

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.04.007

低压柔性直流互联系统运行控制与模式自适应切换策略

蒋昌君^{1,2}, 刘海涛^{1,2}, 熊雄², 郭昌浩¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;

2. 国网上海能源互联网研究院有限公司, 上海 201210)

摘要: 低压柔性直流技术是解决末端配电网重过载问题、保障供电可靠性的重要手段。稳态下高效运行与暂态下快速切换控制是低压柔性直流互联系统的核心技术基础。文中首先分析总结低压柔性直流系统典型分散式组网方式, 包括分散式组网互联系统的系统拓扑、接线方式、电压等级。针对负载空间分布不均下台区重过载问题提出一套稳态均载控制逻辑, 针对故障暂态过程中系统运行模式切换问题提出一种基于就地电压信息的自适应切换控制, 降低系统对通信的依赖, 并通过从控单元控制回路设计实现工作模式的无缝切换。然后在此基础上, 分析多端柔性互联应用下基于主从控制的暂态、稳态运行控制一体化设计, 实现系统暂态、稳态下高效协同与可靠运行。最后进行 PSCAD 时域仿真与 RT-LAB 硬件在环实验, 验证了文中所提控制逻辑及策略的正确性。

关键词: 低压直流; 柔性互联; 分散式组网; 均载运行; 暂态控制; 自适应切换逻辑; 无缝切换

中图分类号: TM7

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)04-0062-09

0 引言

新形势下配电系统面临高比例分布式新能源高效承载和充裕供电双重挑战, 低压直流与柔性互联技术是解决上述挑战的有效途径之一^[1-4]。低压柔性直流互联系统多换流器间高效协同与模式快速切换控制, 是保证系统可靠、稳定运行的重要前提。

低压柔性直流互联系统的配置方式包括集中配置与分散配置, 其中分散配置在占地面积、供电能力、控制方式等方面更具优势, 能够适应更多末端电网应用场景^[5-6]。针对分散配置模式, 目前运行控制策略主要包含主从控制、对等下垂控制、混合控制, 其中主从控制策略可靠性高, 但高度依赖通信和上层控制系统。文献[7-11]指出直流配电网在集中配置模式下进行信息汇总后再决策下发至各单元, 需要上层通信协调配合, 产生的信号多层次上送不利于及时接收控制信号。文献[12]指出在主从控制策略下需要实时监控线路并传输遥测信号, 故模式切换以及控制策略应用都有一定延迟。目前, 配电网规模的复杂化使得其信息流与能量流之间的交互增多, 现研究已逐步考虑到故障通信对于系统稳定性的影响。文献[13]考虑配电网信息物理层相互耦合关系, 提出了通信网络故障与协调控制之间的协同恢复策略。文献[14]分析交直流微网信息交互下通信延迟对控制策略的影响, 得出

了不同通信延迟对控制系统模式切换有直接影响的结论。文献[15-16]考虑通信异常下的配电网电压控制策略, 提高了在非正常通信场景下电压控制的准确度。文献[17]提出配电网下的动态集群划分策略, 将集中式控制转化为分集群式协调控制, 从而降低了通信延时带来的影响, 但集群间的通信仍需要建立通信系统。由此可见, 降低配电网控制系统对于通信网络的依赖, 是实现配电网灵活、可靠控制的优化方式之一。

将现有的控制策略直接应用于分散配置模式, 并未发挥就地分散式控制的特性优势, 与集中配置模式的控制并无区别。随着大量高比例分布式电源接入末端配电网, 基于分散式控制的模式越来越被重视, 文献[18]提出一种适用于分散式控制结构的传统直流下垂改进控制策略, 缓解了集中式控制存在的通信问题, 并验证了在多种场景下分散式控制的有效性。文献[19]采用分散式控制方式, 基于本地控制器采集的数据就地解决配电网暂态故障问题, 无须建立上层通信系统, 但控制的可靠性较低。文献[20]通过所提出的新型电压控制策略解决直流配电系统下工作模式切换的问题, 降低了系统通信成本, 实现了控制的无缝切换。

文中在台区柔性直流互联这一应用场景下, 首先设计包括系统拓扑、接线方式、电压等级在内的多端低压直流系统分散式组网方案, 然后对系统中用于柔性互联核心设备的控制模式, 以及多设备之间的控制架构、协调策略进行分析。在主从控制架构基础上, 提出一种模式间就地自适应切换控制策

收稿日期: 2024-12-16; 修回日期: 2025-03-12

基金项目: 国家重点研发计划资助项目“配电网高功率密度柔性互联技术和装备”(2023YFB2407400)

略, 该过程不依赖通信及上层控制系统, 可以实现无缝运行效果。最后, 分别在 PSCAD 与硬件在环实验平台上搭建相应模型, 对上述运行控制策略的有效性、正确性进行验证。

1 低压柔性直流互联系统分散式组网方式

1.1 互联系统拓扑

低压柔性直流互联系统可根据柔性互联设备的布点位置分为集中式和分散式两种组网结构^[21]。分散式结构中, 各台区低压侧交流出线经柔性互联单元接入就地直流母线, 各台区间通过直流电缆直接相连, 也可预留直流出线供直流设备接入。分散式互联系统拓扑如图 1 所示, 其主要优点为能够就地消纳各直流要素, 供电范围较大, 供电可靠性较高, 故其工程应用价值较大。

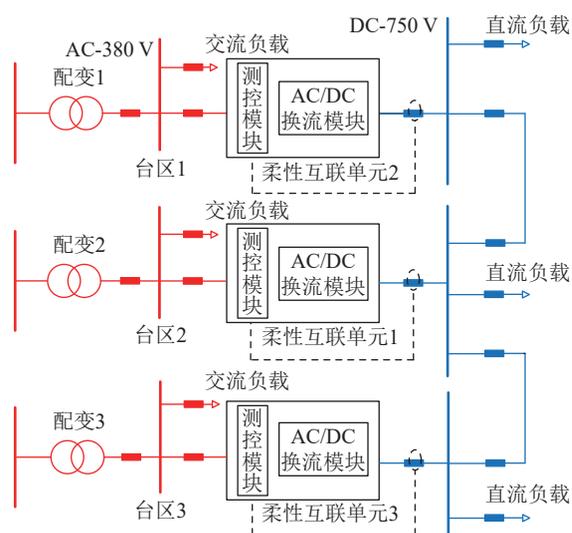


图 1 分散式三端低压柔性直流互联系统拓扑

Fig.1 Topology of the decentralized three-terminal low-voltage flexible DC interconnection system

1.2 互联系统接线方式

低压柔性直流互联系统分散式组网分为直流侧和交流侧两部分。对于直流侧, 主要考虑柔性互联单元出线端的接线方式, 可分为 3 种, 即单极不对称接线方式、伪双极接线方式以及双极接线方式^[22-23]。单极不对称接线由一条导线连接两柔性互联单元, 接线方式简单, 但可靠性较差, 目前应用于电压等级较低、功率小的城市轨道交通牵引系统。伪双极接线方式根据电容或电阻中点在各端对称接地, 形成正负极对称回路, 其可靠性较单极不对称接线方式更高^[24], 在直流配电系统中应用较广。双极接线方式由两个独立的柔性互联单元并联组成, 当系统出线故障时, 系统可以运行在单极模式下, 稳定性和可靠性较高, 但随着柔性直流系

统规模增大, 柔性互联单元增加, 建设成本也随之增加。由于低压台区电压等级较低、容量小, 可通过多台区互联提升供电可靠性。综合考虑供电可靠性和建设成本, 分散式结构选用伪双极接线方式。

1.3 互联系统电压等级

根据中低压直流配电电压导则 GB/T 35727—2017^[25], 低压配电台区柔性互联这一场景可选取的电压等级序列包括 ± 375 V、 ± 750 V 和 ± 1.5 kV。其中, ± 375 V 等级主要适用于通信系统、数据中心、家用光伏发电以及常规电动汽车充电桩接口等场景; ± 750 V 等级主要适用于少数城市轨道交通牵引系统、风电接入等场景; ± 1.5 kV 等级主要适用于工业园区直流负载、多数城市轨道交通牵引系统等场景^[26-27]。

为适应高比例分布式光伏、电动汽车快充桩等设备接入配电网末端的需求, 在分散式组网结构中采用上述 ± 750 V 的直流母线电压等级。

2 低压柔性直流互联系统运行控制策略

2.1 低压柔性互联台区的整体运行控制

台区柔性互联系统采用稳、暂态控制策略一体化设计思路, 逻辑流程如图 2 所示。其中, P_N 为台区需求供给功率, 而当某台区需要进行功率供给时, 每个台区的可互济功率可记为 P_i , 台区 i 的最大可互济功率 M_i 可由式 (1) 进行计算。

$$M_i = S(O_i - \beta_i) \cos \alpha_i \quad (1)$$

式中: S 为台区变压器容量; O_i 、 β_i 分别为台区 i 的重载率设定值和实时负载率; $\cos \alpha_i$ 为台区 i 的功率因数。

其中, 稳态逻辑主要解决季节性用电负荷波动、用电高峰时段以及突发性用电需求导致台区负载分布不均的问题, 可以避免配电台区局部重过载、轻空载现象导致的电压波动、谐波问题以及停电风险^[28]。

暂态情况下模式自适应切换逻辑可灵活装配至柔性互联单元的协调控制器中, 用于解决柔性互联系统线路故障导致柔性互联单元工作模式的切换过度依赖模块间的通信系统的问题, 增强模式切换的独立性。

2.2 低压柔性互联台区稳态运行控制策略

根据低压柔性互联台区的应用场景可选取不同的重载率设定值。柔性互联单元接入配电台区时应采用分层的控制架构, 包括管控层、协调层、本地层, 并构建云-边-端的二次通信架构。本地控制层的就地监测主站负责实时采集各台区、设备的

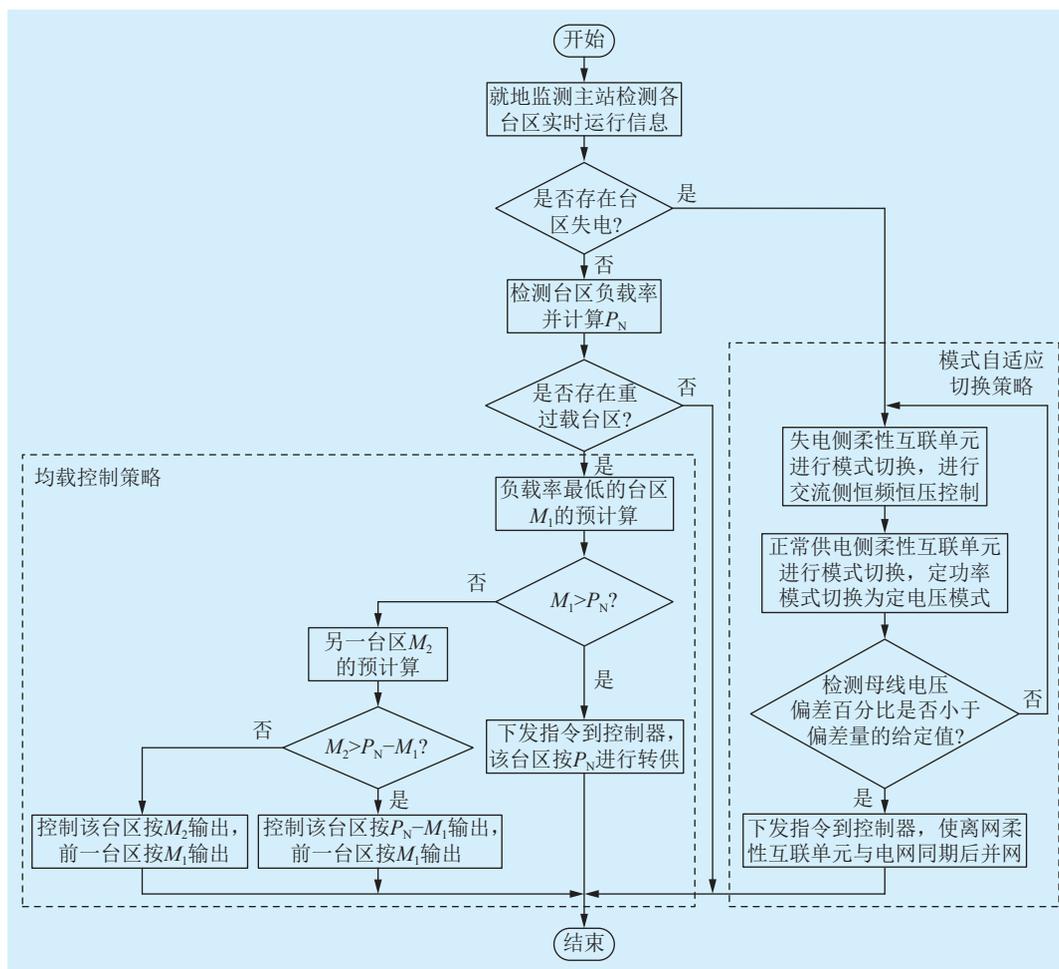


图2 稳态、暂态情况下自适应切换运行模式逻辑流程

Fig.2 Logic flowchart for adaptive switching operation modes under steady-state and transient conditions

运行状态(包括台区负载率 β_i), 并通过网络将数据上传至智能融合终端。就地监测主站每隔 5 min 进行一次数据采集, 作为均载控制逻辑每次的循环起始。

均载控制逻辑流程如图 2 所示。首先通过智能融合终端的各台区负载率计算某台区需求供给功率 P_N , 将可调台区的 M_i 和需求台区的 P_N 进行对比, 判断是否继续功率互济; 当该可调台区的可互济功率无法满足功率需求时, 由其他台区继续补充。

2.3 低压柔性互联台区模式自适应切换策略

模式自适应切换策略基于主从控制架构, 当系统正常运行达到稳定状态时, 各从控柔性互联单元均处于定功率控制模式, 主控柔性互联单元运行在定直流电压控制模式。

具体的自适应模式切换逻辑框图如图 3 所示。其中 P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为互联单元的有功、无功功率优化参考值; P 、 Q 分别为互联单元有功、无功功率输出; U_{ref} 为限幅环节输出的电压参考值; ω_0 为基波频率; L_1 为滤波电感; K_{p1} 、 K_{i1} 、 K_{p2} 、 K_{i2} 、 K_{p3} 、 K_{i3} 、

K_{p4} 、 K_{i4} 为各互联单元对应的比例、积分常数; U_{dc} 为直流母线电压; K 、 T_s 分别为为一阶惯性环节的增益与时间常数。在 dq 旋转坐标系下, U_d 、 i_d 分别为互联单元端电压、电流的 d 轴分量; U_q 、 i_q 分别为互联单元端电压、电流的 q 轴分量; i_d^* 、 i_q^* 分别为电流内环的 d 、 q 轴输入电流参考值; u_{cd} 、 u_{cq} 分别为电流环控制输出的 d 、 q 轴电压调制指令。

自适应模式切换模块用于接收能量优化指令, 功率参考值 P_{ref} 由配电网的能量管理系统提供。当主控柔性互联单元发生故障退出运行时, 整个直流配电系统的有功功率存在不平衡部分, 系统进入暂态过渡阶段。

由于配电网能量管理系统未能及时调整功率参考值 P_{ref} , 或者负荷变化超出电压限值下功率参考值 P_{ref} 的可调范围, 实际输出功率 P 无法跟踪功率参考值 P_{ref} , 经过比例积分 (proportional-integral, PI) 环节、限幅环节输出逐渐达到饱和, 从控柔性互联单元失去功率调节的作用, 直流电压将被限定在上限或下限, 实现工作模式从定功率控制到定电压

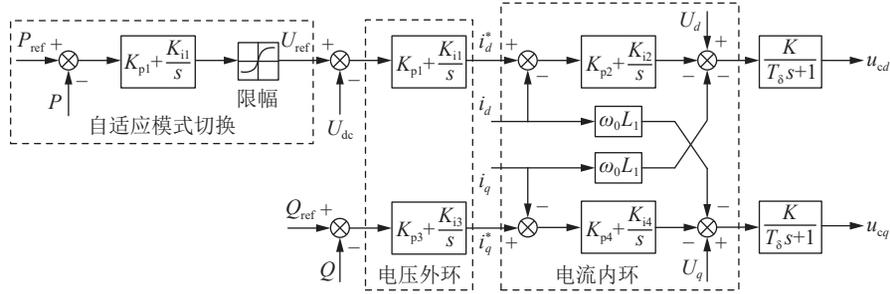


图 3 低压柔性直流互联系统自适应模式切换逻辑实现框图

Fig.3 Block diagram for the implementation of adaptive mode switching in low-voltage flexible DC interconnection system

控制的模式自适应切换。

可以得出,在模式自适应切换策略的调节下,低压柔性直流互联系统无须依赖各互联单元间的通信即可实现故障状态下无缝切换运行模式,从而维持整个柔性直流配电网的电压稳定,弱化上层通信的控制策略,增强系统的可靠程度。

3 系统时域仿真分析

为验证均载控制逻辑和模式自适应切换策略在运行控制方面的有效性,以分散式三端低压柔性直流互联系统为研究对象,采用 PSCAD/EMTDC 进行仿真验证。初始时,负载和台区变压器运行在正常运行范围,设柔性互联单元 1 为主控单元,工作在定直流电压模式;柔性互联单元 2、3 为从控单元,工作在定功率模式,系统具体仿真参数配置如表 1 所示。

表 1 系统仿真配置参数

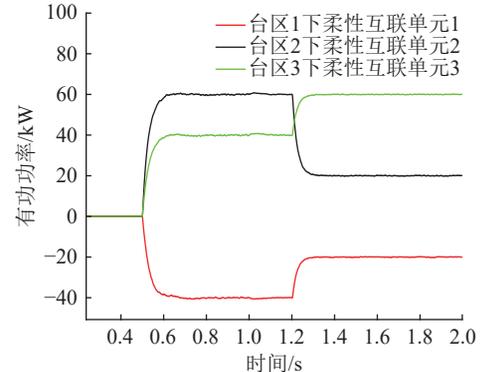
Table 1 The system simulation configuration parameters

参数	数值
交流系统电压/V	380
交流频率/Hz	50
直流母线电压/V	750
各配电变压器容量/(kV·A)	400
直流负载/kW	60
台区1下交流负载/kW	200
台区2下交流负载/kW	100
台区3下交流负载/kW	120
限幅环节下限/V	720
限幅环节上限/V	780

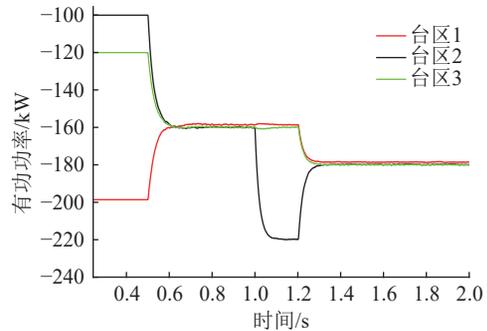
3.1 均载控制逻辑验证

验证均载控制逻辑时,具体的仿真工况如下:设定重载率为 50%,当 $t < 0.5$ s 时,各台区负载率分别为 50%、25%、30%;当 $t = 0.5$ s 时,均载控制逻辑启动,各台区负载率达到均衡后, $t = 1$ s 时台区 2 的交流负载突增 60 kW,此时台区 2 下负载的总有功率达 220 kW。

均载控制逻辑下柔性互联单元输出的有功功率及各台区有功功率输出情况如图 4 所示。由图 4 可以看出,当 $t < 0.5$ s 时,第一次均载控制逻辑启动前各柔性互联单元输出有功为 0,检测各台区负载率后发现台区 1 的负载率为 50%,达到重载率设定值,台区 1 重载,此时均载控制逻辑启动,柔性互联单元 1 向交流侧输出 40 kW 有功功率,使台区 1 的负载率降低至 40%,同时调节柔性互联单元 2、3 的输出,使得台区 2、3 总有功率均为 160 kW,负载率为 40%,实现三台区均载运行。



(a) 柔性互联单元输出的有功功率



(b) 台区有功功率输出

图 4 均载控制逻辑下柔性互联单元输出的有功功率及各台区有功功率输出情况

Fig.4 The active power output of flexible interconnection units and active power output of each transformer zone under the load-sharing control logic

$t = 1$ s 时台区 2 的交流负载突增了 60 kW,此时台区 2 下负载的总有功率为 220 kW,检测后发现

台区 2 的负载率为 55%，超过重载率设定值，台区 2 重载，均载控制逻辑再次启动，柔性互联单元 1 向交流侧输出 20 kW 有功功率，单元 2、3 向直流侧分别输出 20、60 kW 有功功率，此时 3 个台区下有功功率均为 180 kW，解决了相邻台区重过载与轻空载并存的问题。

直流母线电压在均载控制下的波动情况如图 5 所示。在均载控制逻辑运行后调节各柔性互联单元的出力，此时直流母线电压产生波动，当 $t=0.54$ s 时，电压上升到 769 V，在经历 0.47 s 调节时间后，又能迅速恢复至 750 V 的额定电压。仿真结果表明均载控制逻辑能够快速调节各柔性互联单元的出力来优化系统整体运行效果。

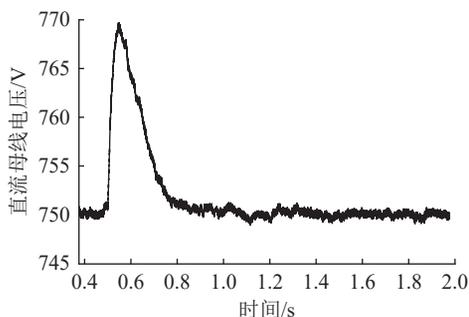


图 5 均载控制逻辑下直流母线电压波动情况
Fig.5 Voltage fluctuations of the DC bus under the load-sharing control logic

3.2 模式自适应切换策略验证

验证模式自适应切换策略时，将其与需要运行人员切换模式的传统主从控制策略进行对比。在传统主从控制策略下，采集的端侧设备实时运行情况需要时间传输，且实时终端的本地人机操作涉及毫秒级至秒级的延迟，故在仿真中将传统主从控制策略的模式切换延迟设定为 120 ms。具体仿真工况为：当 $t < 1$ s 时，柔性互联单元 1、2、3 分别承担有功功率 30、10、20 kW；当 $t=1$ s 时，柔性互联单元 1 所在线路故障，保护装置动作，断开线路使得台区 1 失电；当 $t=1.4$ s 时，台区 2 的直流负载突增 30 kW。

传统主从控制和模式自适应切换策略下柔性互联单元直流母线电压如图 6 所示。可知， $t=1$ s 时，柔性互联单元 1 由于线路故障退出运行，系统切换至交流侧恒频恒压控制模式，此时直流母线电压骤降，在模式自适应切换策略下直流母线电压被钳位至 720 V；随后，柔性互联单元 2 在 $t=1.14$ s 时将工作模式从定功率控制自适应切换为定直流电压控制。从故障发生到直流母线电压恢复的过渡时间约为 278 ms。当配电系统在故障暂态下需要切换运行模式时，传统主从控制策略存在较大的电

压波动，在有限幅环节约束时电压降低到 697 V，严重影响系统的安全运行；并且受人为切换控制模式的延迟和二次通信影响，动态响应时间慢。相比传统主从控制，模式自适应切换策略的动态响应时间缩短了 65.8 ms，并且能通过就地电压信息的判断实现工作模式快速平稳切换。

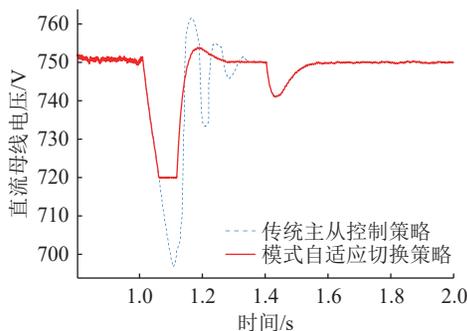


图 6 传统主从控制和模式自适应切换策略下柔性互联单元直流母线电压

Fig.6 The DC bus voltage of the flexible interconnection unit under the traditional master-slave control and adaptive mode switching strategy

模式自适应切换策略下各柔性互联单元输出的有功功率如图 7 所示。可知，在模式自适应切换策略下暂态故障过程结束后，柔性互联单元 2 的有功功率输出为 40 kW，当 $t=1.4$ s 时台区 2 的直流负载突增导致直流母线电压再次下降，控制柔性互联单元 2 增大功率输出以恢复直流母线电压，而未切换模式的柔性互联单元仍保持 20 kW 的定功率输出。

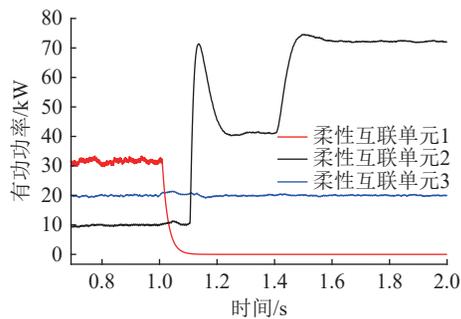


图 7 模式自适应切换策略下各柔性互联单元输出的有功功率
Fig.7 The active power output of flexible interconnection units under the adaptive mode switching strategy

综上所述，时域仿真结果验证了模式自适应切换策略在暂态故障下动态调节方面的优势，其暂态过渡过程短，电压波动能被抑制，且柔性互联单元的工作模式切换无需互联单元间通信信号的传递，仅基于就地电压信息即可达到理想的控制效果。

4 硬件在环实验验证

为验证模式自适应切换策略的动态切换无缝

性, 基于 RT-LAB 硬件在环测试三端柔性直流互联系统在台区交流侧失电情况下的暂态电压恢复情况。半实物仿真平台由实时 RT-LAB5600、5607 模拟器、数字信号处理器(digital signal processor, DSP)控制板、主机和示波器组成, 如图 8 所示, 其中 IGBT 为绝缘栅双极型晶体管。系统的主电路在 RT-LAB 模拟器上进行, 时间步长为 $40 \mu\text{s}$, 采样频率设置为 12 kHz 。

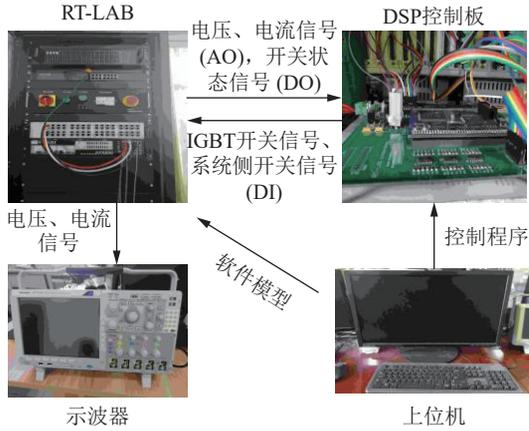
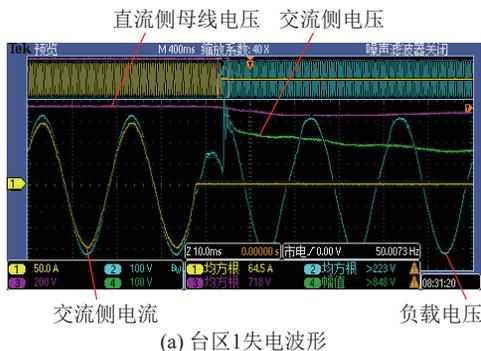


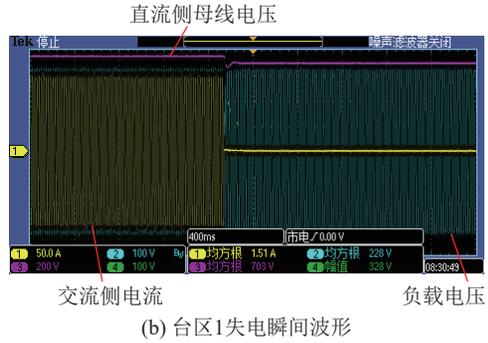
图 8 RT-LAB 半实物仿真平台
Fig.8 RT-LAB semi-physical simulation platform

3 台柔性互联单元交流侧各自接入具有独立供电能力的外电网, 且均装有隔离变压器、接触器、断路器以及附属配件。常规工作状态下台区 1 的柔性互联装置单元设置为定直流电压工作模式, 另外两台柔性互联单元设置为定功率模式。

交流供电侧断电实验波形如图 9 所示。其中, 横坐标一大格代表 10 ms , 纵坐标的刻度根据波形类别在示波器图左下角进行表示, 如图 9(a)所示, 波形 1 纵坐标每一大格标度为 50 A 。柔性互联单元 1 的交流侧外电网断电瞬间, 残压缓慢下降, 交流侧断电处经过 3 ms 后电流变为 0, 直流侧母线电压略有下降, 柔性互联单元 1 检测到异常电压后断开, 如图 9(b)所示, 此时柔性互联单元 2 通过模式自适应切换策略切换为定直流电压工作模式共同调节直流母线电压。



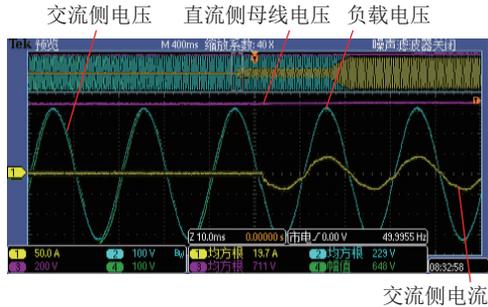
(a) 台区 1 失电波形



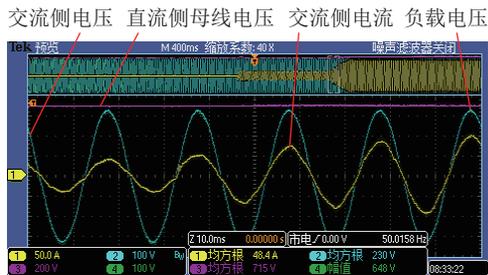
(b) 台区 1 失电瞬间波形

图 9 交流供电侧断电实验波形
Fig.9 Experimental waveforms of power failure on the AC power supply side

交流供电恢复时自适应切换策略运行波形如图 10 所示。当台区 1 恢复供电后, 柔性互联单元 1 根据模式自适应切换策略检验同期后无缝接入系统共同调节直流母线电压, 直流母线电压逐步恢复到 750 V 。



(a) 逻辑运行初始



(b) 逻辑运行之后

图 10 交流供电恢复时自适应切换策略运行波形
Fig.10 Adaptive switching strategy operational waveforms during the recovery of AC power supply

5 结语

文中针对柔性互联系统分散式组网下系统拓扑、接线方式、电压等级三方面进行论述, 设计了稳态下多配变台区间均载控制逻辑, 提出了暂态下基于柔性互联单元模式自适应切换的故障快速转供逻辑。所设计的均载控制逻辑能够有效解决相邻台区间重过载与轻空载并存的问题, 实现末端配电网动态扩容与优化运行。所提出的自适应切换策略能够有效解决模式切换过度依赖通信与上层控制系统的问题, 实现末端电网故障快速转供与可靠运行。

参考文献:

- [1] 冀肖彤, 杨东俊, 方仍存, 等. “双碳”目标下未来配电网构建思考与展望[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 37-48.
JI Xiaotong, YANG Dongjun, FANG Rengcun, et al. Research and prospect of future distribution network construction under dual carbon target[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 37-48.
- [2] 刘科研, 盛万兴, 詹惠瑜, 等. 考虑多台区互联的中低压交直流混合配电网双层协同优化调度方法[J]. 电力建设, 2024, 45(1): 33-44.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, ZHAN Huiyu, et al. Bi-level optimization scheduling of mid-low-voltage AC/DC hybrid distribution network considering interconnection between networks[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 33-44.
- [3] 徐良德, 郭金川, 郭挺, 等. 城市电网柔性分区互联方案研究[J]. 南方能源建设, 2023, 10(5): 9-16.
XU Liangde, GUO Jinchuan, GUO Ting, et al. Research on flexible interconnection of urban power grid[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(5): 9-16.
- [4] 王扬, 蔡永翔, 付宇, 等. 适应分布式光伏并网的低压交直流混合配电工程示范应用[J]. 供用电, 2023, 40(3): 40-46.
WANG Yang, CAI Yongxiang, FU Yu, et al. Demonstration application of low voltage AC/DC hybrid distribution project adapted to distributed photovoltaic grid connection[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(3): 40-46.
- [5] 郑国权, 祝恩国, 张海龙, 等. 基于主从博弈的高比例光伏配电网台区柔性互联规划[J]. 电力建设, 2024, 45(4): 100-110.
ZHENG Guoquan, ZHU Enguo, ZHANG Hailong, et al. Flexible interconnection planning for distribution station areas of high-ratio photovoltaic based on master-slave game[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(4): 100-110.
- [6] 陈楚靓, 李晓露, 纪坤华, 等. 考虑源荷储匹配的配电网集群划分与优化运行[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 80-93.
CHEN Chujing, LI Xiaolu, JI Kunhua, et al. Distribution network cluster partition and optimal operation considering source-load-storage matching[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 80-93.
- [7] 王强钢, 宋佳航, 廖建权, 等. 基于电压补偿的双端直流配电网电压就地协调控制[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 277-287.
WANG Qianggang, SONG Jiahang, LIAO Jianquan, et al. Local coordinated voltage control of two-terminal DC distribution network based on voltage compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 277-287.
- [8] 徐海亮, 张禹风, 聂飞, 等. 微电网运行控制技术要点及展望[J]. 电气工程学报, 2020, 15(1): 1-15.
XU Hailiang, ZHANG Yufeng, NIE Fei, et al. Key points and prospect of microgrid operation and control technologies[J]. Journal of Electrical Engineering, 2020, 15(1): 1-15.
- [9] 李敬如, 韩丰, 姜世公, 等. 能源互联网环境下交直流混合配电系统关键技术[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 56-63.
LI Jingru, HAN Feng, JIANG Shigong, et al. Research on the key technologies of AC/DC hybrid distribution networks based on energy Internet[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 56-63.
- [10] 汪泽州, 张明明, 钱峰强, 等. 含光伏接入的中压配电网集中调控优化策略[J]. 中国电力, 2023, 56(2): 15-22.
WANG Zezhou, ZHANG Mingming, QIAN Fengqiang, et al. Centralized regulation and optimization strategy for MV distribution network with PV integration[J]. Electric Power, 2023, 56(2): 15-22.
- [11] 刘子文, 唐渊, 张勇军, 等. 非理想工况下柔性直流配电系统建模与运行控制关键问题[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 73-84.
LIU Ziwen, TANG Yuan, ZHANG Yongjun, et al. Key issues of modeling and operation control of flexible DC distribution system under non-ideal conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 73-84.
- [12] HUO X X, XIE X F, WU Z J, et al. A novel DC voltage control strategy for DC distribution based on adaptive droop control[C]//2020 4th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA). Singapore. IEEE, 2020: 40-44.
- [13] 刘达夫, 钟剑, 杨祺铭, 等. 基于V2G与应急通信的配电网信息物理协同快速恢复方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 147-158.
LIU Dafu, ZHONG Jian, YANG Qiming, et al. Fast recovery method for distribution network through cyber-physical collaboration based on vehicle to grid and emergency communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 147-158.
- [14] 杨志淳, 王晨霞, 蒋东, 等. 交直流微电网群系统运行模式划分及协同互助调控策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 1111-1121.
YANG Zhichun, WANG Chenxia, JIANG Dong, et al. Operation mode division and cooperative regulation strategy of AC/DC microgrid cluster system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1111-1121.
- [15] 赵乐, 许凌, 张梦瑶, 等. 考虑非完美通信的高比例光伏配电网模糊电压控制策略[J]. 广东电力, 2023, 36(12): 9-16.
ZHAO Le, XU Ling, ZHANG Mengyao, et al. Fuzzy voltage control strategy for high proportion photovoltaic distribution network considering non-perfect communication[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(12): 9-16.
- [16] 方朝, 吴红斌, 杨晓东, 等. 考虑通信故障的配电网失联分布式电源群优化控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 44-52.
FANG Zhao, WU Hongbin, YANG Xiaodong, et al. Optimal control strategy for distributed generator group losing commu-

- nication in distribution network considering communication fault[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(5): 44-52.
- [17] 杜红卫, 尉同正, 夏栋, 等. 基于集群动态划分的配电网无功电压自律-协同控制[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(10): 171-181.
- DU Hongwei, WEI Tongzheng, XIA Dong, et al. Reactive voltage self-regulation and coordination control in distribution networks based on cluster dynamic partition[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(10): 171-181.
- [18] 陈波, 贾亦真, 汪硕承, 等. 考虑通信缺失情景的光伏集群分散式电压控制方法[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(4): 152-158, 167.
- CHEN Bo, JIA Yizhen, WANG Shuocheng, et al. Decentralized voltage control method of photovoltaic cluster considering communication loss scenario[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(4): 152-158, 167.
- [19] 丁涛, 张承学, 孙元博. 基于本地信号的 VSC-MTDC 输电系统控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(9): 44-48, 86.
- DING Tao, ZHANG Chengxue, SUN Yuanbo. A control strategy based on local signal measuring for VSC-MTDC[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(9): 44-48, 86.
- [20] 季一润, 袁志昌, 赵剑锋, 等. 一种适用于柔性直流配电网的电压控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(2): 335-341.
- Ji Yirun, YUAN Zhichang, ZHAO Jianfeng, et al. A suitable voltage control strategy for DC distribution power network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(2): 335-341.
- [21] 刘海涛, 董新洲, 熊雄, 等. 基于低压柔直的末端电网能源互联与能量微循环系统[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(6): 40-47.
- LIU Haitao, DONG Xinzhou, XIONG Xiong, et al. Energy interconnection and energy microcirculation system of terminal power grid based on low-voltage flexible DC[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(6): 40-47.
- [22] 徐旖旎, 刘海涛, 熊雄, 等. 低压配电台区柔性互联关键技术与发展模式[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(11): 3986-4001.
- XU Yini, LIU Haitao, XIONG Xiong, et al. Key technologies and development modes of flexible interconnection of low-voltage distribution station area[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(11): 3986-4001.
- [23] 苏成, 简翔浩, 孔志达, 等. 基于 IGCT 器件的配电网柔性直流互联策略[J]. *南方能源建设*, 2024, 11(6): 183-190.
- SU Cheng, JIAN Xianghao, KONG Zhida, et al. Flexible interconnection strategy of distribution network based on IGCT[J]. *Southern Energy Construction*, 2024, 11(6): 183-190.
- [24] 邓卫, 裴玮, 吴琦, 等. 低压直流系统 VSC 交互影响与稳定性分析: 主从控制与下垂控制[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(S1): 80-91.
- DENG Wei, PEI Wei, WU Qi, et al. VSC interaction and stability analysis of low-voltage DC system: master-slave control VS droop control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(S1): 80-91.
- [25] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中低压直流配电电压导则: GB/T 35727—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Guideline for standard voltages of medium and low voltage DC distribution system: GB/T 35727-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [26] 盛万兴, 李蕊, 李跃, 等. 直流配电电压等级序列与典型网络架构初探[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(13): 3391-3403, 3358.
- SHENG Wanxing, LI Rui, LI Yue, et al. A preliminary study on voltage level sequence and typical network architecture of direct current distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(13): 3391-3403, 3358.
- [27] 段建东, 魏朝阳, 周一, 等. 未来直流配电网电压等级序列研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(12): 3538-3545, 13.
- DUAN Jiandong, WEI Zhaoyang, ZHOU Yi, et al. Research on voltage level sequence of future DC distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(12): 3538-3545, 13.
- [28] 彭寒梅, 尹棠, 肖千皓, 等. 高比例分布式电源配电网中低压柔性互联协调规划[J]. *中国电力*, 2024, 57(8): 117-129.
- PENG Hanmei, YIN Tang, XIAO Qianhao, et al. Coordinated planning of medium-voltage and low-voltage flexible interconnection for distribution networks with high proportion of distributed generation[J]. *Electric Power*, 2024, 57(8): 117-129.

作者简介:



蒋昌君

蒋昌君(1998), 男, 硕士, 从事柔性直流配电网仿真、分布式电源并网工作(E-mail: 1571040311@qq.com);

刘海涛(1978), 男, 博士, 教授级高级工程师, 通信作者, 从事直流配电运行控制、分布式电源并网与微电网技术工作;

熊雄(1988), 男, 博士, 高级工程师, 从事分布式电源并网与交直流微电网技术工作。

Operation control and mode adaptive switching strategy for low-voltage flexible DC interconnection systems

JIANG Changjun^{1,2}, LIU Haitao^{1,2}, XIONG Xiong², GUO Changhao¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Grid Shanghai Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201210, China)

Abstract: Low-voltage flexible direct current (LV-FDC) technology represents a vital technical approach to addressing the issues of heavy overloading and power supply reliability in end-user distribution networks. The core technological foundation of LV-FDC systems lies in their efficient operation under steady-state conditions and rapid switching control during transient states. This paper analyzes and summarizes the typical decentralized networking modes of LV-FDC systems, encompassing system topologies, connection schemes, and voltage levels. Aiming at the heavy overloading issue in transformer zones caused by uneven spatial and temporal load distributions, a set of steady-state load balancing control logic is proposed. For the issue of system operation mode switching during fault transients, an adaptive switching control based on local voltage information is proposed, which reduces the system's dependence on communication and achieves seamless switching between operating modes through the design of the slave control unit's control loop. Furthermore, an integrated design for steady-state and transient operation control based on master-slave control is analyzed in the context of multi-terminal flexible interconnection applications, ensuring efficient coordination and reliable operation of the system under both steady and transient conditions. Finally, the correctness of all control logic strategies is verified through PSCAD time-domain simulations and RT-LAB hardware-in-the-loop experiments.

Keywords: low-voltage direct current; flexible interconnection; decentralized network; load sharing operation; transient control; adaptive switching logic; seamless switching

(编辑 陆海霞)

(上接第 32 页)

Asymmetric fault voltage support scheme for soft open points based on improved negative sequence voltage outer loop

WANG Xuze¹, CHEN Wu¹, ZHAO Haixi¹, CHEN Shi²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Flexible interconnection and dynamic power flow regulation in distribution networks are achieved by soft open point (SOP), optimizing the configuration and scheduling of distribution resources. To improve the load voltage during asymmetric ground faults, it is proposed that positive and negative sequence currents are output by the converter during faults. This provides voltage support and enhances fault ride-through capability. However, actual operating conditions make open-loop optimization schemes susceptible. Poor performance is shown by traditional negative sequence voltage-based closed-loop support. In this paper, the conventional negative sequence voltage outer loop is improved by controlling the amplitude of negative sequence current to suppress the negative sequence voltage. The phase of the negative sequence current is adjusted to optimize the suppression effect. To enhance the inverter's capacity utilization and limit active power fluctuations, a comprehensive scheme is proposed for limiting the positive and negative sequence current amplitudes. A short-circuit fault simulation is constructed using PSCAD simulation software, based on the actual parameters of the distribution network. The simulation results show that the proposed control strategy significantly enhances voltage performance during fault conditions, improving the low-voltage ride-through capability.

Keywords: asymmetric ground fault; soft open point (SOP); positive and negative sequence voltage support; voltage outer loop; line impedance ratio; limit active power fluctuations

(编辑 方晶)