

基于背靠背变流器柔性互联的 微网群分层协同恢复控制策略

孟潇潇¹, 邵冰冰¹, 韩平平¹, 华玉婷^{2*}, 王强钢³

- (1. 新能源利用与节能安徽省重点实验室(合肥工业大学), 安徽省 合肥市 230009;
2. 安徽省能源实验室(合肥综合性国家科学中心能源研究院), 安徽省 合肥市 230031;
3. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044)

Hierarchical Cooperative Recovery Control Strategy for Flexible Interconnected Microgrid Cluster Based on Back-to-back Converters

MENG Xiaoxiao¹, SHAO Bingbing¹, HAN Pingping¹, HUA Yuting^{2*}, WANG Qianggang³

(1. Anhui Province Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving (Hefei University of Technology), Hefei 230009, Anhui Province, China; 2. Energy Laboratory of Anhui Province (Hefei Comprehensive National Science Center), Hefei 230031, Anhui Province, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: The flexible multi-state switch (FMSS) enriches the diversity of the topology configuration of microgrid cluster (MGC) and improves its control measure and fault recovery ability. However, flexible interconnection changes the disturbance transfer mode of the traditional AC-MGC, leading to frequency/voltage decoupling among the MG units, which brings new difficulties to the frequency/voltage zero-error recovery and active power sharing control under the disturbance. This study firstly takes BTBC-FMSS based flexible interconnected MGC system as the research object. Then, a novel centralized-distributed hybrid communication architecture is designed, and a hierarchical cooperative control for the MGC system is proposed based on consistency theory and power balance equations. Under this control strategy, the frequency/voltage restoration and active power sharing control goals can be achieved. Finally, the stability analysis of the proposed control strategy is analyzed, and a simulation model is built in Matlab/Simulink to verify the effectiveness of the control strategy.

KEY WORDS: microgrid cluster; flexible multi-state switch; Hierarchical cooperative control; back-to-back converters

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(2108085QE236); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(JZ2021HGQA0196, PA2022GDSK0072)。

Project Supported by Anhui Provincial Natural Science Foundation (2108085QE236); Fundamental Research Funds for the Central Universities (JZ2021HGQA0196, PA2022GDSK0072).

摘要: 柔性多状态开关丰富了微网群拓扑构型的多样性, 提升了其调控手段和故障恢复能力。但柔性互联方式改变了传统交流微网群的扰动传递模式, 导致各微网单元间频率/电压解耦, 从而给扰动下的频率/电压无差恢复及有功均分控制带来了新的难题。该文以背靠背变流器柔性互联微网群为研究对象, 设计全新的集中-分布式混合的分层协同控制通信网络架构, 分别基于一致性理论和功率平衡方程组推导并提出柔性互联微网群的分层协调控制策略。在该策略下, 能够实现集群全网的频率/电压无差恢复和有功出力按容量比率均分的控制目标。该文分析该控制策略下柔性互联微网群的稳定性, 在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型, 验证控制策略的有效性。

关键词: 微网群; 柔性多状态开关; 分层协同控制; 背靠背变流器

0 引言

将多个地理位置上毗邻的微网(microgrid, MG)互联构成微网群(microgrid cluster, MGC)方式运行, 是提升偏远山区、海岛地区乃至城市配电网末端供电可靠性的有效途径^[1-2]。同时, 柔性多状态开关(flexible multi-state switch, FMSS)作为一种新兴的互联方案, 由于具备扰动隔离效果好、调节能力强以及故障恢复快等优势, 已成为解决多微网集成问题的全新选择。然而考虑到 FMSS 的非线性受控源特性, 与常规阻抗互联的 MGC 系统相比, 柔性互

联 MGC 系统各 MG 单元间不再遵从阻抗线路的功率传输规律, 电网运行频率从全局退化为局部变量, 不同 MG 单元可异步运行于不同频率^[3-4]。在异步互联特性影响下, 各 MG 单元间无法形成有效的“频率信号”传递^[5-6], 各 MG 单元的频率扰动平抑任务只能由区域内的发电设备独自承担, 集群层面的 DG 有功按容量比率出力的均分控制目标难以实现。

针对柔性直流互联的交流微网, 一种控制方案^[7-9]是选定一个主控 MG 单元侧的 VSC 采用定直流电压控制($V_{dc}Q$ 控制), 而其他从控 MG 单元侧的 VSC 采用定功率控制(PQ 控制)。由于该方法对主控 MG 单元的备用容量和功率调节能力要求较高, 且主控 MG 单元必须完全承担直流电压侧的扰动平抑任务, 不适应孤岛柔性互联场景。针对上述不足, 在不依赖通信网络交互下, 如文献[10-12]提出采用有功-直流电压-频率(P-V-f)下垂控制方式, 将局部交流侧频率扰动转换为直流侧电压扰动信号, 进而“传递”至其他交流系统, 可有效改善柔性互联电网的扰动均担能力。但此类方法高度依赖直流电压的误差信号作为全网的扰动传递信号, 仅适用于多端直流互联场合, 且易在暂态大扰动下由直流侧扰动引发全网失稳问题。文献[13]进一步通过本地测量提取背靠背变流器(back to back converters, BTBC)型 FMSS 两端频率和电压偏差信号, 并考虑调节死区, 构造紧急状态下的有功/无功传输指令改善扰动均摊和功率均分水平, 但该方法仅能一定程度改善扰动均摊和有功均分问题, 且对于多个 BTBC-FMSS 互联的 MGC 无良好适应性。总结来看, 不依赖通信网络的上述控制其本质仍然是有差调节, 无法实现各 MG 系统的频率/电压无差恢复及有功均分等目标。

针对频率/电压二次控制(无差调节)问题, 近年来研究成果表明^[14-17], 可通过构建(集群层-MG 单元层)分层控制的通信架构解决常规阻抗互联 MGC 系统的频率/电压恢复控制和有功均分控制问题。但上述方法不能照搬至柔性互联 MGC 系统, 因为相比于前者, 后者互联线路传输功率依赖给定且不符合阻抗线路传输规律。因此, 文献[14-16]的思路是对分层分布式控制模式加以改进, 将 FMSS 设备各端口逆变器纳入通信网络并作为集群层主控设备, 提出一种适用于直流互联孤岛 MGC 系统的分层分布式控制策略。文献[17]针对三端口 AC/DC 微网群提出一种分布式与集中式混合的控

制策略, 实现交直流微网群本地/全局的功率均分以及分布式储能按荷电状态均分。但上述文献所提方法均存在局限, 即在单直流母线功率平衡约束下, N 端互联的 MG 单元只能实现 $N-1$ 个 MG 单元的扰动均担。

综上, 柔性互联 MGC 系统的分层控制实施更加复杂, 不仅需要保证频率/电压的无差恢复, 还需要保证全网的有功均分控制, 同时, 还需设计合理的 FMSS 控制策略, 在实现上述目标的同时保障直流侧电压的稳定性, 从而确保 MGC 系统的稳定运行。目前, 针对柔性互联, 特别是由 BTBC 型 FMSS 柔性互联的 MGC 系统, 鲜有同时满足上述控制目标的研究成果。

为解决上述问题, 本文首先针对多 BTBC-FMSS 环型互联的 MGC 系统, 深入分析其在传统控制下无法实现集群层面有功均分的原因, 并围绕这一矛盾, 提出一种集中-分布式混合的分层控制架构。在集群层, 采用集中通信方式, 根据功率平衡关系方程推导并考虑方程可行解问题, 提出一种 BTBC 传输指令的实时计算方法, 实现集群全网有功均分控制目标; 在 MG 单元层, 仍依靠传统分布式控制实现频率/电压恢复和有功均分控制目标; 同时, 通过 3 项改进控制措施优化 BTBC-FMSS 设备的稳定性, 从而进一步改善集群层控制策略的稳定性问题。最后, 通过算例仿真验证了所提策略的有效性和优越性。

1 柔性互联 MGC 系统的结构及建模分析

1.1 系统建模

本文研究的柔性互联 MGC 系统结构如图 1 所示, 它由 N 个交流 MG 单元及各单元间 q 个 BTBC 型 FMSS 组成, 其中 $N \geq 2$ 。交流微网内部包含 n_k (k 为所对应 MG 的编号) 个 DG 和 1 个接在 PCC 母线的恒阻抗等值负荷, DG 和负荷间通过常规交流线路连接。在常规 BTBC-FMSS 的 AC/DC/AC 的变流器控制结构中, 一端变流器采用定直流电压控制($V_{dc}Q$ 控制), 维持直流侧电压 V_{dc} 的稳定; 另一端采用定功率控制(PQ 控制), 控制 BTBC 的传输功率。

FMSS 设备的拓扑结构多样, 通常可分为双端互联型、多端互联型、跨电压等级互联型以及交直流混联型等多种类型^[18]。其中, 双端互联型(BTBC-FMSS)组网方式下各 MG 单元可相互隔离独立运行, 必要时也可动态调整交互功率, 均衡各 MG 单

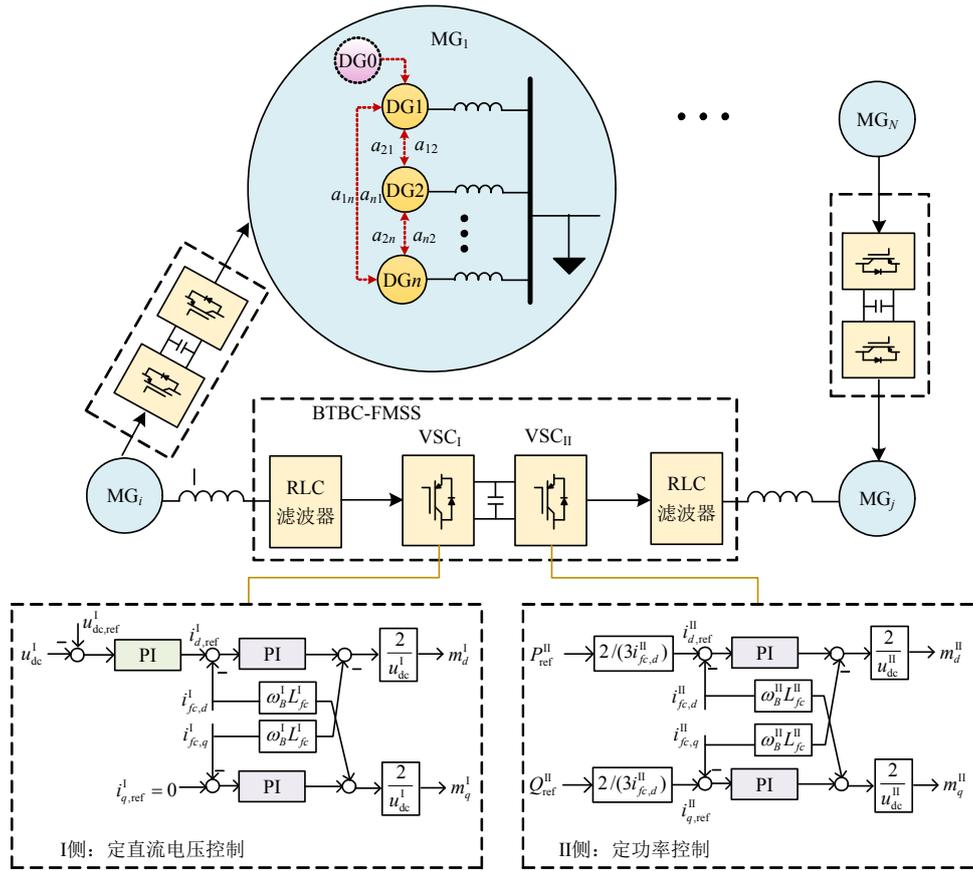


图1 基于BTBC柔性互联MGC系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the BTBC based flexible interconnected MGC system

元负载率水平, 提供常态化柔性联络通道的同时还有效阻断故障电流的传播路径。因此本文以

BTBC-FMSS 互联的 MGC 系统为研究对象, 其详细网架结构如图 2 所示。

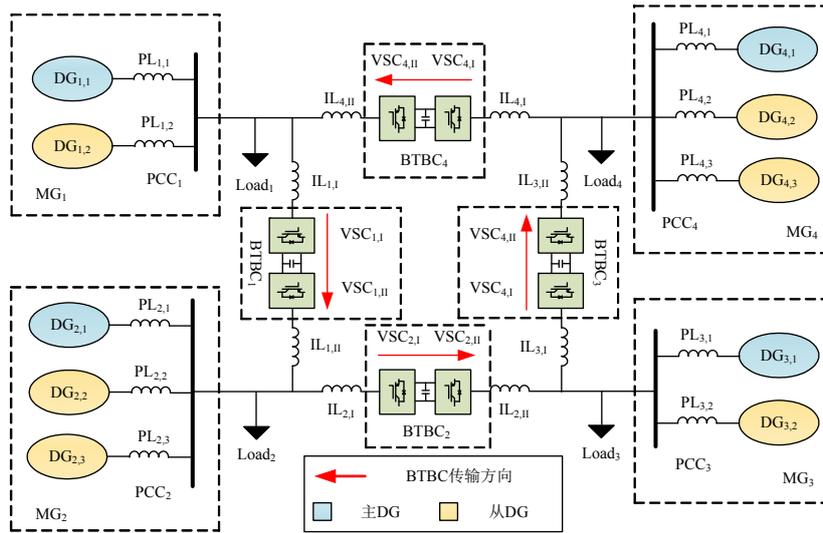


图2 本文所研究的柔性互联MGC系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of flexible interconnected MGC system

1.2 控制目标

本文提出的柔性互联 MGC 系统的分层协同控制目标包括 MGC 系统的频率/电压无差恢复、有功功率按容量比率均分及直流电压稳态无差等目标,

具体可分解表示如下:

1) 对于各 MG 单元层控制目标, 包括:

目标 1: 频率二次恢复控制, 使各 MG 单元内部的频率保持在额定值。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\omega_{k,i} - \omega_{ref}| = 0, \forall k \in N, i \in n_k \quad (1)$$

式中：下标 k 为 MG 编号； i 为 DG 编号。

目标 2：电压二次恢复控制，使各 MG 单元内 DG 端口电压保持在额定值。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |V_{k,i} - V_{ref}| = 0, \forall k \in N, i \in n_k \quad (2)$$

目标 3：有功功率均分控制，使各 MG 单元内每台 DG 按照其容量(下垂系数)均衡出力^[19-20]。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\alpha_{k,i} - \alpha_{k,j}| = 0, \forall k \in N, i, j \in n_k \quad (3)$$

式中 $\alpha_{k,i} = K_{k,i}^P P_{k,i}$ 表示第 i 台 DG 按照下垂系数的有功出力比率。

2) 对于 BTBC 的控制目标：

目标 4：定直流电压控制，保证 BTBC 直流侧电压的稳定及无差。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |V_{dcs} - V_{dc}^{ref}| = 0, \quad \forall s \in q \quad (4)$$

3) 对于 MGC 系统层面的控制目标：

目标 5：有功功率均分控制，协调各 BTBC 传输功率实现不同 MG 单元间按照其容量均衡出力。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\alpha_{MGk} - \alpha_{MGl}| = 0, \quad \forall k, l \in N \quad (5)$$

式中： $\alpha_{MGk} = K_{MGk}^P P_{MGk}$ 表示 MG_k 单元按照其等效下垂系数的整体有功出力比率； K_{MGk}^P 的具体表达式形式及推导过程将在下一节中给出。结合目标 3 可以推出目标 5 的另一种表达形式：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\alpha_{k,i} - \alpha_{l,j}| = 0, \forall k, l \in N, \forall i \in n^k, j \in n^l \quad (6)$$

即 MGC 系统中所有 DG 都实现有功均分控制。

1.3 有功功率均分问题分析

在传统阻抗线路互联 MGC 系统^[19-20]中，可简单利用一致性协议并结合双层(MG 单元层、集群层)的分层分布式稀疏通信网络，有效的实现上述控制目标，其分层分布式的控制架构可如图 3(a)所示。但对于柔性互联 MGC 系统，直接应用该控制架构会存在如下问题：

1) BTBC-FMSS 设备的非线性受控源特性导致各 MG 单元间的频率扰动无法相互传递；下垂控制仅能够实现各 MG 单元内部的有功均分控制，而各 MG 单元间的频率收敛值及有功出力比率不再直接关联，目标 5 无法自动实现。

2) 对于 N 端 FMSS 设备($N \geq 2$)，由于有功功率平衡方程的存在(流入等于流出)，仅存在 $N-1$ 端的控制自由度。常规分层分布式控制架构无法解决 BTBC-FMSS 一端功率不可调配问题。

3) 柔性互联的特殊组网方式导致集群全网的

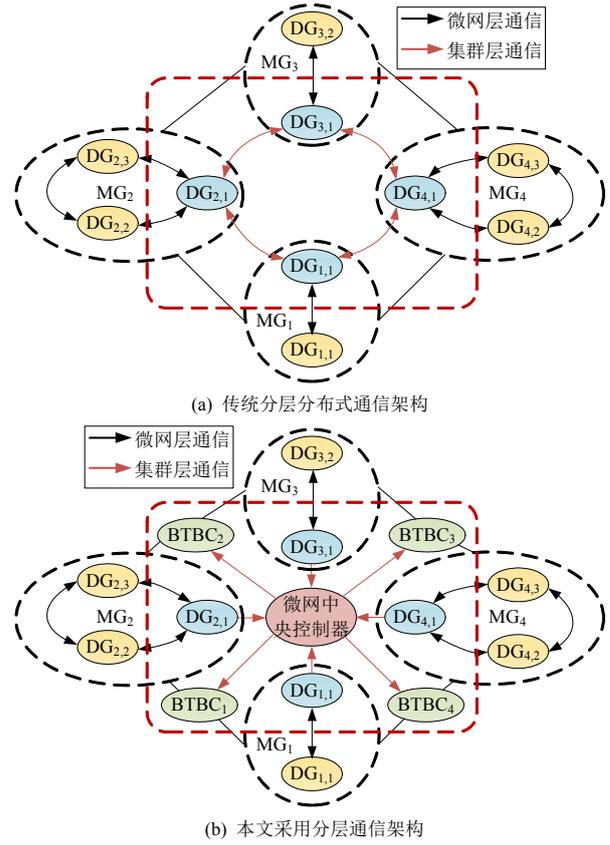


图 3 传统和柔性互联 MGC 系统的分层控制通信架构图
Fig. 3 Hierarchical control communication architecture of conventional and flexible interconnected MGC systems

有功均分控制已转化为对各 BTBC 设备传输功率的灵活调控问题。因此，为发挥 BTBC 的灵活调控能力，集群层采用集中控制方式更为合理。

鉴于实际 MGC 系统对实现目标 1—4 的要求比目标 5 更为紧迫，且分层架构具备显著优势，本文仍然将控制架构分为 MG 单元层和集群层，如图 3(b)所示。与文献[19]类似，在 MG 单元层中，微网内各 DG 的本地控制采用常规下垂控制以快速响应各类扰动。在 MG 单元的二次恢复控制中，利用多代理技术构建稀疏网络进行信息交互，以分布式控制方式实现 MG 单元内的二次频率/电压恢复及有功均分控制等目标(目标 1—3)。各 BTBC 采用常规一端 V_{dc}/Q 一端 PQ 控制方式，保证扰动下的直流侧电压稳定且无差(目标 4)。而在集群层，将各 BTBC、负荷数据及各 MG 内部的领导 DG 有功均分比率作为控制输入，利用 MGCC 集中控制方式实现全网有功均分控制目标(目标 5)。采取上述集中式-分布式分层架构的优势在于，集群层与 MG 单元层控制基本解耦，MGC 系统可随时从互联互通转入相互隔离状态。

此外，本文研究的孤岛微网群是一个完全由逆

变型 DG 主导且不含同步发电机的微网群系统,即本文所认为的 DG 是理想可调配电源,在实际中,可认为是储能电源或光储、风储等可调配电源。且本文不考虑新能源 DG 一次能源侧波动影响,认为在所提控制策略时间尺度内,一次能源作为外部给定可认为是常数。

2 基于分层协同的 MGC 系统功率均分控制

2.1 DG 本地层下垂控制

本地层利用本地量测信息,无需通信信息交换。对于采用电压控制的 DG,其基本控制环节包括内部的电压/电流双环控制以及功率外环控制,功率外环控制则常采用有功-频率以及无功-电压的下垂控制。基于 P - ω 和 Q - V 的下垂控制表达式^[21]可表示如下:

$$\begin{cases} \omega_{k,i} = \omega_{\text{ref}} - K_{k,i}^P P_{k,i} \\ V_{k,i} = V_{\text{ref}} - K_{k,i}^Q Q_{k,i} \\ V_{k,i} = V_{k,i}^{\text{ref}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $V_{k,i}$ 和 $\omega_{k,i}$ 分别为 DG 输出的电压幅值和频率,由于采用 d 轴电压定向,因此有 $V_{k,i} = V_{k,i}^{\text{od}}$ 存在, $P_{k,i}$ 和 $Q_{k,i}$ 是经过低通滤波器后的平均有功和无功功率; $K_{k,i}^P$ 和 $K_{k,i}^Q$ 分别为有功和无功下垂系数,其大小通常与每台 DG 的最大有功和无功容量,即 $P_{k,i}^{\text{max}}$ 和 $Q_{k,i}^{\text{max}}$ 成反比关系。

2.2 MG 单元层分布式二次控制

由于 DG 的下垂控制为有差控制,需要利用通信网络在下垂控制器中施加附加二次控制以消除频率/电压的稳态偏差。由于各 DG 与 PCC 母线间的传输线路阻抗存在不匹配问题,电压恢复与无功均分由此存在固有矛盾,因而本文仅关注 MGC 系统的频率/电压恢复和有功均分控制问题,无功均分问题不在相应的讨论范畴^[19-21]。对式(7)中的下垂控制式的左右两边求导可得,

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{k,i}^{\text{ref}} = \dot{\omega}_{k,i} + K_{k,i}^P \dot{P}_{k,i} = u_{k,i}^{\omega} + K_{k,i}^P u_{k,i}^P \\ \dot{V}_{k,i}^{\text{ref}} = \dot{V}_{k,i} + K_{k,i}^Q \dot{Q}_{k,i} = u_{k,i}^V + K_{k,i}^Q u_{k,i}^Q \end{cases} \quad (8)$$

式中: $u_{k,i}^{\omega}$ 和 $u_{k,i}^V$ 分别是各 MG 单元层二次控制器中频率和电压的二次控制输入量; $u_{k,i}^P$ 和 $u_{k,i}^Q$ 是有功和无功的二次控制输入量。

参考文献[19-20]方式,本文首先利用分布式控制方式实现 MG 单元内部的目标 1—3。各 MG 单元内部频率/电压恢复和有功均分的二次控制协议

设计,分别如下:

$$\begin{cases} u_{k,i}^{\omega} = -C_{\omega} \sum_{j \in N_i^k} a_{ij}^k (\omega_{k,i} - \omega_{k,j}) - d_i^k (\omega_{k,i} - \omega_{\text{ref}}) \\ u_{k,i}^V = -C_V \sum_{j \in N_i^k} a_{ij}^k (V_{k,i} - V_{k,j}) - d_i^k (V_{k,i} - V_{\text{ref}}) \end{cases} \quad (9)$$

$$u_{k,i}^P = -C_P \sum_{j \in N_i^k} a_{ij}^k (K_{k,i}^P P_{k,i} - K_{k,j}^P P_{k,j}) \quad (10)$$

式中:上下标中的 k 对应第 k 个 MG 单元 $a_{ij}^k \in R^{N \times N}$ 为 MG_k 内各 DG 频率、电压和有功功率通信网络的邻接矩阵元素; d_i^k 为对应的领导节点相邻权重矩阵元素,如果第 i 台机组 DG_i 与虚拟领导节点 DG₀ 相连,获得参考值 ω_{ref} 、 V_{ref} 信息,则 $d_i^k = 1$, 否则 $d_i^k = 0$ 。本文假定仅有一台 DG 能获得领导节点 DG₀ 的信息。

2.3 集群层有功均分控制

本文集群层控制的主要目的是在各 MG 单元层内恢复控制的基础上,实现不同 MG 间的有功均分比率一致(目标 5)。本文集群层控制采用集中通信方式,设计思路是:利用 MGCC 收集各 MG 单元有功出力比率、负载大小,在线实时计算不同 BTBC 的传输功率指令,使各 MG 单元之间的有功出力均衡,同时不能影响各 MG 单元内频率和电压恢复控制的效果。其相应集群层控制的设计步骤如下。

1) MG 单元内部的功率平衡关系。

首先,针对单个 MG_k,其内部的基础功率平衡约束方程可表示为

$$\sum_{i=1}^{n_k} P_{k,i} - P_{\text{load}k} - P_{\text{loss}k} + \sum_{s=1}^q m_{k,i} P_{\text{cs}} = 0 \quad (11)$$

式中: P_{cs} 为 BTBC_s 传输的有功功率; $m_{k,i}$ 可认为是 MG_k 与 BTBC_s 之间的关联系数,取 $V_{\text{dc}}Q$ 控制侧(I 侧)向 PQ 控制侧(II 侧)的功率传输方向为正方向(见图 1 和图 2),则有功率由 BTBC 向 MG 流入为 1,反向为-1,不相关为 0; $P_{\text{load}k}$ 为 MG_k 中的负荷总量; $P_{\text{loss}k}$ 为 MG_k 内的传输损耗; $P_{k,i}$ 为 MG_k 内 DG_i 的有功出力。

考虑到 MG 单元内部分布式有功均分控制的恢复作用,在接近稳态时,各 DG 出力满足有功均分,则有控制目标 3 成立,因此,每个 MG 单元的整体有功出力可表示为

$$P_{\text{MG}k} = \sum_{i=1}^{n_k} P_{k,i} = K_{k,P_{\text{in}}}^P P_{k,P_{\text{in}}} \sum_{i=1}^{n_k} \frac{1}{K_{k,i}^P} = \frac{\alpha_{k,P_{\text{in}}}}{K_{\text{MG}k}^P} \quad (12)$$

式中:编号 P_{in} 为每个 MG 单元内指定与领导节点相连机组,满足 $1 \leq P_{\text{in}} \leq n_k$, 本文设定 $P_{\text{in}} = 1$; $\alpha_{k,P_{\text{in}}}$ 为领导者 DG_{k,P_{\text{in}}}} 所对应的有功均分比率; $K_{\text{MG}k}^P$ 为

MG_k 单元的等效下垂系数, 满足关系 $K_{MGk}^P = 1 / (\sum_{i=1}^{n_k} 1/K_{k,i}^P)$ 。则式(12)可进一步表示为

$$\alpha_{k,p_m} / K_{MGk}^P - P_{loadk} - P_{lossk} + \sum_{s=1}^q m_{k,s} P_{cs} = 0 \quad (13)$$

集群层控制的主要目的是实现目标 5, 因此各 MG 单元的有功均分比率应满足如下关系:

$$\alpha_{1,p_m} = \alpha_{2,p_m} = \dots = \alpha_{N,p_m} = \alpha_0 \quad (14)$$

式中 α_0 为集群层面的有功均分比率的最终收敛值(未知)。对于 MG_k 单元, 其功率平衡约束方程可进一步表示为

$$\alpha_0 / K_{MGk}^P - P_{loadk} - P_{lossk} + \sum_{s=1}^q m_{k,s} P_{cs}^{ref} = 0 \quad (15)$$

式中 P_{cs}^{ref} 为第 s 台 BTBC 的有功传输指令值。

2) 柔性互联 MGC 系统 BTBC 传输指令求解。

对于含 N 个 MG 单元且由 q 个 BTBC 柔性互联的 MGC 系统, 为实现集群层面的有功均分控制, 存在 q 个 BTBC 的传输有功指令 P_{cs}^{ref} 和集群有功均分比率收敛值 α_0 等 $q+1$ 个未知量待求, 而已知量为 MGC 系统的组网方式(关联系数)、各 MG 单元内的负载大小 P_{loadk} 及网损 P_{lossk} (可估计或忽略)以及各 MG 单元的有功均分比率 α_{k,p_m} 。将 N 个 MG 单元的功率约束方程关系, 写作非齐次线性方程组形式, 如式(16)所示。

$$\begin{cases} \frac{\alpha_0}{K_{MG1}^P} + m_{1,1} P_{c1}^{ref} + m_{1,2} P_{c2}^{ref} + \dots + m_{1,q} P_{cq}^{ref} = \\ P_{load1} + P_{loss1} \\ \frac{\alpha_0}{K_{MG2}^P} + m_{2,1} P_{c1}^{ref} + m_{2,2} P_{c2}^{ref} + \dots + m_{2,q} P_{cq}^{ref} = \\ P_{load2} + P_{loss2} \\ \vdots \\ \frac{\alpha_0}{K_{MGN}^P} + m_{N,1} P_{c1}^{ref} + m_{N,2} P_{c2}^{ref} + \dots + m_{N,q} P_{cq}^{ref} = \\ P_{loadN} + P_{lossN} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)可进一步表示为矩阵形式:

$$[\mathbf{R}_{MGC} \quad \mathbf{M}_{MGC}] [\alpha_0 \quad \mathbf{P}_c^{ref}]^T = \mathbf{P}_{LD} \quad (17)$$

式中: $\mathbf{R}_{MGC} = [1/K_{MG1}^P \dots 1/K_{MGN}^P]_{N \times 1}^T$ 为各 MG 单元的等效下垂系数的倒数向量; $\mathbf{M}_{MGC} = \{m_{i,j}\}_{N \times q}$ 为系统互联拓扑连通图中 BTBC(边)与各 MG(点)的关联矩阵; $\mathbf{P}_c^{ref} = [P_{c1}^{ref} \dots P_{cq}^{ref}]_{q \times 1}^T$ 为各 BTBC 所计算的传输功率指令向量; $\mathbf{P}_{LD} = [P_{LD1} \dots P_{LDN}]_{N \times 1}^T$ 为负荷和

线损构成的功率向量, 有 $P_{LDk} = P_{loadk} + P_{lossk}$ 。

观察式(17), 存在 N 个等式关系和 $q+1$ 个未知量。根据非齐次线性方程组求解特点, 上述控制方程有解的充要条件应为: $N \leq q+1$, 即 BTBC 的数量应该满足 $q \geq N-1$ 。对于仅由 BTBC 互联的 MGC 系统, 实现集群层面的有功均分的等价充要条件是: MGC 系统的柔性互联拓扑满足连通图条件。

值得指出的是, 鉴于 BTBC 成本较高, $q > N$ 时会出现明显的设备冗余, 而 $q < N-1$ 则会导致传输功率约束方程组超定无准确解, 因此通过多个 BTBC 手拉手构建环型系统是合理方式, 也符合工程实际, 此时 BTBC 个数 q 等于 N , 也满足拓扑的连通图条件。因此本文的研究对象限定为环型 MGC 系统。现针对 N 个 MG 单元柔性互联的 MGC 系统, 推导各 BTBC 的传输指令。

根据上述分析可知, 由于 $q=N$, 式(17)欠定, 存在无穷多组非零解。常规思路是利用优化算法设计约束条件和优化目标求最小范数解, 但优化算法收敛时间不定, 实时性难以保证。另一种思路是固定一个 BTBC 传输指令, 转换为求可行解问题, 本文采用后者。

基于此, 本文设计一种 BTBC 传输功率指令的快速在线实用计算方法, 以实现集群层面的有功均分控制, 其相应的算法步骤如下:

①对环型 MGC 系统的 MG 和 BTBC 进行顺序编号, 以 4 个 MG 单元经 4 个 BTBC 互联 MGC 系统为例, 编号方式如图 2 所示, 为: $\langle \text{MG}_1, \text{MG}_2 \rangle \rightarrow \text{BTBC}_1$, $\langle \text{MG}_2, \text{MG}_3 \rangle \rightarrow \text{BTBC}_2$, $\langle \text{MG}_3, \text{MG}_4 \rangle \rightarrow \text{BTBC}_3$, $\langle \text{MG}_4, \text{MG}_1 \rangle \rightarrow \text{BTBC}_4$ 。

②集群层采用实时数据采集但离散发送控制信号方式, 首先确定控制的固定触发时间间隔 ΔT , MGCC 实时采集(或估计)各 MG 单元负荷大小、有功均分比率等信息;

③实时比较各 MG 单元的有功均分比率, 并得到最小有功均分比率 $\min(\alpha_{i,p_m})$ 对应的 MG 单元编号, 设为 m ;

④选取最小有功均分比率 MG _{m} 单元所对应的 BTBC _{m} , $1 \leq m \leq N$, 将控制模式编号对应为 BTBC 编号, 并设定其传输功率指令为 P_{cm}^{set} ;

⑤添加步骤③中预设功率指令于式(17), 求解其余 BTBC 的传输功率指令。

按照上述传输指令求解步骤, 增加预设有功传输指令后, 式(17)变化为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{MGC} & \mathbf{M}_{MGC} \\ 0 & \mathbf{e}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \mathbf{P}_c^{\text{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{LD} \\ \mathbf{P}_{cm}^{\text{set}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中 \mathbf{e}_m 为 q 维单位列向量, 满足第 m 个元素为 1, 其他为 0。变化后的式(18)满足 q 个 BTBC 有功传输指令唯一解条件。

以上求解步骤避免了讨论不定方程多解问题, 且求解难度(线性方程)和工作量(N 阶)都不高, 能够保证算法的实时性。但 $\mathbf{P}_{cm}^{\text{set}}$ 的不同取值显然会影响算法的控制效果和稳定性, 也不能保证各 BTBC 的传输功率指令 $\|\mathbf{P}_c^{\text{ref}}\|$ 满足最小范数解条件。

对于 BTBC _{m} 设备的预设传输指令 $\mathbf{P}_{cm}^{\text{set}}$, 设计如下:

$$\mathbf{P}_{cm}^{\text{set}} = \begin{cases} r\mathbf{P}_{cm}^{\Delta}, & |r\mathbf{P}_{cm}^{\Delta}| \leq \mathbf{P}_{cm}^{\text{max}} \\ \mathbf{P}_{cm}^{\text{max}}, & |r\mathbf{P}_{cm}^{\Delta}| > \mathbf{P}_{cm}^{\text{max}} \end{cases}, r \in [-1, 1] \quad (19)$$

式中: $\mathbf{P}_{cm}^{\text{max}}$ 是 BTBC _{m} 所能传输的最大功率上限, 它能够保证 BTBC _{m} 不至于因为功率交互越限导致设备本身失稳; \mathbf{P}_{cm}^{Δ} 是假定除 BTBC _{m} 以外的所有 BTBC 传输功率为 0, 为平衡 BTBC _{m} 两端 MG 单元的有功均分比率, 所应该传输的有功功率; \mathbf{P}_{cm}^{Δ} 仅与 BTBC _{m} 两端负荷大小、网损以及有功出力水平相关, 可进一步表示为

$$\mathbf{P}_{cm}^{\Delta} = (K_{MGi} P_{LDi} - K_{MGj} P_{LDj}) / (K_{MGi} + K_{MGj}), i, j \in N^m \quad (20)$$

\mathbf{P}_{cm}^{Δ} 可保证在其余 BTBC 的传输功率指令为 0 时, BTBC _{m} 两端 MG 的有功均分比率完全趋于一致。显然, 在关键参数 $r=1$ 时, \mathbf{P}_{cm}^{Δ} 可认为是一个局部最优解, 但不能认定该解也是全局最优解, 全局最优解显然仅能在 $r \geq 0$ 处取得。

3 稳定性分析

本文的研究对象为利用 BTBC 装置采用环型互联方式下的 MGC 系统。系统的控制构架分为 DG 本地下垂控制、MG 单元层分布式控制和集群层集中控制。由于 BTBC 设备的直流侧存在较好的隔离作用, 各 MG 单元内的控制相对独立。其中 DG 本地层和 MG 单元层控制作用限于各 MG 单元内部, 仅集群层控制涉及各 MG 单元间的信息交互。

3.1 MG 单元层稳定性分析

对于单个 MG 包含下垂和分布式控制协议的稳定性证明已有相关研究, 如文献[19-21], 采用 Lyapunov 直接法对所提策略的稳定性进行了相应分析。其思想在于忽略逆变型电源控制器电压、电

流内环动态, 仅保留下垂控制及分布式二次控制中电压 V 、频率 ω 及有功均分比率 α_p 等动态。所得结论一般是为了保证 MG 单元层控制的稳定, 各 DG 的下垂控制参数及分布式控制的比例系数需要维持在一个合理区间。由于 MG 单元稳定性证明已有较多成果且不是本文研究重点, 因此不再赘述。

3.2 集群层稳定性分析

集群层控制的稳定性主要由各 BTBC-FMSS 设备主导, 有文献研究指出[23-25], 针对小扰动(静态)稳定问题, 仅存在传输功率极限和控制参数取值范围问题; 而对于暂态稳定性问题, 由于两侧 VSC 的控制策略不同, 其不同功率传输方向和大小突变下存在阻抗特性和稳定性差异。

为解决上述问题, 参考文献[23-25]所提改进方法, 本文对 PQ 控制侧 VSC 的控制器作如下优化, 且如图 4 所示: 1) 根据 BTBC 容量限制, 设定传输功率指令的双向饱和限制; 2) 通过低通滤波器(low-pass filter, LPF)提取实际网侧交流电压的扰动分量, 对传统 PQ 控制中有功功率支路的实际电压值进行修正, 使 PQ 侧 VSC 对交流侧电压波动提供阻尼支撑, 保持为正阻抗; 3) 将直流电压变化量乘以反馈系数 k_f 后反馈到交流侧 d 轴电流分量上, 即通过改变并网电流的值进而改变传输功率来抑制直流电压波动。

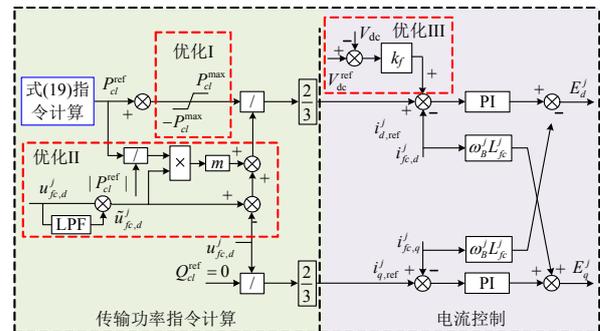


图4 PQ侧VSC的附加稳定提升控制

Fig. 4 Stable enhancement control for PQ side VSC

在上述3个稳定优化措施中, 优化 I 影响 BTBC 的稳态传输功率极限; 而优化 II 和 III 仅影响暂态指令切换下的有功传输指令, 不影响稳态传输功率水平。可以保证系统在稳态和暂态扰动下各 BTBC 不存在失稳问题, 从而进一步保证整体控制算法的稳定性。

4 算例验证

为验证本文所提分层控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 中搭建如图 2 所示的仿真模型, 其

中, MGC 系统在初始时刻的元件和控制参数如表 1 所示。

表 1 MGC 系统元件和控制参数

Table 1 Parameters of MGC system components and controllers				
额定参数	数值			
	MG ₁ & MG ₂ & MG ₃ & MG ₄			
DG 额定直流侧电压 U_{dc}	800V			
DG 额定交流侧电压 U_n	380V			
额定频率 f_n	50Hz			
DG 参数	数值			
	DG _{1,1&2,1&2,3&3,1&4,2}	DG _{1,2&2,2&3,2&4,1&4,3}		
RLC 滤波器 $R_f/L_f/C_f$	0.05Ω/1.2mH/10μF	0.1Ω/0.8mH/15μF		
电流内环 PI 参数 K_{pi}/K_{ii}	30/500	25/400		
电压外环 PI 参数 K_{pv}/K_{iv}	0.05/20	0.1/18		
有功/无功下垂系数 K^P/K^Q	$0.8 \times 10^{-4}/3.2 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-4}/4.8 \times 10^{-3}$		
电压/频率/有功二次控制比例系数 $C_v/C_\omega/C_P$	30/20/20	25/15/15		
BTBC 参数	数值			
	BTBC _{1&3}	BTBC _{2&4}		
RLC 滤波器 $R_{fc}/L_{fc}/C_{fc}$	0.12Ω/3.1mH/10μF	0.2Ω/1.6mH/15μF		
直流侧电容 C_{dc}	1000μF	1200μF		
电流内环 PI 参数 K_{p_cc}/K_{i_cc}	20/200	18/150		
直流电压环 PI 参数 K_{p_dvc}/K_{i_dvc}	2/20	1.5/15		
PLL 参数 K_{p_pll}/K_{i_pll}	0.4/2	0.5/3		
传输功率限值	±15kW	±10kW		
负荷参数	数值			
	LOAD _{1,1}	LOAD _{2,1}	LOAD _{3,1}	LOAD _{4,1}
负荷 P_{Load}/Q_{Load}	12kW	16kW	14kW	18kW
	12kvar	16kvar	14kvar	18kvar
线路参数	数值			
	PL _{1,2,3,4}	IL _{a,b}		
交流线路阻抗 R_c/L_c	0.8Ω/5mH	0.1Ω/2.5mH		

图 2 所示 MGC 系统相应的通信链路如图 3(b) 所示。采用 0-1 权重方式, 各 MG 单元的邻接矩阵表示为

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{MG1\&3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{MG2\&4} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (21)$$

相应的领导节点连接矩阵为

$$\begin{cases} \mathbf{d}_{MG1\&3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{d}_{MG2\&4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (22)$$

本文所研究的 MGC 系统中, 各 MG 单元采用单母线结构的多机并联方式, 各 DG 建模为理想逆变型 DG, 负荷设置为恒阻抗负载。各 BTBC-FMSS 设备的功率传输正方向定义为 I 侧流向 II 侧。则根据 BTBC(边)与 MG 单元(点)的关联关系, 得到 MGC 系统的关联矩阵为

$$\mathbf{M}_{MGC} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

4.1 控制性能验证

为验证控制方案的有效性, 在 MG 单元层控制中, 采用常规频率/电压下垂控制作为一次控制, 在二次控制中设计频率、电压恢复和有功均分的控制器; 在 MGC 集群层中, 采用集中式控制方式实时调整 BTBC 设备传输指令实现全网有功均分控制。分别在轻载、重载以及与文献[13]控制策略比较 3 个算例, 验证本文所提控制策略的有效性。

1) 轻载负荷接入下系统动态响应。

算例 1: 为此, 仿真算例设计为, 0~1s, 系统仅采用下垂控制; 1s 时刻, 投入 MG 单元层的二次恢复控制; 3s 时刻, 再投入集群层有功均分控制; 5s 时刻, MG₁ 单元内接入轻载 LOAD_{1,2}, 容量为 6kW+j6kvar; 8s 时刻, 轻载 LOAD_{1,2} 退出运行; 10s 时刻, MG₃ 单元内 LOAD_{3,1} 负荷减少了 7kW+j7kvar; 15s 仿真结束。其中, 关键参数 $r=0, \Delta T=0.01$ 。

观察图 5(a)~(c)可知, 在 0—1s 时段, 仅在下垂控制作用下的 MGC 系统, 各 MG 单元的运行电压和频率都不相同, 且未运行在额定值, 有功均分比率也不相同。在 1—3s 时段, 各 MG 单元施加二次恢复控制, 图 5(a)、(b)可观察到各 MG 单元的电压和频率皆恢复为额定值, 但图 5(c)显示, 集群层面的有功均分控制仍然未实现。在 3—5s 时段, 进一步施加集群层面的有功均分控制, 可以观察到各 MG 单元有功均分比率已趋于一致, 集群层面的有功均分控制已实现。在 5—10s 时段, MG₁ 和 MG₃ 中负荷连续投退对系统整体的频率/电压恢复和有功均分的控制效果未造成显著影响, 说明本文所提控制策略的有效性。图 5(d)、(e)进一步给出各 BTBC 装置的传输有功和直流侧电压状态, 图 5(d)可以看出, 传输功率未超过装置上下限值, 而图 5(e)显示各 BTBC 设备的直流侧波动较小。最后, 图 5(f)给出了控制模式的切换过程, 可以看出, BTBC 传输

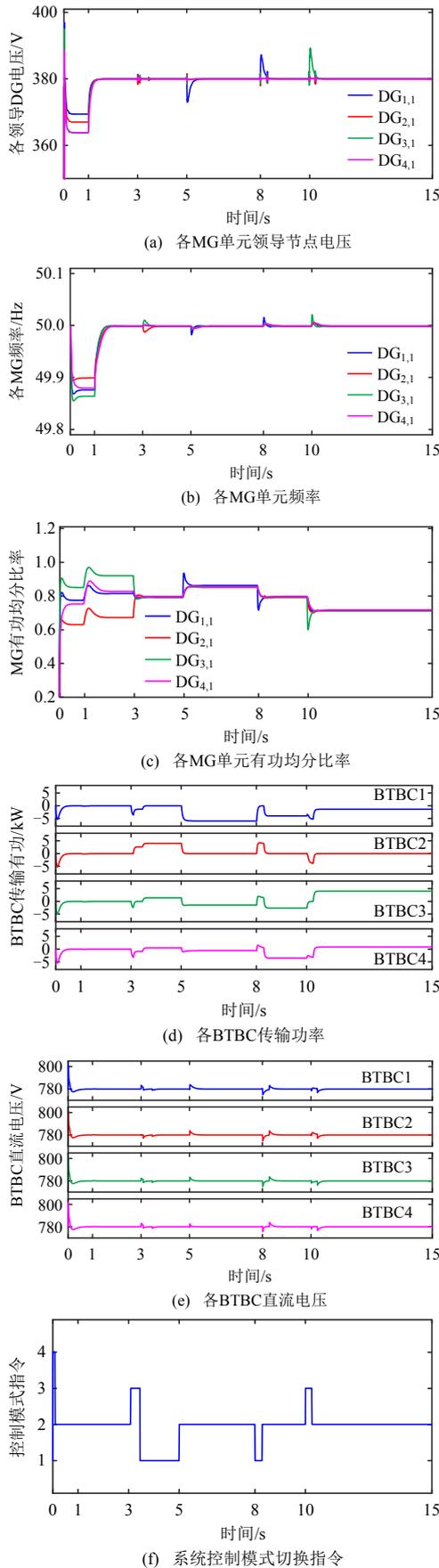


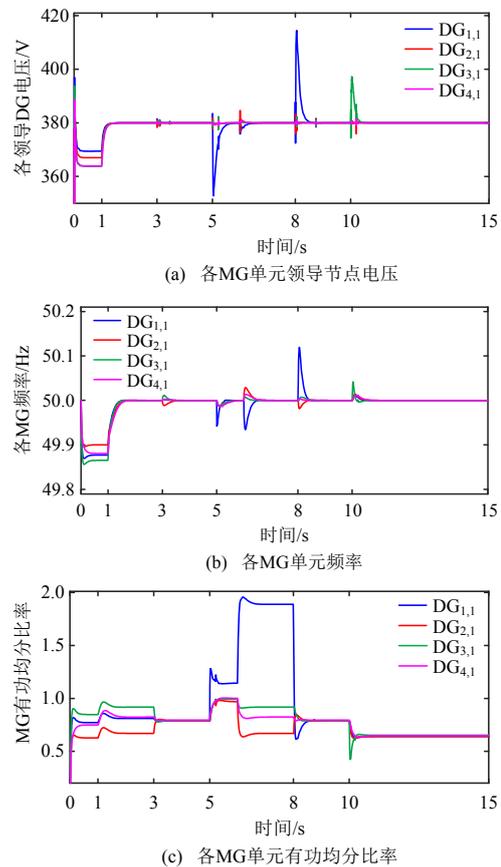
图5 算例1负载变化下MGC系统响应
 Fig. 5 MGC system responses of Case 1 under load variations

模式切换仅在几个暂态扰动发生时刻。

2) 重载负荷接入下系统动态响应。

算例2: 与算例1类似, 0—5s时段, 与算例1完全相同; 5s时刻, MG₁单元内接入重载LOAD_{1,3}, 容量为30kW+j30kvar; 由于BTBC1进入传输指令进入饱和, 系统于6s传输指令控制自动清零, 并持续2s时间; 8s时刻, 重载LOAD_{1,3}退出运行, 同时; 10s时刻, MG₃单元内LOAD_{3,1}负荷减少了7kW+j7kvar; 15s仿真结束。其中, 关键参数 $r=0$, $\Delta T=0.01$ 。

不同于轻载接入情况, 可以观察到5s时刻接入重载后, 图6中BTBC₁设备首先达到反向饱和-10kW, 此时, 有功均分比率来判断, 集群层的有功均分控制已无法实现。在饱和阶段经历1s后, MGCC将各BTBC传输指令清零, 并于8s重新启动, 此时恰好重载Load_{1,3}退出运行, 在8—15s时段, 集群层的有功均分控制又能够实现, 在整个动态阶段, 系统的频率和电压仍然保持稳定。由此可见, 在实际工程应用时, 应通过设置合理BTBC容量确保其可调范围能满足集群层有功均分控制需求。附图A1进一步展示了轻载和重载投退下MG₂单元内部的动态响应结果。由结果可知, 在两个算例下, MG₂单元内部的频率、电压恢复控制和有功



(c) 各MG单元有功均分比率

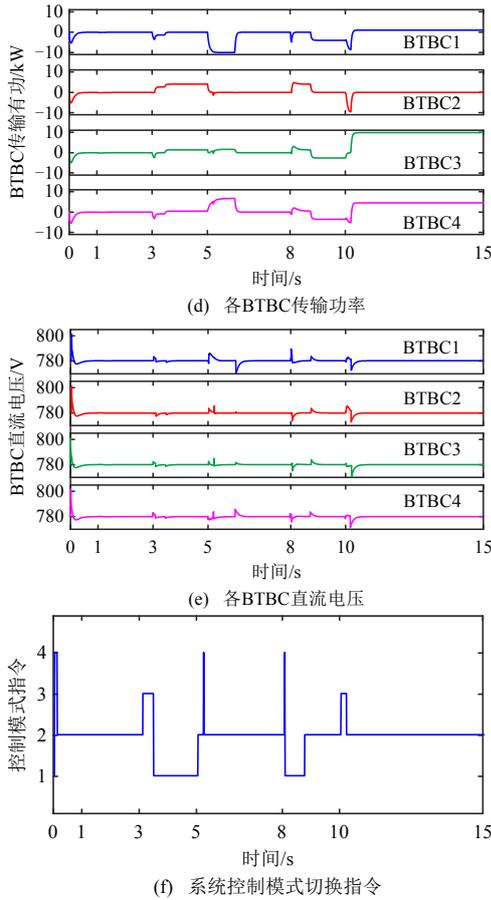


图 6 算例 2 负载变化下 MGC 系统响应
Fig. 6 MGC system responses of Case 2 under load variations

均分控制均不受影响，可如期实现，这也反映出柔性互联 MGC 系统良好且独特的扰动隔离能力。

3) 与文献[13]所提方法进行比较。

文献[13]通过本地测量提取 BTBC-FMSS 两端频率偏差信号，并考虑调节死区，设计了一种广义下垂控制策略，并以此构造紧急状态下的有功传输指令以改善两侧 MG 单元的扰动均摊和有功功率均分水平。该方法的优点是不需要设计集群层通信控制，缺点是无法实现集群层面的有功均分控制。下面利用算例 3 比较本文所提方法相比文献[13]方法的优越性。

算例 3: 0—2s, 系统仅采用下垂控制; 2s 时刻, 投入本文所提算法的集群层有功均分控制和文献 [13]所提 BTBC 的扰动均担控制; 6s 时刻, 投入 MG 单元层的二次恢复控制; 8s 时刻, MG₁ 单元内接入轻载 LOAD_{1,2}, 容量为 6kW+j6kvar; 11s 时刻, 轻载 LOAD_{1,2} 退出运行; 13s 时刻, MG₃ 单元内 LOAD_{3,1} 负荷减少了 7kW+j7kvar; 15s 仿真结束。

算例 3 的仿真结果如图 7 所示, 观察图 7(e)、(f)的结果可知, 文献[13]所提方法在不考虑各 MG

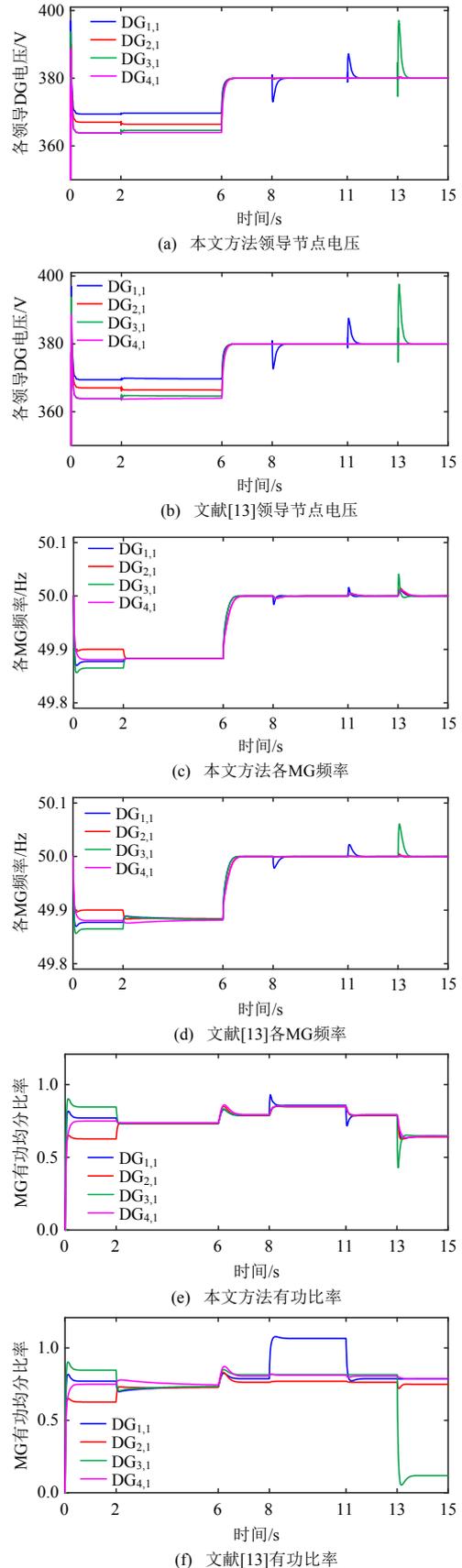


图 7 本文和文献[13]方法在负载变化下 MGC 系统响应
Fig. 7 MGC system responses of the proposed method and the method in [13] under load variations
单元内频率/电压恢复控制时具有较好的有功均分

控制效果。对应图中 2—6s 时间段内各 MG 单元有功均分比率的动态特性，这是由于文献[13]方法高度依赖 BTBC 两侧的频差传递有功，当二次控制将两侧频率都恢复为额定值时，该方法的有效性将大打折扣，任意 MG 内负载变化都会导致此时有功均分比率无法收敛为一致，对应图中 6—15s 时间段。显然，本文所提集群层的有功均分控制，与各 MG 单元的相应控制基本解耦，在任何情况下都可以保证集群层面有功均分一致收敛的目标，且控制响应的超调量更小，这证明了本文所提方法的有效性和创新性。

4.2 即插即用性能验证

算例 4：为了进一步验证系统中 DG 即插即用能力，设置算例为，0—5s 时段，与算例 1 相同；5s 时刻，MG₂ 单元系统中 DG_{2,3} 因为故障立即退出运行；10s 时刻，DG_{2,3} 需要重新并网，为了保护 BTBC 装置安全，给 MGCC 系统下发 BTBC 调整指令，MGCC 系统将所有 BTBC 传输指令置零，维持 2s；同时 DG_{2,3} 延迟 0.5s 并网。

算例 4 的仿真结果如图 8 所示，观察图 8(a)—(c)可以看出，在 5s 时刻，DG_{2,3} 退出运行对系统的冲击较小，经小幅振荡后，频率和电压仍维持在额定值，有功均分控制效果也能够保证。但在 10.5s 时刻，DG_{2,3} 并网时电压、频率和有功状态量都出现较大冲击，这主要是由于 DG_{2,3} 未采取预同期控制而直接并网的结果。但由于事先调整了 BTBC 传输指令，图 8(d)、(e)显示未对 BTBC 的稳定性造成显著影响。同时 DG_{2,3} 并网后暂态冲击的动态过程也基本在 2s 内平息。说明本文所提算法满足 DG 机组的“即插即用”。

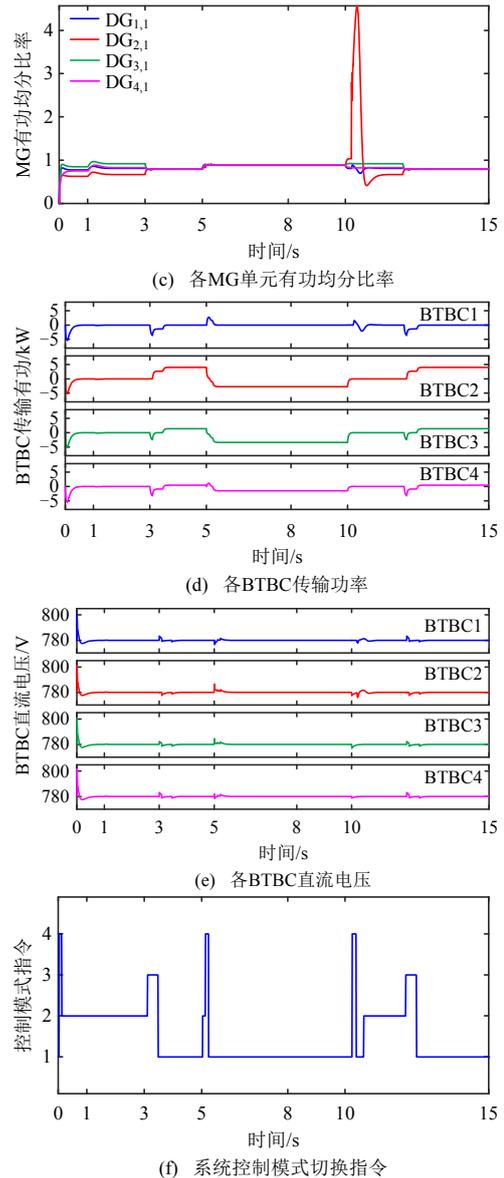
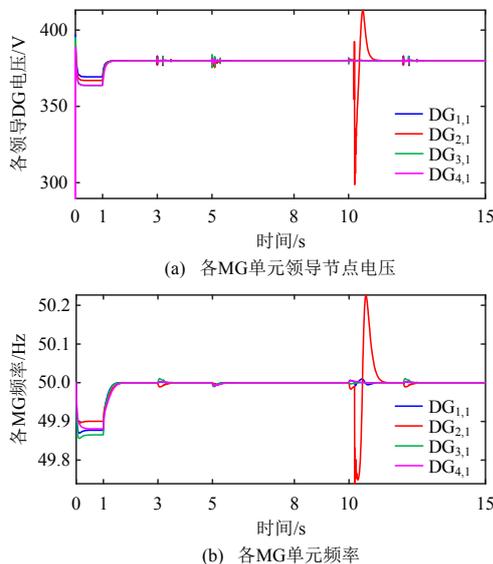


图 8 负荷变化下 MG₂ 单元系统响应

Fig. 8 MG₂ unit responses under load variations

4.3 关键参数对控制算法性能影响

前述分析指出，对于每个控制模式，BTBC_m 的传输 P_{cm}^{set} 在未超过其出力限值下可以任意取值，但其大小显然会影响集群层有功均分控制的性能。同时，集群层采用离散控制，算法的固定触发时间间隔 ΔT 也会对系统的动态响应产生影响。本节将分析上述两个关键参数变化下对控制算法的性能影响。首先定义有功均分比率均方误差 $\Delta\alpha_{\text{MG}k}^{\text{rms}}$ 和 BTBC 传输功率均方根 P_c^{rms} ，分别表示如式(24)和(25)所示。

$$\begin{cases} \Delta\alpha_{\text{MG}k}^{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\alpha_{\text{MG}k} - \bar{\alpha}_{\text{MG}})^2} \\ \bar{\alpha}_{\text{MG}} = \frac{1}{N} \left(\sum_{k=1}^N \alpha_{\text{MG}k} \right) \end{cases} \quad (24)$$

$$P_c^{rms} = \sqrt{\frac{1}{q} \sum_{s=1}^q (P_{cs}^{set})^2} \quad (25)$$

1) 不同传输指令设定下系统动态响应。

取算例 1 场景，仅观察有功均分控制和 BTBC 传输功率的动态响应，设置 $\Delta T=0.01s$ ，分别观察 $r=-1、0、0.5、1$ ，4 种情况下的有功均分比率动态响应特性，并且用有功均分比率均方误差和 BTBC 传输功率均方根来评价功率传输指令解的范数大小。

观察图 9(a)可知，不同传输比例系数 r 下系统的有功均分比率的均方误差在稳态下的变化不大，近似为 0，说明有功均分水平较好；仅在集群层控制实施时刻、负载接入和退出时刻等暂态下才会出现较大扰动，扰动时间不足 0.5s，反映出算法的稳定性。由于 r 的正负和大小反映了 BTBC 的传输有功指令 P_{cm}^{set} 方向和大小，由此可以看出，集群层有功均分控制并不受 BTBC_m 设备传输指令大小的影响。而图 9(b)则反映出，不同传输比例系数 r 下 BTBC 整体的传输指令水平差别较大，随着 r 的增大，BTBC 传输能量整体水平越小。显然这与本文设计参数 r 的初衷相吻合，即在 $r \geq 0$ 时 BTBC 的整体传输能量水平较低，传输指令式(18)的解接近最小范数解。

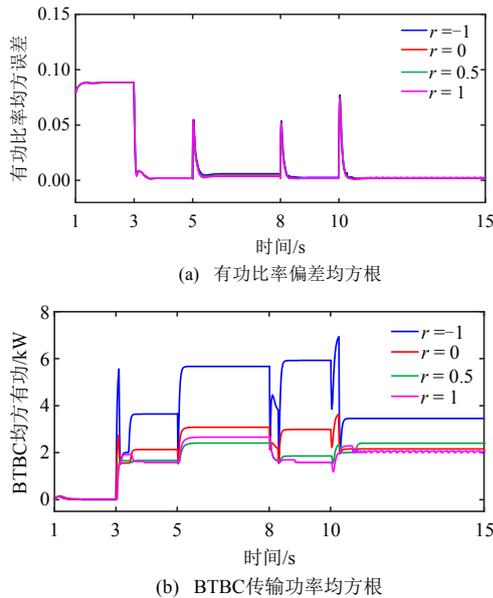


图 9 不同传输比例系数 r 下 MGC 系统响应
Fig. 9 MGC system response under different transmission ratio coefficient r

2) 不同触发时间间隔下系统动态响应。

算例设置场景与 4.3.1 节相同，设置 $r=0$ ，再分别观察 $\Delta T=0.01、0.05、0.1、0.2s$ ，4 种情况下的有

功均分比率动态响应特性。

根据图 10(a)可知，不同时间触发间隔 ΔT 下系统的有功均分比率的均方误差在稳态下的变化仍然不大，近似为 0；但在暂态下，不同 ΔT 对应不同程度的暂态扰动， ΔT 越大扰动超调量越大。而图 10(b)则显示，不同时间触发间隔 ΔT 对 BTBC 整体的传输指令水平几乎没有影响，仅影响 BTBC 传输指令的响应速率。

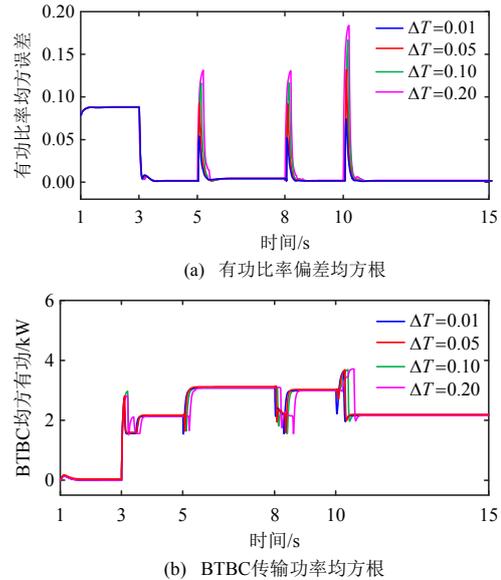


图 10 不同触发间隔 ΔT 下 MGC 系统响应
Fig. 10 MGC system response under different time-trigger intervals ΔT

显然，在实际控制场景中，为了同时降低集群层有功均分控制的响应超调量和 BTBC 的传输能量水平，应该尽可能取较大的 r 和较小的 ΔT ，但 r 受 BTBC 传输容量限制存在取值上下限，而 ΔT 则受通信资源和成本限制，也存在最小限值，因此应综合考虑选择此二关键参数范围。

5 结论

本文提出一种适用于 BTBC-FMSS 柔性互联 MGC 系统的分布式-集中式混合的分层协同控制策略，来解决 MGC 全网层面的频率/电压二次恢复控制和有功均分控制问题。具体结论如下。

1) 本文提出一种全新的分层协同控制结构。在该结构中，MG 单元层采用分布式控制架构实现频率/电压恢复控制和局部有功均分控制；集群层依靠 MGCC 集中协调各 BTBC 设备实现全网层面的有功均分控制，且 BTBC 传输指令进入饱和后不会影响 MG 单元层的频率/电压恢复控制效果。

2) 设计了与分层协同控制策略相匹配的算法。

在MG单元层采用传统分布式一致性协议实现恢复控制目标, 集群层则通过集中式离散控制在线实时计算各BTBC传输指令实现有功均分目标。通过仿真验证该算法能有效应对负荷动态变化, 且能够实现各DG的“即插即用”。

3) 对所提控制策略的稳定性问题进行了讨论, 证明在合理参数取值范围内系统是能够保持稳定的。

本文所提集群层集中控制依赖实时测量各MG单元负荷大小且忽略了网损, 而较大规模电力系统的负荷可能较难实时测量, 一定程度影响该策略的推广。此外, 集群层采用固定时间触发方式进行控制, 存在信号冗余、成本偏高等问题, 后续可改进为基于事件触发的控制方式。

参考文献

- [1] 支娜, 肖曦, 田培根, 等. 微网群控制技术研究现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 107-115.
ZHI Na, XIAO Xi, TIAN Peigen, et al. Research and prospect of multi-microgrid control strategies[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 107-115(in Chinese).
- [2] 刘迎澍, 陈曦, 李斌, 等. 多微网系统关键技术综述[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3804-3820.
LIU Yingshu, CHEN Xi, LI Bin, et al. State of art of the key technologies of multiple microgrids system[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3804-3820(in Chinese).
- [3] 王杰, 黄文焘, 余墨多, 等. 柔性互联微网模式紧急切换平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7695-7705.
WANG Jie, HUANG Wentao, YU Moduo, et al. Smooth control strategy for emergency switching of interconnected microgrids via FMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7695-7705(in Chinese).
- [4] 杨万里, 涂春鸣, 兰征, 等. 基于储能型柔性多状态开关的直流微电网与交流配电网柔性互联策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 254-260.
YANG Wanli, TU Chunming, LAN Zheng, et al. Flexible interconnection strategy between DC microgrid and AC distribution grid based on energy storage flexible multi-state switch[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 254-260(in Chinese).
- [5] 黄文焘, 吴攀, 邵能灵, 等. 基于混合公共连接单元的柔性互联多微网结构与控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3499-3513.
HUANG Wentao, WU Pan, TAI Nengling, et al. Architecture design and control method for flexible connected multiple microgrids based on hybrid unit of common coupling[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3499-3513(in Chinese).
- [6] 徐殿国, 刘瑜超, 武健. 多端直流输电系统控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 1-12.
XU Dianguo, LIU Yuchao, WU Jian. Review on control strategies of multi-terminal direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 1-12(in Chinese).
- [7] WANG Wenyuan, BARNES M. Power flow algorithms for multi-terminal VSC-HVDC with droop control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1721-1730.
- [8] DU Wenjuan, FU Qiang, WANG Haifeng. Comparing AC dynamic transients propagated through VSC HVDC connection with master-slave control versus DC voltage droop control[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1285-1297.
- [9] WANG Yizhen, HE Jinwei, ZHAO Yuming, et al. Equal loading rate based master-slave voltage control for VSC based DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2252-2259.
- [10] ANDREASSON M, WIGET R, DIMAROGONAS D V, et al. Distributed secondary frequency control through MTDC transmission systems[C]//Proceedings of the 54th IEEE Conference on Decision and Control. Osaka, Japan: IEEE, 2015.
- [11] YOGARATHINAM A, CHAUDHURI N R. Stability-constrained adaptive droop for power sharing in AC-MTDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 1955-1965.
- [12] 李霞林, 李志旺, 郭力, 等. 交直流微电网集群柔性控制及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5948-5961.
LI Xialin, LI Zhiwang, GUO Li, et al. Flexible control and stability analysis of AC/DC microgrids clusters [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5948-5961(in Chinese).
- [13] NADERI M, KHAYAT Y, SHAFIEE Q, et al. An emergency active and reactive power exchange solution for interconnected microgrids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 5206-5218.
- [14] 于国星, 宋蕙慧, 侯睿, 等. 柔性直流互联孤岛微网群

的分布式频率协同控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 103-111.

YU Guoxing, SONG Huihui, HOU Rui, et al. Distributed cooperative frequency control for flexible DC interconnected island microgrid cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 103-111(in Chinese).

[15] ZHOU Jianguo, ZHANG Huaguang, SUN Qiuye, et al. Event-based distributed active power sharing control for interconnected AC and DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6815-6828.

[16] HOSSAIN J, MAHMUD A, MILANO F, et al. Design of robust distributed control for interconnected microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2724-2735.

[17] WANG Peng, JIN Chi, ZHU Dexuan, et al. Distributed control for autonomous operation of a three-port AC/DC/DS hybrid microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 1279-1290.

[18] 王成山, 季静, 冀浩然, 等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 1-14.

WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1-14(in Chinese).

[19] LAI Jingang, LU Xiaoqing, YU Xinghuo, et al. Cluster-oriented distributed cooperative control for multiple AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(11): 5906-5918.

[20] KOU Peng, LIANG Deliang, GAO Lin. Distributed coordination of multiple PMSGs in an islanded DC microgrid for load sharing[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 471-485.

[21] CHEN Meng, XIAO Xiangning, GUERRERO J M. Secondary restoration control of islanded microgrids with a decentralized event-triggered strategy[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(9): 3870-3880.

[22] NADERI M, KHAYAT Y, SHAFIEE Q, et al. Interconnected autonomous AC microgrids via back-to-back converters—Part I: small-signal modeling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 4728-4740.

[23] 田艳军, 彭飞, 王毅, 等. AC/DC-DC/AC 级联变流器 DC 与 AC 双侧双向交互稳定性分析及协调优化控制[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2434-2446.

TIAN Yanjun, PENG Fei, WANG Yi, et al. Bidirectional

interactive stability analysis of DC and AC sides for AC/DC-DC/AC cascade converter and coordinative optimization control[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2434-2446(in Chinese).

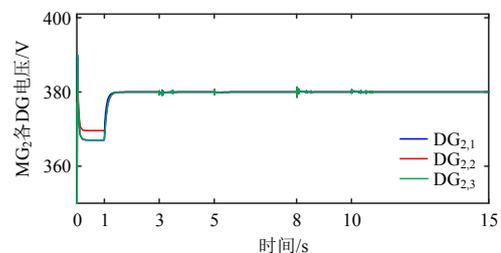
[24] NADERI M, KHAYAT Y, SHAFIEE Q, et al. Interconnected autonomous AC microgrids via back-to-back converters—Part II: stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 11801-11812.

[25] 姜玉霞, 田艳军, 李永刚. 背靠背变流器调节器参数及传输功率变化对阻抗稳定特性的影响及其改进控制策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2866-2875.

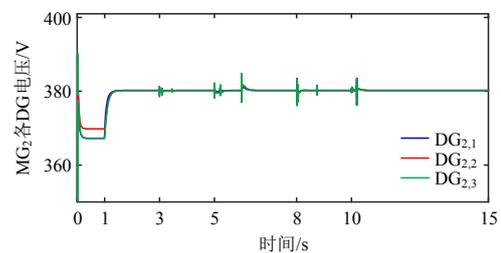
JIANG Yuxia, TIAN Yanjun, LI Yonggang. Influence of back-to-back converter regulator parameters and transmission power variation on impedance stability and improved control strategy[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2866-2875(in Chinese).

附录 A

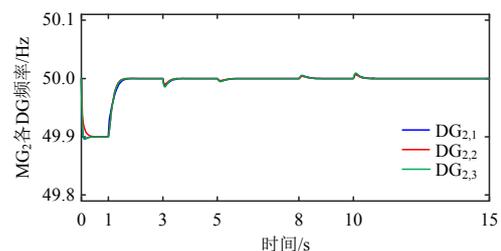
附图 A1(a)–(c)及(d)–(f)则分别展示了轻载和重载退下 MG₂ 单元内部的动态响应结果。由结果可知, 在两种情况下, MG₂ 单元内部的频率、电压恢复控制和有功均分控制均不受影响, 可如期实现; 同时, 由于 5~10s 时段的负荷变动发生在 MG₁ 和 MG₃ 单元, 根据超调量判断可知对 MG₂ 系统影响较小, 这也反映出柔性互联 MGC 系统良好且独特的扰动隔离能力。



(a) 算例1 MG₂各DG电压



(b) 算例1 MG₂各DG频率



(c) 算例1 MG₂有功功率

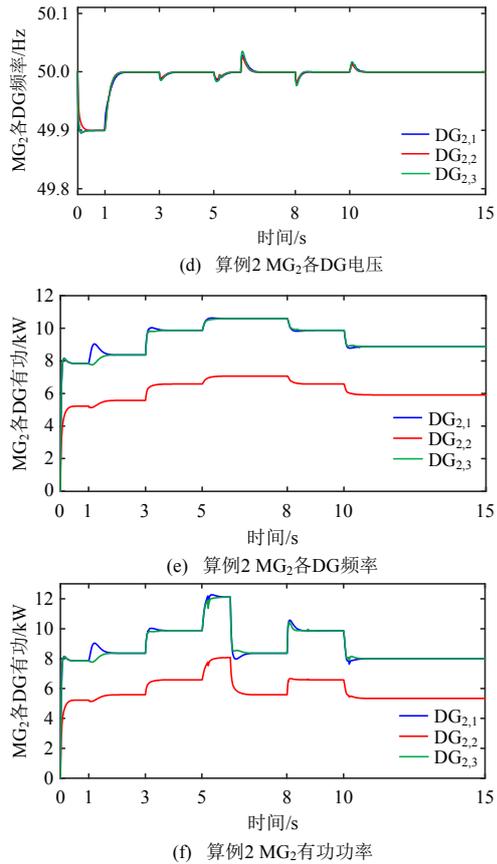


图 A1 算例 1 和算例 2 负载变化下 MG₂ 单元系统响应

Fig. A1 MG₂ unit responses of Case 1&2 under load variations



孟潇潇

在线出版日期: 2022-10-21。

收稿日期: 2022-05-30。

作者简介:

孟潇潇(1992), 男, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为微电网、电力系统运行与控制等, mxxfreedom@hfut.edu.cn;

邵冰冰(1995), 男, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为新能源发电系统等值建模, shaobingbing1223@163.com;

韩平平(1982), 女, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析与运行, lh021211@163.com;

*通信作者: 华玉婷(1989), 女, 工学博士, 助理研究员, 主要研究方向为电力系统可靠性, huayuting@ie.ah.cn。

(责任编辑 邱丽萍)