

DOI:10.11784/tdxbz202404009

构网型单元异常下的孤岛交直流混合微电网群 分布式协同控制策略

贾宏杰¹, 张育炜¹, 肖 迁^{1,2}, 穆云飞¹, 金 昱¹, 陆文标¹

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;

2. 新型电力系统运行与控制全国重点实验室(清华大学), 北京 100084)

摘要: 当构网型单元处于限功率运行与故障等工况下, 传统孤岛交直流混合微电网群分布式协同控制方法易造成交流子微网母线电压与频率失去支撑, 进而导致系统失稳. 为解决上述问题, 本文提出了一种面向构网型单元限功率运行与故障工况的孤岛交直流混合微电网群分布式协同控制策略. 当子微网构网型单元处于限功率运行或故障工况时, 首先, 在构网型单元异常子微网逆变器控制层, 构网型单元将输出功率钳位于最大值或退出运行, 跟网型单元通过与互联变换器进行二次协同控制, 实现功率的合理分配; 其次, 在网间互联变换器控制层, 与构网型单元异常子微网相连的互联变换器转为构网型控制模式, 为构网型单元异常子微网提供母线电压与频率支撑, 其余互联变换器按照正常子微网自身剩余容量分担构网型单元异常子微网所需的支撑功率. 多工况下的仿真结果表明, 当负荷连续增加, 构网型单元处于限功率运行工况时, 所提分布式协同控制策略可通过网间互联变换器的变模式运行, 实现构网型单元异常子微网交流母线电压与频率的快速恢复、跟网型单元输出功率的精准分配; 当构网型单元处于故障工况时, 所提分布式协同控制策略可以有效解决构网型单元异常子微网因交流母线电压与频率失去支撑导致的失稳问题.

关键词: 孤岛交直流混合微电网群; 分布式协同控制; 构网型单元; 异常运行工况; 电压与频率支撑; 功率分配

中图分类号: TM71

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)03-0221-16

Distributed Coordination Control Strategy for Islanded AC/DC Hybrid Microgrid Clusters Under Abnormal Conditions of Grid-Forming Units

Jia Hongjie¹, Zhang Yuwei¹, Xiao Qian^{1,2}, Mu Yunfei¹, Jin Yu¹, Lu Wenbiao¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Key Laboratory of Power System Operation and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Under abnormal operating conditions such as limited power operation and faults of grid-forming units, the traditional distributed coordination control method of islanded AC/DC hybrid microgrid clusters is prone to losing support for AC bus voltage and frequency, resulting in system instability. To tackle this issue, a distributed coordination control strategy for islanded AC/DC hybrid microgrid clusters under such conditions is proposed here-in. When the grid-forming units of an AC microgrid operate under limited power or faulty condition, in the abnormal grid-forming units microgrid converters control layer, the output power of grid-forming units is limited or they exit operation. The secondary coordination control is then applied to control the grid-following units and their interlinking con-

收稿日期: 2024-04-10; 修回日期: 2024-05-21.

作者简介: 贾宏杰(1973—), 男, 博士, 教授, hjia@tju.edu.cn.

通信作者: 肖 迁, xiaoqian@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52107121, 52222704, U2066213); 新型电力系统运行与控制全国重点实验室开放基金课题重点资助项目(SKLD23KZ04); 中国博士后科学基金资助项目(2023TQ0242); 天津市企业科技特派员资助项目(23YDTPJC00090).

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52107121, No. 52222704, No. U2066213), the State Key Laboratory of Power System Operation and Control(No. SKLD23KZ04), the China Postdoctoral Science Foundation(No. 2023TQ0242), the Tianjin Enterprise Science and Technology Commissioner Project(No. 23YDTPJC00090).

verter to ensure reasonable power allocation. In the interlinking converters control layer, the interlinking converter connected to the abnormal grid-forming units microgrid switches to a grid-forming control mode, providing necessary bus voltage and frequency support to this microgrid. The other interlinking converters share power supply with abnormal microgrid according to the remaining capacity of normal microgrids. Simulation results under various scenarios indicate that when there is an increased load and grid-forming units operate under limited power condition, the proposed distributed coordination control strategy enables fast recovery of AC bus voltage and frequency in the abnormal microgrid and ensures precise power allocation among grid-following units through the variable mode operation of interlinking converters. Furthermore, when grid-forming units fail, the proposed strategy can effectively solve the instability problem of abnormal microgrid caused by the loss of support from AC bus voltage and frequency.

Keywords: islanded AC/DC hybrid microgrid cluster; distributed coordination control; grid-forming unit; abnormal operating condition; voltage and frequency support; power allocation

随着环境污染的日益加剧以及能源需求的不断增加,以太阳能、风能为主的分布式电源(distributed generator, DG)得到了快速发展^[1]. 分布式电源虽然可以有效改善传统发电方式产生的环境污染问题,但也给配电网的稳定运行带来严峻挑战^[2]. 微电网作为集成新能源、储能装置、负荷的小型电网,已成为分布式电源并网的有效途径,被广泛应用于新型电力系统中^[3]. 然而,单一微电网因具有容量小、抗扰动能力差等缺陷^[4],难以满足高比例分布式电源消纳与用户的多样化需求. 将地理临近的多个交、直流微电网通过电力电子设备互联,形成交直流混合微电网群,可提升系统供电能力与运行可靠性,已成为未来电网的重要发展趋势^[5].

交直流混合微电网群具有并网与孤岛两种运行模式,特别地,在孤岛模式下,由于缺乏大电网提供的惯性,需要配置用于建立母线电压的控制单元. 构网型单元(grid-forming units, GFM)作为一种提供电压支撑的可行方案^[6],近年来广泛应用于孤岛系统中^[7]. GFM 的控制本质为电压源控制模式(voltage control mode, VCM),可通过调整自身输出功率为系统提供电压与频率支撑.

目前,已有较多学者针对含 GFM 的微电网群运行控制方法开展了相关研究. 现有微电网群中各子微网的 GFM 均采用下垂控制,下垂控制作为分散式控制中较为常用的方法,可在无通信条件下,根据各 DG 单元的容量对其功率进行分配^[8-10]. 文献[9]提出了一种适用于交直流混合微电网的功率控制策略,实现了系统的功率平衡与自主分配. 文献[10]将上述策略拓展至交直流混合微电网群,实现多子微网之间功率的互补互济. 上述策略虽然可以有效优化子微网间的功率分配过程,但下垂控制会引起系统频率与电压产生相对于额定值的偏差.

相较于传统集中式控制与分散式控制,分布式控

制仅依靠稀疏通信网络即可实现上述控制目标^[11-20],具有较高的经济性、灵活性与可靠性^[21]. 文献[11]提出了一种基于一致性算法的交流微电网分布式分层控制策略,实现电压的稳定运行与功率的灵活分配. 文献[12]为解决直流微电网中产生的负载均流不合理、母线电压不稳定等问题,提出了一种分层协同控制策略,有效提升电流分配精度. 文献[13]针对交直流混合微电网中的网间互联变换器(interlinking converter, IC),提出了一种分布式控制方法,通过引入功率参考估计器,实现网间传输功率信息在多 ICs 间的共享. 文献[14]提出了一种基于动态平均一致性算法的交直流混合微电网分布式协同控制策略,通过引入平均功率观测器,实现系统内多 ICs 间功率的合理分配. 文献[15]在此基础上提出了一种基于事件触发改进一致性算法的混合微电网分布式控制策略,在实现多 ICs 功率合理共享的同时,有效降低了单元间的通信次数. 文献[16]针对含多储能系统的交直流混合微电网,提出了一种灵活、可扩展的分布式控制框架,实现多子微网内储能系统的荷电状态均衡与功率合理分配. 文献[17]进一步考虑了系统的经济调度问题,在小时间尺度内提升了子微网内与子微网间的运行经济性. 文献[18]提出了一种改进一致性算法,有效解决现有分布式控制方法通信结构复杂、二次控制参数难以整定的问题. 文献[19]将基于一致性算法的分布式控制方法应用于微电网群中,互联变换器通过传递本地子微网的功率偏差信息,实现负荷功率在各子微网 GFM 间的精准分配. 文献[20]进一步引入 DGs 发电成本二次调整项,实现微电网群的分布式经济控制. 然而,上述方法仅适用于系统正常运行工况,当微电网群中的某子微网 GFM 处于限功率运行或故障工况时,其母线将失去电压与频率支撑,进而影响系统的稳定运行.

为解决上述问题,本文提出一种构网型单元限功

率运行与故障工况下的孤岛交直流混合微电网群的分布式协同控制策略. 当某子微网构网型单元处于限功率运行或故障工况时, 首先, 在构网型单元异常子微网变换器控制层, 构网型单元将输出功率钳位在极限值或退出运行, 跟网型单元 (grid-following units, GFLs) 与所连 IC 共同进行功率的合理分配; 其次, 在网间互联变换器控制层, 与异常子微网相连的互联变换器调整为构网模式运行, 支撑其母线电压与频率; 其余互联变换器控制正常子微网, 按自身剩余容量分配异常子微网产生的功率缺额, 保证孤岛交直流混合微电网群的安全稳定运行. 最后, 通过多工况下的仿真算例分析验证所提孤岛交直流混合微电网群分布式协同控制策略的有效性.

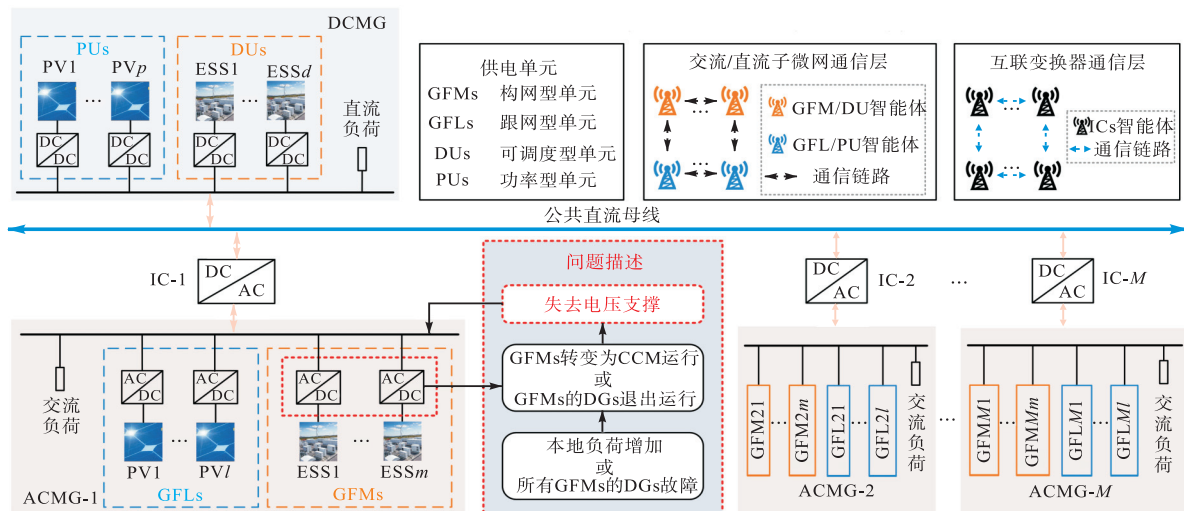


图1 孤岛交直流混合微电网群拓扑

Fig.1 Topology of islanded AC/DC hybrid microgrid cluster

在孤岛交直流混合微电网群中, ACMG 内包含构网型单元与跟网型单元两类 DG. 其中, 以储能为主的构网型单元一般通过下垂控制参与系统的功率调节, 为子微网母线提供电压与频率支撑; 以光伏、储能为主的跟网型单元亦可采用下垂控制, 通过调整自身功率响应母线电压变化. 与 ACMG 类似, DCMG 内包含可调度型单元 (dispatchable units, DUs)^[22]与功率型单元 (power units, PUs)^[10], 其中 DUs 采用下垂控制支撑公共直流母线电压, PUs 通过采集电压信息, 调整自身功率, 参与系统调节.

交直流混合微电网群内各单元之间的通信网络由子微网通信层与互联变换器通信层构成. 子微网通信层中的各智能体与各 DG 一一对应, 互联变换器通信层中的各智能体与各 IC 一一对应. 当本地负荷较轻时, 子微网通信层的智能体通过交换信息, 实现 GFLs 与 GFLs 间、DUs 与 PUs 间的协调控制; 当某子微网的 GFLs 处于限功率运行与故障工况时, 互

1 交直流混合微电网群拓扑结构

本节首先给出孤岛交直流混合微电网群的典型拓扑结构, 其次介绍微电网群构网型单元限功率运行与故障工况, 最后对现有控制方法存在的问题进行归纳.

1.1 微电网群拓扑结构

本文研究的孤岛交直流混合微电网群拓扑如图1所示, 它由交流子微网 (ACMGs)、直流子微网 (DCMG) 与网间互联变换器 (ICs) 构成, 各 ACMG 通过 ICs 与 DCMG 的直流母线相连 (后文将其命名为公共直流母线).

联变换器通信层的智能体通过交换信息, 判断各子微网当前运行状态, 既可以实现功率缺额在子微网之间的精准、稳定分配, 也保证了子微网具备一定的自治能力.

1.2 构网型单元异常运行工况定义

本文考虑构网型单元限功率运行与因故障退出运行两种场景, 并将其称为构网型单元异常运行工况 (abnormal operating condition, AOC):

(1) 当子微网的本地负荷增加, 进而导致构网型单元输出功率超出其最大值时, GFLs 将转变为电流源控制模式 (current control mode, CCM) 运行^[23], 输出功率被限制为其最大值, 已不具备构网功能, 此时孤岛系统下的交流母线电压将失去支撑 (后文将该情况称为 AOC-1);

(2) 当子微网内构网型单元的 DGs 因故障等原因退出运行时, 该子微网内仅含跟网型单元与负荷, 亦将失去交流母线电压支撑 (后文将该情况称为

AOC-2).

1.3 现有方法存在的问题

尽管现有孤岛交直流混合微电网群分布式控制方法具备良好的控制效果,但仍存在如下两个主要问题:

(1) 在现有分布式控制方法中,子微网之间始终存在功率交互.当某子微网的本地负荷发生变化时,系统内的所有子微网将在一致性算法的作用下更新自身运行状态,微电网的自治性将无法保证;

(2) 在现有分布式控制方法中,IC 通常处于功率调节模式,其控制本质为 CCM,可视为跟网型单元.当其本地子微网处于 AOC 时,IC 并不具备稳定的构网功能,因此该子微网母线将失去电压与频率支撑,进而影响微电网群的稳定运行.

2 基本原理

图 1 为交直流混合微电网群的典型拓扑结构.图中,微电网群内包含 M 个交流子微网,第 k 个交流子微网 $ACMG-k, k \in N_{MG} = \{1, 2, \dots, M\}$ 内包含 km 个构网型单元与 kl 个跟网型单元 ($m, l \in \mathbf{R}$), $km, kl \in N_{DG}^{ac} = \{1, 2, \dots, km, km+1, \dots, km+kl\}$; M 个交流子微网对应 M 个 IC,各交流子微网通过所连 IC 进行功率交互,系统中还包含一个直流子微网,其公共直流母线实现多交流子微网的耦合.直流子微网内含 d 个可调度型单元与 p 个功率型单元, $d, p \in N_{DG}^{dc} = \{1, 2, \dots, d, d+1, \dots, d+p\}$.

2.1 子微网下垂控制

2.1.1 交流子微网下垂控制

交流子微网内构网型单元与跟网型单元的下垂控制表达式分别为

$$\begin{cases} f_{ki} = f_{ki}^* - k_{ki}^{ac} P_{ki}^{ac} \\ P_{kj}^{ac} = (f_{kj}^* - f_{kj}) / k_{kj}^{ac} \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_{ki} 与 f_{ki}^* 分别为 $ACMG-k$ 内第 ki 个构网型单元 GFM- ki 的频率及其额定值; P_{ki}^{ac} 为 GFM- ki 的输出有功功率; k_{ki}^{ac} 为 GFM- ki 的下垂系数; f_{kj} 与 f_{kj}^* 分别为第 kj 个跟网型单元 GFL- kj 采集的频率及其额定值, $ki, kj \in N_{DG}^{ac}$; P_{kj}^{ac} 为 GFL- kj 的输出有功功率; k_{kj}^{ac} 为 GFL- kj 的下垂系数.

2.1.2 直流子微网下垂控制

直流子微网内可调度型单元与功率型单元的下垂控制表达式分别为

$$\begin{cases} u_{dc} = u_{dc}^* - k_i^{dc} P_i^{dc} \\ P_j^{dc} = (u_{dc}^* - u_{dc}) / k_j^{dc} \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_{dc} 与 u_{dc}^* 分别为公共直流母线电压及其额定

值; P_i^{dc} 为第 i 个可调度型单元 DU- i 的输出有功功率; k_i^{dc} 为 DU- i 的下垂系数; P_j^{dc} 为第 j 个功率型单元 PU- j 的输出有功功率, $i, j \in N_{DG}^{dc}$; k_j^{dc} 为 PU- j 的下垂系数.上述下垂控制中的频率、电压与功率均为标么值,其基准值将在仿真部分中进行说明.

2.2 一致性算法原理

2.2.1 图论

本文考虑一个无向图 $G=(V,E)$,其中 $V=\{1, 2, \dots, N\}$ 为节点集, $E=V \times V$ 为两节点间的边集.第 i 个节点的相邻节点集为 $N_i = \{j \in V: (i, j) \in E\}$,邻接矩阵 A 一般表示节点间的通信权重,当 $j \in N_i$ 时,邻接矩阵元素 $a_{ij} = a_{ji} = 1$; 否则, $a_{ij} = a_{ji} = 0$. 无向图 G 的 Laplacian 矩阵可定义为 $D-A$,其中矩阵 D 为 G 的度矩阵,可定义为 $D = \text{diag}\{d_i\}$, $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$.

2.2.2 一致性框架

在基于“领导者-跟随者”的一致性 (leader-follower consensus, LFC) 框架中,一些智能体被看作领导者,在遵循一致性协议的同时,实现额外的控制目标;其余智能体可看作跟随者,仅遵循一致性协议^[24].

本文假设节点集 V 内的前 nl 个智能体为领导者,后 $N-nl$ 个智能体为跟随者.这样可将节点集分为领导者节点集 $V_l = \{1, 2, \dots, nl\}$ 与跟随者节点集 $V_f = \{nl+1, \dots, N\}$ 两类.由此可以制定跟随者的一致性协议为

$$u_i = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i - x_j) \quad i \in V_f \quad (3)$$

式中: u_i 为节点 i 的控制输入; x_i 为节点 i 的状态量.领导者的一致性协议是在式 (3) 的基础上,引入一个既定的外部输入,可表示为

$$u_i = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i - x_j) + \varepsilon_i \quad i \in V_l \quad (4)$$

式中 ε_i 为既定的外部输入,它可以引导系统内的所有智能体以一个既定的方式达成一致性协议.

3 孤岛交直流混合微电网群分布式协同控制策略

本节首先介绍交直流混合微电网群的控制目标,其次构建考虑构网型单元限功率运行与故障工况的分层分布式协同控制架构,最后提出了一种孤岛交直流混合微电网群的分布式协同控制策略.

3.1 交直流混合微电网群的控制目标

3.1.1 交流子微网控制目标

(1) 使交流子微网频率恢复至其额定值,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (f_k - f_k^*) = 0 \quad (5)$$

式中 f_k 与 f_k^* 分别为 ACMG- k 的交流频率及其额定值。

(2) 使交流子微网内构网型单元与跟网型单元按比例分配有功功率, 即

$$k_{k1}^{\text{ac}} P_{k1}^{\text{ac}} = \dots = k_{km}^{\text{ac}} P_{km}^{\text{ac}} = k_{km+1}^{\text{ac}} P_{km+1}^{\text{ac}} = \dots = k_{km+kl}^{\text{ac}} P_{km+kl}^{\text{ac}} \quad (6)$$

式中: P_{km}^{ac} 与 k_{km}^{ac} 分别为 ACMG- k 内第 km 个构网型单元的输出功率与下垂系数; P_{km+kl}^{ac} 与 k_{km+kl}^{ac} 分别为 ACMG- k 内第 $km+kl$ 个跟网型单元的输出功率与下垂系数。

3.1.2 直流子微网控制目标

(1) 使直流母线电压恢复至其额定值, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (u_{\text{dc}} - u_{\text{dc}}^*) = 0 \quad (7)$$

(2) 使直流子微网内可调度型单元与功率型单元按比例分配输出功率, 即

$$k_1^{\text{dc}} P_1^{\text{dc}} = \dots = k_d^{\text{dc}} P_d^{\text{dc}} = k_{d+1}^{\text{dc}} P_{d+1}^{\text{dc}} = \dots = k_{d+p}^{\text{dc}} P_{d+p}^{\text{dc}} \quad (8)$$

式中: P_d^{dc} 与 k_d^{dc} 分别为 DCMG 内第 d 个可调度型单元的输出功率与下垂系数; P_{d+p}^{dc} 与 k_{d+p}^{dc} 分别为 DCMG 内第 $d+p$ 个功率型单元的输出功率与下垂系数。

3.1.3 互联变换器控制目标

(1) 本地负荷较轻时, 保证子微网的自治能力, 即

$$P_k^{\text{ICref}} = 0 \quad (9)$$

式中 P_k^{ICref} 为第 k 个 IC 传输功率参考值, 这里将其设置为“0”, 避免子微网间不必要的功率交互, 保证子微网具备一定的自治能力。

(2) 某交流子微网处于构网型单元异常运行工况时(后文将其命名为构网型单元异常子微网, 即 AOC-ACMG), 与其相连的互联变换器通过其余子微网, 为 AOC-ACMG 提供构网支撑。

(3) 某交流子微网处于 AOC 时, 未与其相连的互联变换器实现 AOC-ACMG 产生的功率缺额由其余子微网按自身剩余容量进行分配, 即

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{P_1}{P_1^{\text{ava}}} = \dots = \frac{P_k}{P_k^{\text{ava}}} = \dots = \frac{P_{k_{\text{AOC}}-1}}{P_{k_{\text{AOC}}-1}^{\text{ava}}} = \\ \frac{P_{k_{\text{AOC}}+1}}{P_{k_{\text{AOC}}+1}^{\text{ava}}} = \dots = \frac{P_M}{P_M^{\text{ava}}} = \frac{\sum_{i=1}^{d+p} P_i^{\text{dc}} - P_{\text{Load}}^{\text{dc}}}{P_{\text{dc}}^{\text{ava}}} \\ P_k^{\text{ava}} = \sum_{ki=1}^{km+kl} P_{ki}^{\text{acmax}} - P_{\text{Load}}^{\text{ac}} \\ P_{\text{dc}}^{\text{ava}} = \sum_{i=1}^{d+p} P_i^{\text{dcmax}} - P_{\text{Load}}^{\text{dc}} \end{array} \right. \quad (10)$$

式中: P_k 与 P_M 分别为 ACMG- k 与 ACMG- M 通过互联变换器 IC- k 与 IC- M 传递的互助功率; P_i^{dc} 为 DCMG 内第 i 个 DG 的输出功率; P_k^{ava} 、 P_M^{ava} 与 $P_{\text{dc}}^{\text{ava}}$ 分别为 ACMG- k 、ACMG- M 与 DCMG 的剩余容量; k_{AOC} 为 AOC-ACMG 的子微网序号; P_{ki}^{acmax} 与 P_i^{dcmax} 分别为 ACMG- k 第 ki 个 DG 和 DCMG 内第 i 个 DG 的最大输出有功功率; $P_{\text{Load}}^{\text{ac}}$ 与 $P_{\text{Load}}^{\text{dc}}$ 分别为 ACMG- k 与 DCMG 的本地负荷。

3.2 交直流混合微电网群分层分布式协同控制架构

本文所提交直流混合微电网群分层分布式协同控制架构如图 2 所示, 该控制架构由子微网变换器控制层与网间互联变换器控制层两部分构成, 共同保证微电网群在正常运行工况与异常运行工况下的稳定运行。

(1) 在子微网变换器控制层中, 当系统处于正常运行工况时, 交流子微网与直流子微网通过前述 LFC 框架控制各 DG, 以实现第 3.1.1 节与第 3.1.2 节的控制目标。当系统处于 AOC 时, AOC-ACMG 的构网型单元因本地负荷增加运行于最大功率模式, 或因 DGs 故障等原因退出运行。此时跟网型单元需与所连 IC 进行二次协同控制, 配合实现第 3.1.3 节的控制目标(2)。系统控制模式切换模块根据交流子微网内当前负荷量、电源输出功率以及电源退出运行信号, 判定微电网群运行工况。

(2) 在网间互联变换器控制层中, 当系统处于正常运行工况时, 各 IC 传输功率参考值设置为“0”, 以实现第 3.1.3 节的控制目标(1)。当系统处于 AOC 时, 与 AOC-ACMG 相连的 IC 转换为构网模式以实现第 3.1.3 节的控制目标(2), 同时通过与子微网内的 GFLs 进行二次协同控制, 配合实现第 3.1.1 节的控制目标(2); 其余 ICs 通过协调子微网间的传输功率以实现第 3.1.3 节的控制目标(3)。系统控制模式切换模块用于判定 ICs 是否进行子微网间的功率传递。

3.3 孤岛交直流混合微电网群分布式协同控制策略

本节首先介绍子微网内变换器的分布式协同控制, 其次介绍网间互联变换器分布式协同控制, 最后给出系统控制模式的切换逻辑。

3.3.1 子微网变换器分布式协同控制

子微网变换器分布式协同控制由交流子微网分布式协同控制与直流子微网分布式协同控制两部分构成。

1) 交流子微网分布式协同控制

本文所提交流子微网分布式协同控制框图如图 3 所示。

(1) 系统处于正常运行工况: 利用本控制, 可以

实现第 3.1.1 节的控制目标. 基于 LFC 框架, 本文将 GFM 视为领导者, GFL 视为跟随者, 设计了构网-跟网型单元分布式协同控制策略. 该策略能够将交流子微网频率恢复至额定值, 并实现构网-跟网型单元按比例分配输出功率.

其中, 构网型单元控制表达式为

$$f_{ki}^{ref} = f_{ki}^* - k_{ki}^{ac} P_{ki}^{ac} + \lambda_{ki}^{ac} \quad (11)$$

$$\begin{cases} e_{ki}^{GFM} = -(f_{ki} - f_{ki}^*) - \\ c_{ki}^{ac} \sum_{kj \in N_{ki}} a_{kikj} (k_{ki}^{ac} P_{ki}^{ac} - k_{kj}^{ac} P_{kj}^{ac}) \\ \lambda_{ki}^{ac} = e_{ki}^{GFM} G_{ki}^{GFM}(s) \end{cases} \quad (12)$$

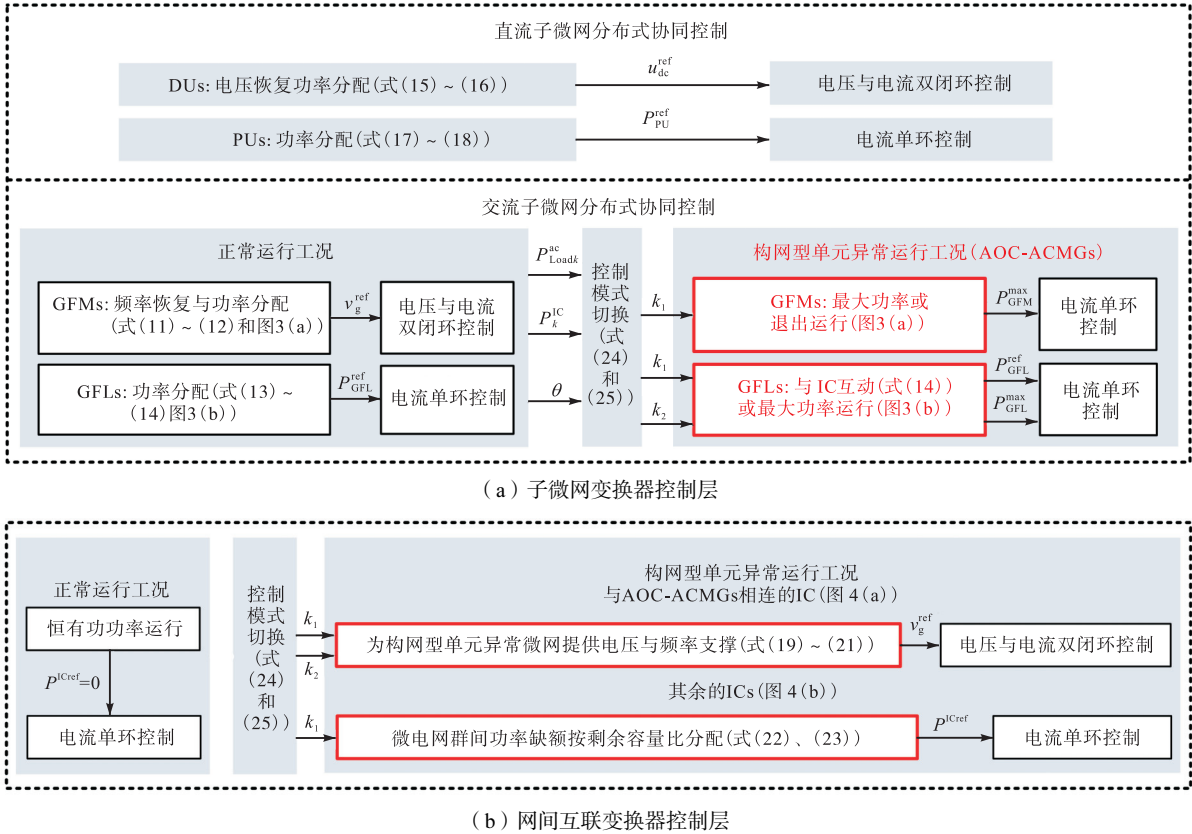


图 2 交直流混合微电网群分层分布式协同控制架构

Fig.2 Hierarchical distributed coordination control structure for AC/DC hybrid microgrid clusters

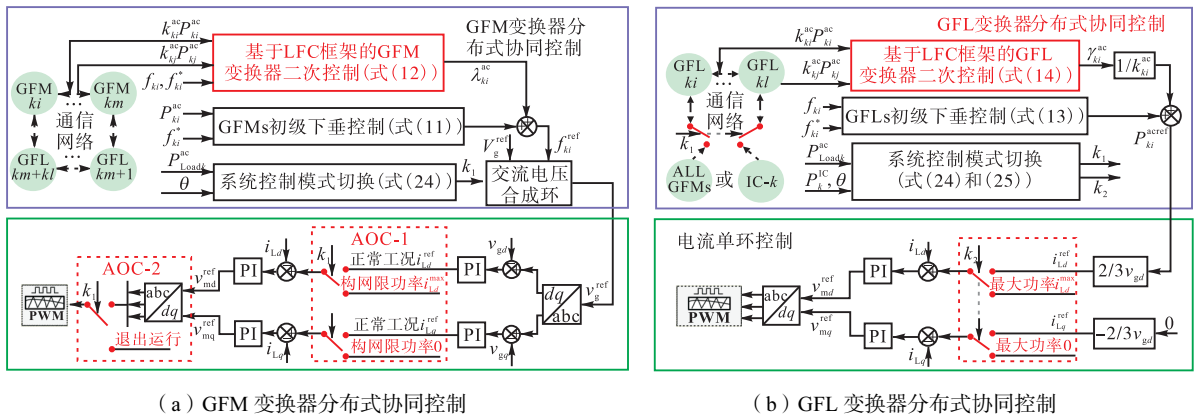


图 3 子微网变换器分布式协同控制层: 交流子微网分布式协同控制框图

Fig.3 Distributed coordination control layer of a microgrid converters: distributed coordination control diagram for ACMGs

式中: f_{ki}^{ref} 为构网型单元 GFM- ki 的输出频率参考值; λ_{ki}^{ac} 为 GFM- ki 的二次控制量; a_{kikj} 为 DG 间通信权重; e_{ki}^{GFM} 为 GFM- ki 的一致性控制输入; $k_{kj}^{ac} P_{kj}^{ac}$ 为相邻节点传递的信息; c_{ki}^{ac} 为增益; $G_{ki}^{GFM}(s)$ 为构网型单

元 GFM- ki 的 PI 控制器传递函数; N_{ki} 为节点 ki 的相邻节点集.

跟网型单元控制表达式为

$$P_{ki}^{acref} = (f_{ki}^* - f_{ki} + \gamma_{ki}^{ac}) / k_{ki}^{ac} \quad (13)$$

式中： P_{ki}^{acref} 为跟网型单元 GFL- ki 的输出功率参考值； γ_{ki}^{ac} 为其二次控制量。

$$\begin{cases} e_{ki}^{\text{GFL}} = -c_{ki}^{\text{ac}} \sum_{kj \in N_{ki}} a_{kikj} (k_{ki}^{\text{ac}} P_{ki}^{\text{ac}} - k_{kj}^{\text{ac}} P_{kj}^{\text{ac}}) \\ \gamma_{ki}^{\text{ac}} = e_{ki}^{\text{GFL}} G_{ki}^{\text{GFL}}(s) \end{cases} \quad (14)$$

式中： e_{ki}^{GFL} 为 GFL- ki 的一致性控制输入； $G_{ki}^{\text{GFL}}(s)$ 为跟网型单元 GFL- ki 的 PI 控制器传递函数。

(2) 系统处于 AOC: AOC-ACMG 内的 GFM 因 AOC-1 导致转变为 CCM 运行, 处于最大功率运行模式; 或因 AOC-2 而退出运行. 此时 AOC-ACMG 失去电压与频率支撑, GFLs 需与其相连的 IC 进行功率互动, 以实现第 3.1.1 节的控制目标(2). 此时, 式(14)中的相邻节点集将包含与 GFL- ki 相连的 IC 节点.

2) 直流子微网分布式协同控制

与交流子微网类似, LFC 框架亦可用于 DCMG 内 DUs 与 PUs 的分布式协同控制, 实现公共直流母线电压的调节与 DGs 功率的精准分配.

其中, DUs 的控制表达式为

$$u_{\text{dci}}^{\text{ref}} = u_{\text{dc}}^* - k_i^{\text{dc}} P_i^{\text{dc}} + \lambda_i^{\text{dc}} \quad (15)$$

式中： $u_{\text{dci}}^{\text{ref}}$ 为可调度型单元 DU- i 的输出电压参考值； λ_i^{dc} 为其二次控制量。

$$\begin{cases} e_i^{\text{DU}} = -(u_{\text{dci}} - u_{\text{dc}}^*) - \\ c_i^{\text{dc}} \sum_{j \in N_i} a_{ij} (k_i^{\text{dc}} P_i^{\text{dc}} - k_j^{\text{dc}} P_j^{\text{dc}}) \\ \lambda_i^{\text{dc}} = e_i^{\text{DU}} G_i^{\text{DU}}(s) \end{cases} \quad (16)$$

式中： e_i^{DU} 为 DU- i 的一致性控制输入； $k_j^{\text{dc}} P_j^{\text{dc}}$ 为相邻节点传递的信息； c_i^{dc} 为增益； $G_i^{\text{DU}}(s)$ 为 DU- i 的 PI 控制器传递函数。

PU 的控制表达式为

$$P_i^{\text{dcref}} = (u_{\text{dc}}^* - u_{\text{dci}} + \gamma_i^{\text{dc}}) / k_i^{\text{dc}} \quad (17)$$

式中： P_i^{dcref} 为功率型单元 PU- i 的输出功率参考值； γ_i^{dc} 为其二次控制量。

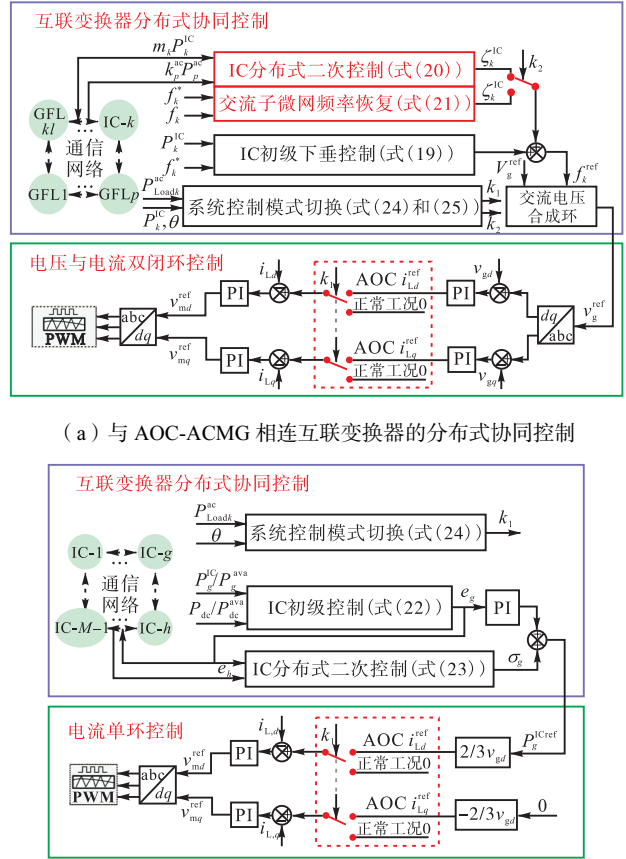
$$\begin{cases} e_i^{\text{PU}} = -c_i^{\text{dc}} \sum_{j \in N_i} a_{ij} (k_i^{\text{dc}} P_i^{\text{dc}} - k_j^{\text{dc}} P_j^{\text{dc}}) \\ \gamma_i^{\text{dc}} = e_i^{\text{PU}} G_i^{\text{PU}}(s) \end{cases} \quad (18)$$

式中： P_i^{dcref} 为功率型单元 PU- i 的输出功率参考值； e_i^{PU} 为 PU- i 的一致性控制输入； $G_i^{\text{PU}}(s)$ 为 PU- i 的 PI 控制器的传递函数。

3.3.2 网间互联变换器分布式协同控制

网间互联变换器分布式协同控制包含系统正常运行工况控制与系统构网型单元异常运行工况控制两部分。

本文所提网间互联变换器分布式协同控制框图如图 4 所示。



(a) 与 AOC-ACMG 相连互联变换器的分布式协同控制

(b) 未与 AOC-ACMG 相连互联变换器的分布式协同控制

图 4 网间互联变换器分布式协同控制层: 互联变换器分布式协同控制框图

Fig.4 Distributed coordination control layer of ICs : distributed coordination control diagram of ICs

1) 系统正常运行工况控制

本文所提系统正常运行工况指的是: 无 GFM 处于 AOC, 各子微网有足够的容量满足本地负荷. 为了保证微电网具备一定的自治能力以实现第 3.1.3 节的控制目标(1), 此时将 IC 传输功率参考值设置为“0”。

2) 系统构网型单元异常运行工况控制

(1) 与 AOC-ACMG 相连的 IC 控制策略: 当交流子微网处于 AOC 时, 其余子微网将通过与其相连的 IC- k 为该子微网提供电压支撑. IC- k 通过调动其余子微网的传递功率满足 AOC-ACMG 的功率缺额, 以实现第 3.1.3 节的控制目标(2), 控制策略可表示为

$$f_k^{\text{ref}} = f_k^* - m_k P_k^{\text{IC}} + \xi_k^{\text{IC}} \quad (19)$$

式中： f_k^{ref} 为 IC- k 输出频率参考值； P_k^{IC} 为 IC- k 传输功率； m_k 为 IC- k 的下垂系数； ξ_k^{IC} 为其二次控制量。

$$\begin{cases} e_k^{\text{IC}} = -(f_k - f_k^*) - \\ c_k^{\text{IC}} \sum_{p \in N_k} a_{kp} (m_k P_k^{\text{IC}} - k_p^{\text{ac}} P_p^{\text{ac}}) \\ \xi_k^{\text{IC}} = e_k^{\text{IC}} G_k^{\text{IC}}(s) \end{cases} \quad (20)$$

式中: a_{kp} 为通信权重; e_k^{IC} 为 IC- k 的一致性控制输入; $k_p^{ac} P_p^{ac}$ 为相邻节点传递的信息; c_k^{IC} 为增益; $G_k^{IC}(s)$ 为 IC- k 的 PI 控制器传递函数; \mathcal{N}_k 为 IC- k 的相邻节点集, 其元素为 AOC-ACMG 中与其建立通信链路的 GFLs.

此外, 若系统处于 AOC-1, 基于上述运行状态, 当 AOC-ACMG 本地负荷继续增加导致 GFLs 输出功率超出其最大值时, GFLs 停止与 IC- k 的功率互动, 转为最大功率运行模式. 此时 IC- k 的二次控制仅实现频率恢复的功能, 表达式为

$$\begin{cases} e_k^{IC} = -(f_k - f_k^*) \\ \zeta_k^{IC} = e_k^{IC} G_k^{IC}(s) \end{cases} \quad (21)$$

最后, IC- k 的控制框图如图 4(a) 所示.

(2) 未与 AOC-ACMG 相连的 IC 控制策略: 其余 ICs 根据与其相连的交流子微网与直流子微网的剩余容量满足 AOC-ACMG 的功率缺额, 以实现第 3.1.3 节的控制目标(3), 表达式为

$$\begin{cases} e_g = \frac{P_g^{IC}}{P_g^{ava}} - \frac{\sum_{i=1}^{d+p} P_i^{dc} - P_{Load}^{dc}}{P_{dc}^{ava}} \\ P_g^{ICref} = e_g G_g^{IC}(s) \end{cases} \quad (22)$$

式中: P_g^{IC} 与 P_g^{ICref} 分别为 IC- g 的传输功率及其参考值; P_g^{ava} 为 ACMG- g 的剩余容量; e_g 为 IC- g 的功率不平衡量; $G_g^{IC}(s)$ 为 PI 控制器传递函数. 在本文研究的系统中, 各交流子微网只能通过与其相连的 IC 进行网间功率传递, 因此可认为式(10)中提及的交流子微网互助功率即为 IC 的传输功率.

由式(22)可知, 上述控制策略仅考虑了 IC 的本地信息, 易引发不同 IC 对同一子微网功率的争抢, 进而引起子微网内的功率波动, 影响系统的稳定运行. 为解决该问题, 设计了 IC 的二次控制方法, 表达式为

$$\begin{cases} \sigma_g = \left[c_g^{IC} \sum_{h \in \mathcal{N}_g} a_{gh} (e_g - e_h) \right] G_{\sigma_g}^{IC}(s) \\ P_g^{ICref} = e_g G_g^{IC}(s) + \sigma_g \end{cases} \quad (23)$$

式中: σ_g 为 IC- g 的二次控制量; a_{gh} 为 ICs 间的通信权重; e_h 为相邻节点信息; \mathcal{N}_g 为 IC- g 的相邻节点集, 其元素为未与 AOC-ACMG 相连的 ICs 中, 与其建立通信链路的 ICs; c_g^{IC} 为增益; $G_{\sigma_g}^{IC}(s)$ 为二次控制的 PI 控制器传递函数. 最后, 未与 AOC-ACMG 相连互联变换器的控制框图如图 4(b) 所示.

3.3.3 系统控制模式切换

由图 2 可知, 微电网群内各单元工作模式均包含

“系统正常运行工况”与“系统构网型单元异常运行工况”两类. 因此图 1 中的各智能体需根据各交流子微网本地负荷量、DGs 运行状态等信息, 对 GFLs、GFLs 以及 ICs 的控制策略与通信拓扑进行选择, 以实现第 3.1 节的控制目标.

不失一般性, 本文假设 ACMG- k 的 GFLs 因 AOC-1 或 AOC-2 而导致系统处于构网型单元异常运行工况, 系统运行工况的判定条件为

$$k_1: \sum_{ki=1}^{km+kl} P_{ki}^{acmax} < P_{Loadk}^{ac} \text{ 或 } \theta=1 \quad (24)$$

式中: $\sum_{ki=1}^{km+kl} P_{ki}^{acmax}$ 为 ACMG- k 内 DGs 的最大输出功率之和; θ 为 GFLs 的退出运行信号, 当其为“1”时, 说明 GFLs 退出运行; 反之则没有退出运行. 式(24)表达的含义为: 当本地负荷高于 ACMG- k 内所有 DG 的最大值(此时 GFLs 应限功率运行)或 GFLs 因故障而退出运行时, 系统处于“构网型单元异常运行工况”, 式(24)成立, k_1 为“1”; 反之, 则式(24)不成立, k_1 为“0”, 此时各交流子微网未发生 AOC, 系统处于“正常运行工况”.

当 ACMG- k 处于 AOC 时, GFLs 将与 IC- k 进行功率互动, 实现第 3.1.1 节的控制目标(2)与第 3.1.3 节的控制目标(2). 随着本地负荷的继续增加, 超过 GFLs 的最大输出功率时, 其会切换为最大功率运行模式, 为系统提供功率支撑, 此时用于切换的判定条件如下.

$$\begin{cases} \sum_{ki=km+1}^{km+kl} P_{ki}^{acmax} < P_{Loadk}^{ac} - \sum_{kj=1}^{km} P_{kj}^{acmax} - P_k^{IC} & k_1=1, \theta=0 \\ \sum_{ki=km+1}^{km+kl} P_{ki}^{acmax} < P_{Loadk}^{ac} - P_k^{IC} & k_1=1, \theta=1 \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\sum_{kj=1}^{km} P_{kj}^{acmax}$ 为 GFLs 的最大输出功率之和; $\sum_{ki=km+1}^{km+kl} P_{ki}^{acmax}$ 为 GFLs 的最大输出功率之和; P_k^{IC} 为 IC- k 当前传输功率.

当 GFLs 的退出运行信号 θ 为“0”时, GFLs 并未发生故障而退出运行, 说明 ACMG- k 处于 AOC-1, GFLs 以最大输出功率运行, 此时 k_2 将由式(25)中第 1 个式子得到. 式(25)中第 1 个式子不等号右侧表达式的含义为: 考虑 GFLs 与 IC- k 当前输出功率后, GFLs 需要平衡的本地负荷. 当该部分负荷低于 GFLs 输出功率最大值时, k_2 为“0”, GFLs 的输出功率未达最大值, 此时其与 IC- k 进行功率互动, 实现功率的合理分配; 反之, 则 k_2 为“1”, GFLs 以最大功率运行, IC- k 仅实现对 ACMG- k 频率的恢复.

当 GFM 的退出运行信号 θ 为“1”时, GFM 们因发生故障而退出运行, 说明 ACMG- k 处于 AOC-2, 此时 k_2 将由式(25)中第 2 个式子得到. 式(25)中第 2 个式子不等号右侧表达式的含义为: GFM 输出功率为“0”, 因此仅考虑 IC- k 当前传输功率后, GFLs 需要平衡的本地负荷. 式(25)第 2 个式子后续的逻辑判断过程与第 1 个式子类似, 本节不再赘述. 最后, k_1 与 k_2 用于切换的具体控制结构可见图 3 和图 4.

4 仿真验证

为验证本文所提分布式协同控制策略的有效性, 在 MATLAB/Simulink 仿真平台中搭建了如图 1 所示的孤岛交直流混合微电网群模型, 详细的系统仿真参数见表 1. 该模型包含 3 个 ACMG 与 1 个 DCMG, 各交流子微网均包含 1 个 GFM 与 2 个 GFLs, 直流

子微网包含 1 个 DU 与 2 个 PUs. 本文设置“负荷连续增加”与“构网型单元故障”两个场景进行验证. 此外, 由于各子微网内 DGs 最大功率与下垂系数的改变不会影响所提策略的控制效果, 为便于不同策略对比结果的展示, 本文将不同供电形式子微网的这两类参数分别设为相同.

4.1 算例 1: 负荷连续增加场景下的仿真验证

为验证本文所提控制策略的有效性, 本小节将其与文献[19]中的交直流混合微电网群分布式控制策略进行对比, 该策略的网间互联变换器并不具备构网功能, 仅运行于 CCM 以实现子微网间功率的合理分配. 本节设置负荷“连续增加”场景进行验证, 不同时间段各子微网负荷量如表 2 所示. 文献[19]所提策略与本文所提策略的仿真结果分别如图 5 和图 6 所示.

表 1 系统仿真参数

Tab.1 System simulation parameters

ACMG 额定频率 f_{ac}^*/Hz	ACMG 额定相电压 u_{ac}^*/V	DCMG 额定电压 u_{dc}^*/V	各子微网 DG 最大 功率 P_{\max}/kW	ACMG 各 DG 下 垂系数 k^{ac}	DCMG 各 DG 下 垂系数 k^{dc}	各单元基准 容量 P_B/kW
50	220	800	50	0.04	0.1875	100

表 2 算例 1 的各时间段子微网负荷量

Tab.2 Microgrid load capacity during each time period in Case 1

时间 t/s	ACMG-1 的负荷 $P_{\text{Load1}}^{ac}/\text{kW}$	ACMG-2 的负荷 $P_{\text{Load2}}^{ac}/\text{kW}$	ACMG-3 的负荷 $P_{\text{Load3}}^{ac}/\text{kW}$	DCMG 的负荷 $P_{\text{Load}}^{dc}/\text{kW}$
0 ~ 0.2	90	60	80	40
0.2 ~ 0.5	170	60	80	40
0.5 ~ 0.8	240	60	80	40

图 5 为文献[19]所提策略下的交直流混合微电网群仿真结果, 由图 5(a) ~ (h) 可知, 该策略在负荷变化时可以实现频率与公共直流母线电压的恢复, 子微网内的 DGs 间、子微网间可以进行功率的精准分配. 但由图 5(i) 可知, 当各子微网均已满足本地负荷需求时, 文献[19]所提策略依旧存在子微网之间的功率互助, 微电网的自治能力无法得到保障.

由图 6 可知, 在本文所提策略下, 当交直流混合微电网群负荷量变化时, 各交流子微网的频率与公共直流母线电压均能够在短时间内恢复至其额定值; 各子微网内的 DGs 均可以按既定控制策略实现功率的精准分配.

在 $t \in [0\text{s}, 0.2\text{s})$ 间, 各子微网内的本地负荷均较轻, 并未超过各 DGs 的最大输出功率. 由图 6(i) 可知, 此时子微网之间没有功率互助过程, 各互联变换器传输功率为“0”, 保证了微电网的自治运行.

在 $t \in [0.2\text{s}, 0.5\text{s})$ 间, ACMG-1 负荷增加导致其处于 AOC-1. 由图 6(e) ~ (i) 可知, 此时 ACMG-1 的

GFM 以最大功率输出, 与其相连的 IC-1 为其提供电压与频率支撑, 和 GFLs 共同满足本地负荷的用电需求, 实现功率的精准分配; 其余 ICs 则根据各子微网的剩余容量满足 ACMG-1 由于构网型单元异常运行而产生的功率缺额.

在 $t \in [0.5\text{s}, 0.8\text{s})$ 间, ACMG-1 负荷的继续增加导致 GFLs 输出功率同样到达其最大值. 由图 6(i) 可知, 此时 IC-1 停止与 GFLs 的互动, 承担剩余 90 kW 的功率缺额, 并继续为 ACMG-1 提供电压支撑, 使其频率恢复至额定值.

4.2 算例 2: 构网型单元故障场景下的仿真验证

为验证本文所提策略在构网型单元故障场景下的有效性, 本节同样将其与文献[19]中的交直流混合微电网群分布式控制策略进行对比, 子微网负荷量如表 3 所示. 本算例设置在 $t = 0.3\text{s}$ 时, ACMG-1 中的 GFM 因故障而退出运行. 文献[19]所提策略与本文所提策略的仿真结果分别如图 7 ~ 图 10 所示.

由图 7 和图 9 可知, 在故障发生后, 文献[19]所

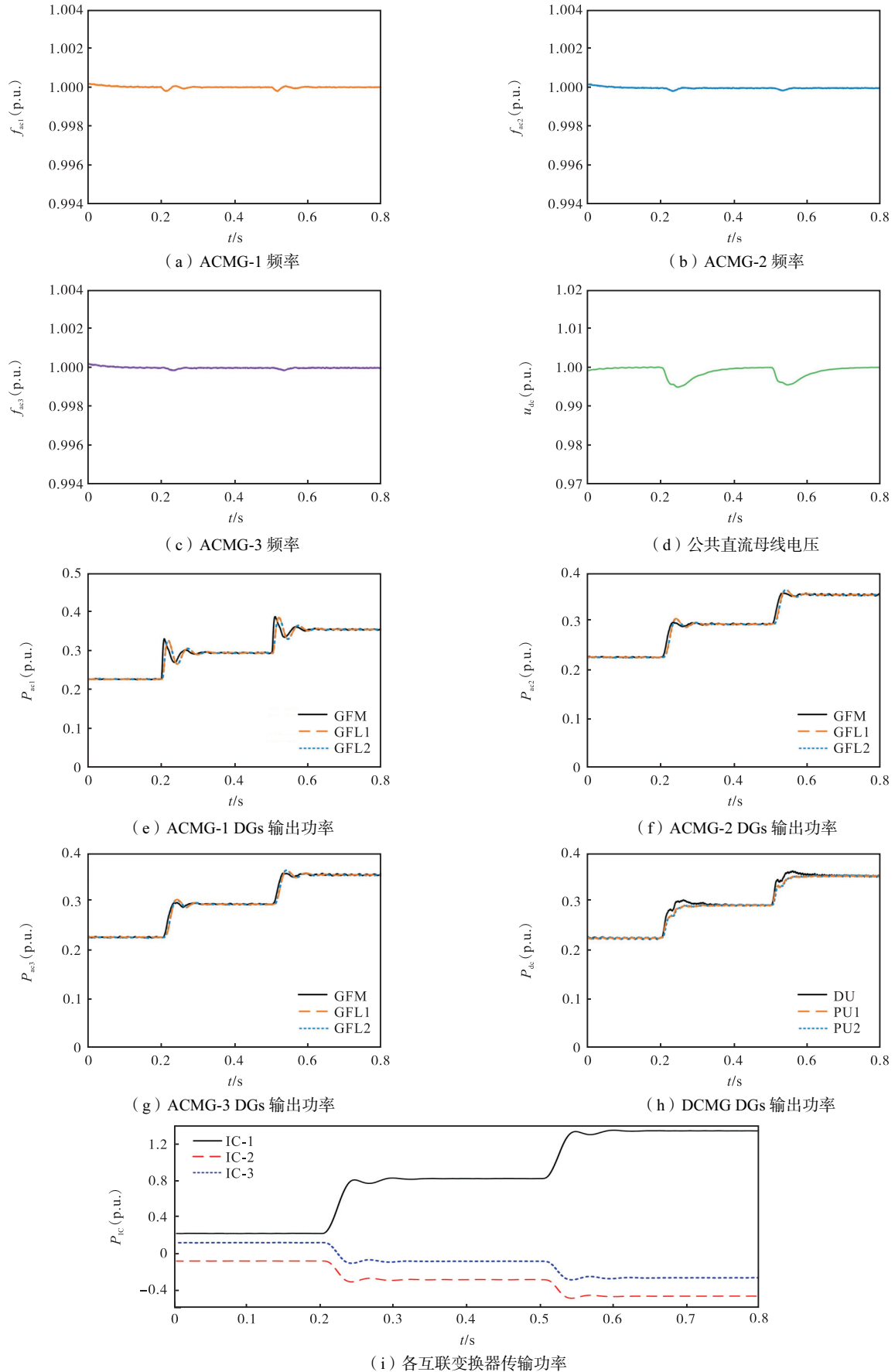


图 5 文献[19]所提策略下的交直流混合微电网群仿真结果(算例 1)

Fig.5 Simulation results for AC/DC hybrid microgrid clusters under the strategy proposed in Ref.[19] (Case 1)

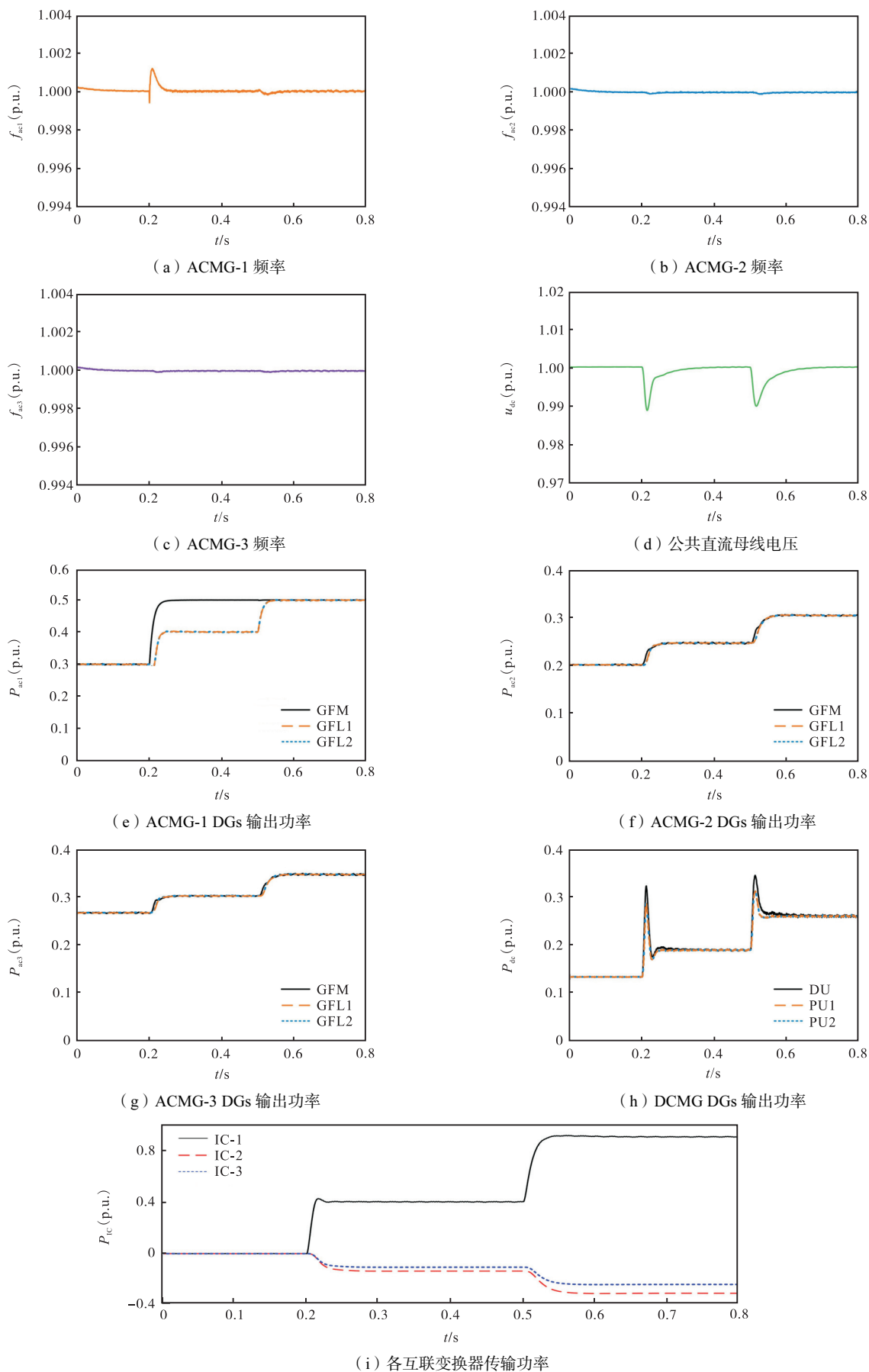


图6 本文所提策略下的交直流混合微电网群仿真结果(算例1)

Fig.6 Simulation results for AC/DC hybrid microgrid cluster under the strategy proposed in this paper (Case 1)

提策略由于 ACMG-1 失去电压与频率支撑,其母线电压失稳;且与其相连的 IC-1 因处于 CCM,控制目标被破坏,系统将该失稳现象通过 IC-1 逐步蔓延至其他子微网,最终造成其余子微网母线电压的波动与

DGs 输出功率的大幅振荡。

由图 8 和图 10 可知,在本文所提策略下,故障发生前后,各交流子微网频率与公共直流母线电压均能够在短时间内恢复至其额定值;各子微网内的

表 3 算例 2 的子微网负荷量

Tab.3 Microgrid load capacity in Case 2

ACMG-1 的负荷 P_{Load1}^{dc} /kW	ACMG-2 的负荷 P_{Load2}^{dc} /kW	ACMG-3 的负荷 P_{Load3}^{dc} /kW	DCMG 的负荷 P_{Load}^{dc} /kW
120	60	80	40

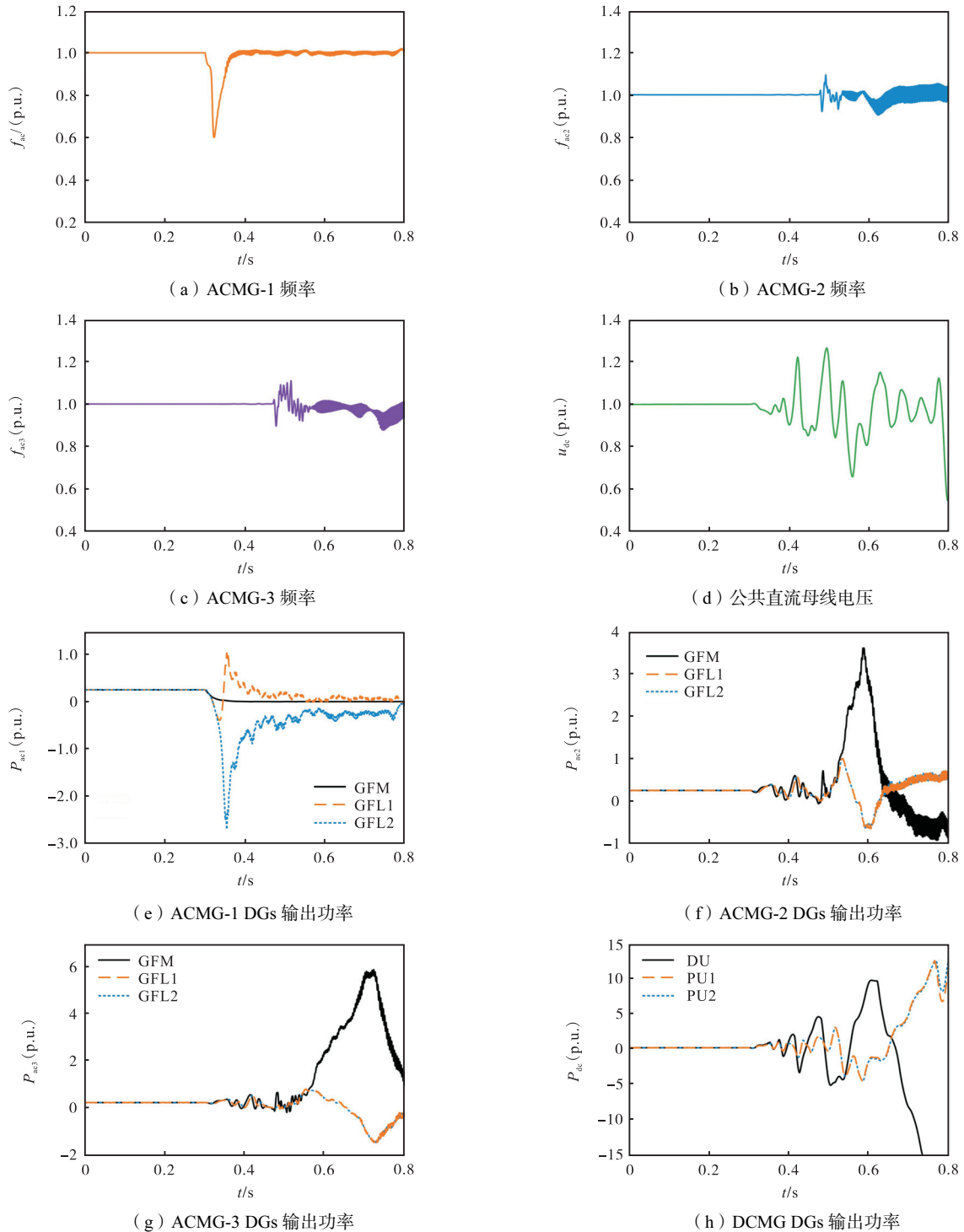


图 7 文献[19]所提策略下的交直流混合微电网群仿真结果(算例 2)

Fig.7 Simulation results for AC/DC hybrid microgrid clusters under the strategy proposed in Ref.[19] (Case 2)

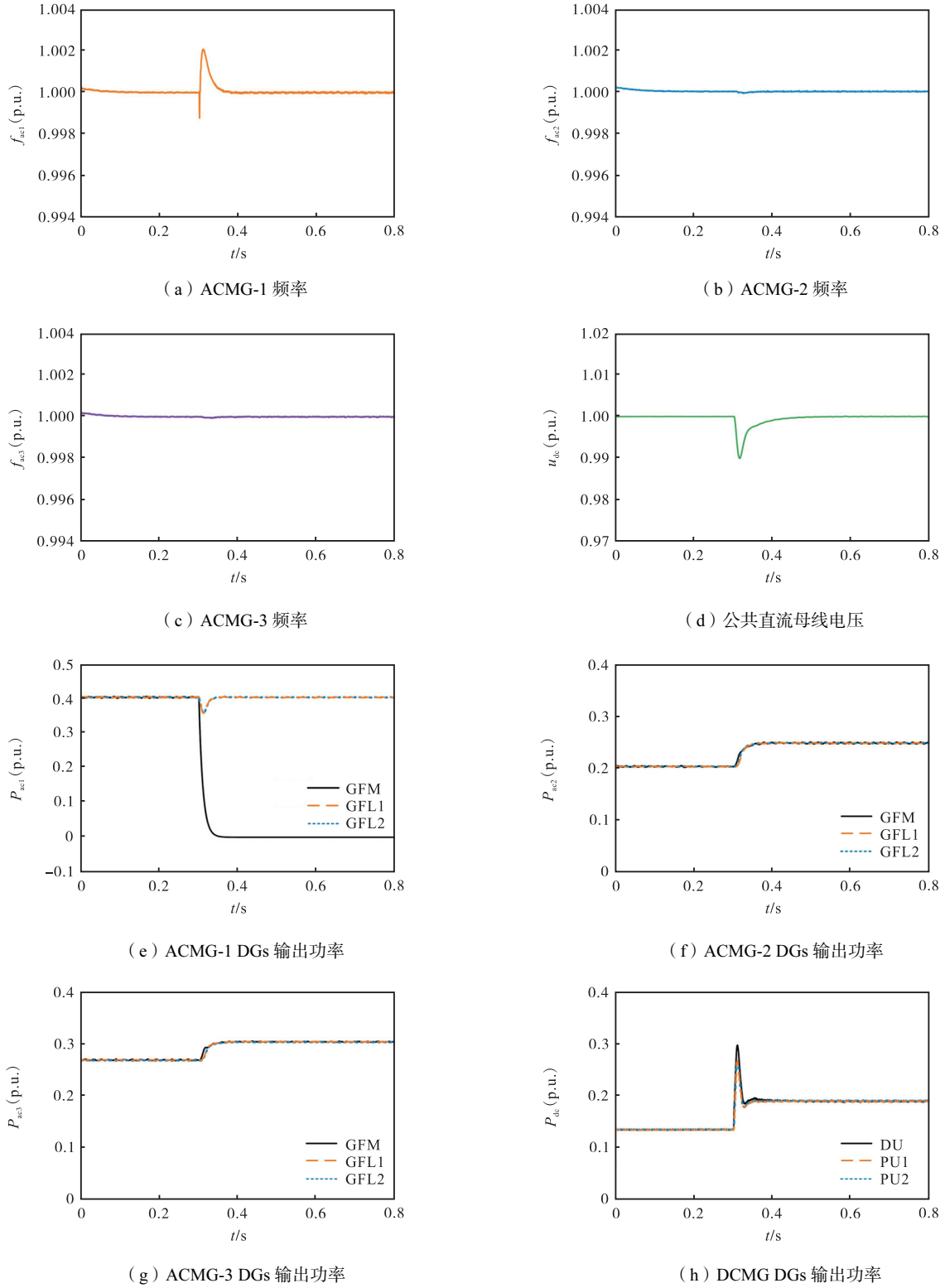


图8 本文所提策略下的交直流混合微电网群仿真结果(算例2)

Fig.8 Simulation results for AC/DC hybrid microgrid cluster under the strategy proposed in this paper (Case 2)

DGs 均可以按既定控制策略实现功率的精准分配. 由图 10 的局部放大可知, 在故障发生时, 各子微网相电压均能够经过短时、小幅波动即可恢复至稳态值.

在 $t \in [0\text{s}, 0.3\text{s})$ 间, 各子微网内的本地负荷均较

轻, 微电网处于自治运行状态, 互联变换器暂无功率传递过程.

在 $t \in [0.3\text{s}, 0.8\text{s})$ 间, ACMG-1 中的 GFM 因故障而退出运行, 处于 AOC-2. 此时 IC-1 迅速为 ACMG-1 提供构网支撑, 同时与子微网内 GFLs 进行功率互

动, 维持 DGs 间功率的精准分配过程.

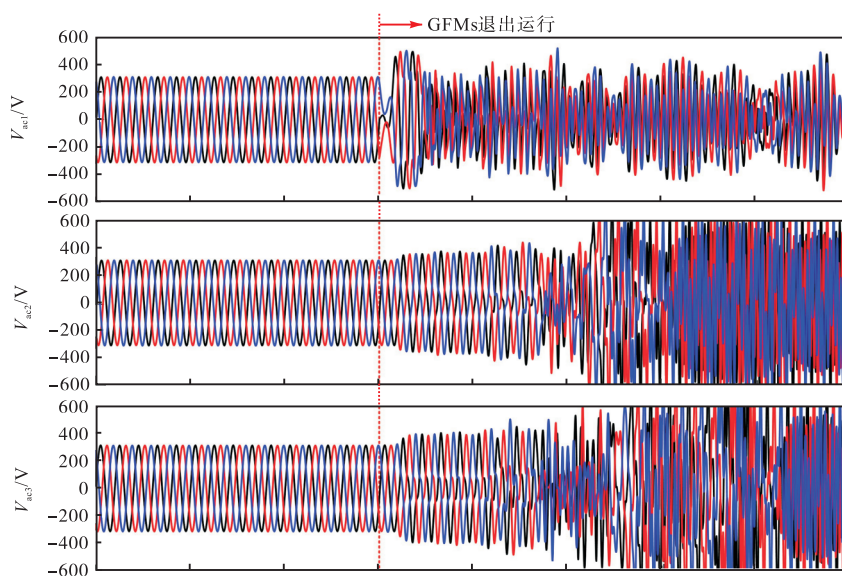


图 9 文献[19]所提策略下的各交流子微网母线电压(算例 2)

Fig.9 Bus voltages of each ACMG under the strategy proposed in Ref.[19] (Case 2)

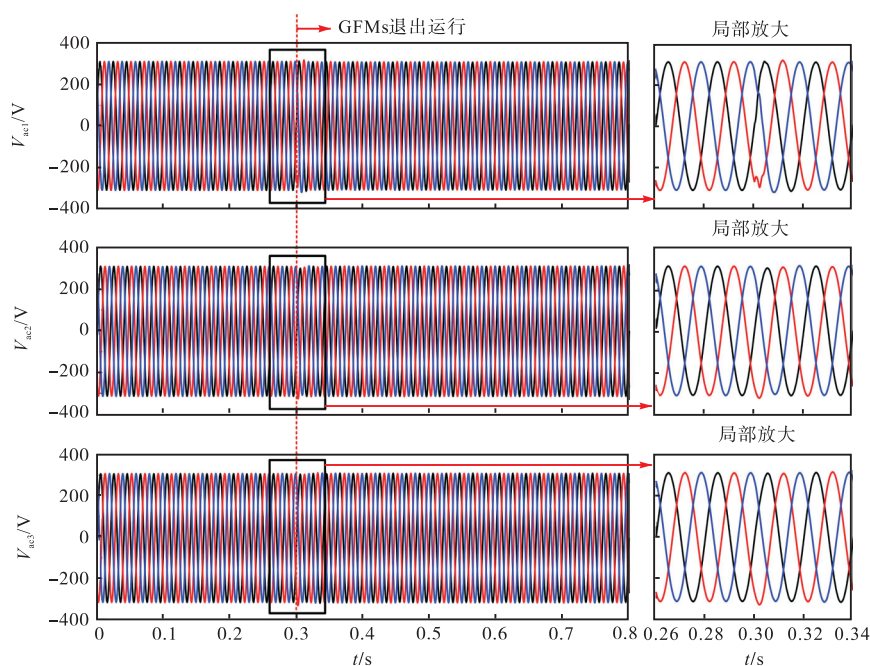


图 10 本文所提策略下的各交流子微网母线电压(算例 2)

Fig.10 Bus voltages of each ACMG under the strategy proposed in this paper (Case 2)

5 结 论

本文提出一种面向构网型单元限功率运行与故障工况的孤岛交直流混合微电网群的分布式协同控制策略, 可为异常子微网提供电压与频率支撑, 避免系统失稳风险, 并得到如下结论.

(1) 与传统方法相比, 本文所提控制策略可在构网型单元限功率运行与故障工况下, 通过互联变换器

的变模式运行, 为构网型单元异常子微网提供电压与频率支撑, 维持孤岛交直流混合微电网群的稳定运行.

(2) 与传统方法相比, 本文所提控制策略可在构网型单元限功率运行与故障工况下, 保障正常子微网按自身剩余容量承担异常子微网产生的功率缺额, 实现子微网间功率的合理互济.

本文所提方法仅讨论通信条件良好下的运行控制方法, 在未来工作中, 进一步研究考虑通信延迟与网络攻击下的微电网群协同控制方法.

参考文献:

- [1] 李志军, 张牟发, 张家安. 考虑延时的孤岛微电网频率协同控制策略稳定性分析及改进[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2022, 55(10): 1061-1070.
Li Zhijun, Zhang Moufa, Zhang Jia'an. Stability analysis and improvement of frequency cooperative control strategy for island microgrid considering time delay[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2022, 55(10): 1061-1070(in Chinese).
- [2] 余昆, 唐修明, 陈星莺, 等. 高比例分布式光伏接入的配电网过电压责任分摊方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9535-9546.
Yu Kun, Tang Xiuming, Chen Xingying, et al. Allocation method of overvoltage responsibility in distribution network with high proportion distributed photovoltaic[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9535-9546(in Chinese).
- [3] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.
Kang Chongqing, Du Ershun, Guo Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750(in Chinese).
- [4] Arani Z D, Taher S A, Ghasemi A, et al. Application of multi-resonator notch frequency control for tracking the frequency in low inertia microgrids under distorted grid conditions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 337-349.
- [5] Gupta A, Doolla S, Chatterjee K. Hybrid AC-DC microgrid: Systematic evaluation of control strategies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3830-3843.
- [6] Ungerland J, Poshiya N, Biener W, et al. A voltage sensitivity based equivalent for active distribution networks containing grid forming converters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 2825-2836.
- [7] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175.
Zheng Tianwen, Chen Laijun, Chen Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175(in Chinese).
- [8] 田浩, 黄文焘, 余墨多, 等. 交直流混合独立微网互联变换器自适应双向下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7063-7074.
Tian Hao, Huang Wentao, Yu Moduo, et al. Adaptive bidirectional droop control strategy for the interlinking converter in the islanding hybrid AC/DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7063-7074(in Chinese).
- [9] 刘子文, 苗世洪, 范志华, 等. 孤立交直流混合微电网双向 AC/DC 换流器功率控制与电压波动抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6225-6238.
Liu Ziwen, Miao Shihong, Fan Zhihua, et al. Power control and voltage fluctuation suppression strategy of the bidirectional AC/DC converter in the islanding hybrid microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6225-6238(in Chinese).
- [10] 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, 6175.
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, 6175(in Chinese).
- [11] 周焯, 汪可友, 李国杰, 等. 基于多智能体一致性算法的微电网分布式分层控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 142-149.
Zhou Ye, Wang Keyou, Li Guojie, et al. Distributed hierarchical control for microgrid based on multi-agent consensus algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 142-149(in Chinese).
- [12] Zeng Y J, Zhang Q J, Liu Y C, et al. Hierarchical cooperative control strategy for battery storage system in islanded DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 4028-4039.
- [13] Chang J W, Lee G S, Moon S I, et al. A novel distributed control method for interlinking converters in an islanded hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3765-3779.
- [14] Martinez-Gomez M, Orchard M E, Bozhko S. Dynamic average consensus with anti-windup applied to interlinking converters in AC/DC microgrids under economic dispatch and delays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(5): 4137-4140.
- [15] 赵洪山, 徐昆毓. 事件触发改进一致性算法的孤岛混合微电网并联互联变换器分布式协调控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2977-2984.
Zhao Hongshan, Xu Kunyu. Distributed coordinated

- control strategy for parallel bidirectional power converters of island hybrid microgrid based on event triggered improved consensus algorithm[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(7): 2977-2984(in Chinese).
- [16] Zhang Y L, Liu Z X, Chen Z Q. Distributed cooperative control of BESSs in AC and DC hybrid microgrid and its energy internet paradigm[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(1): 2042-2051.
- [17] 李忠文, 王新创, 程志平, 等. 考虑经济调度的交直流混合微电网分布式电压/频率分层控制[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(24): 9633-9645.
- Li Zhongwen, Wang Xinchuang, Cheng Zhiping, et al. Distributed voltage/frequency hierarchical control for AC/DC hybrid microgrid considering economic dispatch[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(24): 9633-9645(in Chinese).
- [18] 杨畅, 郑涛, 李鹏宇, 等. 基于改进 MFAC 的交直流微电网分布式二次控制[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(1): 34-46.
- Yang Chang, Zheng Tao, Li Pengyu, et al. Distributed secondary control of hybrid AC/DC microgrid based on improved model-free adaptive control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(1): 34-46(in Chinese).
- [19] Zhou J G, Zhang H G, Sun Q Y, 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.
- [20] 杨炜晨, 苗世洪, 张世旭, 等. 交直流混合微电网群分布式自治经济控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(3): 857-868.
- Yang Weichen, Miao Shihong, Zhang Shixu, et al. Distributed autonomous economic control strategy for AC/DC hybrid microgrid cluster[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(3): 857-868(in Chinese).
- [21] 杨珺, 侯俊浩, 刘亚威, 等. 分布式协同控制方法及在电力系统中的应用综述[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(19): 4035-4049.
- Yang Jun, Hou Junhao, Liu Yawei, et al. Distributed cooperative control method and application in power system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(19): 4035-4049(in Chinese).
- [22] 米阳, 宋根新, 宋元元, 等. 孤岛交直流混合微电网群多级功率管理策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(7): 38-45.
- Mi Yang, Song Genxin, Song Yuanyuan, et al. Strategy of multi-level power management for islanded AC/DC hybrid microgrid cluster[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(7): 38-45(in Chinese).
- [23] 杜毅, 郑超, 孙华东. 构网型 VSC 暂态稳定机理及改进限幅策略[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(10): 3753-3766.
- Du Yi, Zheng Chao, Sun Huadong. Transient stability mechanism analysis of the grid forming voltage source converter and the improved limiting method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(10): 3753-3766(in Chinese).
- [24] Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(6): 988-1001.

(责任编辑:孙立华)