

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231426

集群式岸电能量路由器供能精细化就地管控策略

姜昊¹, 孙毅超¹, 张艺凡¹, 吴志坚², 董晓峰², 吾喻明³

(1. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023; 2. 国网江苏省电力有限公司苏州供电分公司, 江苏 苏州 215100; 3. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 传统的能量路由器能量管理策略未考虑多台设备之间的柔性互联关系, 且在港口应用中港机负荷的冲击性和新能源发电的波动性, 使区域电网的可靠供电和经济运行面临挑战。为此, 基于模糊逻辑控制提出了一种适用于集群式岸电能量路由器的供能精细化就地管控策略。该方法考虑了互联岸电能量路由器之间输出功率的耦合影响, 并依据并网模式下可能的功率流向制定了保证电力用户经济效益的模糊控制规则, 使储能输出电流根据电池荷电状态(state of charge, SOC)、电网电价以及各台岸电能量路由器净输出功率的变化进行动态调整。该方法及了互联系统间的协同作用, 构建了互联系统间各端口传输功率关系, 有利于分布式能源跨台区协同消纳, 且不需要上层调度控制, 减少了对通信的依赖。仿真结果验证了所提控制策略的有效性和可行性。

关键词: 岸电; 集群能量路由器; 供能精细化就地管控; 协同运行

Refined local energy management strategy for clustered shore power energy routers

JIANG Hao¹, SUN Yichao¹, ZHANG Yifan¹, WU Zhijian², DONG Xiaofeng², WU Yuming³

(1. NARI School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;
2. Suzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suzhou 215100, China;
3. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

Abstract: Traditional energy management strategies for energy routers do not take into account the flexible interconnection relationship between multiple devices. Also, the shocks of port loads and the fluctuations of new energy generation in port applications make the reliable power supply and economic operation of regional power grids challenging. Therefore, a refined local energy management strategy is proposed based on fuzzy logic control for clustered shore power energy routers. The method considers the effect of coupling of output power between interconnected shore power energy routers. It also formulates fuzzy control rules based on the possible power flow direction in the grid-connected mode to ensure economic benefits for power users. The energy storage output current is dynamically adjusted according to the changes in SOC, electricity price of the grid, and the net output power of each shore power energy router. The method takes into account cooperative interaction between interconnected systems and constructs the transmission power relationship between ports of interconnected systems. It facilitates the synergistic consumption of distributed energy across stations, and does not require upper-level dispatch control, reducing the dependence on communication. The effectiveness and feasibility of the proposed control strategy is verified through simulation.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5400-202218430A-2-0-ZN).

Key words: shore power; clustered energy routers; refined local energy management; cooperative operation

0 引言

随着我国“双碳”目标的提出,“清洁能源”、

“绿色产业”成为时代焦点。近年来,我国航运业迅猛发展,加快船舶产业绿色智能转型已成为必然趋势^[1-2]。然而,高比例可再生能源和大规模随机性负荷接入将给港口配电网运行带来很多不稳定因素,传统电网已无法满足各种能源、灵活负荷的需求,促使传统岸电系统向新型港口岸电系统转型^[3-4]。

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助(5400-202218430A-2-0-ZN)

能量路由器(energy router, ER)是能源互联网的关键设备之一。其具有电压等级变换、电气隔离、多端口运行、电能质量控制、分布式可再生能源及储能装置直接接入等功能^[5-10], 适用于新型的港口岸电系统, 可实现多种能量形式在港口能源互联网中灵活转换和有效利用。

能量路由器的性能主要依赖于能量管理策略^[11-13]。目前, 国内外学者针对能量路由器的能量管理策略和协调控制展开了大量研究。文献[14]提出一种能量路由器的分层统一协调控制方案, 该方案分为三个层级, 分别为上层调度、微网控制层和下层本地控制层, 可实现多工况的无缝切换。文献[15]提出一种分级能量管理控制策略, 对能量路由器进行分散模块控制, 实现复杂工况下各模块间能量路由的协调控制。但上述文献所提能量管理策略均含有顶层电力调度控制, 需优先响应电网调度, 且增加了对通信的依赖程度。模糊控制器作为一种非线性智能控制策略, 是针对多目标问题的一种有效方法^[16-20], 有利于系统实现能量管理的就地管控。文献[21-22]提出了一种两输入两输出的模糊控制器, 其将电池荷电状态(state of charge, SOC)和净输出功率作为输入变量, 有效降低系统功率损耗, 但在控制器设计中忽略了电价的影响, 无法保证电力用户经济效益。而文献[23-24]将电价作为第三种输入变量考虑在内, 提出一种三输入的模糊逻辑控制器, 可增加储能设备的使用寿命, 更具经济性。然而, 上述方法均为基于单一能量路由器的能量管理策略, 未考虑多台能量路由器的协同作用。在岸电能量路由器实际应用中, 多台能量路由器形成供电区域间柔性互联关系, 功率传输关系更加复杂, 影响区域电网经济效益。因此, 集群式能量路由器的能量管理策略亟待研究。

针对集群式能量路由器的能量管理策略, 现有研究主要集中在改进优化算法以实现能量路由由传输路径优化^[25-28]。其中, 文献[25]提出多台能量路由器间负载共享策略, 对于负荷变化, 每台能量路由器主动调整其输入功率, 以保证系统功率平衡。文献[26-28]分别利用离散粒子群优化算法、Dijkstra算法、路由优化算法对能量传输路径进行优化, 以实现传输损耗最小。在集群式能量路由器互联系统中, 要实现能量精细化管理还需要计及端口间的耦合关系, 考虑储能系统参与的调节作用。应以提高互联系统的经济效益为目标, 实现新能源的就地消纳, 减少供电链路, 延长设备使用寿命和节约成本。

基于以上分析, 本文面向港口岸电应用场景, 提出了一种适用于集群式岸电能量路由器的供能精

细化就地管控策略。与传统能量管理策略相比, 该方法计及了多台能量路由器间净输出功率的耦合影响, 构建了互连系统间各端口传输功率关系。可实现多台岸电能量路由器间的功率互济, 提高新能源就地消纳水平, 且不依赖于上层调度控制, 实现能量路由由精细化就地管控, 保证电力用户的经济效益。集群式岸电能量路由器是未来能源互联网的关键组成部分。

本文首先给出了集群式岸电能量路由器的系统架构和主电路拓扑结构, 并分析了集群式岸电能量路由器的不同工作模式。然后给出了集群式岸电能量路由器各部分基本控制策略, 并依据并网模式下互连系统各端口功率流向, 提出了基于模糊逻辑控制的供能精细化就地管控策略。最后, 通过仿真验证了所提控制策略的有效性和可行性。

1 集群式岸电能量路由器系统描述

1.1 集群式岸电能量路由器系统架构

本文主要针对港口交直流混合供电系统应用场景进行研究, 图1为集群式岸电能量路由器互联系统结构示意图。其中, 岸电能量路由器是实现系统运行控制和能量管理的关键设备。该系统面向港口电力用户, 由能量路由器、分布式能源、储能设备、负载、微电网组成。与常规供电系统不同, 港口供电系统除包括电源、常规电负荷和控制装置外, 还包含大量电动装卸机械和岸电设备。多台能量路由器经由直流端口互联, 共享光储荷等资源。通过合

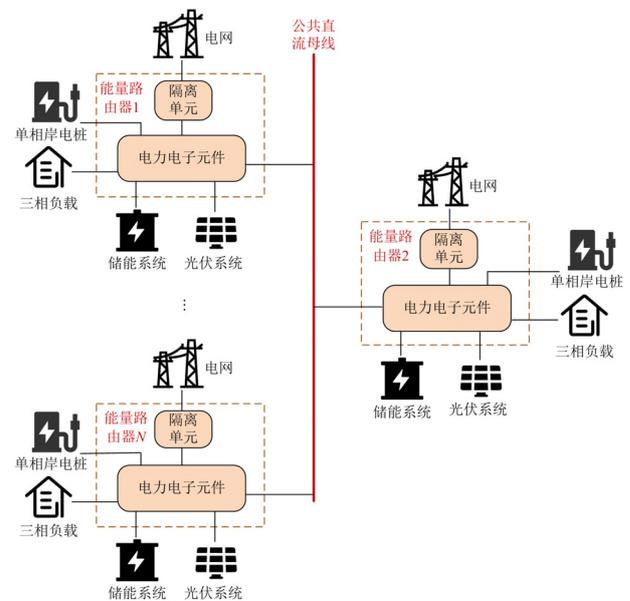


图1 集群式岸电能量路由器互联系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interconnection system structure of clustered shore power energy routers

理的协调控制策略实现各台能量路由器之间的功率交互, 能够在不同区域间进行分布式能源消纳, 提高能量利用率, 且同时接入多台台区后可均衡台区负载, 防止过载或功率倒送。

1.2 拓扑结构

在单台岸电能量路由器中, 本文选用的拓扑结构如图 2 所示。并网部分由滤波器和 AC/DC 变换器组成, 实现 380 V 配电网与能量路由器之间的双向功率流动。储能部分由储能电池和双向 DC/DC 变换器组成, 是实现精细化就地管控和高供电可靠

性的重要组成部分。中压直流部分由若干支撑电容组成, 提供 750 V 直流接口, 可实现光伏、风电和船舶等新能源和直流负载的接入, 并用于多台岸电能量路由器互联。三相交流部分由 DC/AC 变换器和滤波器组成, 负责提供 380 V 交流输出, 用于连接交流负载或微电网。单相交流部分由 DC/AC 变换器组成, 提供单相交流电源。考虑到岸电能量路由器在港口低压配电网中对电力用户的应用, 本拓扑不使用隔离变压器, 以降低设备体积和成本。

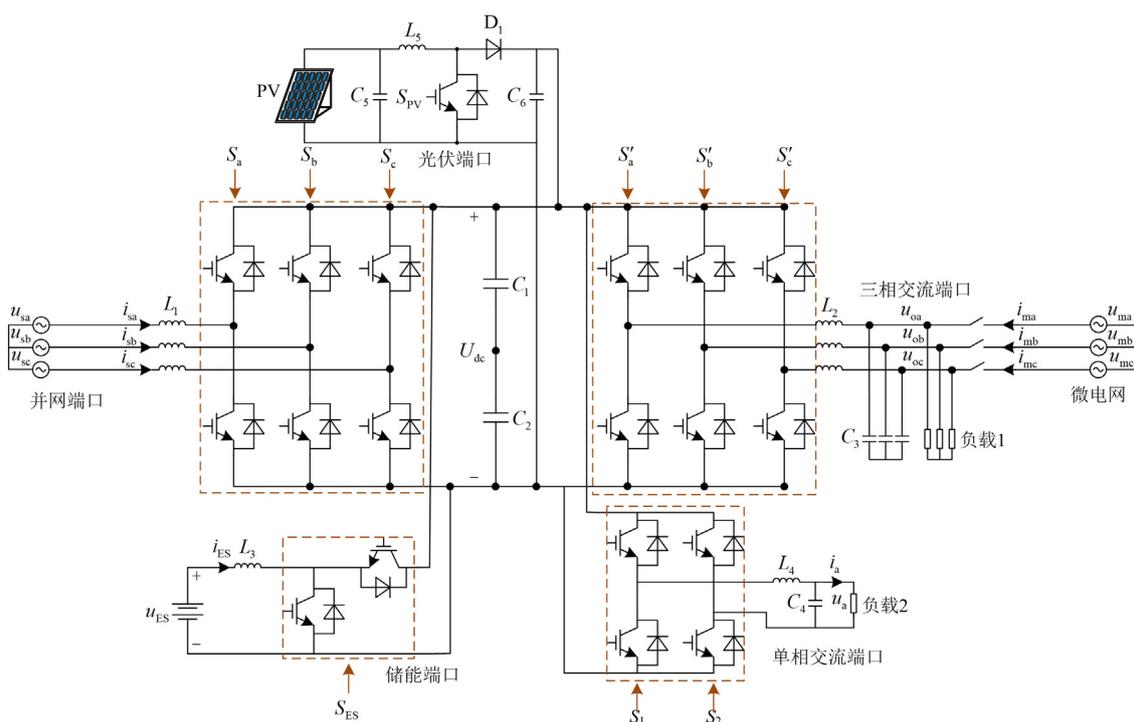


图 2 单台岸电能量路由器拓扑结构

Fig. 2 Topology of single shore power energy router

与传统港口配电网相比, 此拓扑结构具有以下特点。

1) 根据实际需求, 岸电能量路由器可提供多个不同电压等级的交直流端口, 满足不同用电设备的接入。

2) 该拓扑提供通用的 750 V 公共直流母线, 用于多台岸电能量路由器互联。不同工作模式控制策略可以维持母线电压稳定, 分布式能源和储能设备的变换器在接入过程中不需要考虑并网问题和母线电压稳定性, 因此可简化变换器结构和控制。

3) 港口供电系统可以由岸电能量路由器统一控制和管理, 信息流和电力流高度集成。各台岸电能量路由器互联可实现协同运行, 以便系统整体的能量管理。

4) 各台岸电能量路由器通过直流母线互联, 其中一台故障对其他正常岸电能量路由器不产生影响。且在每台岸电能量路由器内部, 当储能部分、交流部分或并网部分发生局部故障时, 故障部分会被自动屏蔽, 其他部分不受影响。

1.3 工作模式分析

以两台岸电能量路由器为例, 本节分析了互联系统的不同工作模式。两台岸电能量路由器在不同模式下协同运行, 可实现两台间功率互济, 其工作模式如图 3 所示。

1) 两台同时并网

此模式下, 电网与两台能量路由器之间均可实现电能双向传输。当一台能量路由器可再生能源和储能出力无法满足负荷供电需求时, 优先由其他互

联能量路由器向其供电，若仍无法满足则需所连电网供电。并网部分的控制器负责公共直流母线的电压稳定。储能部分考虑互联能量路由器之间的功率传输，其控制器根据所设计的供能精细化就地管控策略获得期望的充放电状态，有利于新能源就地消纳，减少供电链路，满足低碳用能需求。

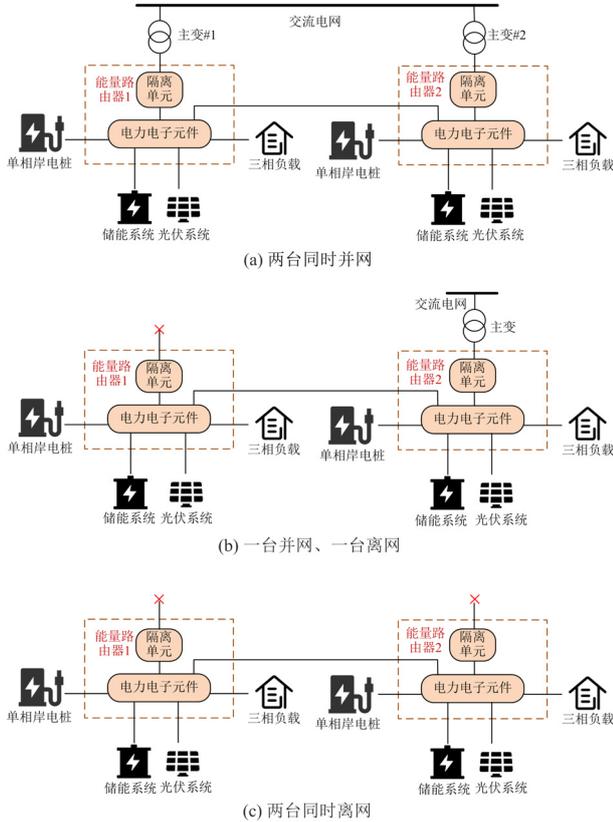


图3 岸电能量路由器工作模式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the operating mode of clustered shore power energy routers

2) 一台并网、一台离网

此模式下，并网的能量路由器可与电网实现双向能量传输，其并网部分控制器提供公共直流母线的电压支撑。离网的能量路由器与其他能量路由器通过直流母线互联。各台能量路由器储能部分仍根据供能精细化就地管控策略得到的指令进行充放电，以提升电力用户经济效益，平滑可再生能源和负荷消耗产生的功率波动。其中，离网工况可分为两种：(1) 当并网部分或交流母线发生故障时，被动进入离网模式；(2) 通过发出离网命令使能量路由器主动进入离网模式。

3) 两台同时离网

此模式下，两台能量路由器都进入离网模式，两台间可实现功率互补，依靠自身的可再生能源和

储能出力满足负荷供电需求及另一台能量路由器的功率缺额，可增强系统抗风险能力。此时，储能部分不再根据供能精细化就地管控策略得到的指令进行充放电，而是保障公共直流母线的电压稳定，提高供电可靠性。

2 集群式岸电能量路由器就地管控策略

2.1 基本控制策略

并网部分控制策略如图4所示，三相并网逆变器采用双闭环控制器。其中，外环为电压控制环，内环为dq旋转坐标系下的电流控制环。为保证电网功率因数为1，将q轴分量电流的参考值 i_{sq}^* 设为零，也可根据所需的功率因数角对其进行修改，从而产生可控的无功功率。电压外环根据直流电压参考值 U_{dc}^* 与实际值 U_{dc} 之间的电压误差来调节d轴分量电流的参考值 i_{sd}^* ，使直流电压保持在额定值。

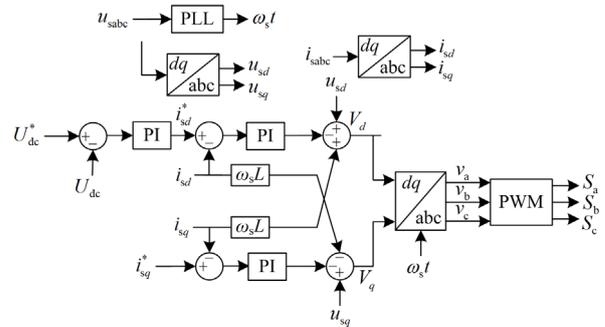


图4 并网部分控制策略

Fig. 4 Control strategy for the grid-connected part

在三相交流输出部分，如图5所示，控制策略与所选模式相关。当三相交流端口需要输出指定的有功功率和无功功率时，工作在P-Q模式，其包括功率外环控制和电流内环控制。通过dq旋转坐标系下的电流控制环控制电流，进而实现有功功率和无功功率的解耦控制。当三相交流端口需要维持输出电压幅值和频率不变时，工作在V-f模式。交流参考频率经过积分环节得到电压的参考相位，再通过dq旋转坐标系下的电压控制环将电压与参考值比较，生成频率和幅值恒定的三相正弦输出电压。

如图6所示，根据控制目标的不同，储能部分可选择工作于并网模式或离网模式。在并网模式下，通过供能精细化就地管控策略得到充放电电流参考值，并利用电流环控制使储能输出电流跟踪参考值，然后得到开关信号以控制储能的DC/DC变换器。在离网模式下，储能部分将取代并网部分，通过直流电压外环和储能电流内环将公共直流母线电压维持在额定值。

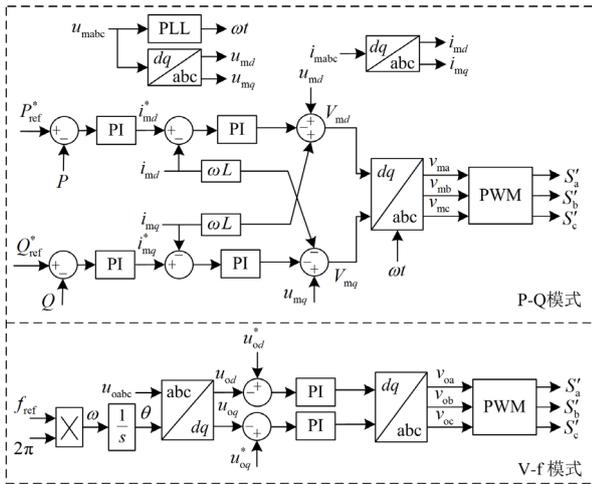


图5 三相交流输出部分控制策略

Fig. 5 Control strategy of the three-phase AC output part

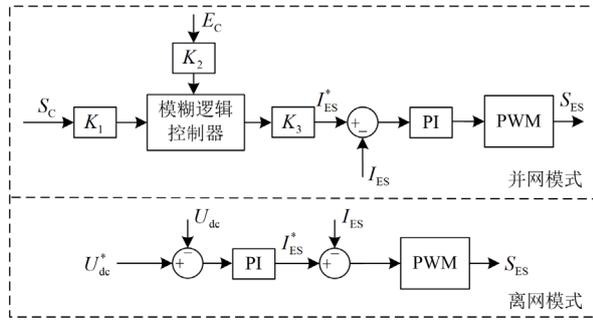


图6 储能部分控制策略

Fig. 6 Control strategy of the energy storage part

在单相交流输出部分,如图7所示,采用电压电流双闭环控制器。其主要目标是通过控制交流输出电流,使交流输出电压与参考值相符。在光伏部分,采用改进的扰动观察法使其工作在最大功率点附近,以充分利用光伏输出功率^[29]。

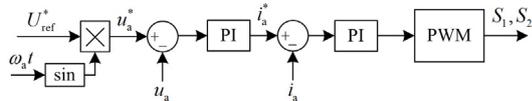


图7 单相交流输出部分控制策略

Fig. 7 Control strategy of the single-phase AC output part

2.2 供能精细化就地管控策略

本节讨论了集群式岸电能量路由器并网模式下的潮流,并提出并网模式下的供能精细化就地管控策略。

以 N 台岸电能量路由器互联系统为例分析并网模式下可能的功率流, $R_j (j=1,2,\dots,N)$ 表示第 j 台岸电能量路由器。每台岸电能量路由器均接入可再生能源、储能和负荷,如图8所示。为分析方便,

以流入岸电能量路由器的功率方向为正,则有

$$P_{cj} = P_{PVj} - P_{loadj} \quad (1)$$

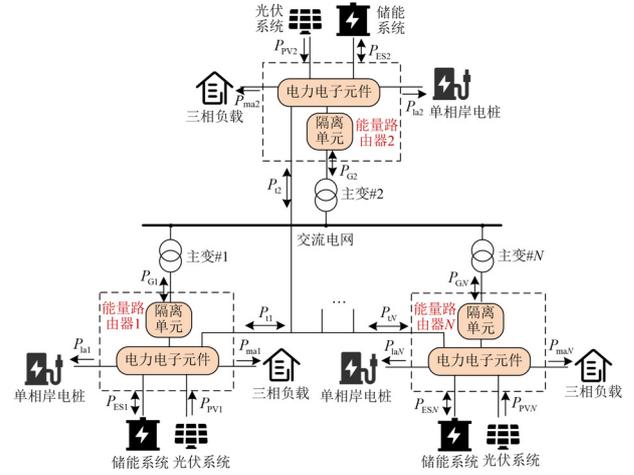


图8 并网方式下功率流动方向

Fig. 8 Direction of power flow in grid-connected mode

式中: P_{cj} 为 R_j 中光伏输出功率与负载消耗功率之差; P_{PVj} 为 R_j 中光伏输出功率; P_{loadj} 为 R_j 中交直流负载消耗的有功功率之和。假设储能发出功率 P_{ESj} 为正,基于系统有功功率平衡,可以得到

$$P_G + \sum_{j=1}^N P_{cj} + \sum_{j=1}^N P_{ESj} = 0 \quad (2)$$

式中, P_G 为互联系统与电网侧交换的有功功率, $P_G = \sum_{j=1}^N P_{Gj}$, P_{Gj} 为 R_j 与电网的有功功率交换值。以能量路由器1(R_1)为参考,为分析方便,假设 P_{t1} 以流入 R_1 的方向为正,其中 P_{t1} 为 R_1 与其他互联能量路由器之间的传输功率,由于在基于 R_1 的互联系统中有功功率是平衡的,则可得

$$P_{c1} + P_{G1} + P_{ES1} + P_{t1} = 0 \quad (3)$$

考虑互联系统间的功率传输,设 R_j 的净输出功率 P_{netj} 为

$$P_{netj} = \sum_{j=1}^N P_{cj} + \sum_{i=1(i \neq j)}^N P_{ESi} \quad (4)$$

如果 $P_{netj} < 0$,则需要 R_j 中的储能和配电网对系统进行补偿;另一方面,如果 $P_{netj} > 0$,则存在多余的电能给 R_j 中的储能充电并流入配电网。则系统有功功率平衡表达式(2)可简化为

$$P_{netj} + P_G + P_{ESj} = 0 \quad (5)$$

在所有岸电能量路由器同时处于离网模式下,存在 $P_G = 0$,则功率平衡表达式可简化为

$$P_{netj} + P_{ESj} = 0 \quad (6)$$

由图 8 可知，并网部分、储能部分和互联系统间的传输功率是双向的，如果功率分配不理想，会影响储能电池的寿命和电力消费者的经济效益。因此需要考虑储能电池的 SOC(S_{Cj})、电网电价(E_p)以及净输出功率 P_{netj} 的影响，合理分配电能。例如，当系统净输出功率小于 0 时，配电网将提供部分电能。假如此时电价和储能 SOC 都很高，应鼓励储能放电以减小并网部分的传输功率，从而降低电价成本。

根据上述讨论，并网模式下的储能电池充放电状态将取决于 3 个因素： S_{Cj} 、 E_p 和 P_{netj} ，并在 P_{netj} 中计及了多台岸电能量路由器之间的协同作用。对于多控制目标相互制约的供能精细化就地管控策略，本文采用模糊逻辑控制器，其通过模糊化、模糊推理和去模糊化的过程能够实现复杂的控制决策，具有较强的适应性和鲁棒性^[30]。

考虑到采用单层模糊逻辑控制器时，其输入量为 3 个，为避免模糊逻辑规则过多，产生“模糊规则爆炸”的问题^[16]，需要将控制器输入量的数目转化为 2 个。由于电价 E_p 和 P_G 相乘即为岸电能量路由器从配电网获得的单位时间电费(E_{Cj})，反映了电力用户的经济效益，且根据式(5)可得

$$P_G = -P_{ESj} - P_{netj} \quad (7)$$

则单位时间电费 E_{Cj} 能反映电价 E_p 和净输出功率 P_{netj} 的变化情况。为了计算方便，本文将 E_p 和

$-P_{ESj} - P_{netj}$ 采用归一化的方法将其映射到区域 $[0,1]$ ，则 E_{Cj} 可表示为

$$E_{Cj} = \frac{E_p - E_{p\min}}{E_{p\max} - E_{p\min}} \times \left(\frac{P_N - P_{ESj} - P_{netj}}{2P_N} \right) \quad (8)$$

式中： $E_{p\min}$ 和 $E_{p\max}$ 分别为一天内的电价的最低值和最高值； P_N 为单台岸电能量路由器的额定容量。如果 P_{netj} 发生变化，模糊逻辑控制器会根据 E_{Cj} 的相应变化使 P_{ESj} 向相反方向变化，从而有助于平滑可再生能源输出功率和船舶等冲击性负荷的波动。

在模糊逻辑控制器中，将 S_{Cj} 和 E_{Cj} 设置为两个输入变量，将储能输出电流 I_{ESj} 设置为输出变量。

S_{Cj} 、 E_{Cj} 和 I_{ESj} 的范围分别为

$$\begin{cases} S_{Cj} \in [40\%, 80\%] \\ E_{Cj} \in [0, 1] \\ I_{ESj} \in [-90, 90] \text{ A} \end{cases} \quad (9)$$

其中， S_{Cj} 的最小阈值设置为 40%，以确保储能电池切换到孤岛模式时，有足够的剩余容量维持岸电能量路由器的正常运行。 I_{ESj} 的阈值设置为 90 A，其根据储能的额定容量和额定功率制定。其中，模糊逻辑控制器输入变量隶属度函数包含 5 个等级：L(低)、SL(略低)、M(中)、SH(略高)、H(高)。输出变量隶属度函数包含 7 个等级：NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。输入输出变量的隶属度函数如图 9 所示。

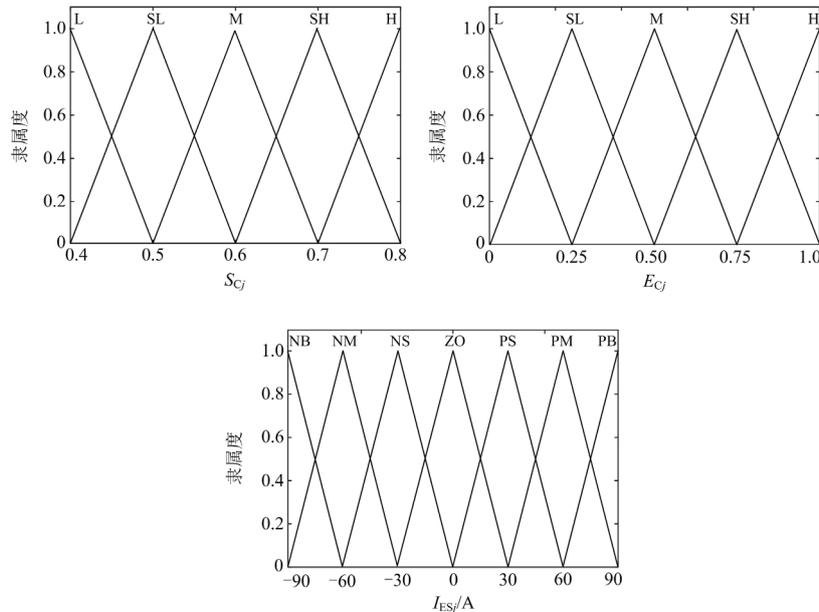


图 9 输入输出隶属度函数

Fig. 9 Input and output membership functions

模糊控制规则如表 1 所示, 为不对称设计, 主要参考以下基本准则。

表 1 模糊控制规则
Table 1 Fuzzy control rules

I_{ESj}	E_{Cj}					
	L	SL	M	SH	H	
S_{Cj}	L	NB	NS	NS	ZO	ZO
	SL	NM	NS	ZO	ZO	PS
	M	NS	NS	ZO	PS	PM
	SH	NS	ZO	ZO	PM	PM
	H	NS	ZO	PM	PB	PB

1) 当 $P_{netj} < 0$ 且 S_{Cj} 和电价过高时, 应鼓励储能电池放电, 减少公共电网输电, 储能电池放电电流较大; 当 S_{Cj} 较高但电价较低, 或 S_{Cj} 较低但电价较高时, 储能电池放电电流较小; 当 S_{Cj} 和电价都很低时, 储能电池充电电流较大, 鼓励配电网向岸电能量路由器输送电能。

2) 当 $P_{netj} > 0$ 且 S_{Cj} 和电价过高时, 应鼓励储能电池放电以提高经济效益, 此时由岸电能量路由器向配电网输送电能, 储能电池放电电流较大; 当 S_{Cj} 较高但电价较低, 或 S_{Cj} 较低但电价较高时, 储能电池放电电流较小甚至不放电; 当 S_{Cj} 和电价都很低时, 净输出功率优先给储能电池充电, 储能电池充电电流较大。

3 仿真验证

为了验证本文所提基本控制策略和供能精细化就地管控策略的有效性。本节基于苏州某港口岸电能量路由器示范应用, 结合该港口岸电需求和光伏储能配置, 在 Matlab/Simulink 中搭建了两台岸电能量路由器互联仿真模型, 主要仿真参数如表 2 所示。

3.1 基本控制策略有效性

本节通过仿真分析来验证岸电能量路由器基本控制策略的有效性。在 1 s 时, 设置光照强度从 650 W/m^2 变为 548 W/m^2 , 在 2.5 s 时, 光照强度从 548 W/m^2 变为 450 W/m^2 。因此, 光伏输出功率在 1 s 时从 31.2 kW 变为 26.4 kW , 在 2.5 s 时, 从 26.4 kW 变为 20.9 kW 。在 1 s 时, 假设此时有冲击性船舶负荷接入岸电能量路由器, 负载总功耗从 22.1 kW 变为 32.5 kW 。

光照强度和功率变化情况分别如图 10(a)、图 10(b)所示。如图 10(c)所示, 公共直流母线电压波动很小, 可以看出光伏发电量和负载功耗的变化对公共母线直流电压几乎没有影响。如图 10(d)所示,

表 2 岸电能量路由器互联系统仿真参数
Table 2 Simulation parameters of the interconnection system of shore power energy routers

对象及参数	值
岸电能量路由器台数	2
岸电能量路由器额定功率/kVA	150
光伏系统额定容量/kW	50
储能系统额定容量	40 kW/80 kWh
开关频率/kHz	5
公共直流母线电压/V	750
三相交流端口额定电压/V	380
单相交流端口额定电压/V	220
并网端口线路电感/mH	2.4
三相交流端口 LC 滤波器	1.2 mH, 15 μF
单相交流端口 LC 滤波器	1 mH, 20 μF
储能端口滤波电感/mH	2.5
光伏端口滤波电感/mH	2
公共直流母线电容/ μF	1000

在单相交流输出端口, 输出电压电流同相位, 满足单位功率运行。如图 10(e)、图 10(f)所示, 在并网端口和三相交流输出端口, 其输出电流为三相正弦波, 动态响应效果较好。仿真结果验证了岸电能量路由器基本控制策略的有效性。

为了验证所提控制策略在多种并离网工作模式下的适用性, 以两台岸电能量路由器为例, 设置 1 s 时系统由两台同时并网模式切换到一台并网、一台离网模式。然后在 2 s 时切换到两台同时离网模式。为简化分析, 设置光伏输出功率、负载消耗功率及电价 E_p 保持不变, R_1 的 S_{C1} 初始值为 75%, R_2 的 S_{C2} 初始值为 60%。其仿真结果如图 11 所示。

R_1 和 R_2 的并网部分电流及电网功率如图 11(a)—图 11(c)所示, 可知系统最初工作于两台同时并网模式。在 1 s 时, R_2 并网部分发生故障导致系统转换到一台并网、一台离网模式。在 2 s 时, R_1 并网部分又发生故障导致系统进入两台同时离网模式。如图 11(d)所示, 在两次模式切换过程中, 公共直流母线电压最终都能稳定在 750 V。如图 11(e)所示, 在 0~2 s 时, 储能部分根据供能精细化就地管控策略得到的指令进行充放电。在 2~3 s 时, 即两台同时离网模式下, 储能部分工作于离网模式, 负责公共直流母线的电压稳定。如图 11(f)—图 11(i)所示, 在 1 s 和 2 s 系统工作模式切换时, 两台岸电能量路由器的单相交流端口和三相交流端口输出几乎不受影响, 体现了系统的抗风险能力。仿真结果验证了多种并离网工作模式下控制策略的有效性。

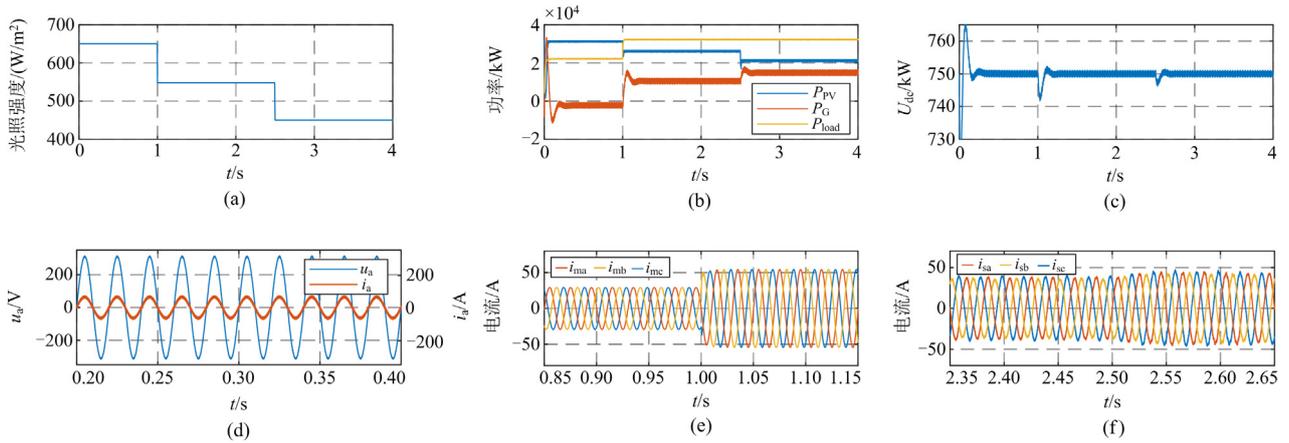


图 10 各个端口电压电流及功率变化情况

Fig. 10 Voltage, current and power variation of each port

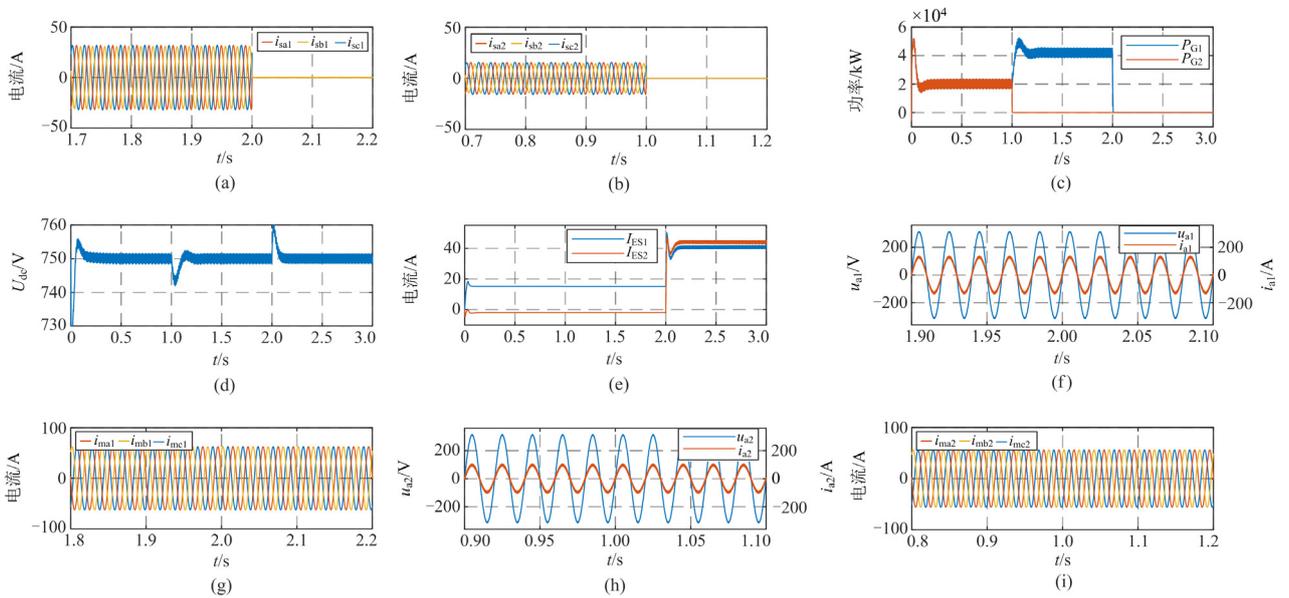


图 11 不同工作模式下系统仿真结果

Fig. 11 Simulation results of the system in different operating modes

3.2 供电精细化就地管控策略有效性

本节通过仿真分析验证本文所提供精细化就地管控策略的有效性。假设 R_1 中光伏输出功率与负载消耗功率之差为负(即 P_{c1} 为负), R_2 中光伏输出功率与负载消耗功率差为正(即 P_{c2} 为正)。则分为系统功率剩余($P_{c1} + P_{c2} > 0$)和系统功率不足($P_{c1} + P_{c2} < 0$)两种情况。

在系统功率剩余情况下,图 12 显示了两台岸电能量路由器各部分功率及储能 S_{Cj} 和充放电电流 I_{ESj} 的变化情况。为了简单而不失通用性,设置光伏输出功率及负载消耗功率在 0.8 s、2 s、2.5 s 随机

变化,1.4 s 时电价 E_p (归一化值)由 0.3 上升为 0.8, R_1 的 S_{C1} 初始值为 75%, R_2 的 S_{C2} 初始值为 60%。

由图 12(a)、图 12(b)可知, $P_{c1} + P_{c2}$ 始终大于 0,说明系统功率存在剩余。岸电能量路由器互联系统始终向配电网供电,且 R_2 剩余功率更多,所以持续向 R_1 输送电能,即互联系统间的传输功率始终为正。

由图 12(c)—图 12(f)可知, R_1 和 R_2 的净输出功率变化趋势相同。在 0.8 s 之前,系统净输出功率较大,所以尽管电价较低且 S_{C1} 较高, R_1 的储能仍处于充电状态,充电电流较小。而由于 S_{C2} 较低, R_2 的储能处于充电状态且充电电流较大;在 0.8~1.4 s,

由于系统净输出功率降低, S_{C1} 由上升变为下降, S_{C2} 上升趋势减慢; 在 1.4~2 s, 由于电价大大升高, R_1 的储能放电电流增大, R_2 的储能充电电流几乎为 0, 以便增加互联系统向电网的输送电能; 在 2~3 s, 由于电价依然较高, R_1 的储能放电电流几乎不变, 以提高电力用户经济效益, 而 R_2 的储能充电状态随其净输出功率变化而变化。

同理, 在系统功率不足情况下, 图 13 显示了两台岸电能量路由器各部分功率及储能 S_{Cj} 和充放电电流 I_{ESj} 的变化情况。设置光伏输出功率及负载消耗功率在 0.8 s、2.4 s 随机变化, 1.6 s 时电价 E_p (归一化值) 由 0.3 上升为 0.8, R_1 的 S_{C1} 初始值为 75%, R_2 的 S_{C2} 初始值为 60%。

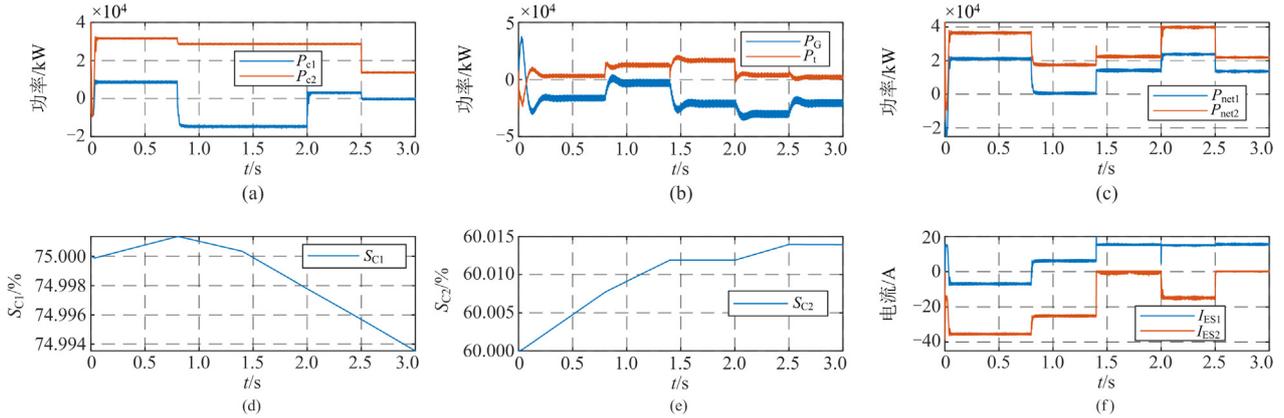


图 12 系统功率剩余情况仿真结果

Fig. 12 Simulation results of system with power surplus

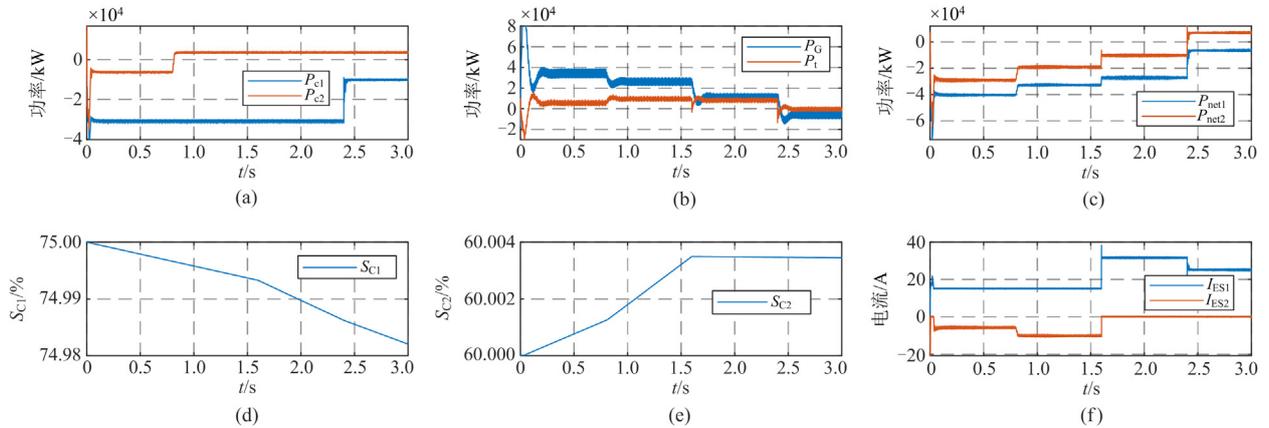


图 13 系统功率不足情况仿真结果

Fig. 13 Simulation results of system with power deficiency

由图 13(a)、图 13(b)可知, $P_{c1} + P_{c2}$ 始终小于 0, 说明系统功率不足。在 2.4 s 之前, 配电网始终向岸电能量路由器互联系统供电, R_2 剩余功率更多所以持续向 R_1 输送电能, 互联系统间的传输功率为正。在 2.4 s 之后, 由于电价较高且系统功率不足情况缓解, 互联系统转而向电网供电, 此时两台能量路由器剩余功率相差不大, 传输功率几乎为 0。

由图 13(c)—图 13(f)可知, 在 0.8 s 之前, 系统净输出功率较小, 此时电价较低且 S_{C1} 较高, R_1 的

储能处于放电状态, 而由于 S_{C2} 较低, R_2 的储能处于充电状态; 在 0.8~1.6 s 之间, 系统净输出功率上升, S_{C2} 上升趋势加快, 由于系统净输出功率仍处于较低水平, R_1 的储能放电电流几乎不变。在 1.6~2.4 s, 由于电价大大升高, R_1 的储能放电电流增大, R_2 的储能充电电流几乎为 0, 以便减小电网向互联系统的输送电能。在 2.4~3 s 之间, 系统净输出功率上升, 但由于电价依然较高, R_1 的储能放电电流下降不大, 而 R_2 的储能充电电流仍几乎为 0,

以减小电网向互联系统的输送电能,提高电力用户经济效益。仿真结果验证了岸电能量路由器供能精细化就地管控策略的有效性。

4 结论

本文面向港口岸电应用场景,提出了一种集群式能量路由器供能精细化就地管控策略。该方法考虑了储能 SOC、电网电价以及净输出功率的影响,并计及互联岸电能量路由器之间的协同作用。为避免模糊逻辑规则过多,本文将电价和互联能量路由器间净输出功率转化为单位时间电费,并制定了保证港口岸电系统经济效益的模糊控制规则。针对多台岸电能量路由器之间的协同运行,该方法能实现分布式能源跨台区协同消纳,平滑分布式能源输出功率和船舶等冲击性负荷波动,且不依赖于上层调度控制,减少对通信设备的依赖,降低用电成本。通过深入的仿真分析验证了所提控制策略的有效性和可行性,在端口数量和冲击性港机负荷较多的港口中应用前景广阔。

参考文献

- [1] 禹伟良, 强郁文, 范昊天. 发展绿色航运 守护一江碧水[N]. 人民日报, 2023-06-15(001).
YU Weiliang, QIANG Yuwen, FAN Haotian. Developing green shipping to protect a river of blue water[N]. People's Daily, 2023-06-15(001).
- [2] 邰能灵, 王萧博, 黄文焘, 等. 港口综合能源系统低碳化技术综述[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3749-3764.
TAI Nengling, WANG Xiaobo, HUANG Wentao, et al. Review of low-carbon technology for integrated port energy systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3749-3764.
- [3] 方斯顿, 赵常宏, 丁肇豪, 等. 面向碳中和的港口综合能源系统(一): 典型系统结构与关键问题[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 114-135.
FANG Sidun, ZHAO Changhong, DING Zhaohao, et al. Port integrated energy systems toward carbon neutrality (part I): typical topology and key problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 114-135.
- [4] 贺之渊, 杨杰, 吴亚楠, 等. 能源转型下的未来交流和直流联合运行模式及发展趋势探讨[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 99-114.
HE Zhiyuan, YANG Jie, WU Yanan, et al. Investigation on the future AC and DC combined operation form and development trend under energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 99-114.
- [5] HUBER J E, KOLAR J W. Solid-state transformers: on the origins and evolution of key concepts[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2016, 10(3): 19-28.
- [6] 赵争鸣, 冯高辉, 袁立强, 等. 电能路由器的发展及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3823-3834.
ZHAO Zhengming, FENG Gaohui, YUAN Liqiang, et al. The development and key technologies of electric energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3823-3834.
- [7] 李子欣, 高范强, 赵聪, 等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1274-1289.
LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1274-1289.
- [8] 陈庆, 葛雪峰, 史明明, 等. 多台电力电子变压器云边脉宽调制同步控制策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 128-135.
CHEN Qing, GE Xuefeng, SHI Mingming, et al. The cloud-edge signals based PWM synchronization strategy for multi-power electronic transformer[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 128-135.
- [9] 郭慧, 丁峰, 任林涛, 等. 基于固态变压器的有源配电网自适应模式切换与功率管理[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 89-98.
GUO Hui, DING Feng, REN Lintao, et al. Adaptive mode switching and power management of a solid-state transformer-based active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 89-98.
- [10] 王思尹, 粟时平, 王海明, 等. 基于切换系统理论的终端能量路由器能量路由控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 81-90.
WANG Siyin, SU Shiping, WANG Haiming, et al. An energy routing control method for a terminal energy router based on switching system theory[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 81-90.
- [11] CHEN Richeng, YANG Yaxi, JIN Tao. A hierarchical coordinated control strategy based on multi-port energy router of urban rail transit[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(2): 201-212.
- [12] VIVAS F J, DE LAS HERAS A, et al. A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 126-155.
- [13] 徐明宇, 郝文波, 王盼宝, 等. 基于动态随机模型的微电网群能量管理方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 140-148.
XU Mingyu, HAO Wenbo, WANG Panbao, et al. Energy management method of multi-microgrids based on dynamic stochastic model[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 140-148.
- [14] 孙利, 陈武, 蒋晓剑, 等. 能源互联网框架下多端口能

- 量路由器的多工况协调控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 32-39.
- SUN Li, CHEN Wu, JIANG Xiaojian, et al. Coordinated control of multiple operation conditions for multi-port energy router in energy internet framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 32-39.
- [15] WANG Rui, JIANG Shaoxu, MA Dazhong, et al. The energy management of multiport energy router in smart home[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2022, 68(4): 344-353.
- [16] 吴文进, 郭海婷, 苏建徽, 等. 基于自适应模糊 PID 算法的锂电池组双层均衡控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2):111-117.
- WU Wenjin, GUO Haiting, SU Jianhui, et al. Dual-layer equalization control of lithium batteries based on an adaptive fuzzy PID algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 111-117.
- [17] 卢开诚, 刘铠诚, 董树锋. 基于模糊单神经元 PI 的微电网频率自适应控制[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 131-139.
- LU Kaicheng, LIU Kaicheng, DONG Shufeng. A microgrid frequency control method based on fuzzy single neuron adaptive PI control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 131-139.
- [18] CASTRO L, PERÉZ-LONDOÑO S, MORA J. Application of fuzzy logic based control in micro-grids[C] // 2019 FISE-IEEE/CIGRE Conference-living the Energy Transition (FISE/CIGRE), December 4-6, 2019, Medellin, Colombia: 1-8.
- [19] NGUYEN A T, TANIGUCHI T, ECIOLAZA L, et al. Fuzzy control systems: past, present and future[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2019, 14(1): 56-68.
- [20] 何胜华, 范必双, 夏侯智聪, 等. 一种新颖的模糊自耦合 PI 在风力机 MPPT 控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 46-55.
- HE Shenghua, FAN Bishuang, XIAHOU Zhicong, et al. A novel fuzzy self-coupled PI for wind turbine MPPT control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 46-55.
- [21] UDDIN N, ISLAM M S. Optimization and management strategy of grid connected hybrid renewable energy sources[C] // 2019 International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE), March 14-16, 2019, Dhaka, Bangladesh: 1-6.
- [22] CHEN Y K, WU Y C, SONG C C, et al. Design and implementation of energy management system with fuzzy control for DC microgrid systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(4): 1563-1570.
- [23] LIU Bin, WU Weihang, ZHOU Chunxiao, et al. An AC-DC hybrid multi-port energy router with coordinated control and energy management strategies[J]. IEEE Access, 2019, 7: 109069-109082.
- [24] LIU Bin, PENG Yuwei, XU Jiachao, et al. Design and implementation of multiport energy routers toward future energy Internet[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 1945-1957.
- [25] MILANI A A, KHAN M T A, CHAKRABORTTY A, et al. Equilibrium point analysis and power sharing methods for distribution systems driven by solid-state transformers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(2): 1473-1483.
- [26] YE Huili, WEN Shuli, ZHU Miao, et al. Virtual energy routing strategy for energy internet with renewable energy[C] // 2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition-Asia (ECCE-Asia), May 24-27, 2021, Singapore, Singapore: 1459-1463.
- [27] CHEN Xu, ZHANG Yan. Energy router optimization strategy based on LSTM algorithm for real-time congestion prediction[C] // 2022 IEEE 11th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS), August 3-5, 2022, Chengdu, China: 380-384.
- [28] WANG Yuanhui, ZHANG Yan. Energy routing strategy based on minimum loss and transaction price[C] // 2022 41st Chinese Control Conference (CCC), July 25-27, 2022, Hefei, China: 6073-6078.
- [29] 刘秋华, 张秀锦, 樊陈. 基于功率差变步长扰动观察法的 MPPT 控制算法[J]. 电源技术, 2020, 44(7): 1035-1039.
- LIU Qiuhua, ZHANG Xiujin, FAN Chen. MPPT control algorithm based on power difference variable step-size disturbance observation method[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(7): 1035-1039.
- [30] YANG Jingyu, YANG Tongguang, LUO Longfu, et al. Tracking-dispatch of a combined wind-storage system based on model predictive control and two-layer fuzzy control strategy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 974-989.

收稿日期: 2023-11-07; 修回日期: 2024-03-26

作者简介:

姜昊(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子变压器控制技术; E-mail: jh_0319@163.com

孙毅超(1987—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用。E-mail: yichao.sun@njnu.edu.cn

(编辑 许威)