

孤岛交直流混合微电网群分布式低碳控制策略

张兴¹, 刘平飞¹, 张柳丽¹, 张育炜², 金昱², 肖迁²

(1. 平高集团有限公司, 天津 300304;

2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要:在“双碳”目标的推动下,为有效降低孤岛交直流混合微电网群中分布式电源的碳排放量,提出一种孤岛交直流混合微电网群分布式低碳控制策略。首先,给出一种孤岛交直流混合微电网群拓扑,并基于此,分析其低碳控制特性。其次,提出一种孤岛交直流混合微电网群分布式低碳控制策略,该策略分为微电网变换器控制层与网间互联变换器控制层两部分。在微电网变换器控制层中,将电源的碳排放对出力的微分作为碳排放微增率,引入基于一致性算法的二次控制项,保证微电网内各电源按碳排放微增率准则,合理分配输出功率,实现微电网级的低碳控制;在互联变换器控制层中,通过将微电网间碳排放微增率的偏差引入互联变换器的控制结构,实现了微电网群的低碳控制。最后,多工况的仿真算例表明,与传统分布式协同控制策略相比,所提分布式低碳控制策略通过不同层级之间的协同控制,实现了系统的低碳控制。

关键词:交直流混合微电网群;碳减排;分布式低碳控制;构网型单元;一致性框架

中图分类号:TM72 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26031

Distributed Low-carbon Control Strategy for an Islanded AC/DC Hybrid Microgrid Cluster

ZHANG Xing¹, LIU Pingfei¹, ZHANG Liuli¹, ZHANG Yuwei², JIN Yu², XIAO Qian²

(1. Pinggao Group Co., Ltd., Tianjin 300304, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Under the promotion of carbon peak and carbon neutrality, in order to effectively reduce the carbon emissions of distributed generators in islanded AC/DC hybrid microgrid clusters, a distributed low-carbon control strategy was proposed. Firstly, the topology of the islanded AC/DC hybrid microgrid cluster was given. Based on these, the low-carbon characteristics of the system were analyzed. Secondly, the distributed low-carbon control strategy for an islanded AC/DC hybrid microgrid cluster was proposed. This strategy was divided into two parts: the microgrid converters control layer and the interlinking converters (ICs) control layer. In the microgrid converters control layer, this strategy taken the differential of carbon emissions from power sources as the incremental carbon emissions, and introduced it into the secondary control term. It can ensure reasonable power allocation of the generators according to the principle of equaling incremental carbon emissions, and achieve low-carbon control in the microgrid level. In the interlinking converters control layer, this strategy introduced the deviation of incremental carbon emissions between microgrids into the control structure of ICs and achieved low-carbon control in the microgrid cluster level. Finally, the multi-condition simulation results show that compared with the conventional methods, the proposed control strategy can realize low-carbon control of the system through collaborative control between different levels.

Key words: AC/DC hybrid microgrid cluster; carbon emission reduction; distributed low-carbon control; grid-forming units (GFMUs); consensus framework

近年来,随着化石能源的逐渐短缺与环境污染问题的日益严重^[1],我国亟需进行能源的转型

基金项目:平高集团有限公司科技项目(PGKJ2022-034);国家自然科学基金资助项目(52107121);广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515240047);中国科协科技智库青年人才计划资助项目(XMSB20240711043);天津市企业科技特派员项目(23YDTPJC00090);天津大学自主创新基金资助项目(2024XHX-0028, 2024XJD-0045)

作者简介:张兴(1987—),男,本科,工程师,主要研究方向为储能技术,Email:690117463@qq.com

通讯作者:张育炜(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为分布式能源与配网/微网,Email:yuweizhang@tju.edu.cn

升级。在此背景下,以光伏、风机、储能为主的分布式电源(distributed generators, DGs)得到了广泛应用。分布式电源具有提高能源利用率、接入点灵活等优势。但是,分布式电源出力具有波动性的特点,这给电力系统的运行控制带来了严峻挑战^[2]。为解决该问题,微电网的概念被提出,并已成为分布式电源并网的有效途径^[3-4]。然而,随着负荷的用电量增加与需求的逐步多样化,单一微电网容量受限、运行稳定性低的问题逐渐突出^[5]。交直流混合微电网群在应对分布式电源挑战方面具备适应多类型电源接入、提升系统电能质量等优势与潜力^[6],逐渐成为微电网群的主要发展方向^[7-8]。

交直流混合微电网群存在并网与孤岛两种运行模式,在孤岛模式下,由于缺乏大电网提供的惯性,系统内的小扰动可能会对其运行稳定性造成影响^[9]。因此需要设计合理的控制策略,保证各分布式电源为系统提供充足的频率/电压与功率支撑,以提升微电网群的运行稳定性和供电可靠性。

国内外众多学者已对交直流混合微电网群的运行控制进行了深入研究。文献[10]提出了一种微电网群混合协调控制策略,实现了系统的分散管理,但该策略包含多分段的下垂曲线,结构复杂。文献[11]提出了一种交直流混合微电网群的柔性控制策略,通过简单的控制结构即可实现多微电网功率的合理分配,但该策略在重负荷接入系统时易导致频率与电压产生较大偏差。为解决该问题,基于一致性算法的分布式控制方法逐渐应用于微电网群中。文献[12]提出了一种微电网群分层分布式控制策略,实现了系统频率与电压的恢复,但其层级间的交互过程较为复杂。文献[13]提出了一种交直流混合微电网群分布式控制策略,实现电压的恢复与功率的合理分配,却忽略了对系统碳排放量的控制。因此,需要设计合理的碳减排控制方法,实现微电网群内各单元功率的进一步优化控制。

微电网群的碳减排控制多用于DG的发电调度,通过建立DG碳排放模型,将碳排放量折算为碳排成本,将其计入总发电成本中。文献[14]提出一种多能微网多目标优化调度方法,兼顾了系统运行的经济性与环境友好性,但仅适用于多种能源耦合的场景。文献[15]面向微电网群,提出一种基于云储能的多目标优化配置方法,实现

系统的经济-低碳-可靠运行。但随着电力系统对于碳减排的需求愈发强烈,碳排放量已由原先的发电成本形式逐渐转变为发电机组独立、硬性的控制指标。在此背景下,世界各国陆续开始引入碳排放权交易机制,实现有效的碳减排。文献[16]在微电网优化过程中引入碳交易机制,降低系统碳排放量,但所提方法仅对微电网的碳交易过程进行了初步研究。文献[17-18]将碳交易机制扩展至微电网群场景,实现了多微电网间合理的碳交易。但上述文献所提方法均属于上层的优化调度与能量管理,该层与控制层之间存在着较大的时间尺度差异,不利于孤岛交直流混合微电网群在多个时间尺度下的低碳控制。同时,部分文献已对配电系统的碳减排控制进行了初步研究^[19]。因此,如何在现有研究的基础上,为微电网群控制层设计一种低碳控制方法,实现系统在短时间尺度下的低碳控制,具有重要意义。

针对孤岛交直流混合微电网群传统控制策略无法在控制层级有效降低系统的碳排放量,本文提出了一种孤岛交直流混合微电网群分布式低碳控制策略。该策略通过定义碳排微增率,并将其引入微电网内变换器与网间互联变换器的控制过程中,保证系统内各电源按等碳排微增率分配有功功率,进而实现微电网群的低碳控制。通过多工况下的仿真算例分析,验证了所提孤岛交直流混合微电网群分布式低碳控制策略的有效性与优越性。

1 孤岛交直流混合微电网群拓扑及其低碳控制特性分析

本节首先介绍孤岛交直流混合微电网群拓扑,对其物理结构、各单元基本控制策略、通信网络进行说明;接着分析微电网群的低碳控制特性,为后续控制策略的设计奠定基础。

1.1 孤岛交直流混合微电网群拓扑

本文研究的孤岛交直流混合微电网群拓扑如图1所示,其中包含数个交流微电网(AC microgrid, ACMG)、直流微电网(DC microgrid, DCMG)与网间互联变换器(interlinking converters, ICs),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),实现多微电网直流侧相耦合。

孤岛交直流混合微电网群中,交流微电网内主要包含构网型单元(grid-forming units, GFMUs)

与跟网型单元(grid-following units, GFLUs)。其中, GFMUs通常采用下垂控制为交流微电网母线提供电压支撑; GFLUs同样可以采用下垂控制, 采集母线频率参与系统的功率调节。直流微电网内主要包含可调度型单元(dispatchable units, DUs)与功率型单元(power units, PUs)^[20], DUs利用下垂控制特性, 支撑公共直流母线电压; PUs通过调整自身输出功率响应直流电压变化。上述DGs均可直接参加系统的功率管理, 其主要包含燃料电池(fuel cell, FC)、微型燃气轮机(micro gas turbine, MGT)等。本文为便于分析, 将风机、光伏等不直接参加功率管理的DG视为具有负功率特性的负荷^[21]。

图1的微电网群内包含 N 个交流微电网, 第 n 个交流微电网ACMG- n , $n \in N_{MG} = \{1, 2, \dots, N\}$ 内

含有 nm 个构网型单元与 nl 个跟网型单元, $nm, nl \in N_{DC}^{\text{ac}} = \{1, 2, \dots, nm, \dots, nm + nl\}$, N 个交流微电网通过各自所连IC(总计 N 个)实现微电网间的功率互动; 直流微电网内含有 p 个可调度型单元与 q 个功率型单元, $p, q \in N_{DC}^{\text{dc}} = \{1, 2, \dots, p, p + 1, \dots, p + q\}$ 。交流微电网内各单元的变换器与ICs均采用两电平电压源型变换器, 直流微电网内各单元均采用常规双向DC/DC变换器。

交直流混合微电网群的通信网络由微电网通信层与互联变换器通信层构成, 在微电网通信层中, 微电网内的各单元均配备一个智能体; 在互联变换器通信层中, 各IC均配备一个智能体。为便于后续控制策略的设计, 各交流微电网中的一个GFMU与所连IC建立通信链路, 直流微电网内的一个DU与各IC均建立通信链路。

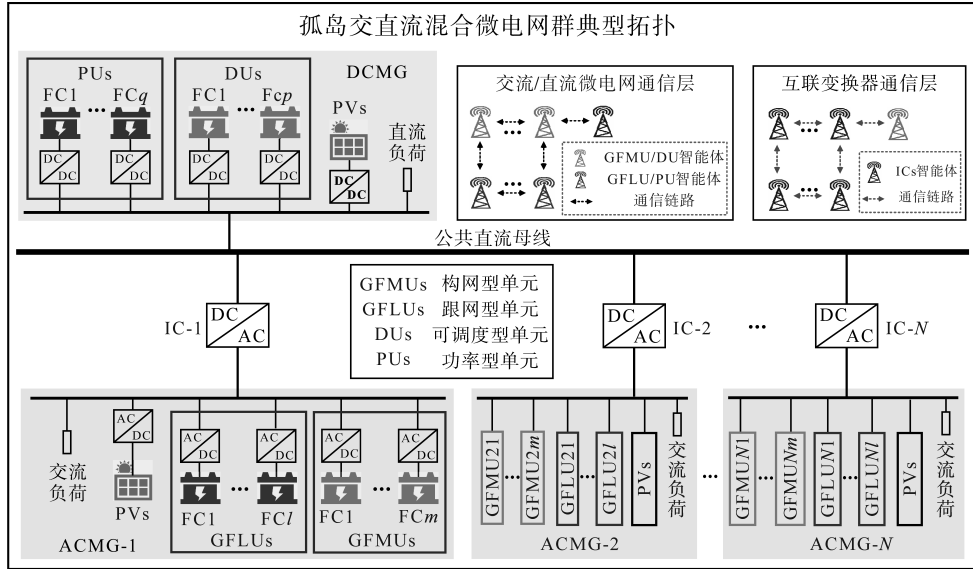


图1 孤岛交直流混合微电网群拓扑

Fig.1 Topology of AC/DC hybrid microgrid cluster

1.2 孤岛交直流混合微电网群的低碳控制特性分析

孤岛交直流混合微电网群产生的碳排放主要由其分布式电源的发电环节产生, 对于燃料电池等DG, 其出力与碳排放之间的关系可表示为

$$T = aP^2 + bP + c \quad (1)$$

式中: T 为DG的碳排放量; P 为DG有功出力; a, b, c 为DG碳排放系数, 此类系数可由燃料消耗系数通过计算得到。

微电网群低碳控制的主要目标就是通过设计合适的控制策略, 实现系统的总碳排放量最小。该控制问题可建模为包含目标函数与约束条件的优化问题:

$$\begin{cases} \min T_{\text{sum}} = \sum_{n=1}^N \sum_{ni=1}^{nm+nl} T_{ni}^{\text{ac}}(P_{ni}^{\text{ac}}) + \sum_{j=1}^{p+q} T_j^{\text{dc}}(P_j^{\text{dc}}) \\ P_{ni}^{\text{acmin}} \leq P_{ni}^{\text{ac}} \leq P_{ni}^{\text{acmax}} \\ P_j^{\text{dcmin}} \leq P_j^{\text{dc}} \leq P_j^{\text{dcmax}} \\ \sum_{ni=1}^{nm+nl} P_{ni}^{\text{ac}} = P_{\text{Loadn}}^{\text{ac}} - P_n^{\text{IC}} \\ \sum_{j=1}^{p+q} P_j^{\text{dc}} = P_{\text{Load}}^{\text{dc}} + \sum_{n=1}^N P_n^{\text{IC}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_{sum} 为系统总碳排放量; $T_{ni}^{\text{ac}}, P_{ni}^{\text{ac}}, P_{ni}^{\text{acmax}}, P_{ni}^{\text{acmin}}$ 分别为ACMG- n 内第 ni 个DG的碳排放量、有功出力及其上、下限; $T_j^{\text{dc}}, P_j^{\text{dc}}, P_j^{\text{dcmax}}, P_j^{\text{dcmin}}$ 分别为DC-MG内第 j 个DG的碳排放量、有功出力及其上、下

限; $P_{\text{Load}n}^{\text{ac}}, P_{\text{Load}}^{\text{dc}}$ 分别为 ACMG- n 与 DCMG 的本地负荷; P_n^{IC} 为与 ACMG- n 相连的 IC 传输功率。

接着,本文参考经济学中提出的成本微增率概念^[22],定义 DG 的碳排微增率表达式为

$$C = \partial T / \partial P = 2aP + b \quad (3)$$

式中: C 为 DG 的碳排微增率。

最后,根据拉格朗日乘数法,当孤岛交直流混合微电网群内所有 DG 的碳排微增率相等时,系统的碳排放量将达到最小,即

$$\begin{cases} C_{n1}^{\text{ac}} = \dots = C_{ni}^{\text{ac}} = C_n^{\text{ac}} & \text{交流子微网低碳控制} \\ C_1^{\text{dc}} = \dots = C_j^{\text{dc}} = C_{\text{dc}} & \text{直流子微网低碳控制} \\ C_1^{\text{ac}} = \dots = C_n^{\text{ac}} = C_{\text{dc}} & \text{微电网群低碳控制} \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_n^{ac} 为交流微电网内各 DG 的碳排微增率; C_{dc} 为直流微电网内各 DG 的碳排微增率。

2 孤岛交直流混合微电网群分布式低碳控制策略

本节首先介绍一致性算法基本原理;接着制定交直流混合微电网群的低碳控制目标;然后根据控制目标,构建分层分布式低碳控制架构;最后提出一种孤岛交直流混合微电网群分布式低碳控制策略。

2.1 一致性算法原理

2.1.1 多智能体的图模型

本文将第一节中介绍的各层通信网络考虑为一个无向图 $G = (V, E)$, 其中 $V = \{1, \dots, N\}$ 为图 G 的节点集, $E = V \times V$ 为图 G 的边集。 $N_i = \{j \in V : (i, j) \in E\}$ 为第 i 个节点的相邻节点集; 相邻节点间的通信权重 a_{ij} 为邻接矩阵 $A = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 的元素, 当 $j \in N_i$ 时, $a_{ij} = a_{ji} = 1$, 否则, $a_{ij} = a_{ji} = 0$ 。无向图 G 的度矩阵为 $D = \text{diag}(d_i)$, 其中的元素 d_i 可表征节点 i 与相邻节点的通信权重之和。最后, 图 G 的通信网络可用其拉普拉斯矩阵表示:

$$L = D - A \Rightarrow \begin{cases} l_{ij} = -a_{ij} & i \neq j \\ l_{ij} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} & i = j \end{cases} \quad (5)$$

式中: l_{ij} 为拉普拉斯矩阵 L 的元素。

2.1.2 一致性框架

在后续对于微电网分布式低碳控制策略的设计中, 本文采用基于“领导者-跟随者”的一致性 (leader-follower consensus, LFC) 框架, 该框架将通信网络中的一部分智能体视为领导者, 在履

行一致性协议的同时, 实现额外的控制目标; 另一部分智能体视为跟随者, 履行一致性协议^[23]。

本节设置节点集 $V = \{1, \dots, N\}$ 内的前 nl 个节点为领导者, 后 $N-nl$ 个节点为跟随者。领导者节点集定义为 $Vl = \{1, \dots, nl\}$, 跟随者节点集可定义为 $Vf = \{nl+1, \dots, N\}$ 。由此可以制定跟随者的一致性协议为

$$u_i = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i - x_j) \quad i \in Vf \quad (6)$$

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 (6) 的基础上, 引入一个外部输入, 可表示为

$$u_i = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i - x_j) + \varepsilon_i \quad i \in Vl \quad (7)$$

其中, ε_i 是外部输入, 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。

2.2 孤岛交直流混合微电网群分布式低碳控制架构

本小节首先介绍孤岛交直流混合微电网群的分布式低碳控制目标, 接着基于制定的目标, 构建一种分层分布式低碳控制架构。

2.2.1 孤岛交直流混合微电网群分布式低碳控制目标

1) 交流微电网的低碳控制目标如下:

① 使交流微电网的频率恢复至其额定值:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (f_n - f_n^*) = 0 \quad (8)$$

式中: f_n, f_n^* 分别为 ACMG- n 的交流母线频率及其额定值。

② 使交流微电网内的构网型单元与跟网型单元按等碳排微增率准则分配有功功率:

$$C_{n1}^{\text{ac}} = \dots = C_{nm}^{\text{ac}} = C_{nm+1}^{\text{ac}} = \dots = C_{nm+nl}^{\text{ac}} \quad (9)$$

式中: C_{nm}^{ac} 为 ACMG- n 内第 nm 个构网型单元的碳排微增率; C_{nm+nl}^{ac} 为 ACMG- n 内第 $nm+nl$ 个跟网型单元的碳排微增率。

2) 直流微电网的低碳控制目标如下:

① 使直流微电网的公共直流母线电压恢复至其额定值:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (u_{\text{dc}} - u_{\text{dc}}^*) = 0 \quad (10)$$

式中: $u_{\text{dc}}, u_{\text{dc}}^*$ 分别为公共直流母线电压及其额定值。

② 使直流微电网内可调度型单元与功率型单元按等碳排微增率准则分配有功功率:

$$C_1^{\text{dc}} = \dots = C_p^{\text{dc}} = C_{p+1}^{\text{dc}} = \dots = C_{p+q}^{\text{dc}} \quad (11)$$

式中: C_p^{dc} 为 DCMG 内第 p 个可调度型单元的碳排

微增率; C_{p+q}^{dc} 为 DCMG 内第 $p+q$ 个功率型单元的碳排微增率。

3) 网间互联变换器的低碳控制目标为:通过网间互联变换器实现各微电网间的有功功率交互,保证孤岛交直流混合微电网群内各微电网的碳排微增率一致:

$$C_1^{ac} = \dots = C_N^{ac} = C_{dc} \quad (12)$$

2.2.2 交直流混合微电网群的分层分布式低碳控制架构

本文所提孤岛交直流混合微电网群分布式低碳控制架构如图 2 所示,由微电网变换器控制层与网间互联变换器控制层两部分构成,共同保证微电网群的低碳、稳定运行。

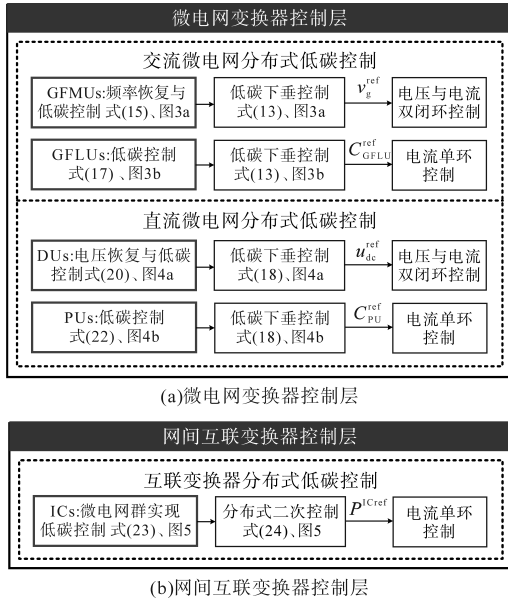


图2 交直流混合微电网群分层分布式低碳控制架构

Fig.2 Hierarchical distributed low-carbon control structure of AC/DC hybrid microgrid cluster

1) 微电网变换器控制层:该控制层用以实现 2.2.1 节中交流与直流微电网的低碳控制目标。首先,交流微电网与直流微电网分别通过后文所提的低碳下垂控制,不依赖通信即可实现微电网内各电源的碳排微增率趋于一致,但由于下垂控制的有差调节特性,频率与直流母线电压会产生偏差。接着,各微电网基于前述 LFC 框架,控制其内的各 DG 设备,得到二次控制量,并将其引入低碳下垂控制中,在保证频率与电压恢复至额定值的同时,实现 DG 按等碳排微增率准则分配输出功率。最后,本文采用电压与电流双闭环控制结构^[24];或通过式(3)将碳排微增率转化为功率参考值,并采用电流单环控制结构^[25],对前述控制环节生成的参考值进行无静差追踪。

2) 网间互联变换器控制层:该控制层用以实现 2.2.1 节中网间互联变换器的低碳控制目标。首先,一次低碳控制通过与微电网变换器控制层进行交互,接收所连本地微电网与相邻 IC 的信息,调整其传输功率参考值,协调微电网间的功率互济,进而优化系统内 DGs 的功率分配过程,实现其碳排微增率趋于一致。接着,二次控制利用 IC 两侧微电网的碳排微增率偏差量,解决不同 IC 对同一微电网的功率争抢问题。最后,本文采用电流单环控制结构,实现对前述控制环节生成的参考值的快速追踪。

2.3 孤岛交直流混合微电网群分布式低碳控制策略

2.3.1 微电网变换器分布式低碳控制策略

微电网变换器分布式低碳控制策略由交流微电网分布式低碳控制与直流微电网分布式低碳控制两部分构成。交、直流微电网分布式低碳控制框图分别如图 3、图 4 所示,其中,各单元变换器外环控制结构均包含一次控制与二次控制。

1) 交流微电网分布式低碳控制。本文所提交流微电网分布式低碳控制框图如图 3 所示,其中,图 3a 为 GFMU 变换器分布式低碳控制框图,图 3b 为 GFLU 变换器分布式低碳控制框图。采用本控制,可以实现 2.2.1 节中交流微电网的低碳控制目标,基于 LFC 框架,本文将 GFMUs 视为领导者,将 GFLUs 视为跟随者,设计了构网-跟网型单元分布式低碳控制。

GFMU 与 GFLU 变换器一次控制。首先设计低碳下垂控制作为 GFMU 与 GFLU 变换器的一次控制,通过将 DGs 的碳排微增率引入下垂公式中,以保证在无通信条件下,微电网内各 DG 实现按等碳排微增率准则分配输出有功功率。低碳下垂控制表达式为

$$\begin{cases} f_{ni} = f_{ni}^* - k_{ni}^{ac} C_{ni}^{ac} \\ C_{nj}^{ac} = (f_{nj}^* - f_{nj}) / k_{nj}^{ac} \end{cases} \quad ni, nj \in N_{DG}^{ac} \quad (13)$$

式中: f_{ni}, f_{ni}^* 分别为 ACMG- n 内第 ni 个构网型单元 GFMU- ni 的频率及其额定值; C_{ni}^{ac} 为 GFMU- ni 的碳排微增率; k_{ni}^{ac} 为 GFMU- ni 的下垂系数; f_{nj}, f_{nj}^* 分别为第 nj 个跟网型单元 GFLU- nj 采集的频率及其额定值; C_{nj}^{ac} 为 GFLU- nj 的碳排微增率; k_{nj}^{ac} 为 GFLU- nj 的下垂系数。

GFMU 与 GFLU 变换器二次控制。由式(13)可知,一次控制虽然可以保证微电网内各电源按

等碳排微增率准则输出有功功率,但会引起母线频率相对于额定值的偏差,因此需设计二次控制结构,以实现2.2.1节中交流微电网的低碳控制目标。其中,GFMU变换器二次控制表达式为

$$f_{ni}^{\text{ref}} = f_{ni}^* - k_{ni}^{\text{ac}} C_{ni}^{\text{ac}} + \lambda_{ni}^{\text{ac}} \quad (14)$$

$$\begin{cases} e_{ni}^{\text{GFMU}} = -(f_{ni} - f_{ni}^*) - c_{ni}^{\text{ac}} \sum_{nj \in \mathcal{N}_{ni}} a_{nijnj} (C_{ni}^{\text{ac}} - C_{nj}^{\text{ac}}) \\ \lambda_{ni}^{\text{ac}} = e_{ni}^{\text{GFMU}} G_{ni}^{\text{GFMU}}(s) \end{cases} \quad (15)$$

式中: f_{ni}^{ref} 为GFMU- ni 的输出频率参考值; λ_{ni}^{ac} 为其二次控制量; e_{ni}^{GFMU} 为GFMU- ni 的一致性控制输入; C_{nj}^{ac} 为节点 ni 相邻节点传递的信息; c_{ni}^{ac} 为正增益; $G_{ni}^{\text{GFMU}}(s)$ 为GFMU- ni 的PI控制器传递函数; a_{nijnj} 为DGs间的通信权重; \mathcal{N}_{ni} 为节点 ni 的相邻节点集。

GFLU变换器二次控制表达式为

$$C_{ni}^{\text{acref}} = (f_{ni}^* - f_{ni} + \gamma_{ni}^{\text{ac}})/k_{ni}^{\text{ac}} \quad (16)$$

$$\begin{cases} e_{ni}^{\text{GFLU}} = -c_{ni}^{\text{ac}} \sum_{nj \in \mathcal{N}_{ni}} a_{nijnj} (C_{ni}^{\text{ac}} - C_{nj}^{\text{ac}}) \\ \gamma_{ni}^{\text{ac}} = e_{ni}^{\text{GFLU}} G_{ni}^{\text{GFLU}}(s) \end{cases} \quad (17)$$

式中: C_{ni}^{acref} 为GFLU- ni 的碳排微增率参考值; γ_{ni}^{ac} 为其二次控制量; e_{ni}^{GFLU} 为GFLU- ni 的一致性控制输入; $G_{ni}^{\text{GFLU}}(s)$ 为GFLU- ni 的PI控制器传递函数。

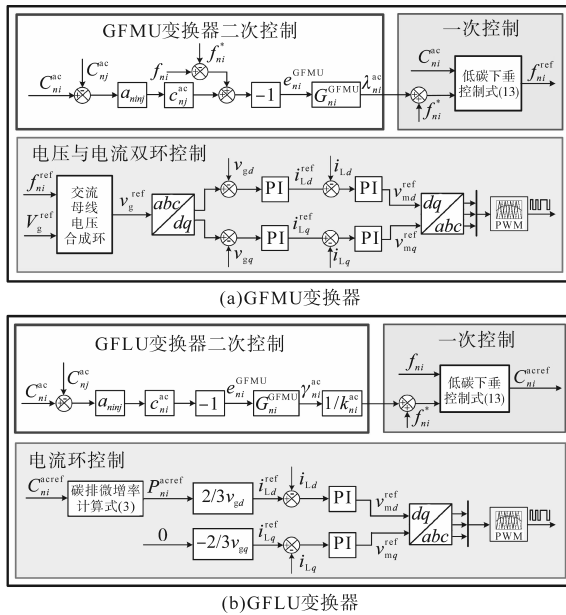


图3 交流微电网分布式低碳控制框图

Fig.3 Distributed low-carbon control diagram for ACMGs

2) 直流微电网分布式低碳控制。本文所提直流微电网分布式低碳控制框图如图4所示。其中,图4a为DU变换器分布式低碳控制框图,图4b为PU变换器分布式低碳控制框图。与交流微电网类似,LFC框架亦可用于DCMG内DUs与

PUs的分布式控制。因此,本文将DUs视为领导者,将PUs视为跟随者,设计了可调度-功率型单元分布式低碳控制。

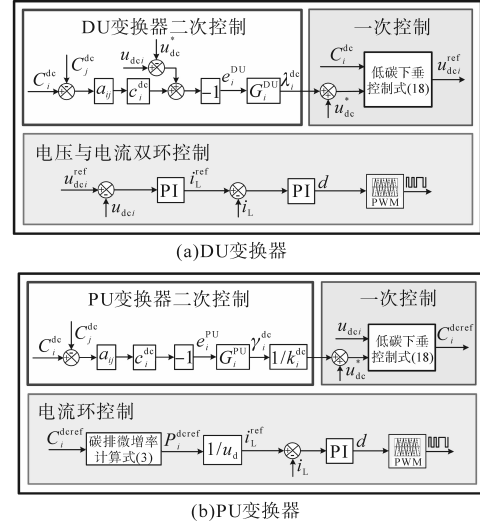


图4 直流微电网分布式低碳控制框图

Fig.4 Distributed low-carbon control diagram for DCMGs

DU与PU变换器一次控制。首先设计低碳下垂控制作为DU与PU变换器的一次控制,低碳下垂控制表达式为

$$\begin{cases} u_{dc} = u_{dc}^* - k_i^{\text{dc}} C_i^{\text{dc}} \\ C_j^{\text{dc}} = (u_{dc}^* - u_{dc})/k_j^{\text{dc}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: C_i^{dc} 为DU- i 的碳排微增率; k_i^{dc} 为DU- i 的低碳下垂系数; C_j^{dc} 为PU- j 的碳排微增率; k_j^{dc} 为PU- j 的低碳下垂系数。

DU与PU变换器二次控制。直流微电网变换器二次控制的主要目标就是在实现对公共直流母线电压恢复的同时,保证各电源按等碳排微增率准则输出有功功率。DU变换器的二次控制表达式为

$$u_{dci}^{\text{ref}} = u_{dc}^* - k_i^{\text{dc}} C_i^{\text{dc}} + \lambda_i^{\text{dc}} \quad (19)$$

$$\begin{cases} e_i^{\text{DU}} = -(u_{dci} - u_{dc}^*) - c_i^{\text{dc}} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (C_i^{\text{dc}} - C_j^{\text{dc}}) \\ \lambda_i^{\text{dc}} = e_i^{\text{DU}} G_i^{\text{DU}}(s) \end{cases} \quad (20)$$

式中: u_{dci}^{ref} 为DU- i 的输出电压参考值; λ_i^{dc} 为其二次控制量; e_i^{DU} 为DU- i 的一致性控制输入; C_j^{dc} 为节点 i 相邻节点传递的信息; c_i^{dc} 为正增益; $G_i^{\text{DU}}(s)$ 为DU- i 的PI控制器传递函数。

PU变换器的二次控制表达式为

$$C_i^{\text{deref}} = (u_{dc}^* - u_{dci} + \gamma_i^{\text{dc}})/k_i^{\text{dc}} \quad (21)$$

$$\begin{cases} e_i^{\text{PU}} = -c_i^{\text{dc}} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (C_i^{\text{dc}} - C_j^{\text{dc}}) \\ \gamma_i^{\text{dc}} = e_i^{\text{PU}} G_i^{\text{PU}}(s) \end{cases} \quad (22)$$

式中: C_i^{dref} 为 PU- i 的碳排微增率参考值; γ_i^{dc} 为其二次控制量; e_i^{pu} 为 PU- i 的一致性控制输入; $G_i^{\text{pu}}(s)$ 为 PU- i 的 PI 控制器传递函数。

2.3.2 网间互联变换器分布式低碳控制策略

网间互联变换器分布式低碳控制框图如图 5 所示。由于在微电网变换器分布式低碳控制中,微电网内的 DGs 已按等碳排微增率准则分配有功功率,因此构网型单元与可调度型单元分别将其所在微电网的电源碳排微增率均值信息传递至网间互联变换器。IC 将所连两微电网碳排微增率均值作差,并代入 PI 控制器中,当系统进入稳态时,PI 控制器输入为“0”,即可实现微电网间的一次低碳控制:

$$\begin{cases} e_n = \overline{C}_n^{\text{ac}} - \overline{C}^{\text{dc}} \\ P_n^{\text{ICref}} = e_n G_n^{\text{IC}}(s) \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\overline{C}_n^{\text{ac}}$, \overline{C}^{dc} 分别为 IC- n 所连微电网的碳排微增率均值; e_n 为 IC- n 两侧微电网的碳排微增率偏差量; $G_n^{\text{IC}}(s)$ 为 PI 控制器传递函数。

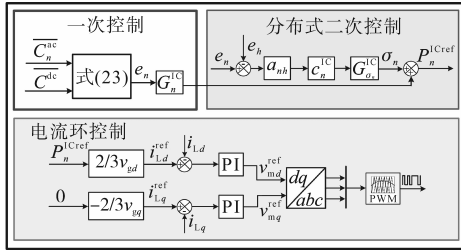


图5 互联变换器分布式低碳控制框图

Fig.5 Distributed low-carbon control diagram for ICs

由式(23)可知,在上述一次低碳控制策略中,各IC仅采集了所连本地微电网的信息进行控制,这种方法易引发不同IC对所连同一微电网功率的争抢,进而引起微电网内 DGs 的功率波动,严重时影响系统的正常运行。为解决此问题,设计了IC的二次控制方法,表达式为

$$\begin{cases} \sigma_n = [c_n^{\text{IC}} \sum_{h \in \mathcal{N}_n} a_{nh} (e_n - e_h)] G_{\sigma_n}^{\text{IC}}(s) \\ P_n^{\text{ICref}} = e_n G_n^{\text{IC}}(s) + \sigma_n \end{cases} \quad (24)$$

式中: σ_n 为 IC- n 的二次控制量; a_{nh} 为 ICs 间的通信权重; e_h 为节点 n 相邻节点信息; c_n^{IC} 为正增益; \mathcal{N}_n 为 IC- n 的相邻节点集; $G_{\sigma_n}^{\text{IC}}(s)$ 为二次控制的 PI 控制器传递函数。

3 仿真验证

为验证本文所提分布式低碳控制策略的有效性,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,详细仿

真参数与电路参数分别如表 1 与表 2 所示,系统内各 DG 的碳排放系数如表 3 所示。仿真模型包含两个交流微电网(ACMG-1, ACMG-2)与一个直流微电网(DCMG),其中,两个 ACMG 内均包含一个 GFMU 与两个 GFLU(GFLU1, GFLU2); DCMG 内包含一个 DU 与两个 PU(PU1, PU2),需注意,仿真模型中的两个 ACMG 与两个 IC 的参数分别一致。

表1 系统仿真参数

Tab.1 System simulation parameters

参数	数值/单位
ACMG 额定频率 f_{ac}^*	50 Hz
ACMG 额定相电压 u_{ac}^*	220 V
DCMG 额定电压 u_{dc}^*	800 V
各微电网 DG 最大功率 P_{max}	50 kW
ACMG 各 DG 下垂系数 k^{ac}	0.89
DCMG 各 DG 下垂系数 k^{dc}	66.73

表2 系统电路参数

Tab.2 System circuit parameters

单元	参数	数值/单位
	直流侧电压	900 V
ACMG	GFMU 的 LC 滤波器参数	2 mH, 150 μF
	GFLU 的 LC 滤波器参数	2 mH, 200 μF
DCMG	低压侧电压	600 V
	各电源的滤波电感	5 mH
IC	LC 滤波器参数	2.5 mH, 200 μF

表3 各微电网分布式电源的碳排放系数

Tab.3 Carbon emission coefficients of DGs in each microgrid

微电网	分布式电源	a	b	c
ACMG	GFMU 的 DG	2.74×10^{-3}	0.85	0.05
	GFLU1 的 DG	2.15×10^{-3}	0.79	0.06
	GFLU2 的 DG	2.02×10^{-3}	0.88	0.04
DCMG	DU 的 DG	3.68×10^{-3}	0.68	0.05
	PU1 的 DG	2.26×10^{-3}	0.71	0.03
	PU2 的 DG	2.35×10^{-3}	0.78	0.06

本文设置如下仿真场景对所提控制策略进行验证:

1)算例1为负荷连续增加场景:各微电网内的负荷进行两次跳变,逐级提高。

2)算例2为通信链路故障场景:在 0.2 s 时, DCMG 内的 PU1 与 PU2 之间的通信链路断开,且 PU2 与 DU 之间的通信权重降低了 60%。

3)算例3为不同策略对比场景:将所提策略与文献[13]中仅考虑功率分配的交直流混合微电网群分布式协同控制策略进行对比。

3.1 算例1:负荷连续增加场景下的仿真验证

算例1各时段微电网的负荷量如表4所示,仿真结果如图6所示。

图6a~图6c为交流微电网频率与公共直流母线电压曲线,由图可知,在不同负荷工况下,所提分布式低碳控制策略均能实现各交流微电网频率与公共直流母线电压恢复至其额定值,各物理量在负荷跳变过程中均波动较小,且可快速恢复至稳态值,保证了系统的稳定、可靠运行。

图6d~图6f为各微电网DGs的碳排微增率曲线,由这些曲线可知:在0 s—0.2 s间,各微电网内的电源碳排微增率曲线重合,说明所提策略能够

表4 算例1的各时间段微电网负荷量

Tab.4 Microgrids load capacity of each time period in case 1

时间段	ACMG-1 P_{Load1}^{ac}/kW	ACMG-2 P_{Load2}^{ac}/kW	DCMG P_{Load}^{dc}/kW
0 s—0.2 s	70	60	60
0.2 s—0.5 s	70	80	60
0.5 s—0.8 s	100	80	60

保证系统内的所有电源碳排微增率相等,实现了微电网群的低碳控制。在0.2 s—0.5 s间,负荷发生跳变,ACMG-1各微电网的碳排微增率能够迅速收敛且保持相等,ACMG-2与DCMG各电源的碳排微增率均能够经过0.15 s左右的动态过程即可恢复至新的稳态值,且保持相等。

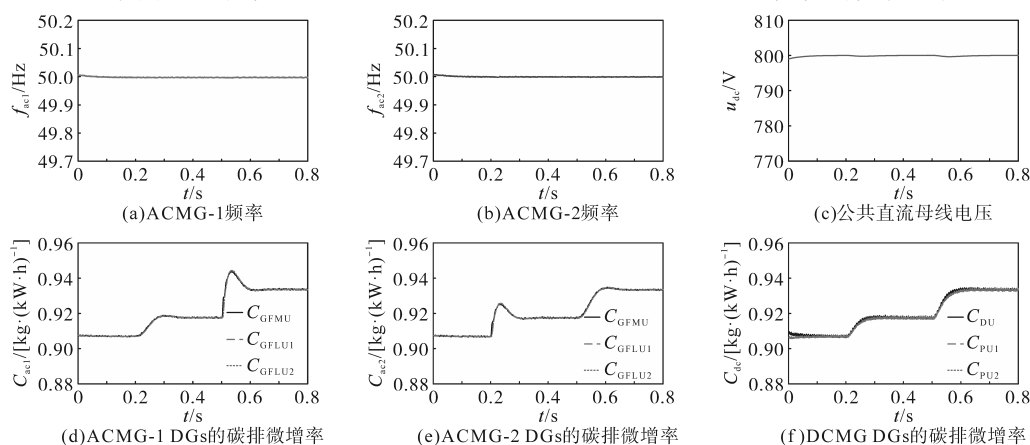


图6 算例1场景下的仿真结果

Fig.6 Simulation results in case 1

3.2 算例2:通信链路故障场景下的仿真验证

算例2在0.3 s时,设置一次系统负荷跳变,跳变量如表5所示。通信链路正常工况与故障工况的仿真结果分别如图7、图8所示。

由图8可知,PU1与PU2的通信链路断开后,系统发生负荷跳变,此时DCMG的通信拓扑仍保

持连通性,所提策略依旧能够保证微电网群内的DGs按等碳排微增率准则分配有功功率。但对比图7c与图8c的局部放大图可知:0.3 s后,通信链路故障工况下的DCMG由于通信拓扑发生改变,且部分正常通信链路的通信权重降低,各分布式电源碳排微增率的收敛速度明显下降。

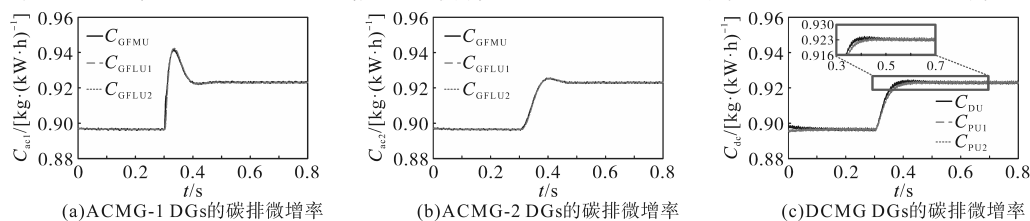


图7 算例2通信链路正常工况下的仿真结果

Fig.7 Simulation results of communication link under normal working conditions in case 2

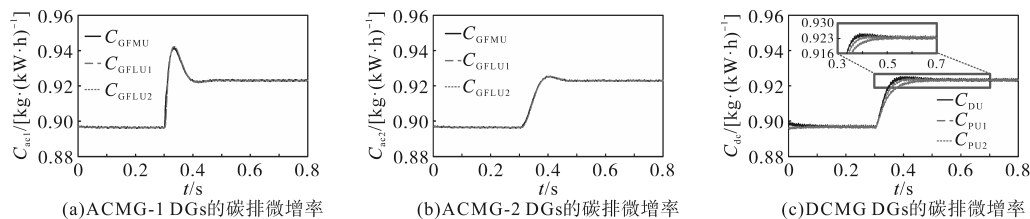


图8 算例2通信链路故障工况下的仿真结果

Fig.8 Simulation results of communication link under faulty conditions in case 2

表5 算例2的各时间段微电网负荷量

Tab.5 Microgrids load capacity of each time period in case2

时间段	ACMG-1 P_{Load1}^{ac}/kW	ACMG-2 P_{Load2}^{ac}/kW	DCMG P_{Load}^{dc}/kW
0 s—0.3 s	50	60	60
0.3 s—0.8 s	100	60	60

3.3 算例3:不同策略对比场景下的仿真验证

算例3的系统各时段负荷工况与算例2相同,两种方法的仿真结果分别如图9与图10所示。图9a~图9c与图10a~图10c为不同策略下的交流微电网频率与公共直流母线电压曲线,对比两组图,文献[13]与本文所提策略在负荷变化时均可以实现频率与公共直流母线电压相对于其额定值的恢复。

图9d~图9f为传统策略下微电网群内各DG的碳排微增率。由图可知,文献[13]策略下的各微电网DGs的碳排微增率并不一致,说明需降低碳排放量较高DGs出力的同时,适当提升碳排放较低DGs的出力,以降低系统的总碳排放量。

图10d~图10f为本文所提策略下微电网群内各DG的碳排微增率。由图可知,所提策略下的DGs在进行功率分配时充分考虑了自身碳排放,各微电网DGs的碳排微增率在不同负荷工况下均保持一致,说明该策略可以自适应地促进微电网群内碳排微增率较低的DGs优先为负荷供电,实现系统的低碳控制。

为了更加直观地展示所提方法的优势,本文引入方差指标。方差是衡量一组数据离散程度的度量,其值越大,说明数据越不集中。表6与表7分别为文献[13]与本文所提方法下各微电网分布式电源碳排微增率的方差值。

由表6可知,文献[13]所提方法下的各微电网DGs碳排微增率方差均不为“0”,说明各组数据均较为离散;且两ACMG在0.3 s—0.8 s间的方差值最大,说明数据最为离散,此现象也可以由图9d、图9e观察到。因此,该方法无法实现各DG按等碳排微增率的准则分配输出功率。

由表7可知,在本文所提方法下,碳排微增率

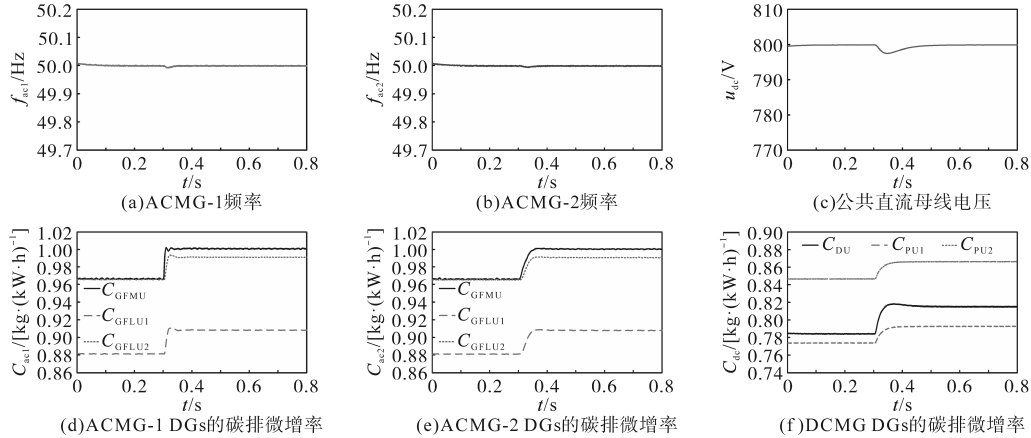


图9 算例3场景下文献[13]策略下的仿真结果

Fig.9 Simulation results of the proposed strategy of reference [13] in case 3

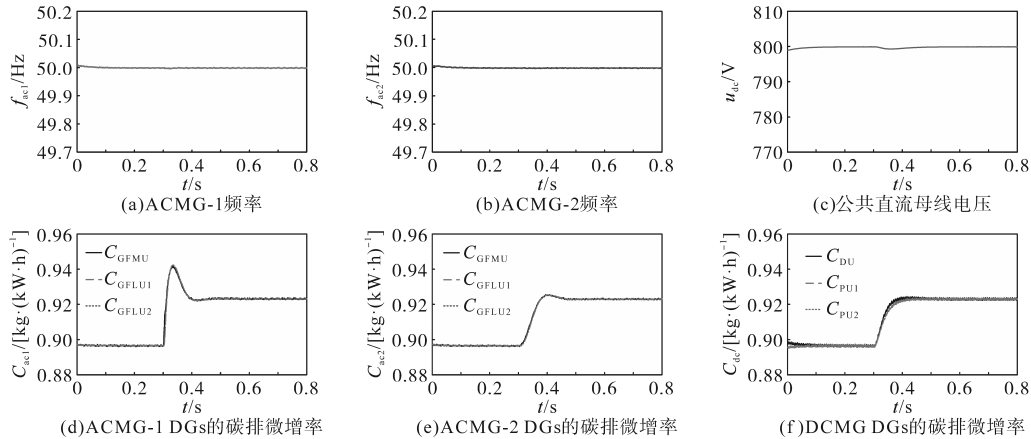


图10 算例3场景下所提策略下的仿真结果

Fig.10 Simulation results of the proposed strategy in case 3

的方差均为“0”,说明各微电网的碳排微增率集中且相等;且由图10d~图10f可知,不同微电网的DGs碳排微增率同样相等,说明本文所提方法可保证各DG按等碳排微增率的准则分配输出功率,实现系统的低碳控制。

图11为不同控制策略下的系统碳排放量曲线。由图可知,所提控制策略能够显著降低系统的碳排放量。经计算,与文献[13]中策略相比,本文所提策略的碳排放量,在不同负荷工况下均可降低约2.6%。

表6 各微电网的分布式电源碳排微增率方差(文献[13]方法)

Tab.6 Variance of incremental carbon emissions of DGs in each microgrid (method in reference[13])		
微电网	时间段	方差 $\sigma/[\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]^2$
ACMG-1	0 s—0.3 s	1.6×10^{-3}
	0.3 s—0.8 s	1.7×10^{-3}
ACMG-2	0 s—0.3 s	1.6×10^{-3}
	0.3 s—0.8 s	1.7×10^{-3}
DCMG	0 s—0.3 s	1.0×10^{-3}
	0.3 s—0.8 s	0.9×10^{-3}

表7 各微电网的分布式电源碳排微增率方差(所提方法)

Tab.7 Variance of incremental carbon emissions of DGs in each microgrid (method proposed)		
微电网	时间段	方差 $\sigma/[\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]^2$
ACMG-1	0 s—0.3 s	0
	0.3 s—0.8 s	0
ACMG-2	0 s—0.3 s	0
	0.3 s—0.8 s	0
DCMG	0 s—0.3 s	0
	0.3 s—0.8 s	0

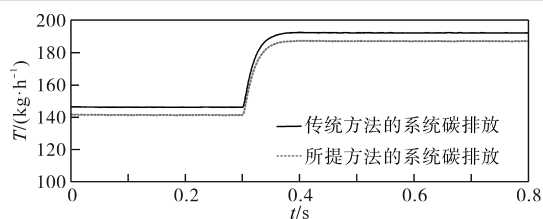


图11 不同方法下的微电网群碳排放量

Fig.11 Carbon emissions of the microgrid cluster under different methods

4 结论

本文提出一种孤岛交直流混合微电网群分布式低碳控制策略,可优化微电网群内各电源间的功率分配过程,降低系统的通信复杂度与碳排放量,实现其短时间尺度内的低碳控制,并得到如下结论:

1)所提策略通过定义分布式电源的碳排微

增率,并将其引入各变换器的分布式控制环节中,保证交流微电网频率与公共直流母线电压恢复的同时,实现了系统的分布式低碳控制。经计算,相较于传统方法,本文所提策略在算例系统的不同工况下,碳排放量降低约2.6%。

2)研究成果可应用于微电网或微电网群的示范工程中,且基本控制原理已在本文与类似已有研究中进行了多场景验证,因此具有较高的实际应用价值。

3)所提策略仅讨论了正常工况与通信链路故障工况下的微电网群分布式控制,后续研究将进一步考虑网络攻击下的分布式二次弹性控制方法。

参考文献

- [1] 张基岳,任洲洋,姜云鹏,等.微电网定碳排运行域:理论、构建与观测[J].电工技术学报,2024,39(8):2342-2359.
ZHANG Jiyue, REN Zhouyang, JIANG Yunpeng, et al. Committed carbon emission operation region of microgrids: theory, construction and observation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2342-2359.
- [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.
- [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.
- [4] 曹敏,俞文瑾,白泽洋,等.碳足迹强约束下的混合储能微电网分布式协调控制算法[J].电气传动,2024,54(6):16-21,96.
CAO Min, YU Wenjin, BAI Zeyang, et al. Distributed coordinated control algorithm for hybrid energy storage microgrid constrained by carbon footprint[J]. Electric Drive, 2024, 54(6): 16-21, 96.
- [5] DU W, SCHNEIDER K P, WIEGAND G P, et al. A supplemental control for dynamic voltage restorers to improve the primary frequency response of microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 878-888.
- [6] WANG J, DONG C, JIN C, et al. Distributed uniform control for parallel bidirectional interlinking converters for resilient operation of hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(1): 3-13.
- [7] 郑凯元,杜文娟,王海风.混联多微电网系统动态交互作用

- 及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5552-5569.
- ZHENG Kaiyuan, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Analysis on dynamic interactions and stability of hybrid multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5552-5569.
- [8] 王力, 胡佳成, 曾祥君, 等. 基于混合储能的交直流混联微电网功率分级协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2311-2324.
- WANG Li, HU Jiacheng, ZENG Xiangjun, et al. Hierarchical coordinated power control strategy for AC-DC hybrid microgrid with hybrid energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2311-2324.
- [9] AHMED M, MEEGAHAPOLA L, DATTA M, et al. A novel hybrid AC/DC microgrid architecture with a central energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 2060-2070.
- [10] 熊雄, 吴鸣, 季宇, 等. 微电网混合协调控制及功率管理策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1419-1427.
- XIONG Xiong, WU Ming, JI Yu, et al. Power management and coordinated control strategy research of multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1419-1427.
- [11] 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.
- [12] WU X, XU Y, WU X, et al. A two-layer distributed cooperative control method for islanded networked microgrid systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 942-957.
- [13] ZHOU J, ZHANG H, SUN Q, 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.
- [14] 王钰, 郝毅, 王磊, 等. 基于改进粒子群算法的多能微网多目标优化调度[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 29-36, 59.
- WANG Yu, HAO Yi, WANG Lei, et al. Multi-objective optimal dispatching for multi-energy microgrid based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 29-36, 59.
- [15] 张世旭, 李姚旺, 刘伟生, 等. 面向微电网群的云储能经济-低碳-可靠多目标优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1): 21-30.
- ZHANG Shixu, LI Yaowang, LIU Weisheng, et al. Economic, low-carbon and reliable multi-objective optimal configuration method of cloud energy storage for microgrid clusters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 21-30.
- [16] DONG H, FU Y, JIA Q, et al. Low carbon optimization of integrated energy microgrid based on life cycle analysis method and multi time scale energy storage[J]. Renewable Energy, 2023, 206: 60-71.
- [17] 严金炜, 谭露, 刘念, 等. 基于碳流追溯的多微电网系统电碳耦合交易方法[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 39-53.
- YAN Jinwei, TAN Lu, LIU Nian, et al. Electricity-carbon coupling trading for multi-microgrids system based on carbon flow tracing[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 39-53.
- [18] YAN M, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Blockchain for transacting energy and carbon allowance in networked microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4702-4714.
- [19] 李静, 杨鹏程, 韦巍, 等. 交直流混联配用电系统多模式减排调控策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 52-60.
- LI Jing, YANG Pengcheng, WEI Wei, et al. Regulation and control strategy of multi-mode emission reduction for hybrid AC/DC power distribution and consumption system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 52-60.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] LI X, WANG M, DONG C, et al. Distributed unified control for global economic operation and resilience reinforcement of hybrid AC-DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(7): 9077-9089.
- [23] SINGHAL A, VU T L, DU W. Consensus control for coordinating grid-forming and grid-following inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 4123-4133.
- [24] WANG J, HUANG W, TAI N, et al. A bidirectional virtual inertia control strategy for the interconnected converter of standalone AC/DC hybrid microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 745-754.
- [25] 李松, 李建伟, 董云飞, 等. 多子微电网型交直流混合配电系统灵活功率控制与电压抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 99-106.
- LI Song, LI Jianwei, DONG Yunfei, et al. Flexible power control and voltage suppression strategy for hybrid AC/DC distribution system with multi-microgrids[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 99-106.

收稿日期: 2024-07-02

修改稿日期: 2024-10-10