

分布式储能接入的柔性直流互联微网群 低碳控制策略

徐彬¹, 崔文庆¹, 曹桓熙², 陈培育¹, 李谦¹, 金昱²

(1. 国网天津市电力公司 电力科学研究院, 天津 300384;

2. 天津大学 智能配用电装备与系统全国重点实验室, 天津 300072)

摘要: 在双碳目标的驱动下, 为有效降低分布式储能接入的柔性直流互联微网群的碳排放、提升系统控制灵活性, 提出了一种低碳控制策略。首先, 提出一种柔性直流互联的微电网群拓扑, 并基于该拓扑分析微电网群内分布式储能等电源的碳排放及低碳控制特性。其次, 确立微电网与微电网群两级控制目标, 据此构建一种分层低碳控制架构, 该架构分为微电网控制层级与微电网群控制层级两部分, 为后续低碳控制策略的设计提供关键参考。然后, 基于前述架构, 提出一种微网群低碳控制策略, 该策略在微电网控制层级, 通过将碳排放微增率引入基于一致性算法的分布式控制结构, 实现微电网内分布式储能等电源间的低碳控制和母线频率的恢复; 在微电网群控制层级, 通过设计网间互联变换器的控制模式, 使微电网群能够以多种形式与直流配电网进行电力交互, 满足上级配电网的多样化供电需求; 最后, 仿真结果验证了所提低碳控制策略的有效性与优越性。

关键词: 柔性直流互联微电网群; 低碳控制; 多模式控制; 一致性框架; 分布式储能; 微型燃气轮机

中图分类号: TM72 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed27050

Low-carbon Control Strategy for Flexible DC Interconnected Microgrids Cluster with Distributed Energy Storage Access

XU Bin¹, CUI Wenqing¹, CAO Huanxi², CHEN Peiyu¹, LI Qian¹, JIN Yu²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China;

2. State Key Laboratory of Smart Power Distribution Equipment and System, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Driven by the dual-carbon goals, to effectively reduce the carbon emissions of flexible DC interconnected microgrids cluster and enhance the flexibility of system control, a low-carbon control strategy was proposed. Firstly, a topology of flexible DC interconnected microgrids cluster was proposed, and the carbon emission and low-carbon control characteristic of each distributed generator within the microgrids cluster were analyzed. Secondly, two-level control objectives for microgrid and microgrids cluster were established, based on which a hierarchical low-carbon control architecture was constructed. This architecture was divided into two parts: the microgrid control layer and the microgrids cluster control layer, providing key references for the subsequent design of the low-carbon control strategy. Then, based on the aforementioned architecture, a low-carbon control strategy for microgrids cluster was proposed. In the microgrid control layer, by introducing the incremental carbon emissions into the distributed control structure based on the consensus algorithm, the low-carbon control among DGs within the microgrid and the restoration of bus frequency were achieved. In the microgrids cluster control layer, by designing the control modes of interlinking converters, the microgrids cluster can conduct power interaction with the DC distribution network in multiple forms, thereby meeting the diverse power supply demands of the upper-level. Finally, simulation results verify the effectiveness and superiority of the proposed low-carbon control strategy.

基金项目: 天津市科技计划项目(24ZXKJGX00040); 国网天津市电力公司科技项目(电科-科技项目2025-13)

作者简介: 徐彬(1993—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为新能源及储能并网运行控制, Email: xubinsdu@163.com

通讯作者: 曹桓熙(2003—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源并网运行控制, Email: caohuanxi@tju.edu.cn

Key words: flexible DC interconnected microgrids cluster; low-carbon control; multi-mode control; consensus framework; distributed energy storage; micro gas turbine

随着我国经济社会的高速发展,传统化石能源消耗不断增加,全球气候变暖等环境问题日益突出。为了应对这一挑战,我国提出“双碳”战略目标,旨在推动能源结构向绿色低碳转型,因此,近年来,以光伏和风机为代表的分布式电源(distributed generators, DGs)得到了快速发展^[1]。然而,由于新能源发电的随机波动性,配电网面临功率和电压越限等稳定性问题^[2],为配电网的安全稳定运行带来了严峻挑战^[3]。在此情况下,微电网通过整合分布式电源、储能和控制系统,实现了局部能量优化和并网缓冲,提升了电力系统的弹性与恢复力^[4-5],已成为接纳分布式电源的有效手段^[6]。然而,单一微电网受限于容量和抗扰能力,难以应对大规模新能源消纳和电网复杂运行需求^[7]。因此,微电网群通过互联多个微电网形成协同系统^[8],结合直流配电网的低损耗、高可靠性及无需相频控制等优势^[9],成为未来发展方向。同时,柔性直流互联技术能进一步提升微电网群的能量交换效率和稳定性^[10-11],使得柔性直流互联的微电网群成为微电网群未来的主要形式,备受研究关注。

在微电网及微电网群控制领域,国内外相关研究已取得了一系列成果。文献[12]采用分层协调模型实现有功分配与电压调节,具备成本更低、鲁棒性突出的优势。文献[13]提出一种基于线性电压控制器的交流微电网改进型下垂控制策略,可有效抑制由微电网模式切换引发的频率和电压波动。文献[14]提出了一种微电网群功率协调控制策略,该策略实现了母线电压的安全稳定运行。上述研究虽在电压恢复与功率分配方面取得一定成效,却未涉及运行过程中系统碳排放量的控制问题。

目前微电网群的碳减排控制多用于DG的发电调度^[15],通过优化调度策略实现碳排放最小化与经济性平衡。文献[16]构建充能型微网互联系统,在多种运行模式下优化DG出力,减少化石能源依赖,提升整体低碳效率。文献[17]引入阶梯碳交易机制与碳配额限制,采用多微网合作博弈调度模式,实现整体系统碳排放量降低。文献[18]针对孤岛微电网,采用多时间尺度调度模式实现碳流与能流协同,通过年度净零排放约束实

现碳减排目标。文献[19]通过设置多种调度模式并结合碳配额限制,实现电-气综合能源系统的低碳高效运行。

现有关于低碳的研究主要集中于系统上层的优化调度与能量管理层面,然而该层级与设备控制层之间存在着显著的时间尺度差异^[20]。这种时间尺度上的不匹配性,特别是在孤岛运行的交直流混合微电网群系统中,将严重制约系统在多个时间尺度下的协调控制能力,同时也难以适应系统多种运行模式之间的灵活切换需求,最终影响整个微电网群系统低碳控制目标的实现效果。

为此,本文提出一种分布式储能接入的柔性直流互联微电网群低碳控制策略。首先,给出一种柔性直流互联的微电网群拓扑,在此基础上,分析了微电网群内分布式储能等电源的碳排放与低碳控制特性。其次,制定微电网与微电网群两个层级的控制目标,并构建分层低碳控制架构,为控制策略的设计提供重要参考。然后,提出一种低碳控制策略,在微电网控制层级,通过将碳排放微增率引入基于一致性算法的分布式控制结构中,实现微电网内DG间的低碳控制;在微电网群控制层级,设计多样化的网间互联变换器(interlinking converters, ICs)控制模式,满足上级配电网的多样化供电需求。最后,仿真结果验证了本文提出的低碳控制策略的有效性和优越性。

1 分布式储能接入的微电网群拓扑及低碳控制特性分析

本节首先介绍柔性直流互联微电网群拓扑,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 分布式储能接入的柔性直流互联微电网群拓扑结构

本文研究的柔性直流互联微电网群如图1所示,数个交流微电网通过互联变换器接入直流电网低压母线,直流母线接入一部分系统负荷。各交流微电网内包含若干构网型单元(grid-forming units, GFMs)与跟网型单元(grid-following units, GFLUs),构网型单元为分布式储能(distributed energy storage, DES);跟网型单元为分布式储能

或微型燃气轮机(micro gas turbine, MGT)。图1为了方便展示,将微电网内所有跟网型单元的

源均绘制为微型燃气轮机,在实际应用时可根据情况与分布式储能按一定比例配置。

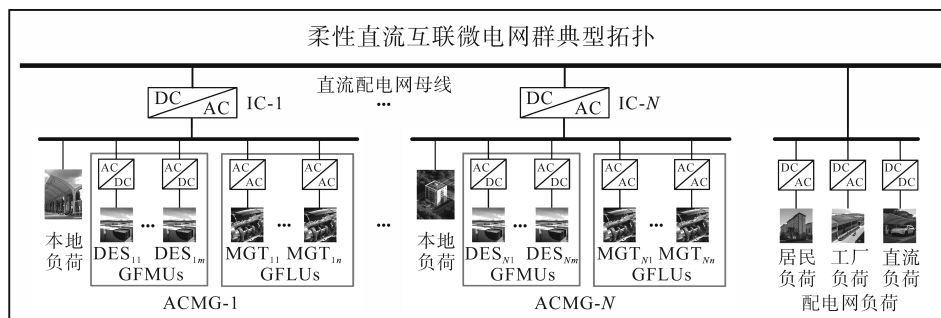


图1 柔性直流互联微电网群拓扑

Fig.1 Topology of flexible DC interconnected microgrids cluster

在柔性直流互联微电网群中,交流微电网内的GFMUs通常采用下垂控制,通过采集自身输出功率生成频率与电压幅值参考,为交流微电网母线提供支撑;GFLUs同样可以采用下垂控制,通过采集母线频率参与系统的有功功率调节。上述DGs均可以直接参加系统的功率管理,本文为便于分析,将风力发电机、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。

图1的微电网群内包含 N 个交流微电网,各微电网内含有 m 个构网型单元与 n 个跟网型单元。 $m, n \in N_{DG}^a = \{1, 2, \dots, m, \dots, m+n\}$, 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。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。

柔性直流互联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。

1.2 分布式储能接入的柔性直流互联微电网群低碳特性分析

本文研究的微电网群碳排放主要源于其分布式电源的发电过程。对于分布式储能,在生产过程中,其核心部件的制造需要依赖化石能源,进而产生“先天碳排放”;在运行阶段,自身产生的损耗将间接转化为系统的额外碳排放;在退役阶段,复杂构件的拆解、材料的分离过程亦会产生碳排放。上述碳排放均可视为与其吸收或释放的有功功率呈正相关。对于微型燃气轮机,其运行过程中产生的碳排放可与有功出力直接产生联系。因此,DG出力与碳排放的关联可表述为

$$C = \alpha P^2 + \beta P + \sigma \quad (1)$$

式中: C 为DG的碳排放量; P 为DG有功出力; α, β, σ 为DG碳排放系数,这类系数可以基于燃料消耗系数经计算得出。

微电网群低碳控制的核心目标在于通过制定适当的控制策略,使系统总碳排放量达到最小。这一控制问题可构建为如下优化模型:

$$\begin{cases} \min C_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{im+in} C_{ij}(P_{ij}) \\ P_{ij}^{\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{\max} \\ \sum_{j=1}^{im+in} P_{ij} = P_{\text{Load}i} - P_i^{\text{IC}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_{sum} 为系统总碳排放量; $C_{ij}, P_{ij}, P_{ij}^{\max}, P_{ij}^{\min}$ 分别为ACMG- i 内第 ij 个DG的碳排放量、有功出力及其上、下限; $P_{\text{Load}i}$ 为ACMG- i 的本地负荷; P_i^{IC} 为与ACMG- i 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,定义DG的碳排微增率表达式为

$$c = \partial C / \partial P = 2\alpha P + \beta \quad (3)$$

式中: c 为DG的碳排微增率。

最后,根据拉格朗日乘数法,当柔性直流互联微电网群内所有DG的碳排微增率相等时,系统的碳排放量将达到最小,即

$$\begin{cases} c_{i1} = \dots = c_{ij} = c_{im+in} & \text{微电网低碳控制} \\ c_1 = \dots = c_i = c_N & \text{微电网群低碳控制} \end{cases} \quad (4)$$

式中: c_{im+in} 为ACMG- i 内第 $m+n$ 个DG的碳排微增率数值; c_i 为ACMG- i 的碳排微增率,其数值与其内的DG相同; c_N 为ACMG- N 的碳排微增率。

2 分布式储能接入的柔性直流互联微电网群低碳控制策略

本节首先介绍一致性算法基本原理;接着制

定柔性直流互联微电网群的低碳控制目标;然后根据控制目标,构建分层低碳控制架构;最后提出一种分布式储能接入的柔性直流互联微电网群低碳控制策略。

2.1 一致性算法原理

2.1.1 多智能体的图模型

本文将第1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。 $\mathcal{N}_i=\{j\in V:(i,j)\in E\}$ 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 $j\in\mathcal{N}_i$ 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:

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

式中: l_{ij} 为拉普拉斯矩阵 L 的元素。

2.1.2 一致性框架

在后续对于微电网群控制策略的设计中,采用基于“领导者-跟随者”的一致性(leader-follower consensus, LFC)框架,一致性框架因在基础架构、核心技术等方面与分布式结构具有较强的适配性,因此作为典型算法之一,在微电网的分布式控制中得到了广泛应用。LFC框架把通信网络中的部分智能体划分为领导者,它们在遵循一致性协议的同时,需达成额外的控制目标;另一部分智能体则作为跟随者,仅遵循一致性协议。

本节设置节点集 $D=\{1,\dots,M\}$ 内的前 p 个节点为领导者,后 q 个节点为跟随者($p+q=M$)。领导者节点集定义为 $D_l=\{1,\dots,p\}$,跟随者节点集可定义为 $D_f=\{p+1,\dots,q\}$ 。由此可以制定跟随者的一致性协议为

$$u_i=-\sum_{j\in\mathcal{N}_i} a_{ij}(x_i-x_j) \quad i\in D_f \quad (6)$$

式中: u_i 为节点 i 的一致性控制输入; x_i 为节点 i 的状态量; x_j 为 x_i 的相邻节点。

领导者的一致性协议以式(6)为基础,增添了一个外部输入,可表示为

$$u_i=-\sum_{j\in\mathcal{N}_i} a_{ij}(x_i-x_j)+\tau_i \quad i\in D_l \quad (7)$$

式中: τ_i 为外部输入,它能够促使系统中的全部智能体按既定方式达成一致性协议。

2.2 分布式储能接入的柔性直流互联微电网群低碳控制架构

本节首先介绍柔性直流互联微电网群的低碳控制目标,接着基于制定的目标,构建一种分层低碳控制架构。

2.2.1 柔性直流互联微电网群的低碳控制目标

1)微电网控制目标。此处主要针对分布式电源的变换器,保证微电网级的低碳控制与可靠供电。

① 将各微电网的母线频率恢复至其额定参考值:

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

式中: f_o, f_o^* 分别为 ACMG- o 的交流母线角频率及其额定值。

② 实现微电网内的分布式电源按等碳排微增率的原则分配输出功率:

$$c_{o1}=\dots=c_{om}=c_{om+1}=\dots=c_{om+on} \quad (9)$$

式中: c_{om} 为 ACMG- o 内第 m 个构网型单元的碳排微增率; c_{om+on} 为 ACMG- o 内第 n 个跟网型单元的碳排微增率。

2)微电网群控制目标。此处主要针对各互联变换器,保证微电网群在多运行模式下的低碳控制与向直流配电网的可靠供电。

① 直接功率控制模式。为了满足直流配电网的系统负荷或网络损耗等约束,上级调度中心需控制配电网各节点的功率大小与流向,此时互联变换器需按指令运行于直接功率控制模式,促使微电网群按参考值向配电网输出/吸收功率,该目标可表示为

$$P_o^{IC}=P_{\text{Load}o}-\sum_{oi=1}^{om+on} P_{oi}=P_o^{IC\text{ref}} \quad (10)$$

式中: P_o^{IC} 为第 o 个互联变换器 IC- o 的传输功率; P_{oi} 为 ACMG- o 内第 i 个分布式电源的输出功率; $P_{\text{Load}o}$ 为其本地负荷; $P_o^{IC\text{ref}}$ 为 IC- o 收到的功率参考指令。

由图1可知,各微电网通过所连 IC 接入直流母线,因此这里将 IC 的标号与所连微电网标号相统一。

② 低碳控制模式。一般情况下,直流配电网希望微电网群以低碳的控制方式与其进行功率互动,满足自身负荷,即实现式(4)中的第二个子式,控制目标可表示为

$$c_1=\dots=c_o=\dots=c_N=c^{\text{ref}} \quad (11)$$

式中: c^{ref} 为上级调度中心发布的碳排微增率参考

指令。

系统可基于后文介绍的低碳控制策略,通过优化各IC的传输功率实现上述控制目标,从而保证碳排放低的微电网优先上网供电,实现微电网群层级的低碳控制。

③ 碳排放限额控制模式。在考虑降低系统碳排放的能量管理与碳交易过程中,往往需要配电网对自身节点接入子系统的碳排放量进行一定限制。在本文研究的柔性直流互联微电网群中,上级直流配电网调度中心可根据优化或交易结果制定碳排放指令,微电网群则需要设计合适的控制策略实现各微电网的碳排放满足该指令,控制目标可表示为

$$C_o = C_o^{\text{ref}} \quad (12)$$

式中: C_o 、 C_o^{ref} 分别为ACMG- o 内各DG的总碳排放量及其限定值。

2.2.2 柔性直流互联微电网群的分层低碳控制架构

本节所提柔性直流互联微电网群的分层低碳控制架构如图2所示,由微电网控制层级与微电网群控制层级构成,两部分之间协调配合,实现微电网群在多运行模式下的低碳、稳定控制。

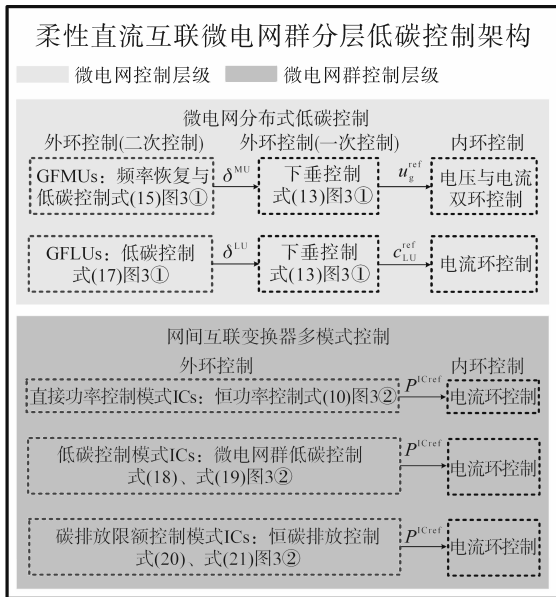


图2 柔性直流互联微电网群分层低碳控制架构

Fig.2 Hierarchical distributed low-carbon control structure of flexible DC interconnected microgrids cluster

1) 微电网控制层级。微电网控制层级用以实现2.2.1节中的微电网控制目标,其控制对象为构网型单元与跟网型单元变换器。该层级由外环控制与内环控制组成,其中外环控制包含一次控制与二次控制。外环一次控制采用后文所提

的低碳下垂控制,在无通信条件下实现微电网内各电源碳排微增率趋于一致。外环二次控制采用分布式协同控制结构,以解决低碳下垂控制导致的母线频率偏差问题,同时保证各电源按等碳排微增率的原则分配输出功率。内环控制中,构网型单元采用电压与电流双环结构;跟网型单元采用电流环结构,实现对外环参考值的快速追踪。

2) 微电网群控制层级。微电网群控制层级用以实现2.2.1节中的微电网群控制目标,其控制对象为微电网间互联变换器。该层级同样由外环控制与内环控制组成,其中外环控制按上级指令可分为三种不同控制模式。首先是直接功率控制模式,功能为保证微电网群快速响应上级功率指令。其次是低碳控制模式,功能为通过IC间的信息交互与功率调整,满足上级碳排微增率指令,实现系统级低碳控制。最后是碳排放限额控制模式,功能为控制微电网群总碳排放量,符合上级调度中心的限制要求。外环的三种控制模式均生成网间互联变换器电流参考值,内环采用电流控制环实现对其的准确追踪。

2.3 分布式储能接入的柔性直流互联微电网群低碳控制策略

本节设计的柔性直流互联微电网群低碳控制策略如图3所示,基于所提低碳控制架构,策略仍然分为微电网控制层级与微电网群控制层级两部分。在微电网控制层级中,本节提出微电网构网-跟网型单元分布式低碳控制策略;在微电网群控制层级中,本节提出网间互联变换器多模式控制策略。

2.3.1 微电网构网-跟网型单元分布式低碳控制策略

本节所提微电网构网-跟网型单元分布式低碳控制策略如图3中的控制结构①所示,利用2.1.2节所述“领导者-跟随者”的一致性框架,将构网型单元视为领导者,跟网型单元视为跟随者。其中,跟网型单元主要与构网型单元进行碳排微增率信息交互,进而实现微电网层级的低碳控制;构网型单元在进行碳排微增率优化的基础上,将母线频率恢复至其额定值。

1) GFMU与GFLU变换器外环控制。

① 外环一次控制。本节将低碳下垂控制作为两类变换器的外环一次控制,该控制通过将各单元碳排微增率带入下垂公式中,实现微电网在无通信条件下的低碳控制。

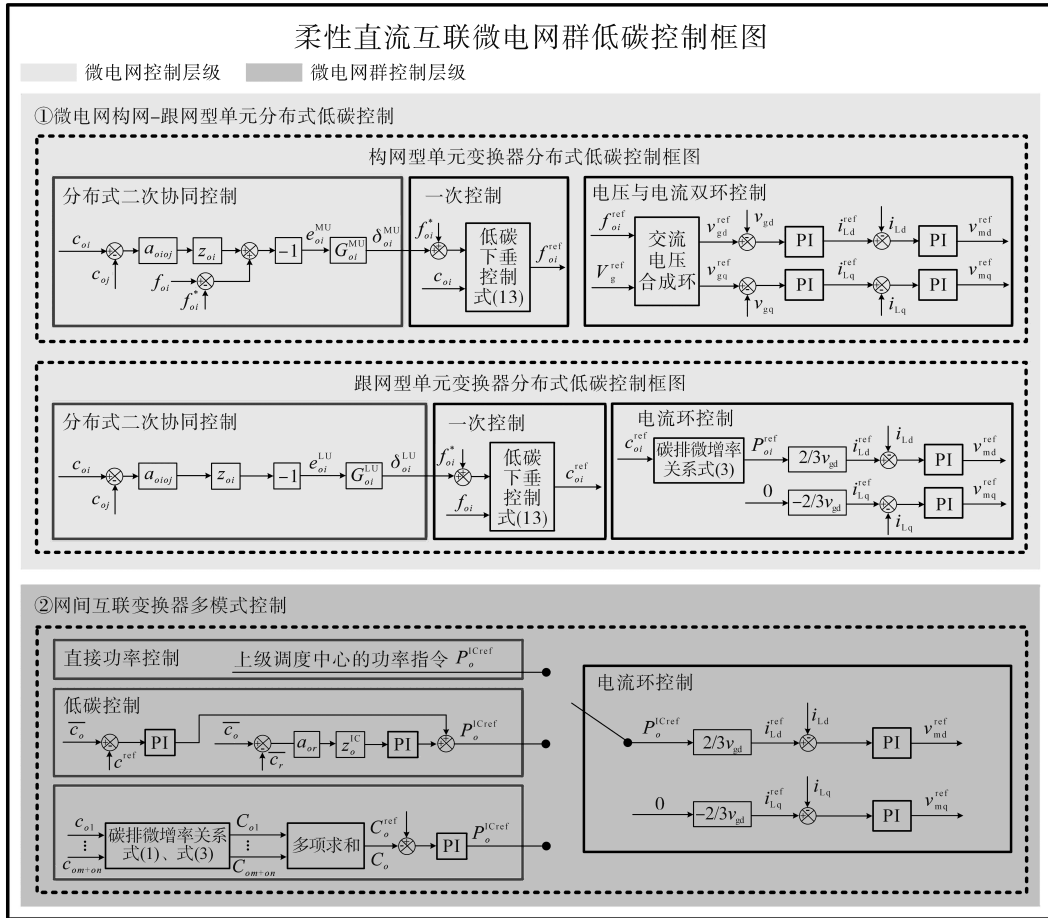


图3 柔性直流互联微电网群低碳控制框图

Fig.3 Low-carbon control diagram of flexible DC interconnected microgrids cluster

基于经典下垂控制,将碳排微增率代替输出功率,进而形成的两类变换器低碳下垂控制表达式为

$$\begin{cases} f_{oi} = f_{oi}^* - d_{oi}c_{oi} \\ c_{oj} = (f_{oj}^* - f_{oj})/d_{oj} \end{cases} \quad (13)$$

式中: f_{oi}, f_{oi}^* 分别为ACMG- o 内第 i 个构网型单元输出的母线频率及其额定值; d_{oi} 为其低碳下垂系数; c_{oi} 为其碳排微增率; f_{oj}, f_{oj}^* 分别为第 j 个跟网型单元采集的母线频率及其额定值; d_{oj} 为其下垂系数; c_{oj} 为其碳排微增率。

由式(13)可知,在实际应用中,由于频率为系统的全局变量,因此仅将各单元下垂系数设置为相同,即可实现微电网内各电源碳排微增率相等,但会引起频率相较于额定值的偏差,需要设计二次控制策略解决以上问题。

②外环二次控制。本节基于一致性框架,设计构网型与跟网型单元的外环分布式二次控制结构,在保证母线频率恢复至其额定值的同时,实现微电网内各电源按等碳排微增率的原则分配输出功率。

分布式二次控制通过生成一次下垂控制的调整量,平移下垂曲线,实现上述目标。GFMU的二次控制表示为

$$f_{oi}^{ref} = f_{oi}^* - d_{oi}c_{oi} + \delta_{oi}^{MU} \quad (14)$$

$$\begin{cases} e_{oi}^{MU} = -(f_{oi} - f_{oi}^*) - z_{oi} \sum_{\forall oj \in \mathcal{N}_i} a_{oi oj} (c_{oi} - c_{oj}) \\ \delta_{oi}^{MU} = e_{oi}^{MU} G_{oi}^{MU}(s) \end{cases} \quad (15)$$

式中: δ_{oi}^{MU} 为二次控制生成的GFMU- oi 的一次调整量; e_{oi}^{MU} 为GFMU- oi 的一致性控制输入; z_{oi} 为数值为正的增益; $a_{oi oj}$ 为GFMU- oi 与其相邻节点间的通信权重; \mathcal{N}_i 为节点 oi 的相邻节点集; c_{oj} 为相邻节点发送的信息; $G_{oi}^{MU}(s)$ 为PI控制器传递函数。

GFLU的二次控制表达式为

$$c_{oi}^{ref} = (f_{oi}^* - f_{oi} + \delta_{oi}^{LU})/d_{oi} \quad (16)$$

$$\begin{cases} e_{oi}^{LU} = -z_{oi} \sum_{\forall oj \in \mathcal{N}_i} a_{oi oj} (c_{oi} - c_{oj}) \\ \delta_{oi}^{LU} = e_{oi}^{LU} G_{oi}^{LU}(s) \end{cases} \quad (17)$$

式中: δ_{oi}^{LU} 为二次控制生成的GFLU- oi 的一次调整量; c_{oi}^{ref} 为生成的碳排微增率参考值; e_{oi}^{LU} 为GFLU-

oi 的一致性控制输入; $G_{oi}^{LU}(s)$ 为PI控制器传递函数。

2) GFMU与GFLU变换器内环控制。对于GFMU变换器,由式(14)可知,外环控制最终生成母线电压参考值,内环则采用电压与电流双环控制结构,实现对该参考值的准确追踪。对于GFLU变换器,由式(16)可知,其外环控制最终生成碳排微增率参考值,内环则首先基于式(3)将碳排微增率参考值转换为功率参考值,接着设置坐标变换中的 d 轴与电压矢量同方向,进而可直接通过计算由功率参考值得到电流参考值,最后采用电流环控制结构实现对参考电流的无静差追踪^[21]。

2.3.2 网间互联变换器多模式控制策略

本节所提网间互联变换器多模式控制策略如图3中的控制结构②所示,通过制定网间互联变换器不同的外环控制结构,满足上级调度中心对微电网群的多种供电形式需求。

1) 网间互联变换器外环控制。

①直接功率控制模式。在该模式下,微电网群需遵循上级调度中心下发的功率指令,满足直流配电网优化过程的潮流约束。设定微电网群中的一个网间互联变换器接受上级功率指令,并通过稀疏通信网络间将指令下发至其余互联变换器。网间互联变换器在该模式下采用恒功率控制策略,控制表达式如式(10)所示。

②低碳控制模式。一般工况下,微电网群作为直流配电网的接入点之一,以低碳控制的形式进行功率交互。上级调度中心下发碳排微增率指令,当微电网群内的所有分布式电源跟随该指令时,系统的总碳排放量达到最小。因此需要各网间互联变换器采用合适的控制结构进一步优化微电网间的功率分配,以实现上述控制目标。本节仍采用“领导者-跟随者”的一致性框架,假设将ACMG- o 所连网间互联变换器IC- o 视为领导者,其余互联变换器视为跟随者(后文以IC- r 为例设计控制结构),设计分布式低碳控制策略。

在该控制模式下,IC- o 与IC- r 均采集并相互传递所连微电网中的碳排微增率信息,此外IC- o 作为领导者节点,接收上级调度中心发送的碳排微增率指令,IC- o 的分布式控制表达式为

$$\begin{cases} e_o^{IC} = (\bar{c}_o - c^{ref}) + z_o^{IC} \sum_{v \in \mathcal{N}_o} a_{ov} (\bar{c}_o - \bar{c}_v) \\ P_o^{ICref} = e_o^{IC} G_o^{IC}(s) \end{cases} \quad (18)$$

式中: e_o^{IC} 为IC- o 的一致性控制输入; \bar{c}_o 为ACMG- o 内DGs的碳排微增率均值; \bar{c}_v 为ACMG- r 内DGs的碳排微增率均值; a_{ov} 为通信权重; \mathcal{N}_o 为IC- o 的相邻节点集; $G_o^{IC}(s)$ 为IC- o 在该模式下的外环PI控制器传递函数。

IC- r 的分布式控制表达式为

$$\begin{cases} e_r^{IC} = z_r^{IC} \sum_{v \in \mathcal{N}_r} a_{rv} (\bar{c}_r - \bar{c}_v) \\ P_r^{ICref} = e_r^{IC} G_r^{IC}(s) \end{cases} \quad (19)$$

式中: e_r^{IC} 为IC- r 的一致性控制输入; a_{rv} 为通信权重; \mathcal{N}_r 为IC- r 的相邻节点集; $G_r^{IC}(s)$ 为IC- r 在该模式下的外环PI控制器传递函数。

③碳排放限额控制模式。在该控制模式下,网间互联变换器外环采用恒碳排放控制,实现各微电网的碳排放满足上级指令。IC首先接收所连微电网内分布式电源的碳排微增率信息,接着基于式(1)与式(3),计算得到微电网总碳排放量信息,表达式为

$$C_o = \sum_{k=1}^{m+n} \frac{c_{ok}^2 - \beta_{ok}^2}{4\alpha_{ok}} + \sigma_{ok} \quad (20)$$

式中: c_{ok} 为ACMG- o 内第 k 个分布式电源的碳排微增率; $\alpha_{ok}, \beta_{ok}, \sigma_{ok}$ 均为其碳排放系数。

在得到碳排放量后,将其与上级调度中心下发的碳排放限额作差后带入PI控制器,得到网间互联变换器传输功率参考值,表达式为

$$P_o^{ICref} = (C_o^{ref} - C_o) \cdot G_o^{Car}(s) \quad (21)$$

式中: $G_o^{Car}(s)$ 为碳排放限额控制模式下的外环PI控制器传递函数。

2) 网间互联变换器内环控制。外环控制得到网间互联变换器传输功率参考值后,内环控制将功率参考值通过计算转化为电流参考值,最终采用电流环结构实现对其的快速追踪。

3 仿真实验

为验证本文所提分布式储能接入的柔性直流互联微网群低碳控制策略的有效性,在Matlab/Simulink仿真平台中搭建了如图1所示的微电网群模型。该模型包含两个交流微电网(ACMG-1与ACMG-2)。具体而言,ACMG-1内包含一个构网型单元(GFMU-1)和两个跟网型单元(GFLU-1, GFLU-2);ACMG-2同样包含一个构网型单元(GFMU-2)和两个跟网型单元(GFLU-3, GFLU-4)。详细仿真参数如表1所示,系统中各分布式电源的碳排放系数如表2所示。

表1 系统仿真参数

Tab.1 System simulation parameters

参数	数值
ACMG 额定频率 f_{ac}^*	50 Hz
ACMG 额定相电压 u_{ac}^*	220 V
直流配电网母线电压 u_{dc}^*	900 V
ACMG 各 DG 下垂系数 d^{ac}	0.89

表2 各微电网分布式电源的碳排放系数

Tab.2 Carbon emission coefficients of DGs in each microgrid

微电网	分布式电源	α	β	σ
ACMG-1	GFMU-1	2.74×10^{-3}	0.85	0.05
	GFLU-1	2.15×10^{-3}	0.79	0.06
ACMG-2	GFLU-2	2.02×10^{-3}	0.88	0.04
	GFMU-2	2.68×10^{-3}	0.74	0.05
ACMG-2	GFLU-3	2.26×10^{-3}	0.70	0.03
	GFLU-4	2.35×10^{-3}	0.72	0.06

本节设置如下仿真场景验证所提控制策略:

1)算例1的微电网内负荷连续增加场景:设置该场景是为了验证所提策略在微电网控制层级的有效性。该算例以ACMG-1为研究对象,其本地负荷进行两次跳变,逐级提高,其间各微电网间无功功率传输。ACMG-1在各时间段的本地负荷量如表3所示。

表3 算例1的各时间段ACMG-1负荷量

Tab.3 ACMG-1 load capacity of each time period in case 1

时段	0 s—0.3 s	0.3 s—0.8 s	0.8 s—1.2 s
负荷量/kW	30	60	90

2)算例2的运行模式切换场景:设置该场景是为了验证所提策略在微电网群控制层级的有效性。其中,微电网群在前述三种模式之间连续切换,为了便于后文描述,将各模式重新命名。模式1:直接功率控制模式;模式2:低碳控制模式;模式3:碳排放限额控制模式。各微电网本地负荷与直流配电网负荷量如表4所示。

表4 算例2的负荷量

Tab.4 Load capacity in case 2

子系统	ACMG-1	ACMG-2	直流配电网
负荷量/kW	30	30	200

3.1 算例1:微电网内负荷连续增加场景下的仿真验证

仿真结果如图4~图6所示,由图4可知,在各稳态阶段,ACMG-1的母线频率均可保持在其额定值50 Hz运行,说明所提策略可以实现对频率的恢复。由图5与表3可知,在各稳态阶段,微电

网内均能够实现源荷平衡。由图6可知,不同本地负荷工况下,ACMG-1内三个单元的碳排微增率均能够保持相等,说明所提策略可以保证各分布式电源按等碳排微增率的原则分配输出功率。

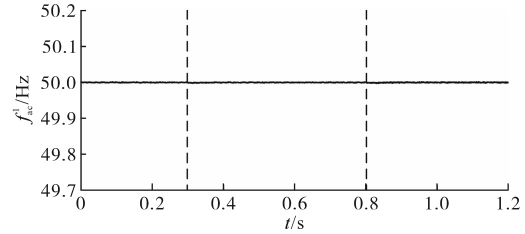


图4 ACMG-1的母线频率

Fig.4 Bus frequency curves of ACMG-1

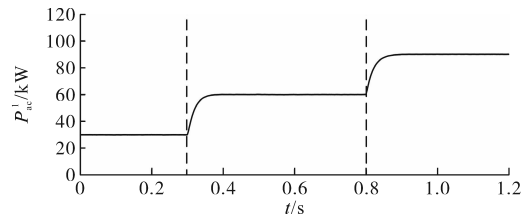


图5 ACMG-1的输出功率

Fig.5 Output power of ACMG-1

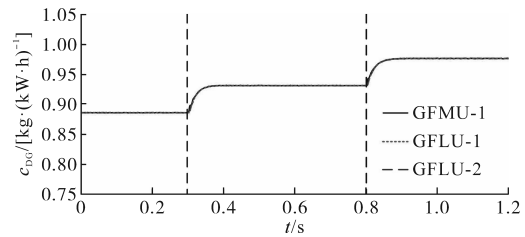


图6 ACMG-1的碳排微增率

Fig.6 Incremental carbon emissions of ACMG-1

3.2 算例2:运行模式切换场景下的仿真验证

仿真结果如图7~图11所示。由图7和图9可知,在三种控制模式下,各交流微电网的母线频率均稳定运行于额定值;模式切换过程中,频率曲线仅出现小幅波动,且能快速恢复至稳态值,确保系统稳定可靠运行。各微电网内分布式电源的碳排微增率曲线相互重合,表明所有分布式电源均能按照等碳排微增率的原则分配输出功率。

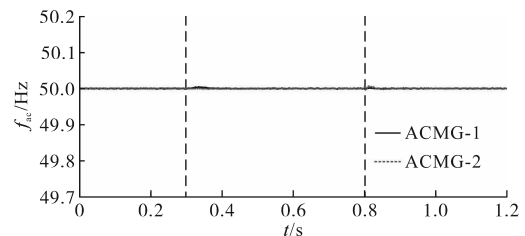


图7 各交流微电网的母线频率曲线

Fig.7 Bus frequency curves of each AC microgrid

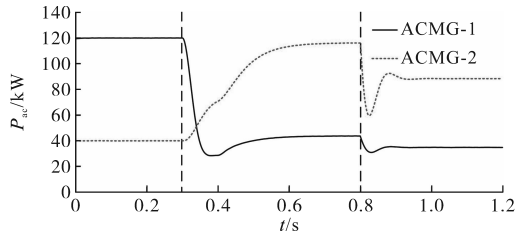


图8 各交流微电网的输出功率

Fig.8 Output power of each AC microgrid

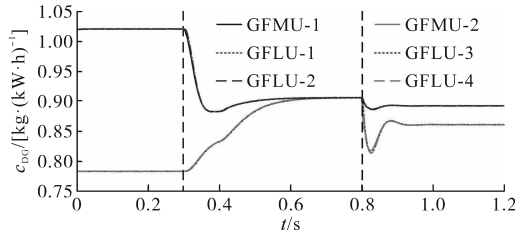


图9 各交流微电网的碳排微增率

Fig.9 Incremental carbon emissions of each microgrid

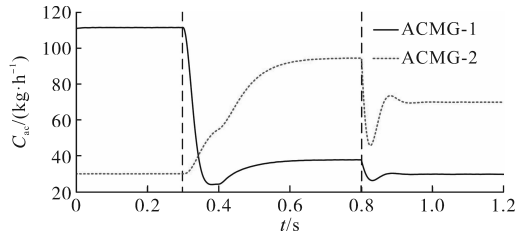


图10 各交流微电网的碳排放

Fig.10 Carbon emissions of each AC microgrid

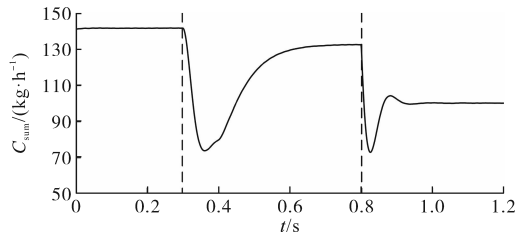


图11 微电网群的总碳排放

Fig.11 Total carbon emissions of microgrids cluster

在0 s—0.3 s时段内,系统运行于模式1。上层调度中心向两个交流微电网下发的功率指令分别为90 kW和10 kW。由图8和表4可知,所提策略能够确保两个交流微电网向直流配电网输出的功率满足指令值。

在0.3 s—0.8 s时段内,系统运行于模式2。由图9可知,不同微电网内分布式电源的碳排微增率曲线相互重合。这表明所提策略能确保系统内所有分布式电源具有相等的碳排微增率,进而实现微电网群的低碳控制。由图8可见,ACMG-1的输出功率降低,而ACMG-2的输出功率升高。这表明该策略可使碳排放较低的微电网优先向配电网供电,从而降低整个系统的碳排放。

在0.8 s—1.2 s时段内,系统运行于模式3。

上层调度中心为两个微电网下发的碳排放指令分别为30 kg/h和70 kg/h。由图10可知,所提策略能够确保两个微电网内所有分布式电源的碳排放满足各自的指令值。

不同模式下微电网群的总碳排放曲线如图11所示。经计算,与模式1相比,模式2下微电网集群的总碳排放降低了约6.5%,体现出显著的减排效果,实现了系统级的碳排放最优。

4 结论

本文提出了一种分布式储能接入的柔性直流互联微电网群低碳控制策略。所提策略实现了直流配电网下微电网群的灵活运行,同时在控制层面有效降低了系统碳排放。仿真结果验证了以下内容:1)不同控制模式可灵活切换,各微电网母线频率始终能稳定维持在50 Hz,实现了系统的稳定运行。2)在不同控制模式下,各微电网内部的分布式电源始终能够按照等碳排微增率的准则分配自身输出有功功率,实现了微电网层级的低碳控制。在本文设定的仿真条件下,与直接功率控制模式相比,低碳控制模式可使系统碳排放降低约6.5%,实现了微电网群层面的低碳控制。3)本文的研究成果可在直流侧并网的柔性直流互联微电网群场景中进行应用,通过两级分布式通信网络,部署所提低碳控制策略。

参考文献

- [1] 乐健,周谦,王曹,等.基于分布式协同的配电网电压和功率优化控制方法研究[J].中国电机工程学报,2020,40(4):1249-1257,1415.
LE Jian, ZHOU Qian, WANG Cao, et al. Research on voltage and power optimal control strategy of distribution network based on distributed collaborative principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1249-1257, 1415.
- [2] 雷雨,李光辉,王伟胜,等.计及光伏阵列的光伏发电阻抗建模与特性分析[J].中国电机工程学报,2024,44(13):5122-5135.
LEI Yu, LI Guanghui, WANG Weisheng, et al. Impedance modeling and characteristics analysis of photovoltaic generation considering photovoltaic array[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5122-5135.
- [3] LI Z, XU Y, WANG P, et al. Restoration of a multi-energy distribution system with joint district network reconfiguration via distributed stochastic programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(3): 2667-2680.
- [4] 别朝红,林超凡,李更丰,等.能源转型下弹性电力系统的发

- 展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2735-2745.
- BIE Z H, LIN C F, LI G F, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.
- [5] 别朝红, 林雁翎, 邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 1-9.
- BIE Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9.
- [6] 王侨侨, 曾君, 刘俊峰, 等. 面向微电网源-储-荷互动的分布式多目标优化算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1421-1432.
- WANG Qiaoqiao, ZENG Jun, LIU Junfeng, et al. A distributed multi-objective optimization algorithm for resource-storage-load interaction of microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1421-1432.
- [7] 李咸善, 方子健, 李飞, 等. 含多微电网租赁共享储能的配电网博弈优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6611-6625.
- LI Xianshan, FANG Zijian, LI Fei, et al. Game-based optimal dispatching strategy for distribution network with multiple microgrids leasing shared energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6611-6625.
- [8] XIAO Q, JIN Y, JIA H, et al. Review of fault diagnosis and fault-tolerant control methods of the modular multilevel converter under submodule failure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(10): 12059-12077.
- [9] 巨云涛, 康晓帆, 刘文武, 等. 基于分布鲁棒优化的分布式配-微协同日前调度方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(20): 48-58.
- JU Yuntao, KANG Xiaofan, LIU Wenwu, et al. Distributed coordinated day-ahead scheduling method for distribution network and microgrid based on distributionally robust optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(20): 48-58.
- [10] 孟潇潇, 尤泽豪, 张茂凡, 等. 基于背靠背变流器柔性互联微电网群的分层分布式协同控制及其稳定分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(24): 7917-7932.
- MENG Xiaoxiao, YOU Zehao, ZHANG Maofan, et al. Distributed hierarchical cooperative control and stability analysis of flexible interconnected microgrid cluster via back-to-back converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(24): 7917-7932.
- [11] 肖迁, 陆文标, 贾宏杰, 等. 改进下垂控制下的中压直流配电系统双时间尺度分层调控方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2507-2519.
- XIAO Qian, LU Wenbiao, JIA Hongjie, et al. Dual-time-scale hierarchical regulation and control for medium-voltage DC distribution system under improved droop control[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2507-2519.
- [12] 苏晨, 吴在军, 周力, 等. 计及线路损耗的自治型微电网群分布式经济控制[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1839-1846.
- SU Chen, WU Zaijun, ZHOU Li, et al. Distributed economic control for islanded microgrid cluster with transmission losses [J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1839-1846.
- [13] GANJIAN-ABOUKHEILI M, SHAHABI M, SHAFIEE Q, et al. Seamless transition of microgrids operation from grid-connected to islanded mode[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2106-2114.
- [14] XIA Y, WEI W, YU M, et al. Decentralized multi-time scale power control for a hybrid AC/DC microgrid with multiple subgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 4061-4072.
- [15] 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.
- [16] 闫佳佳, 滕云, 邱实, 等. 计及供能可靠性动态约束与碳减排的充能型微电网互联系统优化模型[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 5956-5975.
- YAN Jiajia, TENG Yun, QIU Shi, et al. Optimization model of charging microgrid interconnection system considering dynamic constraints of energy supply reliability and carbon emission reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 5956-5975.
- [17] 董雷, 李扬, 陈盛, 等. 考虑多重不确定性与电碳耦合交易的多微网合作博弈优化调度[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2635-2651.
- DONG Lei, LI Yang, CHEN Sheng, et al. Multi-microgrid cooperative game optimization scheduling considering multiple uncertainties and coupled electricity-carbon transactions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2635-2651.
- [18] LI H, REN Z, TRIVEDI A, et al. Optimal planning of dual-zero microgrid on an island toward net-zero carbon emission[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(2): 1243-1257.
- [19] 郭静蓉, 向月, 吴佳婕, 等. 考虑CCUS电转气技术及碳市场风险的电-气综合能源系统低碳调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1290-1303.
- GUO Jingrong, XIANG Yue, WU Jiajie, et al. Low-carbon optimal scheduling of integrated electricity-gas energy systems considering CCUS-P2G technology and risk of carbon market[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1290-1303.
- [20] ZHANG J, QIN D, YE Y, et al. Multi-time scale economic scheduling method based on day-ahead robust optimization and intraday MPC rolling optimization for microgrid[J]. IEEE Access, 2021, 9: 140315-140324.
- [21] WANG J, HUANG W, TAI N, et al. A bidirectional virtual inertia control strategy for the interconnected converter of stand-alone AC/DC hybrid microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 745-754.

收稿日期: 2025-10-20

修改稿日期: 2025-12-10