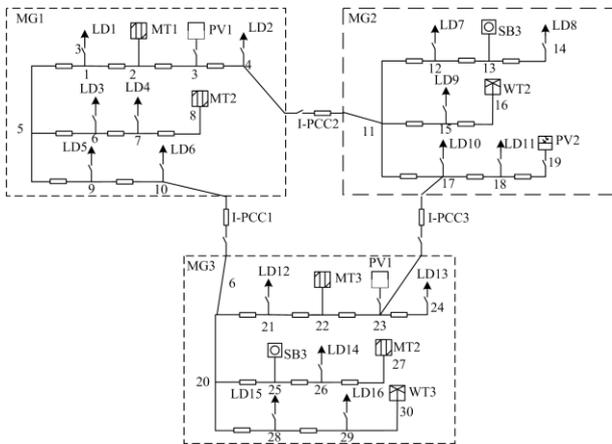


图 6 孤岛运行微电网群结构图

Fig. 6 Structure diagram of islanded micro-grid group

图 6 中, WT 为风电机组, PV 为光伏发电系统, MT 为微型燃气轮机, SB 为蓄电池储能系统。I-PCC 为子微电网与微电网群的联络开关。微电网群电压等级为 400 V, 频率变化允许范围为  $f_N \pm 0.5$  Hz, 电压变化允许范围为  $(1 \pm 10\%)U_N$ 。微源相关参数如表 1 所示, 微网群调频辅助服务电价如表 2 所示, 各个子微网风光出力曲线如图 7 所示, 典型日负荷曲线如图 8 所示。

表 1 微源相关参数

Table 1 Micro-source related parameters

微源类型	燃料/ 耗量成本	运维 成本	额定功率/ kW	(元/kWh)
				下垂系数/ (kW/Hz)
MT1	0.454	0.041 2	50	25
MT2	0.405	0.036 3	30	20
PV1	—	0.009 6	180	—
PV2	—	0.009 6	160	—
SB2	0.472	0.045 2	50	20
WT2	—	0.029 6	250	—
SB3	0.424	0.043 1	50	10
WT3	—	0.029 6	220	—
MT3	0.453	0.028 1	50	25
MT4	0.370	0.027 2	40	20

表 2 微网群调频辅助服务电价

Table 2 Micro-grid group frequency auxiliary service price

微电网	(元/kWh)		
	峰时电价	谷时电价	平时电价
微电网 1	8:00—18:00	23:00—5:00	5:00—8:00
	0.68	0.45	18:00—23:00
微电网 2	11:00—16:00	0:00—8:00	8:00—11:00
	0.74	0.48	16:00—24:00
微电网 3	15:00—2:00	9:00—15:00	2:00—9:00
	0.65	0.42	0.52

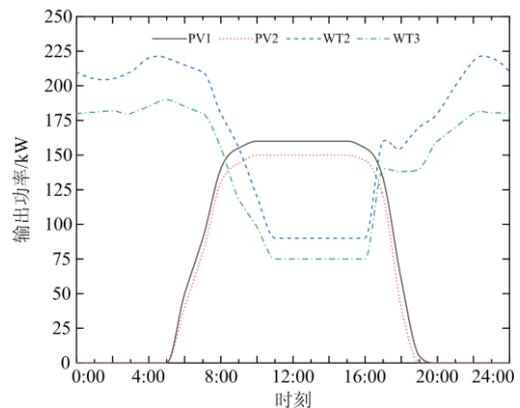


图 7 典型日风光机组输出曲线

Fig. 7 Typical day output curve of WT and PV

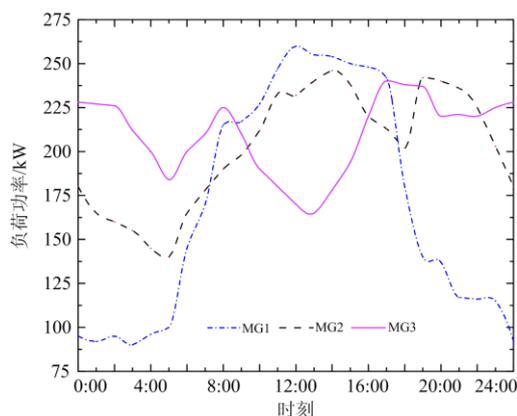


图 8 MG 负荷曲线

Fig. 8 MG load curve

#### 4.2 算例说明

为了便于比较分析, 本文设计了微电网群三个典型算例, 分别在三种不同初始工况下, 发生负荷扰动, 分析验证本文所提方法的有效性。

算例 1、算例 2: 单子微网与多子微网发生负荷扰动时, 通过第一层基于 TBC 的调频控制可以恢复系统的频率到正常值;

算例 3: 多子微网发生负荷扰动下, 通过第一层基于 TBC 的调频控制, 不能恢复系统的频率到正常值。还必须进一步通过第二层基于 FFC 的调频控制, 恢复系统的频率到正常值。

#### 4.3 算例 1: 单个子微网发生负荷扰动且受扰微电网可调节功率充裕

##### 1) 微电网群初始运行状态

在  $t=5:00$  时刻, 微电网群稳态运行, 系统频率为 50 Hz, 不考虑网损, 系统的微源出力状态如表 3 所示。

表 3 微电网群负荷功率波动前后运行状态

Table 3 Micro-grid group load power fluctuation before and after running state

kW					
微电网	微源	微源功率	功率裕度	负荷	负荷波动
MG1	MT1	0	50		
	MT2	14	16	100	0
	PV1	0	—		
MG2	PV2	0	—		
	SB2	0	40	140	0
	WT2	220	—		
MG3	SB3	0	20		
	WT3	190	—		
	MT3	0	50	184	+20
	MT4	0	40		

波动前 MG2 经联络线流向 MG1 的功率为 80 kW, MG3 经联络线流向 MG1 的功率为 6 kW。MG1、MG2、MG3 内总可调功率裕度分别为 66 kW、40 kW、110 kW。

##### 2) 负荷扰动及一次调频

对应于该初始状态, MG3 内负荷波动偏离预测值增加了 20 kW, 系统进行频率的一次调整, 由微电网群总功频静态特性, 代入式(5)计算可得系统一次调频后系统频率下降了 0.167 Hz。

表 4 所示为 3 个 MG 内所有参与一次调频 DG 的一次调频功率增量, 及联络线一次调频交换功率偏差。当  $\Delta P_{Ti}$  为正(以输出为正)时, 说明  $MG_i$  向外送出一一次调频功率, 为负时说明  $MG_i$  接收外来的一次调频功率, 体现了微电网群的互联互通特点。

一次调频后, 系统频率偏移了 -0.167 Hz, 微电网之间的联络线上产生了交换功率偏差, 需要进行二次调频予以消除。

表 4 微电网群一次调频后各可控 DG 增发功率

Table 4 Each controllable DG additional power after micro-grid group primary frequency regulation

kW					
微网	微源一次调频功率	功率裕度	功率	联络线交换功率偏差	负荷波动
MG1	MT1	4.17	45.83	$\Delta P_{T1}$	+7.5
	MT2	3.33	22.67	$\Delta P_{T12}$	0
	PV1	0	—	$\Delta P_{T13}$	+7.5
MG2	PV2	0	—	$\Delta P_{T2}$	+3.34
	SB2	3.33	36.67	$\Delta P_{T21}$	0
	WT2	0	—	$\Delta P_{T23}$	+3.34
MG3	SB3	1.67	18.33	$\Delta P_{T3}$	-10.83
	WT3	0	—	$\Delta P_{T31}$	-7.5
	MT3	4.17	45.83	$\Delta P_{T32}$	-3.33
	MT4	3.33	36.67	—	—

3) 第一层调频控制, 受扰微电网实施基于 TBC 的二次调频。

每个微电网的 TBC 通过测得的系统频率偏差  $\Delta f$  和联络线功率偏差  $\Delta P_{Ti}$ , 代入式(1)计算, 得到微电网控制误差  $MGCE_i$ 。取频率偏差系数为各个 MG 的功频特性系数, 则受扰微电网  $MGCE_3$  产生偏差, 而非扰微电网  $MGCE_1$  和  $MGCE_2$  为零。

因此受扰微电网 MG3 需要实施第一层基于 TBC 的微电网自愈二次频率调整, 调整的目标是:

- ① 受扰微电网支撑自身的负荷变化;
- ② 消除联络线一次调频无意交换功率偏差;

③ 系统频率恢复到 50 Hz。

受扰微电网 MGCC<sub>3</sub> 根据 MG3 内部的调频 DG 运行成本分配输出功率, 各个 DG 在基于 TBC 的二次调频调整后输出功率如表 5 所示。MG3 中 MT4 的运行成本最低, 其次为 SB3, 最后为 MT3, 因此优先由 MT4 输出增发功率。

表 5 微电网群 TBC 二次调频后各可控 DG 增发功率

Table 5 Each controllable DG additional power of micro-grid group TBC after secondary frequency modulation

kW						
微网	微源	一次调频	二次调频	功率裕度	联络交换功率偏差	负荷波动
MG1	MT1	4.17	0	50	$\Delta P_{T1}$	0
	MT2	3.33	0	26	$\Delta P_{T12}$	0
	PV1	0	0	—	$\Delta P_{T13}$	0
MG2	PV2	0	0	—	$\Delta P_{T2}$	0
	SB2	3.33	0	40	$\Delta P_{T21}$	0
	WT2	0	0	—	$\Delta P_{T23}$	0
MG3	SB3	1.67	0	20	$\Delta P_{T3}$	0
	WT3	0	0	—	$\Delta P_{T31}$	0
	MT3	4.17	0	50	$\Delta P_{T32}$	0
	MT4	3.33	20	20	—	—

由表 5 可见, 通过 TBC 控制二次调频自愈控制, MG3 能完全承担自身负荷的变化, 消除了其他两个子微网在一次调频时通过联络线互济导致的联络线功率偏差, 整个微电网群系统频率恢复到 50 Hz, 频率自愈互愈调整结束, 系统进入正常运行, 无需进行第二层基于 FFC 的二次调频。

#### 4.4 算例 2: 多子微网负荷扰动且各受扰子微网可调节功率充裕

##### 1) 微电网群初始运行状态

在  $t=8:00$  时刻, 微电网群稳态运行, 系统频率为 50 Hz, 不考虑网损, 系统的微源出力状态如表 6 所示。波动前 MG2 经联络线流向 MG1 功率为 75 kW, MG2 经联络线流向 MG3 功率为 70 kW。MG1、MG2、MG3 内总可调功率裕度分别为 90 kW、40 kW、107 kW。

##### 2) 负荷扰动及一次调频

对应于该初始状态, 三个 MG 内发生负荷波动, 都偏离预测值增加了 20 kW, 使得微电网群系统的总功率扰动  $\Delta P_L$  为 60 kW, 代入式(5)计算可得系统一次调频后系统的频率下降了 0.5 Hz。

表 7 所示为 3 个 MG 内所有参与一次调频 DG 的一次调频功率增量及联络线一次调频交换功率偏差。

表 6 微电网群负荷功率波动前后运行状态

Table 6 Micro-grid group load power fluctuation before and after running state

kW					
微电网	微源	微源功率	功率裕度	负荷	负荷波动
MG1	MT1	0	50	215	+20
	MT2	0	40		
	PV1	140	—		
MG2	PV2	130	—	190	+20
	SB2	0	40		
	WT2	180	—		
MG3	SB3	0	20	225	+20
	WT3	155	—		
	MT3	0	50		
	MT4	25	15		

表 7 微电网群一次调频后各可控 DG 增发功率

Table 7 Each controllable DG additional power of micro-grid group after primary frequency modulation

kW					
微网	微源一次调频功率	功率裕度	联络交换功率偏差	负荷波动	
MG1	MT1	12.5	37.5	$\Delta P_{T1}$	+2.5
	MT2	10	30	$\Delta P_{T12}$	+2.5
	PV1	0	—	$\Delta P_{T13}$	0
MG2	PV2	0	—	$\Delta P_{T2}$	-10
	SB2	10	30	$\Delta P_{T21}$	-2.5
	WT2	0	—	$\Delta P_{T23}$	-7.5
MG3	SB3	5	15	$\Delta P_{T3}$	+7.5
	WT3	0	—	$\Delta P_{T31}$	0
	MT3	12.5	37.5	$\Delta P_{T32}$	+7.5
	MT4	10	5	—	—

一次调频后, 系统频率偏移 0.5 Hz, 微电网之间的联络线上产生了交换功率偏差, 需要进行二次调频予以消除。

3) 第一层调频控制, 微电网实施基于 TBC 的二次调频。

微电网群一次调频后, 系统频率偏离了初始值, 变为 49.5 Hz, 联络线功率偏离了原来的计划值, MG2 流向 MG1 功率减少至 72.5 kW, MG2 流向 MG3 功率减少至 62.5 kW。

每个微电网的 TBC 通过测得的系统频率偏差  $\Delta f$  和联络线功率偏差  $\Delta P_{Ti}$ , 代入式(1)计算, 得到微电网控制误差  $MGCE_i$ 。受扰微电网需要实施第一层基于 TBC 的微电网自愈二次频率调整。

受扰微电网 MGCC 根据 MG 内部调频 DG 的运行成本分配输出功率, 各个 DG 在基于 TBC 的二次调频后输出功率如表 8 所示。基于经济 TBC 二次调频时, MG1 中 MT2 运行成本最低, 优先由 MT2

输出功率, 其次再由 MT1 输出功率; MG2 中 SB2 增发功率; MG3 中 MT4 的运行成本最低, 其次为 SB3, 最后为 MT3, 因此优先由 MT4 输出功率。

表 8 微电网 TBC 二次调频后各可控 DG 增发功率

Table 8 Each controllable DG additional power of micro-grid group TBC secondary frequency modulation

kW						
微网	微源	一次调频	二次调频	功率裕度	联络交换功率偏差	负荷波动
MG1	MT1	12.5	0	50	$\Delta P_{T1}$	0
	MT2	10	20	20	$\Delta P_{T12}$	0
	PV1	0	0	—	$\Delta P_{T13}$	0
MG2	PV2	0	0	—	$\Delta P_{T2}$	0
	SB2	10	20	20	$\Delta P_{T21}$	0
	WT2	0	0	—	$\Delta P_{T23}$	0
MG3	SB3	5	5	15	$\Delta P_{T3}$	0
	WT3	0	0	—	$\Delta P_{T31}$	0
	MT3	12.5	0	50	$\Delta P_{T32}$	0
	MT4	10	15	0	—	—

由表 8 可见, 通过 TBC 控制二次调频自愈控制, 各个子微网均能完全承担自身负荷的变化, 消除了联络线功率偏差, 保证了系统频率恢复到 50 Hz, 此时频率自愈互愈调整结束, 各个子微网无需进行第二层基于 FFC 的二次调频。

#### 4.5 算例 3: 多子微网负荷扰动下部分子微网内可调容量不足, 微电网群内总可调容量充裕

##### 1) 微电网群初始运行状态

在  $t=17:00$  时刻, 微电网群稳态运行, 系统频率为 50 Hz, 不考虑网损, 系统的微源出力状态如表 9 所示。波动前 MG2 经联络线流向 MG1 的功率为 42 kW, MG2 经联络线流向 MG3 的功率为 25 kW。MG1、MG2、MG3 内总可调功率裕度分别为 25 kW、40 kW、35 kW。

表 9 微电网群负荷功率波动前后运行状态

Table 9 Micro-grid group load power fluctuation before and after running state

kW					
微电网	微源	微源功率	功率裕度	负荷	负荷波动
MG1	MT1	37	13		
	MT2	30	10	242	+30
	PV1	133	—		
MG2	PV2	120	—		
	SB2	0	40	213	+20
	WT2	160	—		
MG3	SB3	10	10		
	WT3	140	—		
	MT3	35	15	240	+10
	MT4	30	10		

##### 2) 负荷扰动及一次调频

对应于该初始状态, 3 个 MG 内发生负荷波动, 使得微电网群系统的总功率扰动  $\Delta P_L$  为 60 kW, 代入式(5)计算可得系统一次调频后系统的频率下降了 0.5 Hz。

表 10 为 3 个 MG 内机组一次调频功率增量、联络线功率偏差、机组的功率调节裕度等。一次调频后, 系统频率偏移 0.5 Hz, 联络线功率偏离了原来的计划值。

表 10 微电网群一次调频后各可控 DG 增发功率

Table 10 Each controllable DG additional power of micro-grid group after primary frequency modulation

kW					
微网	微源	一次调频功率	功率裕度	联络交换功率偏差	负荷波动
MG1	MT1	12.5	0.5	$\Delta P_{T1}$	-7.5
	MT2	10	0	$\Delta P_{T12}$	0
	PV1	0	—	$\Delta P_{T13}$	-7.5
MG2	PV2	0	—	$\Delta P_{T2}$	-10
	SB2	10	30	$\Delta P_{T21}$	0
	WT2	0	—	$\Delta P_{T23}$	-10
MG3	SB3	5	5	$\Delta P_{T3}$	+17.5
	WT3	0	—	$\Delta P_{T31}$	+7.5
	MT3	12.5	2.5	$\Delta P_{T32}$	+10
	MT4	10	0	—	—

3) 第一层调频控制, 微电网实施基于 TBC 的二次调频。

微电网群一次调频后频率偏离了初始值, 变为 49.5 Hz, 联络线功率偏离了原来的计划值, MG3 流向 MG1 的功率增加至 7.5 kW, MG2 流向 MG3 的功率减少至 15 kW。各微电网的 TBC 检测到其 MGCE 小于零, 实施第一层基于 TBC 的微电网自愈二次频率调整。

表 11 为第一层的 TBC 调频控制后, 各个调频 DG 的增发功率、功率裕度和联络线功率偏差。

由表 11 可见, 通过 TBC 控制二次调频自愈控制, MG2 和 MG3 均能完全承担自身负荷的变化; 但 MG1 内部所有 DG 总增发功率 23 kW, 可调节功率已达上限, 并不能完全承担自身负荷的变化, 仍有 7 kW 负荷功率缺额; 联络线交换功率偏差仍然存在, 由 MG2 和 MG3 的可调机组继续提供一次调频支援给 MG1 以平衡其功率缺额 7 kW, 由式(5)可得系统频率偏差为 -0.127 Hz。

$$\Delta f' = -\frac{\Delta P_{L1} - \Delta P_{MG1max}}{K_{MG2} + K_{MG3} + 0} = -\frac{7}{20+10+25} = -0.127 \text{ Hz}$$

式中,  $K_{MG2}$  与  $K_{MG3}$  分别为 MG2 与 MG3 中仍有可调容量的可控微源的功率频率特性系数之和。

第一层调频控制完成后, 系统频率为 49.87 Hz, 频率未恢复正常且联络线交换功率偏差仍然存在。此时 MGCC<sub>1</sub> 向 MGCC 发送频率调整辅助服务请求信号, 需要进一步实施微网群的第二层频率调整控制。

表 11 微网群 TBC 二次调频后各可控 DG 增发功率

Table 11 Each controllable DG additional power after micro-grid group TBC secondary frequency modulation

kW						
微网	微源	一次调频	二次调频	功率裕度	联络线功率偏差	负荷波动
MG1	MT1	12.5	13	0	$\Delta P_{T1}$	-7
	MT2	10	10	0	$\Delta P_{T12}$	-2.55 +30
	PV1	0	—	—	$\Delta P_{T13}$	-4.45
MG2	PV2	0	—	—	$\Delta P_{T2}$	+2.55
	SB2	10	22.55	17.45	$\Delta P_{T21}$	+2.55 +20
	WT2	0	—	—	$\Delta P_{T23}$	0
	SB3	5	4.45	5.55	$\Delta P_{T3}$	+4.45
MG3	WT3	0	—	—	$\Delta P_{T31}$	+4.45
	MT3	12.5	0	15	$\Delta P_{T32}$	0 +10
	MT4	10	10	0	—	—

4) 第二层调频控制, 微电网群实施基于 FFC 的二次调频。

MGGCC 接收到 MGCC<sub>1</sub> 的调频辅助服务请求信号, 按照如表 2 的调频服务电价及其调节裕度, 选择 MG3 提供调频辅助服务。MGGCC 同时向 MGCC<sub>1</sub> 和 MGCC<sub>3</sub> 分别发出接受和增援辅助服务指令, MGCC<sub>1</sub> 和 MGCC<sub>3</sub> 接到该指令后, 将各自的 TBC 控制切换到 FFC 控制模式, 由 MGCC<sub>3</sub> 开始进行增加调频功率控制, 直到系统频率恢复到 50 Hz。

MG3 在 MT4、MT3 与 SB3 中依照运行成本优先选择运行成本低且仍有可调功率裕度的 DG 增发功率弥补 MG1 的 7 kW 功率缺额, 即选择 SB3 增发功率。

微电网群 FFC 二次调频后各可控 DG 增发功率如表 12 所示。

由表 12 可见, 通过 FFC 控制二次调频自愈控制, MGGCC 根据经济性选择了 MG3 进行互济辅助调频, 在保证经济性的同时保证了系统频率恢复到 50 Hz, 此时频率自愈互愈调整结束, 各个子微网在负荷扰动平衡后, MGCC<sub>1</sub> 和 MGCC<sub>3</sub> 将其联络线计划值调整为 FFC 控制结束后的值, 并将 FFC

控制模式切换回 TBC 控制模式, 以应对下一次的调频任务。

表 12 微网群 FFC 二次调频后各可控 DG 增发功率

Table 12 Each controllable DG additional power after micro-grid group FFC secondary frequency modulation

kW						
微网	微源	一次调频	二次调频	功率裕度	联络线功率偏差	负荷波动
MG1	MT1	12.5	13	0	$\Delta P_{T1}$	-7
	MT2	10	10	0	$\Delta P_{T12}$	0 +30
	PV1	0	—	—	$\Delta P_{T13}$	-7
MG2	PV2	0	—	—	$\Delta P_{T2}$	0
	SB2	10	20	20	$\Delta P_{T21}$	0 +20
	WT2	0	—	—	$\Delta P_{T23}$	0
	SB3	5	7	3	$\Delta P_{T3}$	+7
MG3	WT3	0	—	—	$\Delta P_{T31}$	+7
	MT3	12.5	0	15	$\Delta P_{T32}$	0 +10
	MT4	10	10	0	—	—

## 5 结论

1) 本文所提基于微电网群频率分层协调控制下的自愈互愈策略能将微电网群频率恢复至初始值, 增强了微电网以及微电网群的自愈互愈能力, 可以实现满足调频任务的有序分担、调频费用的有序分摊以及调频经济性的有序达成等要求。

2) 微网控制误差 MGCE 的物理意义为子微电网自身的有功功率差值。由 MGCC 控制进行 TBC 调频, 保证了各个 MG 内部可调容量充足时能依照其调频 DG 的运行成本承担各自的有功波动。

3) 在受扰 MG 内部可调容量不足时, 保证增援 MG 和受援 MG 的调频方式切换至 FFC 恒频模式, 在微电网群整体可调容量充足时由 MGGCC 依照电价序位表选取合适出价 MG 能够进行功率互济, 承担 MG 区外的负荷波动, 恢复系统频率。

4) 实际工程中, B 系数的取值与对应微网区域中的功频效应系数  $K_{MG}$  不尽一致, 且  $K_{MG}$  是动态变化的, 但物理意义上, MGCE 能够反映对应区域的有功功率扰动量, 随着二次调频的进行, 不断减小 MGCE, 也就是不断平衡有功功率扰动量, 达到满足式(1)的要求。

5) 本文的经济性调频思想也适用于其他调频经济性的考虑, 如基于等微增率准则的调频功率优化分配、多目标调频功率优化分配等。

## 参考文献

[1] 熊雄, 王江波, 井天军, 等. 微电网群功率优化控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9): 10-17.

- XIONG Xiong, WANG Jiangbo, JING Tianjun, et al. Power optimization control of microgrid cluster[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 10-17.
- [2] 戴志辉, 陈冰研, 谢军, 等. 含多微网的主动配电网分层调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 121-127.
- DAI Zhihui, CHEN Bingyan, XIE Jun, et al. Hierarchical scheduling strategy for active distribution network with multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 121-127.
- [3] 陈其森, 汪湘晋, 池伟, 等. 多微电网互联系统能量管理方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 83-91.
- CHEN Qisen, WANG Xiangjin, CHI Wei, et al. Research on energy management method of multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 83-91.
- [4] 李国庆, 翟晓娟. 基于层次分析法的孤立微电网多目标优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 17-23.
- LI Guoqing, ZHAI Xiaojuan. Multi-objective optimal operation of island micro-grid based on analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 17-23.
- [5] 张羽, 李咸善. 基于频率调整策略的微电网多目标优化自愈控制[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 831-839.
- ZHANG Yu, LI Xianshan. Multi-objective optimization for microgrid self-healing control based on frequency regulation strategy[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 831-839.
- [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): 164-168.
- [7] 梁英, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 基于同步逆变器的微电网二次调频策略及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 391-402.
- LIANG Ying, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Secondary frequency regulation strategies and characteristics analysis of synchronverter-based microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 391-402.
- [8] 康慨, 邓少平, 张超, 等. 考虑联络线功率稳定的微电网鲁棒经济调度模型[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 60-67.
- KANG Kai, DENG Shaoping, ZHANG Chao, et al. Robust economic dispatch model of interconnected microgrid considering tie line power stability[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 60-67.
- [9] BULLICH-MASSAGUÉ, EDUARD, D ÍAZ-GONZÁLEZ, et al. Microgrid clustering architectures[J]. Applied Energy, 2018, 212: 340-361.
- [10] 徐青山, 李淋, 蔡霖霖, 等. 考虑电能交互的冷热电多微网系统日前优化经济调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 36-44.
- XU Qingshan, LI Lin, CAI Jilin, et al. Day-ahead optimized economic dispatch of CCHP multi-microgrid system considering power interaction among microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 36-44.
- [11] ZHAO Bo, WANG Xiangjin, LIN Da, et al. Energy management of multiple microgrids based on a system of systems architecture[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6410-6421.
- [12] BAZMOHAMMADI N, TAHSIRI A, ANVARI-MOGHADDAM A, et al. A hierarchical energy management strategy for interconnected microgrids considering uncertainty[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 109: 597-608.
- [13] JU Liwei, ZHANG Qi, TAN Zhongfu, et al. Multi-agent-system-based coupling control optimization model for micro-grid group intelligent scheduling considering autonomy-cooperative operation strategy[J]. Energy, 2018, 157: 1035-1052.
- [14] 王尧, 李欢欢, 鞠立伟, 等. 面向智能化调度的微电网群能量耦合协调控制策略及仿真分析[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2232-2239.
- WANG Yao, LI Huanhuan, JU Liwei, et al. Coordinated energy coupling control strategy and simulation analysis of microgrid cluster for intelligent scheduling[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2232-2239.
- [15] 高扬, 艾芊, 王靖. 多智能体系统的交直流混合微电网一致性协同控制[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2372-2377.
- GAO Yang, AI Qian, WANG Jing. Consensus cooperative control of AC/DC hybrid microgrids based on multi-agent system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2372-2377.
- [16] 赵敏, 沈沉, 刘锋, 等. 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 848-857.
- ZHAO Min, SHEN Chen, LIU Feng, et al. A game-theoretic

- approach to analyzing power trading possibilities in multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 848-857.
- [17] 刘一欣, 郭力, 王成山. 多微电网参与下的配电侧电力市场竞价博弈方法[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2469-2476.
- LIU Yixin, GUO Li, WANG Chengshan. Optimal bidding strategy for microgrids in electricity distribution market[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2469-2476.
- [18] 佟新, 胡存刚, 芮涛. 基于主从博弈的多微电网系统经济优化方法[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 68-76.
- TONG Xin, HU Cungang, RUI Tao. Master-slave game based economic optimization method of multi-microgrid system[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 68-76.
- [19] 冯劲松. 区域协同控制下频率偏差系数的确定[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- FENG Jinsong. Determination of frequency deviation coefficient in regional cooperation control[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [20] 蔺健. 多区域互联电网 AGC 协同优化控制策略研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- LIN Jian. AGC collaborative optimization control strategy for multi-area interconnection grid[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.
- [21] 汪玉凤, 李琳, 王立辉, 等. 微电网双重下垂控制策略的研究[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 212-215.
- WANG Yufeng, LI Lin, WANG Lihui, et al. Study on the double-droop control strategy of microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 212-215.
- [22] 张国荣, 王啸飞, 王盛. 基于 DBS 的直流微电网能量协调控制策略研究[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 162-168.
- ZHANG Guorong, WANG Xiaofei, WANG Sheng. Energy coordinated control of dc microgrid based on DBS[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3): 162-168.
- [23] 江渝, 向竑宇, 钟力强. 基于协调一致算法的微电网频率二次调整策略[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 66-71.
- JIANG Yu, XIANG Hongyu, ZHONG Liqiang. Secondary adjustment strategy for microgrid frequency based on consensus algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 66-71.
- [24] 徐兴发, 陈志峰, 王智东, 等. 缺储能风光微电网孤岛初期幅频特性[J]. 广东电力, 2019, 32(5): 22-28.
- XU Xingfa, CHEN Zhifeng, WANG Zhidong, et al. Initial amplitude-frequency characteristics of isolated island in lack of energy storage microgrid[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(5): 22-28.
- [25] 吴鸣, 宋振浩, 吕振宇, 等. 计及综合效益的虚拟同步化微电网二次调频策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 743-753.
- WU Ming, SONG Zhenhao, LÜ Zhenyu, et al. Secondary frequency regulation strategy of virtual synchronization technology based microgrid considering the integrated benefit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 743-753.
- [26] LASSETER R H, AKHIL A, MARNAY C, et al. Integration of distributed energy resources: the CERTS micro-grid concept[R]. USA: Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, 2002.

收稿日期: 2019-11-28; 修回日期: 2020-03-03

作者简介:

李咸善(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行与控制、水电站仿真与控制、微电网技术等方面的研究; E-mail: lixianshan@ctgu.edu.cn

董鑫(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网运行与控制。E-mail: aisuivyansuiyi@qq.com

(编辑 魏小丽)