

基于事件触发的动态一致性馈线负载均衡控制策略

罗佳龙¹, 傅晓帆¹, 袁旭峰¹, 张靖¹, 熊国江¹, 黄民聪²

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550000; 2. 澳门大学科技学院、智慧城市物联网国家重点实验室, 澳门 999078)

摘要: 随着大规模间歇式新能源和多元化柔性负荷的接入, 加剧了馈线间负载不平衡程度。为实现馈线负载均衡并稳定直流电压, 提出基于事件触发的动态一致性馈线负载均衡控制策略。首先, 设计基于事件触发的动态一致性算法计算相关状态量, 避免信息集中化处理。其次, 设计馈线负载均衡控制的功率计算模块和功率更新模块, 以实现分布式馈线负载均衡控制。然后, 基于电压下垂控制对下垂特性曲线和功率参考值进行改进, 以达到直流电压无差跟踪。最后, 在 PSCAD/EMTDC 平台搭建四端 MMC 柔性互联配电网验证所提控制策略的有效性。仿真结果表明: 所提控制策略能快速均衡馈线负载, 提高直流电压控制可靠性, 降低系统通信量。

关键词: 柔性互联配电网; 改进电压下垂控制; 事件触发; 动态一致性算法; 负载均衡

Event-triggered dynamic consistency algorithm based feeder load balancing control strategy

LUO Jialong¹, FU Xiaofan¹, YUAN Xufeng¹, ZHANG Jing¹, XIONG Guojiang¹, WONG Manchung²

(1. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550000, China; 2. Faculty of Science and Technology & State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macau 999078, China)

Abstract: With the large-scale integration of intermittent new energy and diverse flexible loads, the imbalance between feeders has intensified. To achieve feeder load balancing and stabilize DC voltage, an event-triggered dynamic consistency algorithm based feeder load balancing control strategy is proposed. First, the event-triggered dynamic consistency algorithm is designed to calculate the relevant state variables, which avoids centralized information processing. Second, a power calculation module and a power update module for feeder load balancing control are designed, enabling distributed feeder load balancing. Then, the droop characteristic curve and power reference value are improved based on voltage droop control to achieve zero-error tracking of the DC voltage. Finally, a four-terminal MMC flexible interconnected distribution network is developed on the PSCAD/EMTDC platform to verify the effectiveness of the proposed control strategy. Simulation results show that the proposed control strategy can rapidly balance the feeder loads, enhance the reliability of DC voltage control, and reduce system communication volume.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52167007).

Key words: flexible interconnected distribution network; improved voltage droop control; event-triggered; dynamic consistency algorithm; load balancing

0 引言

随着间歇式新能源集成到配电网, 馈线末端面临潮流反转和电压越限等问题, 并进一步影响配电网新能源的承载水平^[1-2]。另外, 伴随以新能源汽车为代表的柔性负荷接入配电网, 网络动态性能差和供电可靠性差等问题愈发突出, 进而导致配电网整

体运行被动^[3-4]。此外, 配电网常将地域相近的负荷和分布式电源接入到同一供电区域, 使得馈线间沿线集成的新能源发电容量和负荷类型存在较大差异, 从而加剧馈线间负载不平衡和网络拥堵程度, 降低网络设备效率^[5-6]。因此, 为应对间歇式新能源和多元化负荷的大规模接入, 确保配电网馈线的负载均衡显得尤为关键。

传统馈线负载均衡方法有网络重构法, 通过操作分段开关和联络开关适时调整网络结构, 将负荷从重载馈线转移到轻载馈线。文献[7-10]采用了网络

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52167007); 贵州省科技计划项目资助(黔科合基础-ZK[2023]一般 075)

重构法转移负荷,实现馈线间负载均衡。但传统重构法操作复杂,可能出现网络重构失败问题,难以适用于大规模间歇性新能源接入的场景。

基于柔性互联装置的多端柔性互联配电网具有柔性特性^[11-12],能连续调节潮流,实现负荷灵活转移,改善配电网馈线间负载状况^[13-14];且能够高效地消纳间歇式新能源,提高系统新能源承载水平^[15-18]等。目前,已有不少学者开展了多端柔性互联配电网馈线均衡方法的研究。其中,为提高集中式馈线负载均衡优化的计算速度,文献[5]提出了一种基于二阶锥规划的增强方法求解馈线负载均衡模型,以实现负载均衡和损耗优化的分区控制。文献[19]将多目标粒子群优化算法和局部搜索技术相结合,计算所提馈线负载均衡模型,有效改善了馈线负载均衡度,但仅考虑了两端系统。文献[20]提出了双层嵌套负载均衡方法,供区内的馈线间使用网络重构均衡负荷,不同供区间采用柔性互联均衡负荷,实现了供区层和馈线层的负载均衡。上述文献所提集中式控制方法需集中处理较多数据,通信负担较重,并且随着柔性互联配电网互联场景的增多和互联范围的增大,集中式方法的计算复杂度会大幅增加,进而导致优化时间尺度难以适应间歇式新能源的频繁波动。

为提高系统自适应控制能力,文献[21]提出了分布式自适应控制的负载均衡方法,基于改进一致性算法实现馈线均衡,但其未考虑各馈线间的容量占比。文献[22]提出了基于一致性算法的主从控制智能软开关(soft open point, SOP)的负载均衡方法,但其协调控制不够灵活。文献[23]提出了基于一致性算法的馈线经济负载均衡模型,以提高负载均衡度和经济性,但其负载均衡不能满足功率动量平衡。直流电压控制是柔性互联系统的核心^[24-27],而上述文献所提控制未能很好地兼顾直流电压的稳定控制。如文献[21-22]采用的主从控制虽然简单,但潮流控制的稳定性和灵活性未能较好地满足控制需求;文献[23]采用的电压下垂控制,虽能实现多点控制但存在直流电压偏差。而常用的通过直流电压偏差获取参考值增量以实现直流电压无差跟踪的方法^[28-29],其控制环节较为繁琐。

基于上述传统配电网面临的挑战以及柔性互联配电网的发展需求,提出了基于事件触发的动态一致性馈线负载均衡控制策略。首先,基于事件驱动的动态一致性算法计算目标负载率、修正功率和补偿功率。其次,设计了功率计算模块和功率更新模块,用于计算和自主更新各端馈线负载均衡功率指令。最后,针对电压下垂控制的固有不足,引入直流电压偏差和功率偏差平滑化改进下垂特性曲线,

并引入修正功率和补偿功率实现直流电压无差跟踪。

1 基于事件触发一致性算法的馈线负载均衡控制

1.1 动态离散一致性算法

一致性算法是一种仅需与相邻智能体通信的弱通信算法,本文采用的通信拓扑等效为无向图 $G=[V,E,A]$,包括节点集合 V 、边集合 E 与边权重矩阵 A ,若节点 i 与节点 j 之间存在通信,则 A 矩阵中元素 $a_{ij}=1$,否则 $a_{ij}=0$ 。采样间隔为 h ,采样序列为 $\{sh\}$, $s=1,2,\dots,k$ 。若图 G 中各个节点之间都存在通信路径,则称图 G 为连通,其连通性是系统状态一致的基础。通信拓扑拉普拉斯矩阵表示为 L 。离散一致性协议可描述为^[30]

$$x_i(k+1) = x_i(k) - c \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i(k) - x_j(k)) \quad (1)$$

式中: a_{ij} 为智能体 i 与智能体 j 之间的边权值; $x_i(k+1)$ 为第 $k+1$ 次迭代的状态量; $x_i(k)$ 和 $x_j(k)$ 为第 k 次迭代的状态量; c 为步长; N 为智能体数量; N_i 为与智能体 i 相邻的智能体个数。

为了在新能源和柔性负荷频繁波动的环境下仍能准确和快速地实现负载均衡,本文采用动态离散一致性算法,其一致性协议可描述为^[31-32]

$$\begin{cases} x_i(k+1) = x_i(0) - c \sum_{j \in N_i} \delta_{ij}(k+1) \\ \delta_{ij}(k+1) = \delta_{ij}(k) + a_{ij} [x_i(k) - x_j(k)] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\delta_{ij}(k+1)$ 和 $\delta_{ij}(k)$ 分别为在第 $k+1$ 次和第 k 次迭代期间 x_i 和 x_j 之间的累计误差,其中 $\delta_{ij}(0)=0$; $x_i(0)$ 为状态量初始值。

动态一致性算法的向量形式可表示为

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{W} \cdot \mathbf{X}(k) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{X}(k)=[x_1(k),x_2(k),x_3(k),\dots,x_N(k)]^T$; \mathbf{W} 为通信网络权值矩阵, $\mathbf{W} = \mathbf{I} - c\mathbf{L}$, \mathbf{I} 为单位矩阵。

1.2 馈线负载均衡控制

本文将换流器作为智能体,设计功率计算模块计算本端馈线负载均衡所需的功率。此外,为防止功率更新指令频繁更新而导致功率振荡,设计功率更新模块更新功率指令。

1) 功率计算模块

本文所提馈线负载率为实际动态馈线负载所占馈线容量的百分比^[33]。

$$L_i = \frac{P_{i,Feeder}}{P_{i,NFeeder}} \quad (4)$$

式中: L_i 为换流站 i 所接馈线的实时负载率; $P_{i,Feeder}$ 为馈线的有功功率; $P_{i,NFeeder}$ 为馈线的额定功率。

采用动态一致性算法计算馈线目标负载率有

$$\begin{cases} L_{i,v}(k+1) = L_i(0) - c \sum_{j \in N_i} \delta_{ij,L}(k+1) \\ \delta_{ij,L}(k+1) = \delta_{ij,L}(k) + a_{ij}(L_i(k) - L_j(k)) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $L_{i,v}(k+1)$ 为第 $k+1$ 次迭代的目标负载率; $\delta_{ij,L}(k+1)$ 为第 $k+1$ 次迭代 L_i 与 L_j 之间的累计误差; $L_i(0)$ 为负载率初始值。

根据 $L_{i,v}$ 计算馈线负载均衡所需功率为

$$P_{i,L} = P_{i,NFeeder}(L_{i,v} - L_i) \quad (6)$$

式中, $P_{i,L}$ 为换流站 i 的馈线负载均衡功率。

采用动态一致性算法的换流站其状态量稳定时, 仍维持站间通信, 造成了通信资源浪费, 为此本文采用基于事件触发的动态一致性算法。当前触发时刻为 $t^i \in [t_k^i, t_{k+1}^i]$, t_k^i 和 t_{k+1}^i 分别为上一触发时刻和下一触发时刻, t_k^i 时刻换流站 i 和 j 的状态分别为 $x_i(t_k^i)$ 和 $x_j(t_k^i)$, t^i 时刻换流站 i 和 j 的状态分别为 $x_i(t^i)$ 和 $x_j(t^i)$ 。测量误差和组合测量值分别为

$$e_i(t^i) = x_i(t_k^i) - x_i(t^i) \quad (7)$$

$$q_i(t^i) = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_i(t^i) - x_j(t^i)) \quad (8)$$

式中: $e_i(t^i)$ 为 t_k^i 与 t^i 时刻 x_i 的测量误差; $q_i(t^i)$ 为 t^i 时刻组合测量值。

基于事件触发的动态一致性协议可描述为

$$\begin{cases} L_{i,v}(t_{k+1}^i) = L_i(0) - c \sum_{j \in N_i} \delta_{ij,L}(t_{k+1}^i) \\ \delta_{ij,L}(t_{k+1}^i) = \delta_{ij,L}(t^i) + a_{ij}(L_i(t^i) - L_j(t^i)) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $L_{i,v}(t_{k+1}^i)$ 为 t_{k+1}^i 时刻的负载率; $\delta_{ij,L}(t_{k+1}^i)$ 为 t_{k+1}^i 时刻 L_i 与 L_j 之间的累计误差。

结合文献[34-35]设计 $L_{i,v}$ 事件触发函数。同时, 为防止相邻馈线间目标负载率差值过大, 增加辅助判定阈值 η ^[35]。 $L_{i,v}$ 的事件触发条件为

$$\begin{cases} f_{L_{i,v}} = e_{L_{i,v}}(t^i)^2 - a_L q_{L_i}(t^i)^2 \\ t_{k+1}^i = \inf\{t^i > t_k^i \mid f_{L_{i,v}} \geq 0, |q_{L_i}(t_k^i)| \geq \eta\} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $f_{L_{i,v}}$ 为 $L_{i,v}$ 的事件触发函数; $e_{L_{i,v}}(t^i)$ 为 $L_{i,v}(t_k^i)$ 与 $L_{i,v}(t^i)$ 之差; a_L 为常数系数; $q_{L_i}(t^i)$ 为 t^i 时刻 L_i 的组合测量; η 为常数。

2) 功率更新模块

馈线负载率状态可分为: (1) 稳定收敛(stable convergence, SC)状态、(2) 稳定不收敛(stable non-convergent, SNC)状态、(3) 收敛过程(convergence process, CP)状态、(4) 发散过程(divergence process, DP)状态。如图 1 所示, l_v 为目标曲线, l_{SC} 为稳定收敛状态曲线, l_{SNC} 为稳定不收敛状态曲线, l_{CP} 为收敛过程状态曲线, l_{DP} 为发散过程状态曲线, ε 为馈线负载率允许误差, 取 5%。

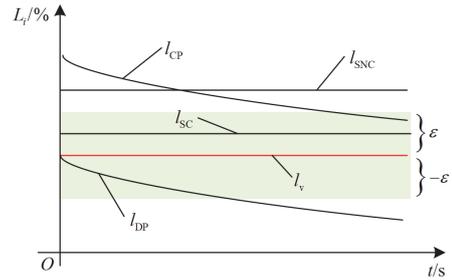


图 1 负载率状态

Fig. 1 Load rate state

定义馈线负载状态误差有

$$\begin{cases} e_{i,Lv}(k) = L_{i,v}(k) - L_i(k) \\ e_{i,Le}(k) = e_{i,Lv}(k) - e_{i,Lv}(k-1) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $e_{i,Lv}(k)$ 为目标负载率与实际馈线负载率之差; $e_{i,Le}(k)$ 为目标负载率与实际馈线负载率的测量误差。

基于数学模型描述馈线负载率运行状态有:

(1) 当 $\varepsilon > |e_{i,Lv}(k)|$ 时, 为 SC 状态; (2) 当 $|e_{i,Lv}(k)| > \varepsilon$ 且 $e_{i,Le}(k) = 0$ 时, 为 SNC 状态; (3) 当 $e_{i,Lv}(k) > \varepsilon$ 且 $e_{i,Le}(k) < 0$ 和 $e_{i,Lv}(k) < -\varepsilon$ 且 $e_{i,Le}(k) > 0$ 时, 为 CP 状态; (4) 当 $e_{i,Lv}(k) > \varepsilon$ 且 $e_{i,Le}(k) > 0$ 和 $e_{i,Lv}(k) < -\varepsilon$ 且 $e_{i,Le}(k) < 0$ 时, 为 DP 状态。根据馈线负载状态误差和馈线负载率运行状态, 设计功率更新事件触发条件为

$$\begin{cases} f_{P_{i,L}} = z + z_1 \\ t_{k+1}^i = \inf\{t > t_k^i \mid f_{P_{i,L}} \geq 0\} \end{cases} \quad (12)$$

$$z = \begin{cases} 2 & |e_{i,Lv}(k)| \geq \varepsilon \\ -2 & |e_{i,Lv}(k)| < \varepsilon \end{cases} \quad (13)$$

$$z_1 = \begin{cases} 1 & e_{i,Lv}(k) \times e_{i,Le}(k) > 0 \\ 0 & e_{i,Lv}(k) \times e_{i,Le}(k) = 0 \\ -3 & e_{i,Lv}(k) \times e_{i,Le}(k) < 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $f_{P_{i,L}}$ 为 $P_{i,L}$ 的触发函数; z 与 z_1 为判断馈线负载状态的分段函数。

z 用来描述负载率是否在误差允许范围内, z_1 用来描述负载率变化趋势。当 L_i 处于 SC 和 CP 状态时, 功率更新模块不动作; 当 L_i 处于 SNC 和 DP 状态时, 功率更新模块动作。当 $f_{P_{i,L}}$ 大于或等于 0 时, 触发更新, 当 $f_{P_{i,L}}$ 持续大于等于 0 时, 则以 100 ms 为周期进行触发更新。功率更新模块能有效避免功率指令频繁更新导致的功率振荡。

2 改进电压下垂控制

目前, 多端柔性互联电网的协调控制策略主要有主从控制、电压裕度控制和电压下垂控制^[24-27]。其中, 主从控制模式切换依赖通信; 电压裕度控制虽然改善了主从控制依赖通信的不足, 但其暂态控制性能表现不佳; 电压下垂控制作为多点控制, 具有自律控制优势, 能自主平衡功率, 并且潮流控制自由度更高^[24-27]。因此, 本文多端柔性互联电网协调控制采用式(15)所示的电压下垂控制。

$$K(U_{i,\text{dcref}} - U_{i,\text{dc}}) + (P_{i,\text{ref}} - P_i) = 0 \quad (15)$$

式中: K 为下垂系数; $U_{i,\text{dcref}}$ 和 $P_{i,\text{ref}}$ 分别为换流器 i 的直流电压和有功功率的参考值; $U_{i,\text{dc}}$ 和 P_i 分别为直流电压和有功功率的反馈值。

电压下垂控制虽能实现多点平衡, 但存在直流电压控制刚性较差问题, 在系统遭受大功率扰动时, 可能导致直流电压偏差过大^[24-27]。为避免这一情况, 本文对电压下垂控制的特性曲线进行改进。此外, 由于存在损耗及 $P_{i,L}$ 不满足动量平衡约束条件, 导致直流系统功率不平衡, 进而出现直流电压偏差。为消除直流电压偏差, 需对有功功率参考值进行改进。

2.1 下垂特性曲线的改进

引入直流电压偏差和功率偏差, 平滑化改进下垂特性曲线。

$$\frac{K + \left| \frac{P_{i,\text{ref}} - P_i}{U_{i,\text{dcref}} - U_{i,\text{dc}}} \right|}{1 - \frac{\xi}{U_{i,\text{dcref}} - U_{i,\text{dc}}}} (U_{i,\text{dc}} - U_{i,\text{dcref}}) + P_i - P_{i,\text{ref}} = 0 \quad (16)$$

式中, ξ 为直流电压允许的运行范围, 取值为 5%。

图 2 为具有相同下垂系数 K 的改进电压下垂控制特性曲线与传统电压下垂控制特性曲线。

改进电压下垂控制能实现电压下垂控制和定直流电压控制的平滑切换。系统在无扰动和遭受小扰动时, 执行电压下垂控制; 在遭受大功率扰动时, 自适应切换到定直流电压控制以稳定直流电压。

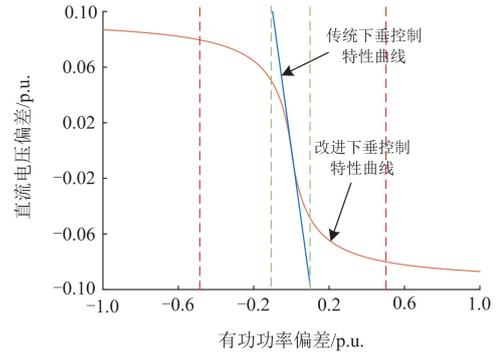


图 2 控制特性曲线对比

Fig. 2 Comparison of control characteristic curves

2.2 有功功率参考值的改进

存在直流电压偏差的原因主要有两方面:

1) $P_{i,L}$ 不满足动量平衡约束; 2) 直流系统网络损耗。基于此, 本文设计了修正功率和补偿功率, 以实现直流电压无差跟踪。其中, 修正功率用于保证 $P_{i,L}$ 的动量平衡, 补偿功率用于消除直流电压稳态误差。

1) 修正功率

为确定 $P_{i,L}$ 产生的总不平衡功率, 本文采用基于事件触发的动态一致性算法计算 $P_{i,L}$ 的平均不平衡功率。

$$\begin{cases} P_{i,\text{xv}}(t_{k+1}^i) = P_{i,L}(0) - c \sum_{j \in N_i} \delta_{j,\text{xv}}(t_{k+1}^i) \\ \delta_{j,\text{xv}}(t_{k+1}^i) = \delta_{j,\text{xv}}(t_k^i) + a_{ij}(P_{i,L}(t_k^i) - P_{j,L}(t_k^i)) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{i,\text{xv}}(t_{k+1}^i)$ 为 t_{k+1}^i 时刻各端 $P_{i,L}$ 产生的平均不平衡功率; $\delta_{j,\text{xv}}(t_{k+1}^i)$ 为 t_{k+1}^i 时刻 $P_{i,L}$ 与 $P_{j,L}$ 之间的累计误差; $P_{i,L}(0)$ 为修正功率初始值。

$P_{i,\text{xv}}$ 用于修正 $P_{i,L}$, 当 $P_{i,L}$ 更新时, $P_{i,\text{xv}}$ 也应更新。为此, $P_{i,\text{xv}}$ 添加辅助判断 $f_{L_{i,v}} \geq 0$, $P_{i,\text{xv}}$ 的触发条件可描述为

$$\begin{cases} f_{P_{i,\text{xv}}} = e_{i,\text{xv}}(t^i)^2 - a_{\text{xv}} q_{i,\text{xv}}(t^i)^2 \\ t_{k+1}^i = \inf\{t^i > t_k^i \mid f_{P_{i,\text{xv}}} \geq 0, f_{L_{i,v}} \geq 0\} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $f_{P_{i,\text{xv}}}$ 为 $P_{i,\text{xv}}$ 的触发函数; $e_{i,\text{xv}}(t^i)$ 为 $P_{i,\text{xv}}(t^i)$ 与 $P_{i,\text{xv}}(t_k^i)$ 之差; $q_{i,\text{xv}}(t^i)$ 为 $P_{i,\text{xv}}(t^i)$ 的组合测量; a_{xv} 为常数系数。

根据换流站容量分配 $P_{i,L}$ 造成的总不平衡功率, 得到修正功率 $P_{i,\text{x}}$ 如式(19)所示。修正功率 $P_{i,\text{x}}$ 对 $P_{i,L}$ 修正使其满足动量平衡, $P_{i,\text{x}}$ 和 $P_{i,L}$ 满足式(20)。

$$P_{i,\text{x}} = \frac{NP_{i,\text{xv}}S_{i,\text{B}}}{S_{\text{total}}} \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^N P_{i,L} + P_{i,x} = 0 \quad (20)$$

式中: $S_{i,B}$ 为换流站 i 的基准容量; S_{total} 为系统总容量。

2) 补偿功率

为消除直流网络损耗所引起的直流电压稳态误差, 本文基于事件触发的动态一致性算法, 以换流站传输功率为状态量, 获取附加功率参考值增量, 通过直接补偿线路损耗, 实现直流电压的无差跟踪, 并减少了控制环节。直流系统网损表示为^[29]

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^N P_i \quad (21)$$

式中, P_{loss} 为直流系统网络损耗。

各端基于动态一致性算法获取平均网络损耗, 总补偿功率为 P_{loss} 。各端补偿功率可描述为

$$\begin{cases} P_{i,bv}(t_{k+1}^i) = P_i(0) - c \sum_{j \in N_i} \delta_{j,bv}(t_{k+1}^i) \\ \delta_{j,bv}(t_{k+1}^i) = \delta_{j,bv}(t^i) + a_{ij}(P_i(t^i) - P_j(t^i)) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{i,bv}(t_{k+1}^i)$ 为 t_{k+1}^i 时刻的补偿功率; $\delta_{j,bv}(t_{k+1}^i)$ 为 t_{k+1}^i 时刻 P_i 与 P_j 之间的累计误差; $P_i(0)$ 为补偿功率初始值。

当出现直流电压偏差时, 需要触发更新 $P_{i,bv}$, 为此可添加辅助判断如式(23)所示。

$$|e_{U_{i,dc}}| \geq c_{U_{dc}} \quad (23)$$

式中: $c_{U_{dc}}$ 为直流系统稳态时允许的最大直流电压偏差值; $e_{U_{i,dc}}$ 为直流电压误差, $e_{U_{i,dc}} = U_{i,dcref} - U_{i,dc}$ 。

$P_{i,bv}$ 的触发条件可描述为

$$\begin{cases} f_{P_{i,bv}} = e_{i,bv}(t^i)^2 - a_{bv} q_{i,bv}(t^i)^2 \\ t_{k+1}^i = \inf\{t^i > t_k^i \mid f_{P_{i,bv}} \geq 0, |e_{U_{i,dc}}| \geq c_{U_{dc}}\} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $f_{P_{i,bv}}$ 为 $P_{i,bv}$ 的触发函数; $e_{i,bv}(t^i)$ 为 $P_{i,bv}(t^i)$ 与 $P_{i,bv}(t^i)$ 之差; $q_{i,bv}(t^i)$ 为 $P_{i,bv}(t^i)$ 的组合测量; a_{bv} 为常数系数。

2.3 整体控制

本文所提控制策略是一种分层控制, 分层控制结构如图3所示, 上层实现馈线负载均衡控制, 下层实现直流电压稳定控制。

上层控制中, 功率计算模块计算负载均衡所需功率 $P_{i,L}$, 功率更新模块则控制 $P_{i,L}$ 的更新, 以实现馈线负载均衡, 同时 $P_{i,x}$ 修正 $P_{i,L}$, 使其满足动量平衡。下层控制中, 改进电压下垂控制保证系统在遭受大功率扰动时仍能维持直流电压稳定, 同时 $P_{i,bv}$ 补偿系统的网络损耗, 以实现直流电压无偏差跟踪。

由此得到各端参考功率为

$$P_{i,refvsc} = P_{i,ref} + P_{i,L} + P_{i,x} + P_{i,bv} \quad (25)$$

式中, $P_{i,refvsc}$ 为换流站 i 的有功功率参考值。

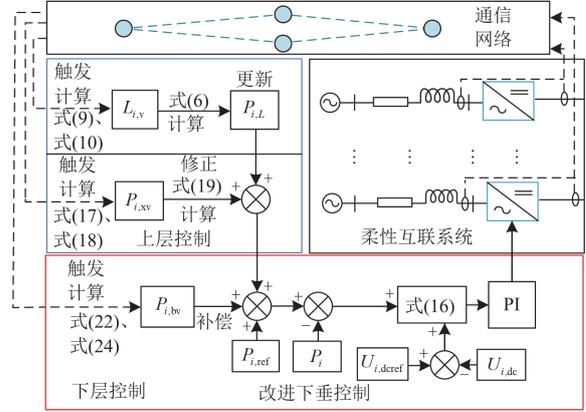


图3 分层控制结构

Fig. 3 Hierarchical control structure

3 算例与分析

3.1 模型构建与参数设置

为验证本文所提控制策略的有效性, 在PSCAD/EMTDC中搭建如图4所示的四端中压柔性互联配电网系统。

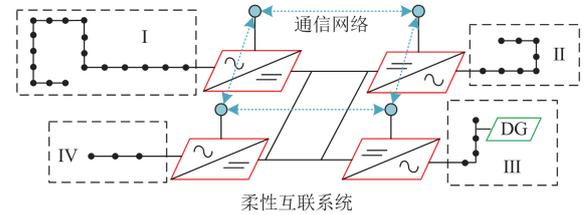


图4 四端柔性互联配电网

Fig. 4 Four-terminal flexible interconnected distribution network

四端分别连接了10 kV 供电区域 I、II、III、IV, 其中供电区域 I 为重负荷区域, 供电区域 III 为新能源聚集区域。换流器采用多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)。系统参数如表1所示。

表1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	数值
额定直流电压/kV	10
MMC1—MMC4 容量/MW	4
直流电压允许波动范围/kV	±5%(19~21)
交流系统电压/kV	10
直流线路电阻/Ω	0.125
下垂系数 MMC1—MMC4	2
供电区域 I—IV 的馈线容量/MW	5,3,4,3

$f_{L_{i,v}}$ 、 $f_{P_{i,xv}}$ 和 $f_{P_{i,bv}}$ 的检测时间间隔为 1 ms，一致性算法通信周期为 1 ms。功率更新触发条件的检测时间间隔为 100 ms，满足事件触发条件后，更新周期为 10 ms。且随着状态量的迭代，测量误差和组合测量之差将趋于 0，这意味着系统状态稳定时，仍会频繁通信，因此增设 $L_{i,v}$ 、 $P_{i,xv}$ 和 $P_{i,bv}$ 的误差判断阈值分别为 0.004、0.002 和 0.003。当测量误差的绝对值大于等于判断阈值时，触发条件决定触发时刻，否则不触发。 a_L 、 a_{xv} 和 a_{bv} 分别取为 0.05、0.08 和 0.05。 η 和 $c_{U_{dc}}$ 分别取为 0.01 和 0.025 kV。当采用离散一致性算法时，若步长 c 取值过大将导致触发频繁，若步长 c 取值过小将导致状态量收敛速度过慢，经仿真调参，本文选取 c 为 0.05。图 4 通信网络拓扑的拉普拉斯矩阵 L 为

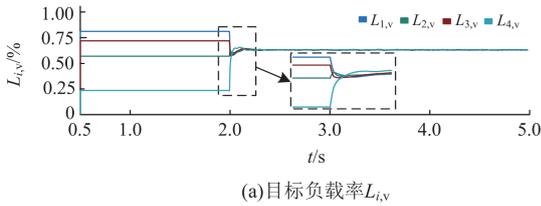
$$L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

3.2 仿真验证

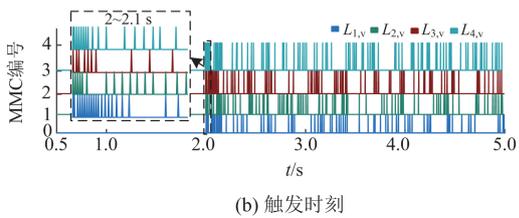
1) 无馈线负载和新能源出力波动的场景

为验证所提基于事件触发的动态一致性馈线负载均衡控制策略的有效性，将其应用于图 4 所示的四端柔性互联系统。在 $t=1$ s 时开启计算 $P_{i,bv}$ ，在 $t=2$ s 时开启计算 $L_{i,v}$ 和 $P_{i,xv}$ 。图 5—图 7 为馈线负载均衡控制效果的输出波形，图 8、图 9 分别为补偿功率和修正功率迭代波形图，图 10 为改进电压下垂控制与传统电压下垂控制的直流电压控制效果对比图。

如图 5 所示， $L_{i,v}$ 经 0.3 s 收敛，在 2~2.1 s 期间，不采用事件触发时，需通信 100 次，而采用事件触发后，仅需通信 21 次。如图 6 所示，在 $t=2$ s 时，



(a) 目标负载率 $L_{i,v}$



(b) 触发时刻

图 5 $L_{i,v}$ 及其触发时刻

Fig. 5 $L_{i,v}$ and the trigger moments

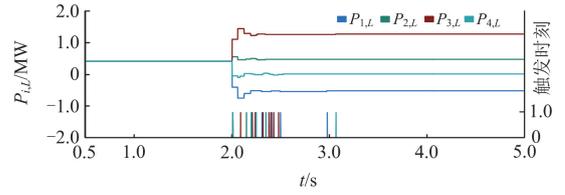


图 6 $P_{i,L}$ 及其触发时刻

Fig. 6 $P_{i,L}$ and the trigger moments

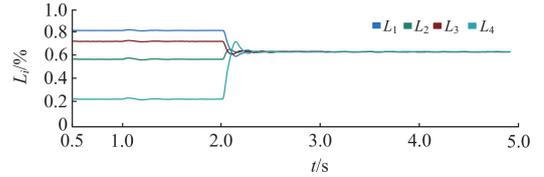
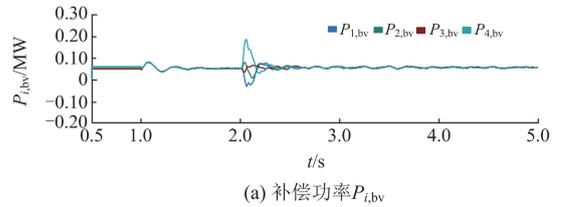
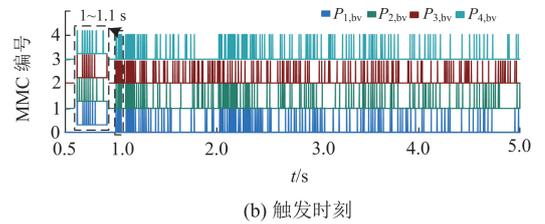


图 7 馈线负载率 L_i

Fig. 7 Feeder load rate L_i



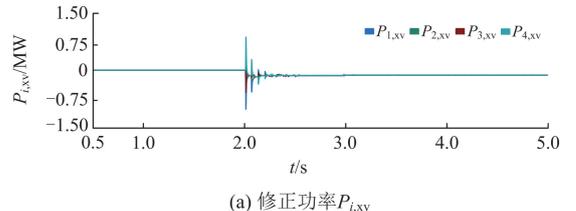
(a) 补偿功率 $P_{i,bv}$



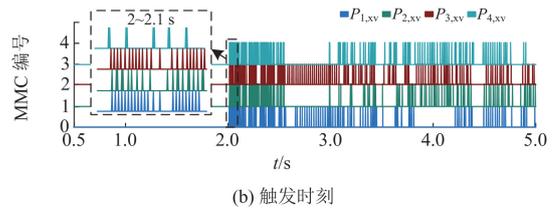
(b) 触发时刻

图 8 $P_{i,bv}$ 及其触发时刻

Fig. 8 $P_{i,bv}$ and the trigger moments



(a) 修正功率 $P_{i,xv}$



(b) 触发时刻

图 9 $P_{i,xv}$ 及其触发时刻

Fig. 9 $P_{i,xv}$ and the trigger moments

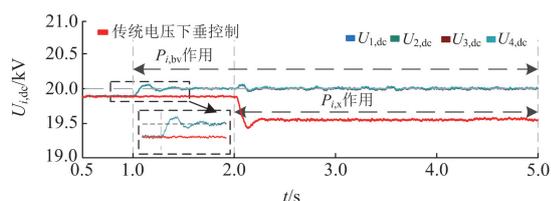


图 10 MMC1—MMC4 的直流电压

Fig. 10 DC voltages of MMC1—MMC4

功率计算模块根据 $L_{i,v}$ 计算得到 $P_{i,L}$, 并根据功率更新模块的触发信号进行更新。如图 7 所示, MMC1—MMC4 接收功率指令 $P_{i,L}$ 并开始转移功率, 经 0.5 s 后, 四回馈线负载率达到一致。

综上, 所提馈线负载均衡方法能自主计算并更新馈线均衡所需功率, 能快速实现负载均衡并降低通信需求。

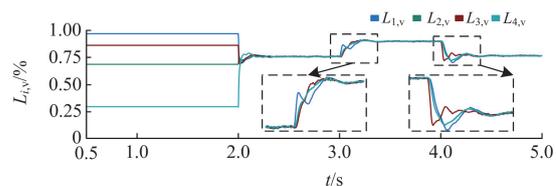
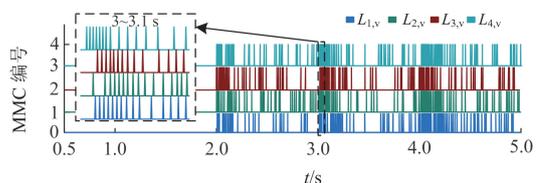
如图 8 所示, $P_{i,bv}$ 在 $t=1\sim 1.1$ s 期间最多通信了 16 次, 约经过 0.4 s 实现收敛。如图 9 所示, $P_{i,xv}$ 在 $t=2\sim 2.1$ s 期间最多通信了 23 次, 约经过 0.3 s 实现收敛。如图 10 所示, 对比传统电压下垂控制和改进电压下垂控制的直流电压控制效果, 在 $t=0.5\sim 2$ s 期间, 基于传统下垂控制的换流站存在约 0.12 kV 的直流电压偏差, $t=2\sim 5$ s 期间, 系统出现约 0.42 kV 的直流电压偏差。而基于改进电压下垂控制的换流站, 在 $P_{i,bv}$ 和 $P_{i,xv}$ 作用期间的最大直流电压偏差不超过 0.05 kV, 并且在稳态时维持直流电压的无偏差跟踪。

2) 馈线负载和新能源出力波动的场景

为验证所提控制策略在负载波动和新能源出力波动情况下的有效性, 设置在 $t=1$ s 时开启计算 $P_{i,bv}$, 在 $t=2$ s 时开启计算 $L_{i,v}$ 和 $P_{i,xv}$, 并在 $t=3$ s 时馈线 1 负荷增加 2 MW, 在 $t=4$ s 时, 馈线 3 线路上新能源出力增加 3 MW。图 11—图 13 为馈线负载均衡控制效果的输出波形, 图 14、图 15 为补偿功率和修正功率迭代波形图, 图 16 为改进电压下垂控制与传统电压下垂控制的直流电压控制效果对比图。

如图 11 所示, 在馈线功率波动下 $L_{i,v}$ 经 0.4 s 实现收敛, 且在 3~3.1 s 期间最多通信 16 次。如图 12 所示, 在 $t=3$ s、4 s 时, 功率计算模块能在馈线功率波动下快速计算 $P_{i,L}$, 且功率更新模块防止了功率指令频繁更新。如图 13 所示, 在馈线功率波动下, MMC1—MMC4 接收功率指令 $P_{i,L}$ 后开始转移功率, 四回馈线仍能在 0.5 s 内实现负载均衡。

综上, 所提方法即使在大扰动的情况下也能快速实现负载均衡, 避免馈线重轻载。


 (a) 目标负载率 $L_{i,v}$


(b) 触发时刻

 图 11 功率波动下 $L_{i,v}$ 及其触发时刻

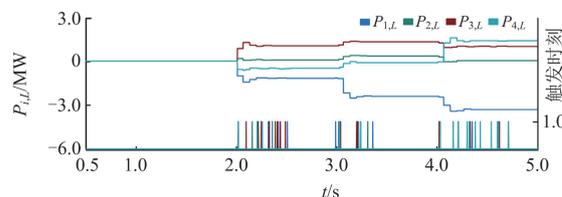
 Fig. 11 $L_{i,v}$ and the trigger moments under power fluctuations

 图 12 功率波动下 $P_{i,L}$ 及其触发时刻

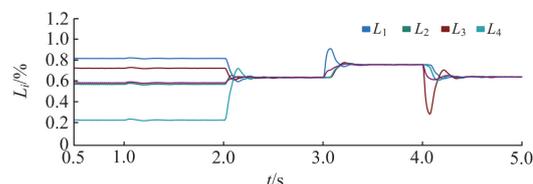
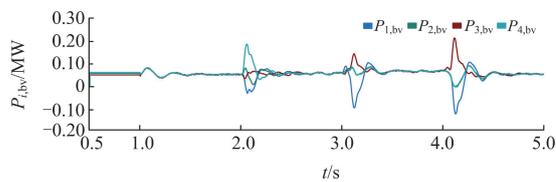
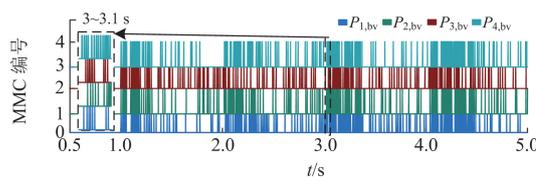
 Fig. 12 $P_{i,L}$ and the trigger moments under power fluctuations

 图 13 功率波动下馈线负载率 L_i

 Fig. 13 Feeder load rate L_i under power fluctuations

 (a) 补偿功率 $P_{i,bv}$


(b) 触发时刻

 图 14 功率波动下 $P_{i,bv}$ 及其触发时刻

 Fig. 14 $P_{i,bv}$ and the trigger moments under power fluctuations

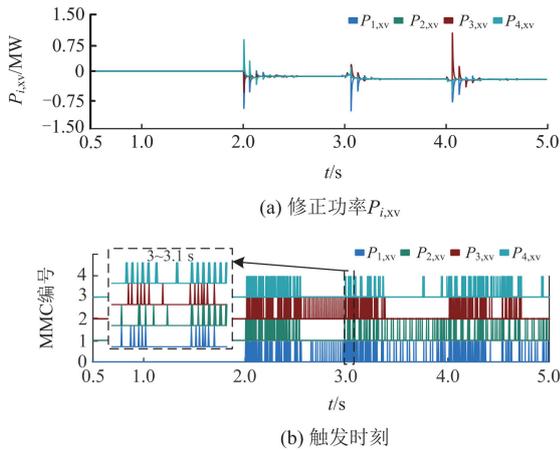


图 15 功率波动下 $P_{i,xv}$ 及其触发时刻

Fig. 15 $P_{i,xv}$ and the trigger moments under power fluctuations

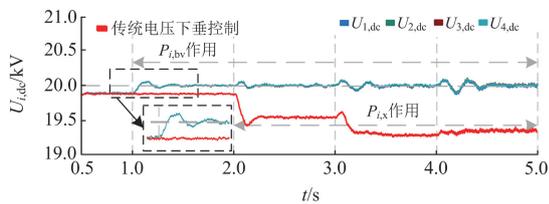


图 16 功率波动下 MMC1—MMC4 的直流电压

Fig. 16 DC voltages of MMC1—MMC4 under power fluctuations

在馈线功率波动下， $P_{i,bv}$ 和 $P_{i,xv}$ 仍能经少量通信实现快速收敛。如图 14 所示， $P_{i,bv}$ 在 $t = 3 \sim 3.1$ s 期间最多通信了 28 次，约经过 0.4 s 实现收敛。如图 15 所示， $P_{i,xv}$ 在 $t = 3 \sim 3.1$ s 期间最多通信了 26 次，约经过 0.3 s 实现收敛。如图 16 所示，对比传统电压下垂控制和改进电压下垂控制的直流电压控制效果，基于传统电压下垂控制的换流站在 $t = 0.5 \sim 1$ s 期间存在约 0.12 kV 直流稳态偏差，并在 $t = 2 \sim 3$ s、 $3 \sim 4$ s 和 $4 \sim 5$ s 期间分别出现约 0.46 kV、0.69 kV 和 0.68 kV 的直流电压偏差。而基于改进电压下垂控制的换流站，在 $P_{i,bv}$ 和 $P_{i,x}$ 作用期间的最大直流电压偏差不超过 0.1 kV，并在稳态时实现直流电压的无偏差跟踪。

4 结论

本文针对配电网馈线负载不均衡问题以及柔性互联配电网的发展需求，提出了基于事件触发的动态一致性馈线均衡控制策略。仿真结果表明所提控制策略能实现馈线负载快速均衡并稳定直流电压，适用于大规模新能源和高波动负载接入场景。具体结论如下：1) 基于事件触发的动态一致性算法不仅能在动态环境下实现状态量的快速收敛，还大大

降低了通信需求；2) 功率计算模块和功率更新模块实现了去中心化的馈线管理；3) 改进电压下垂控制提高了直流电压控制能力，实现了直流电压的无偏差跟踪。

参考文献

- [1] BUTT O M, ZULQARNAIN M, BUTT T M. Recent advancement in smart grid technology: future prospects in the electrical power network[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(1): 687-695.
- [2] 徐晓春, 李佑伟, 戴欣, 等. 基于深度强化学习的馈线-台区两阶段电压优化[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(3): 63-73.
- XU Xiaochun, LI Youwei, DAI Xin, et al. Two stage voltage optimization of feeder-station area based on deep reinforcement learning[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(3): 63-73.
- [3] VENEGAS F G, PETIT M, PEREZ Y. Active integration of electric vehicles into distribution grids: barriers and frameworks for flexibility services[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 145.
- [4] RAHMAN S, KHAN I A, KHAN A A, et al. Comprehensive review & impact analysis of integrating projected electric vehicle charging load to the existing low voltage distribution system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 153.
- [5] JI H, WANG C, LI P, et al. An enhanced SOCP-based method for feeder load balancing using the multi-terminal soft open point in active distribution networks[J]. Applied Energy, 2017, 208: 986-995.
- [6] 汤波, 杨鹏, 余光正, 等. 基于负荷峰谷耦合特性的中压配电网供区优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7051-7063.
- TANG Bo, YANG Peng, YU Guangzheng, et al. Power supply area optimization method of medium voltage distribution network based on load peak valley coupling characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7051-7063.
- [7] 罗翠云, 邓秋荃, 李光明, 等. 基于检修灵敏度和网络重构的电网安全稳定系统的设计与研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 13-20.
- LUO Cuiyun, DENG Qiuquan, LI Guangming, et al. Design and research of power grid security and stability system based on maintenance sensitivity and network reconfiguration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 13-20.
- [8] 崔荣喜, 丁月明, 贾伟, 等. 基于网络重构和无功电压调节的光伏接纳能力提升方法[J]. 供用电, 2023, 40(7):

- 18-24.
CUI Rongxi, DING Yueming, JIA Wei, et al. PV hosting capacity improvement based on network reconfiguration and reactive voltage regulation[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(7): 18-24.
- [9] WANG H, PAN J, NGUYEN T T, et al. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on parallel slime mould algorithm[J]. *Energy*, 2022, 244.
- [10] PAN J, WANG H, NGUYEN T T, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network based on dynamic optimal period division and multi-group flight slime mould algorithm[J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 208.
- [11] 唐巍, 张起铭, 张璐, 等. 新型配电系统多层次交直流互联理念、关键技术与发展方向[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(6): 2-17.
TANG Wei, ZHANG Qiming, ZHANG Lu, et al. Concept, key technologies and development direction of multilevel AC/DC interconnection in new distribution system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(6): 2-17.
- [12] 胡益菲, 钱峰, 李海龙, 等. 基于储能型柔性互联装置的配电网孤岛恢复方法[J]. *供用电*, 2024, 41(2): 21-27.
HU Yifei, QIAN Feng, LI Hailong, et al. Island fault recovery method of distribution network based on flexible interconnection device with energy storage[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(2): 21-27.
- [13] CAO W, WU J, JENKINS N, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 245-257.
- [14] 祁琪, 姜齐荣, 许彦平. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J]. *电网技术*, 2020, 44(12): 4664-4676.
QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping. Research status and development prospect of flexible Interconnection for smart distribution networks[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(12): 4664-4676.
- [15] 刘栢志, 庞丹, 葛津铭, 等. 计及光储接入场景下的柔性互联系统多模式优化运行[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(6): 1-10.
LIU Guangzhi, PANG Dan, GE Jinming, et al. The multi-mode optimization operation of the flexible interconnection system considering the photovoltaic and energy storage access scenarios[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(6): 1-10.
- [16] 王成山, 季节, 冀浩然, 等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(4): 1-14.
WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(4): 1-14.
- [17] JIANG X, ZHOU Y, MING W, et al. An overview of soft open points in electricity distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(3): 1899-1910.
- [18] 张国驹, 裴玮, 杨鹏, 等. 中压配电网柔性互联设备的电路拓扑与控制技术综述[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(6): 18-29.
ZHANG Guoju, PEI Wei, YANG Peng, et al. Review on circuit topology and control technology of flexible interconnection devices for medium-voltage distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(6): 18-29.
- [19] QI Q, WU J, LONG C. Multi-objective operation optimization of an electrical distribution network with soft open point[J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 734-744.
- [20] 王灿, 吴耀文, 孙建军, 等. 基于柔性多状态开关的主动配电网双层负荷均衡方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 77-85.
WANG Can, WU Yaowen, SUN Jianjun, et al. Bi-layer load balancing method in active distribution network based on flexible multi-state switch[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 77-85.
- [21] 张今, 耿光超, 江全元, 等. 含柔性多状态开关的配电网分布式自适应控制[J]. *电网技术*, 2020, 44(7): 2649-2656.
ZHANG Jin, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan, et al. Distributed adaptive control for distribution network with flexible multi-state switches[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(7): 2649-2656.
- [22] 潘御钦, 耿光超, 江全元. 基于一致性算法的柔性多状态开关集群控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(6): 101-109.
PAN Yuqin, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Consistency algorithm based control strategy for soft open point cluster[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(6): 101-109.
- [23] 刘伟丰, 熊炜, 袁旭峰, 等. 基于一致性算法的柔性互联配电网负载均衡控制[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(6): 58-69.
LIU Weifeng, XIONG Wei, YUAN Xufeng, et al. The load balancing control strategy for flexible interconnected distribution network based on consensus algorithm[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(6): 58-69.
- [24] 李兴源, 曾琦, 王渝红, 等. 柔性直流输电系统控制研究综述[J]. *高电压技术*, 2016, 42(10): 3025-3037.
LI Xingyuan, ZENG Qi, WANG Yuhong, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system[J]. *High Voltage Engineering*, 2016,

- 42(10): 3025-3037.
- [25] TAYAB U B, ROSLAN M A B, HWAI L J, et al. A review of droop control techniques for microgrid[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 717-727.
- [26] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术综述[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(1): 72-84, 344. ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(1): 72-84, 344.
- [27] 宁显华, 潘欢, 李峰, 等. 基于线路电阻观测值的直流微电网改进下垂控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(11): 42-51.
NING Xianhua, PAN Huan, LI Feng, et al. An improved droop control strategy for a DC microgrid based on line resistance observations[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(11): 42-51.
- [28] 武海涛, 庞春林, 张宁宁. 兼顾提升功率分配精度与抑制电压偏差的自适应下垂控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(4): 109-120.
WU Haitao, PANG Chunlin, ZHANG Ningning. Adaptive sag control with improved power distribution accuracy and voltage deviation suppression[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(4): 109-120.
- [29] 刘昊宇, 刘崇茹, 郑乐, 等. 直流电压准无差修正的VSC-MTDC系统协同优化下垂控制[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(6): 117-126.
LIU Haoyu, LIU Chongru, ZHENG Le, et al. Cooperative optimal droop control for VSC-MTDC system with quasi non-error DC voltage regulation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(6): 117-126.
- [30] 贺文, 陈珍萍, 胡伏原, 等. 基于一致性的综合能源系统低碳经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(19): 42-53.
HE Wen, CHEN Zhenping, HU Fuyuan, et al. Consensus-based low-carbon economic dispatching of integrated energy systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(19): 42-53.
- [31] MENG Lexuan, ZHAO Xin, TANG Fen, et al. Distributed voltage unbalance compensation in islanded microgrids by using a dynamic consensus algorithm[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 31(1): 827-838.
- [32] 张勤进, 胡王宝, 刘彦呈, 等. 一种直流微电网多光伏变换器新型功率分配策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(9): 101-112.
ZHANG Qinjin, HU Wangbao, LIU Yancheng, et al. A novel power sharing strategy for multi photovoltaic converters in a DC microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(9): 101-112.
- [33] 王皓靖, 郭佩乾, 时珊珊, 等. 中压配电网多台区柔性互联技术应用现状与展望[J/OL]. *电力系统自动化*, 1-14[2024-04-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240401.0952.002.html>.
WANG Haojing, GUO Peiqian, SHI Shanshan, et al. Application status and prospects of multi-substation flexible interconnection technology in medium voltage distribution network[J/OL]. *Automation of Electric Power Systems*: 1-14[2024-04-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240401.0952.002.html>.
- [34] 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流器分布式协调控制策略[J/OL]. *电网技术*: 1-8[2024-06-30]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0787>.
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/OL]. *Power System Technology*: 1-8[2024-06-30]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0787>.
- [35] 董家伟, 龚春阳, 包俊, 等. 事件触发改进一致性算法的孤岛运行多逆变器微电网系统分布式二次调频方法[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(2): 476-489.
DONG Jiawei, GONG Chunyang, BAO Jun, et al. Event-triggered improved consensus algorithm distributed secondary frequency regulation of multi-inverter microgrid systems with islanded operation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(2): 476-489.

收稿日期: 2024-07-10; 修回日期: 2024-10-19

作者简介:

罗佳龙(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多端柔性互联电网的协调优化控制; E-mail: 1628991940@qq.com

傅晓帆(1979—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为多端柔性直流输电、电力电子在电力系统中的应用等。E-mail: xffu3@gzu.edu.cn

(编辑 许威)