

基于低压柔性互联的配电网台区自愈转供方案研究

王思麒¹, 黄亮亮², 温彦军², 薛旺喜²

(1. 国网上海市电力公司市北供电公司, 上海 200072; 2. 江苏金智科技股份有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 针对低压配电网自愈研究不足、台区运行可靠性低、新能源消纳困难等问题, 提出了一种基于柔性互联的低压配电网台区自愈转供方案。首先, 构建了改进的分散式柔性互联拓扑结构, 设计了基于边缘计算的台区融合终端与智能分布式 FA 终端协同架构, 实现中压层与低压层的故障联动自愈。其次, 建立了柔性互联系统能流模型, 设计了分布式源荷转供、失电支援和故障隔离三种策略, 提出了基于预测控制的毫秒级供电恢复策略。最后, 通过算例验证了所提方案的有效性。研究结果表明: 该方案将系统负荷率方差降低 99.7%, 弃光量降低 82.5%, 运行成本降低 4.1%; 能够在 45 ms 内完成从故障发生到供电恢复的全过程, 重要负荷恢复率达到 100%; 故障隔离后系统可靠性仅降低 0.65%。

关键词: 低压配电网; 柔性互联; 自愈转供; 分布式控制

Research on self-healing transfer scheme of distribution network transformer areas based on low-voltage flexible interconnection

WANG Siqu¹, HUANG Liangliang², WEN Yanjun², XUE Wangxi²

(1. Shibei Power Supply Branch, Shanghai Electric Power Co., Ltd., Shanghai 200072, China;

2. Jiangsu Jinzhi Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: Addressing the challenges of insufficient self-healing research in low-voltage distribution networks, low station area reliability, and difficulties in renewable energy integration, this paper proposes a self-healing power supply scheme based on flexible interconnection for low-voltage distribution networks. First, an improved distributed flexible interconnection topology structure is constructed, and a collaborative architecture of station area fusion terminal and intelligent distributed FA terminal based on edge computing is designed to realize fault-linked self-healing between medium-voltage and low-voltage layers. Second, an energy flow model of flexible interconnection system is established, three strategies of distributed source-load transfer, power outage support, and fault isolation are designed, and a millisecond-level power supply recovery strategy based on predictive control is proposed. Finally, the effectiveness of the proposed scheme is verified through case studies. Research results show that: the scheme reduces system load rate variance by 99.7%, curtailed photovoltaic power by 82.5%, and operation cost by 4.1%; completes the entire process from fault occurrence to power supply recovery within 45 ms, with 100% recovery rate for critical loads; system reliability decreases by only 0.65% after fault isolation.

Keywords: low-voltage distribution network; flexible interconnection; self-healing power supply; distributed control

0 引言

随着电力电子技术的快速发展和新型电力设备的广泛应用，配电网架构正在发生深刻变革。传统的低压配电网普遍采用放射状单电源供电方式，在“双碳”背景下，配电网低压台区将面临高比例新能源发电、电动汽车充电桩、储能等低碳元素的接入，使得低压台区的运行复杂性和源荷不确定性增加^[1]。同时，传统低压台区独立运行方式下，容易产生配电设备容量短期过载、运行损耗大、新能源消纳低等问题，严重制约了配电网的安全高效运行^[2]。目前，国内外对配电网自愈的研究主要集中在10 kV中压配电网，针对400 V低压配电网的自愈研究相对较少。这主要存在三个方面的原因：一是低压保护控制手段欠缺；二是低压故障供电主要依赖中压转供；三是中压自愈系统信息汇集与低压状态监测设备独立开展建设^[3]。因此，探索低压配电网柔性互联技术，实现台区自愈转供具有重要的理论与实际意义。

近年来，国内学者针对配电网柔性互联及自愈技术开展了广泛研究。在柔性互联拓扑方面，文献[4]提出了一种新型电力电子变压器，可实现中低压电网的柔性互联；文献[5]研究了基于双向DC-DC变换器的低压直流配电网互联结构；文献[6]分析了柔性开关在配电网互联中的应用。在网架结构设计方面，文献[7]提出了基于软开关的配电网柔性互联架构；文献[8]设计了适用于城市配电网的环网互联结构；文献[9]研究了多馈线互联的配电网优化拓扑。在自愈控制策略方面，文献[10]提出了一种基于多智能体的配电网自愈控制方法；文献[11]提出了分层分布式自愈恢复策略；文献[12]研究了故障区域快速隔离与非故障区域恢复方法。在供电可靠性方面，文献[13]分析了柔性互联对配电网可靠性和经济性的综合影响。然而，现有研究主要关注中压配电网的柔性互联与自愈，缺乏对低压台区柔性互联的系统研究，特别是低压台区与中压自愈系统的协同设计研究较少，难以实现中低压一体

化自愈控制。

针对上述问题，本文提出了一种基于低压柔性互联的配电网台区自愈转供方案。首先，构建了改进的分散式柔性互联拓扑结构，设计了台区融合终端与智能分布式FA终端协同架构，实现中压层与低压层的故障联动自愈；其次，建立了柔性互联系统能流模型，提出了分布式源荷转供、失电支援和故障隔离策略，以及毫秒级供电恢复策略；最后，通过算例验证了所提方案的有效性。

1 基于柔性互联装置的低压配电网架构

1.1 柔性互联装置拓扑结构选型分析

国外研究机构提出了多种柔性互联设备的概念，但就拓扑实现而言，主要以背靠背电压源型变换器（B2B-VSC）和统一潮流控制器（UPFC）两类拓扑为例。针对不同应用场景，需要对柔性互联装置拓扑进行系统分析与选型。

本文提出了一种基于多准则决策的柔性互联装置拓扑选型方法，评价指标包括设备成本、转换效率、系统可靠性、控制灵活性和维护难度。拓扑优选模型为

$$J(T_i) = \sum_{j=1}^5 \omega_j f_j(T_i) \quad (1)$$

式中， $J(T_i)$ 为拓扑方案 T_i 的综合评价值； ω_j 为第 j 个评价指标的权重； $f_j(T_i)$ 为拓扑方案 T_i 在第 j 个评价指标上的归一化得分。

基于本文的分析，针对低压配电台区柔性互联应用场景，综合考虑各项评价指标，推荐采用改进的模块化多电平换流器（Modular Multilevel Converter, MMC）拓扑，其具有结构灵活、故障冗余性高、可扩展性强等优点，特别适合于多台区互联应用。

1.2 柔性互联的网络拓扑结构设计

国内研究机构研究了柔性环网装置的交直流混合配电网连线方式，并提出了几种典型网架结构。本文在分析现有研究的基础上，提出一种改进的分散式柔性互联拓扑结构，如图1所示。

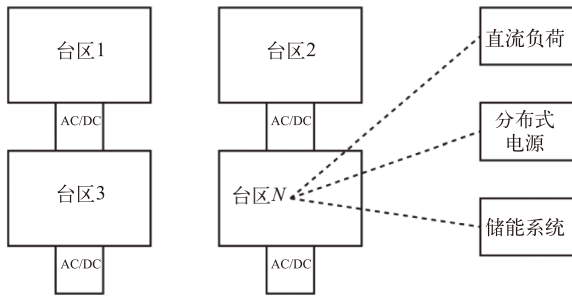


图1 分散式柔性互联拓扑结构

Fig. 1 Distributed flexible interconnect topology structure

相比传统网络拓扑，本文提出的改进分散式拓扑具有以下优势：采用环网结构，提高了系统供电可靠性和抗干扰能力；各台区通过柔性互联装置形成网状结构，任意相邻台区间均可实现双向功率流动；预置直流接口，便于分布式电源和储能系统接入；分散式控制架构，降低了系统通信依赖性，提高了系统鲁棒性。

针对不同的负荷特性和地理分布，可以定义网络拓扑复杂度指标为

$$C_T = \frac{L}{N} \frac{L_c}{L_l} \left(1 + \frac{N_d}{N} \right) \quad (2)$$

式中， C_T 为拓扑复杂度； L 为互联线路总数； N 为台区总数； L_c 为形成闭环的线路数； L_l 为线路总数； N_d 为装有分布式电源的台区数。

1.3 柔性互联系统能流模型

配电台区柔性互联系统台区交流区域有功功率平衡方程为

$$P_{tr,i,t} = P_{VSC,i,t} + P_{AL,i,t} \quad (3)$$

式中， $P_{tr,i,t}$ 、 $P_{VSC,i,t}$ 、 $P_{AL,i,t}$ 分别为时段 t 台区 i 的变压器低压侧、AC/DC换流器交流侧和交流负荷的有功功率。

台区直流区域的能量平衡方程为

$$\alpha_i P_{VSC,i,t} + P_{DG,i,t} = P_{DL,i,t} + P_{ESS,i,t} + P_{EV,i,t} + \sum_{j \in \Omega} P_{lin,ij,t} \quad (4)$$

式中， α_i 为台区 i 的AC/DC换流器转换系数， $P_{VSC,i,t} > 0$ 时， α_i 为换流器的转换效率 $\eta_{VSC,i}$ ， $P_{VSC,i,t} < 0$ 时， α_i 为 $1/\eta_{VSC,i}$ ； $P_{DG,i,t}$ 、 $P_{DL,i,t}$ 、 $P_{EV,i,t}$ 分别为时段 t 台区 i 的DG出力、直流负荷和直流充电桩有功功率； $P_{ESS,i,t}$ 为时段 t 台区 i 的储能充/

放电功率； Ω_i 为与台区 i 互联的台区集合； $P_{lin,ij,t}$ 为台区 i 经直流联络线流向互联台区 j 的传输有功功率。

储能系统的荷电状态（State of Charge, SOC）约束为

$$\begin{aligned} S_{i,t+1} &= S_{i,t} + \frac{\mu_i P_{ESS,i,t}}{E_{ESS,i}} \Delta t \\ -P_{ESSdm,i} &\leq P_{ESSi,t} \leq P_{ESScm,i} \\ S_{min} &\leq S_{i,t} \leq S_{max} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $S_{i,t}$ 为时段 t 台区 i 的储能SOC； $E_{ESS,i}$ 为台区 i 的储能额定容量； μ_i 为台区 i 的储能转换系数； Δt 为调度时段间隔； $P_{ESScm,i}$ 、 $P_{ESSdm,i}$ 分别为台区 i 的储能最大充电功率和最大放电功率； S_{min} 、 S_{max} 分别为储能SOC的下限和上限。

变压器的负荷率约束为

$$\beta_{i,t} = \frac{P_{tr,i,t}}{S_{tr,i} \cos \varphi} \leq \beta_{max} \quad (6)$$

式中， $\beta_{i,t}$ 为时段 t 台区 i 的变压器负荷率； $S_{tr,i}$ 为台区 i 的变压器额定容量； $\cos \varphi$ 为变压器功率因数； β_{max} 为负荷率上限。

2 台区融合终端与配电终端设备通信方案

2.1 台区融合终端与智能分布式FA终端的协同架构

目前，我国部分地区已投运大量融合终端，用于监测台区电压、电流并上传至四区平台，实现低压台区的数据监测。国网部分地区已试点柔性互联装置，实现台区柔性互联，但是目前智能分布式FA终端与台区融合终端、柔性互联装置均无通信，两者之间的故障协同处理的研究存在不足。

本文提出了一种台区融合终端与智能分布式FA终端的协同架构（见图2），实现中压层与低压层的故障联动自愈，填补10 kV中压层和400 V低压层故障联动自愈的空白。

在该架构中，中压层的故障信息通过智能分布式FA终端传递至台区融合终端，而低压层的监测信息通过台区融合终端上传至配电自动化主站。两者之间通过专用通信链路实现信息交互，

形成完整的中低压协同自愈闭环。

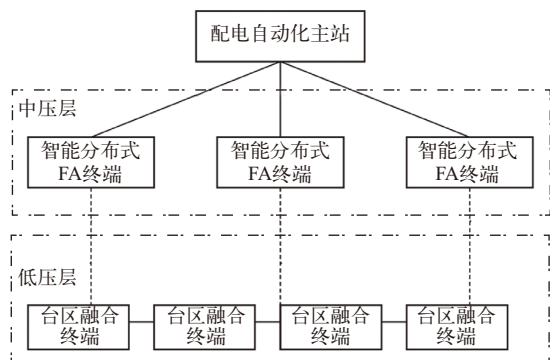


图2 智能分布式FA终端的协同架构

Fig. 2 Collaborative architecture of intelligent distributed FA terminals

2.2 基于边缘计算的融合终端架构设计

本文设计的台区融合终端架构基于边缘计算技术，采用“双模块+双协议栈”设计，如图3所示，实现了对交直流系统的统一监测与控制。

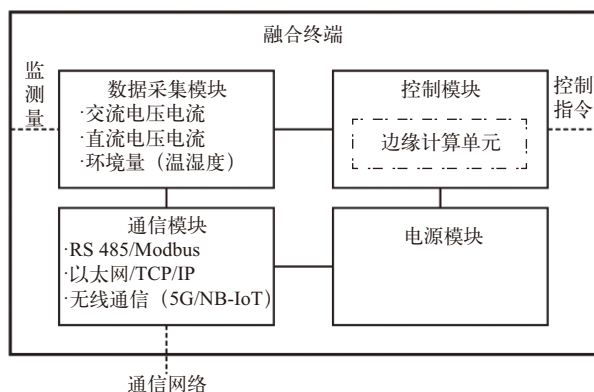


图3 基于边缘计算的融合终端架构

Fig. 3 Convergence terminal architecture based on edge computing

融合终端包含数据采集模块、控制模块、通信模块和电源模块四部分。数据采集模块采集交直流系统的电压、电流等电气量及环境量；控制模块集成边缘计算单元，负责故障判断和控制策略执行；通信模块支持多种通信协议，实现终端间和上下层设备的信息交互；电源模块为系统提供稳定可靠的电源。

控制模块的运算性能直接影响自愈转供决策的速度和质量。采用边缘计算单元，实现数据就地处理，减少通信延迟，提高系统响应速度。边

缘计算单元的处理能力 P_{EC} 与采样频率 f_s 、数据量 D 和算法复杂度 C 的关系可表示为

$$P_{EC} = kf_s DC \quad (7)$$

式中， k 为比例系数，与处理器架构相关。

2.3 分布式通信网络架构

低压柔性互联技术多采用分散式控制方式，相邻融合终端之间分布式交互，根据终端间的信息交互，实现合环内的各台区源荷转供、失电支援和故障隔离功能。

本文设计了一种分布式通信网络架构，如图4所示，支持融合终端间的点对点通信和终端与主站的上下行通信。

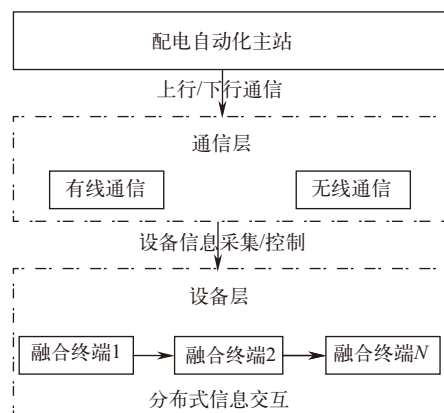


图4 分布式通信网络架构

Fig. 4 Distributed communication network architecture

该通信架构的核心是分布式信息交互模型，定义为

$$I_{ij} = \{D_{ij}, T_{ij}, P_{ij}, S_{ij}\} \quad (8)$$

式中， I_{ij} 为台区 i 与台区 j 之间的信息交互集合； D_{ij} 为数据集合； T_{ij} 为时间戳集合； P_{ij} 为优先级集合； S_{ij} 为状态集合。

通信网络的可靠性指标可表示为

$$R_{comm} = (1 - P_{loss})(1 - P_{error})(1 - P_{delay}) \quad (9)$$

式中， R_{comm} 为通信可靠性； P_{loss} 为信息丢失概率； P_{error} 为信息错误概率； P_{delay} 为信息延迟概率。

2.4 分布式控制数据交互模型

分布式控制策略的有效实施依赖于终端间的数据交互。针对不同控制策略，需要交互的数据

类型不同。

(1) 分布式源荷转供策略交互数据

相邻融合终端之间源荷转供交互数据主要为当前负荷率($\beta_{i,t}$)。各融合终端根据台区内采集的总光伏功率和总负荷功率计算得出当前负荷率,公式为

$$\beta_{i,t} = \frac{P_{\text{load},i,t} - P_{\text{DG},i,t}}{S_{\text{tr},i}} \quad (10)$$

式中, $P_{\text{load},i,t}$ 为时段 t 台区 i 的总负荷功率; $P_{\text{DG},i,t}$ 为时段 t 台区 i 的总光伏功率; $S_{\text{tr},i}$ 为台区 i 的变压器额定容量。

(2) 分布式失电支援策略交互数据

相邻融合终端之间失电支援交互数据为台区失电信号量 $S_{\text{outage},i}$ 。当某台区发生失电时, $S_{\text{outage},i}=1$; 否则 $S_{\text{outage},i}=0$ 。

(3) 分布式故障隔离策略交互数据

相邻融合终端之间故障隔离交互数据包括台区直流侧故障信号 $S_{\text{DC},i}$ 、台区380 V故障信号 $S_{\text{AC},i}$ 和柔性环网装置交流侧故障信号 $S_{\text{VSC},i}$ 。

3 台区故障快速自愈方案

3.1 分布式源荷转供策略

分布式源荷转供是柔性互联系统的核心功能之一,其目标是优化各台区间的功率分配,实现台区负荷率均衡。

1) 各融合终端根据台区内采集的总光伏功率和总负荷功率计算当前负荷率,并将当前负荷率发送至相邻融合终端。

2) 融合终端收到相邻台区的当前负荷率后,计算台区周边的负荷率均衡值。

负荷率均衡值计算式为

$$\bar{\beta}_i = \frac{1}{|\Omega_i|+1} \left(\beta_{i,t} + \sum_{j \in \Omega} \beta_{j,t} \right) \quad (11)$$

式中, $\bar{\beta}_i$ 为台区 i 的负荷率均衡值; $|\Omega_i|$ 为与台区 i 互联的台区数量; $\beta_{i,t}$ 为时段 t 台区 i 的当前负荷率; $\beta_{j,t}$ 为时段 t 与台区 i 互联的台区 j 的当前负荷率。

3) 根据负荷率均衡值,计算本台区柔性环网装置的有功功率指令。

柔性互联装置的有功功率指令计算式为

$$P_{\text{VSC},i,t} = k_p S_{\text{tr},i} (\bar{\beta}_i - \beta_{i,t}) \quad (12)$$

式中, $P_{\text{VSC},i,t}$ 为时段 t 台区 i 的AC/DC换流器交流侧有功功率指令; k_p 为比例系数,用于调节功率调节的灵敏度。

4) 对台区柔性环网装置进行调控,实现功率优化分配。

源荷转供优化目标为台区负荷率方差最小,计算式为

$$\min D_{\text{SLR},t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\beta_{i,t} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_{i,t} \right)^2 \quad (13)$$

式中, $D_{\text{SLR},t}$ 为时段 t 的台区负荷率方差; N 为台区总数。

3.2 分布式失电支援策略

当某台区10 kV系统侧发生故障导致台区交流失电后,需要通过分布式失电支援策略实现快速供电恢复。

1) 台区融合终端检测到台区交流失电,断开本台区配电变压器低压侧开关。

2) 控制柔性环网装置切至电压频率变换(VF)控制模式,并将失电信号发送至相邻融合终端。

3) 融合终端收到失电信号后,将失电信号继续传递至低压柔性直流系统内的其他台区融合终端。

4) 同时控制本台区柔性环网装置切至VF控制模式,由柔性直流系统内的柔性环网装置对失电台区进行功率转供。

失电支援决策流程可表示为状态转移函数,即

$$S_{i,t+1} = f(S_{i,t}, A_{i,t}, O_{i,t}) \quad (14)$$

式中, $S_{i,t}$ 为时段 t 台区 i 的状态; $A_{i,t}$ 为时段 t 台区 i 的动作; $O_{i,t}$ 为时段 t 台区 i 的观测值; f 为状态转移函数。

失电支援容量计算式为

$$P_{\text{sup},i,j} = \min(P_{\text{ava},i}, P_{\text{req},j}) \quad (15)$$

式中, $P_{\text{sup},i,j}$ 为台区 i 对台区 j 的支援功率; $P_{\text{ava},i}$ 为台区 i 的可用支援功率; $P_{\text{req},j}$ 为台区 j 的所需支援功率。

$$P_{\text{ava},i} = S_{\text{tr},i} (1 - \beta_{i,t}) \eta_{\text{VSC},i} \quad (16)$$

$$P_{\text{req},j} = P_{\text{cr},j} + P_{\text{imp},j} \alpha_j \quad (17)$$

式中, $P_{\text{cr},j}$ 为台区 j 的重要负荷功率; $P_{\text{imp},j}$ 为台区 j 的次要重要负荷功率; α_j 为次要重要负荷的支援比例, 取值范围为 $[0,1]$, 由系统实际容量决定。

3.3 分布式故障隔离策略

当某台区发生故障时, 需要通过分布式故障隔离策略及时隔离故障区域, 防止故障扩大。具体策略如下:

- 1) 当某台区 380 V 系统发生故障或柔性环网装置交流侧故障时, 在柔性环网装置检测到故障后, 将交直流变流器停机, 并断开交流侧开关。
- 2) 同时将故障信息上报至台区融合终端, 融合终端将本台区低压侧故障信号发送至相邻融合终端。
- 3) 融合终端收到相邻低压侧故障信号后, 继续传递该信号至柔性直流系统内的其他台区融合终端。
- 4) 当柔性直流系统内出现两台以上柔性环网装置交流侧故障时, 所有台区的柔性环网装置跳开变流器交流侧开关, 防止因严重故障造成安全隐患。

故障隔离决策基于多维故障特征向量, 即

$$F_i = [\Delta V_i, \Delta I_i, \Delta f_i, \Delta P_i, \Delta Q_i, t_{di}] \quad (18)$$

式中, F_i 为台区 i 的故障特征向量; ΔV_i 为电压偏差; ΔI_i 为电流偏差; Δf_i 为频率偏差; ΔP_i 为有功功率偏差; ΔQ_i 为无功功率偏差; t_{di} 为故障持续时间。

故障判断采用模糊综合评判方法, 公式为

$$R_i = F_i W \quad (19)$$

式中, R_i 为台区 i 的故障风险评估值; W 为权重向量, 满足 $\sum W=1$ 。当 R_i 超过预设阈值 $R_{\text{threshold}}$ 时,

认为台区 i 发生故障, 需要进行隔离。

3.4 毫秒级供电恢复策略

为实现毫秒级供电恢复, 本文提出了一种基于预测控制的快速决策策略, 如图 5 所示。

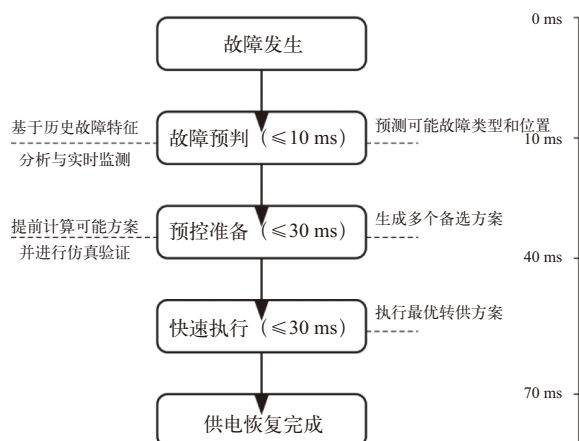


图 5 毫秒级供电恢复策略

Fig. 5 Millisecond level power restoration strategy

该策略包括三个关键阶段:

- 1) 故障预判。基于实时监测数据和历史故障特征, 预测可能发生的故障类型和位置。
- 2) 预控准备。根据预判结果, 提前计算可能的转供方案, 并进行仿真验证。
- 3) 快速执行。故障确认后, 立即执行预先计算好的最优转供方案。

故障转供总时间为故障各阶段处理时间之和, 公式为

$$T_{\text{recovery}} = T_{\text{detect}} + T_{\text{isolate}} + T_{\text{reconfigure}} + T_{\text{verify}} \quad (20)$$

式中, T_{detect} 为故障检测时间; T_{isolate} 为故障隔离时间; $T_{\text{reconfigure}}$ 为网络重构时间; T_{verify} 为方案验证时间。

4 算例分析

4.1 仿真场景

为验证所提方法的有效性, 构建了包含 3 个低压台区的 DSAFIS 算例系统, 如图 6 所示, 系统参数见表 1。

系统采用伪双极接线方式, 直流母线电压为 ± 375 V。3 个台区具有不同的特性: 台区 1 为典

型居民负荷，台区2配置储能系统，台区3接入大容量光伏发电。柔性互联装置采用改进的MMC拓扑结构，额定容量均为120 kV·A。

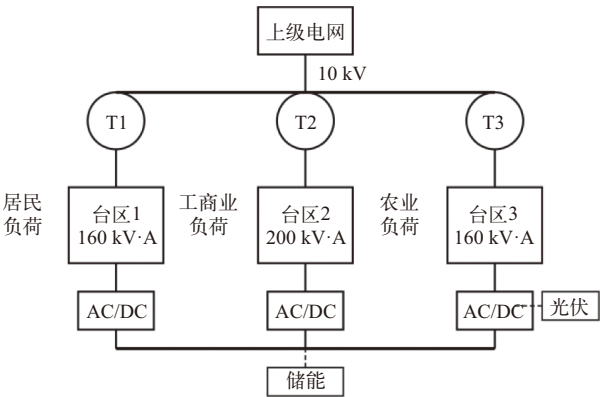


图 6 算例仿真系统

Fig. 6 Numerical simulation system

表 1 算例系统台区参数

Tab. 1 Example system station area parameters

台区编号	变压器容量 /kV·A	交流负荷 /kW	直流负荷 /kW	光伏容量 /kW	储能容量 /kW·h	柔性互联装置容量 /kV·A
1	160	80	60	0	0	120
2	200	100	0	0	30	120
3	160	60	0	100	0	120

4.2 分布式源荷转供效果分析

首先验证分布式源荷转供策略的有效性。某典型日的源荷转供优化前后各台区负荷率的变化如图7所示，前后各台区负荷率及新能源消纳对比见表2。

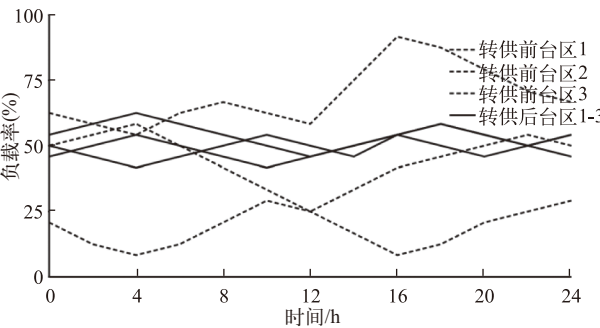


图 7 典型日的源荷转供优化前后各台区负荷率的变化

Fig. 7 Changes in load rates of each substation area before and after optimization of source load transfer on typical days

表 2 源荷转供前后台区负荷率及新能源消纳对比

Tab. 2 Comparison of load rate and new energy consumption in the front-end and back-end areas of source load transfer

时段	策略	台区1 负荷率 (%)	台区2 负荷率 (%)	台区3 负荷率 (%)	平均 负荷率 (%)	负荷率 方差	弃光量 /kW
峰时段	转供前	87.5	50	37.5	58.3	0.051 2	25.3
峰时段	转供后	62.5	60	52.5	58.3	0.001 8	5.7
谷时段	转供前	25	35	-18.8	13.7	0.053 8	30
谷时段	转供后	12.5	15	13.8	13.7	0.000 1	0
全天	转供前	56.3	42.5	18.8	39.2	0.029 2	186.4
全天	转供后	40.6	38.8	38.1	39.2	0.000 1	32.6

从图7和表2可以看出，采用分布式源荷转供策略后，各台区的负荷率均衡性显著提高。系统负荷率方差从0.029 2降至0.000 1，降幅达99.7%。台区3的光伏出力通过柔性互联装置转供至其他台区，大幅减少了弃光量，全天弃光量从186.4 kW降至32.6 kW，降幅达82.5%。

源荷转供过程中各台区间的功率交换情况如图8所示。

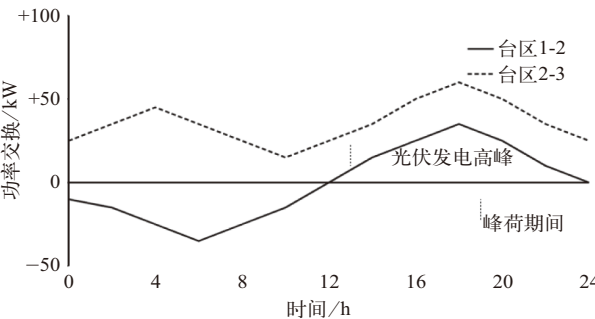


图 8 源荷转供过程中各台区间的功率交换情况

Fig. 8 Power exchange between different sections during the process of source load transfer

从图8可以看出，台区3光伏发电产生的过剩电力主要通过柔性互联装置传输至台区1和台区2，实现了区域内的能量优化配置。在负荷高峰时段，储能系统的放电功率和光伏出力一起提供电力支援，减轻了电网供电压力；在负荷低谷时段，过剩的光伏出力部分用于储能充电，剩余部分向上级电网输送。

为进一步分析源荷转供策略对系统经济性的影响，对比了转供前后系统各项成本，见表3。

表3 源荷转供前后系统成本对比

Tab. 3 Comparison of system costs before and after source load transfer

成本项目	转供前 /元	转供后 /元	节约率 (%)
向上级电网购电成本	2 865.3	2 135.8	25.5
向 DG 购电成本	857.2	1 352.4	-57.8
储能运维成本	125.6	201.3	-60.3
总运行成本	3 848.1	3 689.5	4.1

从表3可以看出，虽然转供后向DG购电成本和储能运维成本有所增加，但向上级电网购电成本大幅减少，总体运行成本降低了4.1%。这说明分布式源荷转供策略不仅提高了系统可靠性和新能源消纳能力，还具有一定的经济效益。

4.3 分布式失电支援效果分析

模拟台区1发生10 kV侧故障导致失电的情况，应用分布式失电支援策略进行自愈转供。失电支援过程中的关键波形如图9所示。

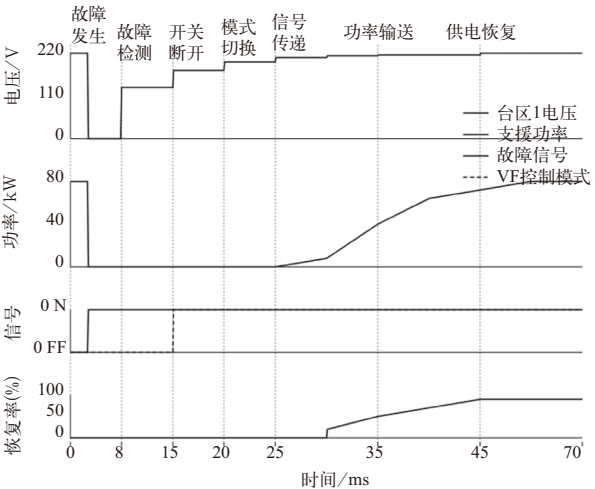


图9 失电支援过程中的关键波形

Fig. 9 Key waveforms during power outage support process

失电支援各阶段的时间统计和转供负荷情况见表4、表5。

从图9和表4、表5可以看出，系统能够在45 ms内完成从故障发生到供电恢复的全过程，

实现了毫秒级的快速自愈。在台区1失电后，台区2和台区3通过柔性互联装置共同向台区1提供80 kW的支援功率，其中台区2提供50 kW，台区3提供30 kW，台区1的重要负荷得到100%恢复，次重要负荷得到75%恢复，总体负荷恢复率达到57.1%。

表4 失电支援各阶段时间统计及转供负荷情况

Tab. 4 Time statistics and load transfer situation for each stage of power outage support

阶段	开始时间 /ms	结束时间 /ms	持续时间 /ms	备注
故障发生	0	-	-	台区1失电
故障检测	0	8	8	台区1检测到交流失电
开关断开	8	15	7	断开台区1配电变压器低压侧开关
控制模式切换	15	20	5	柔性互联装置切至VF控制模式
信号传递	20	25	5	失电信号传递至台区2和台区3
功率分配计算	25	35	10	计算台区2和台区3的支援功率
功率输送建立	35	45	10	建立新的功率分布
供电恢复完成	45	-	-	台区1重要负荷得到供电
总过程	0	45	45	-

表5 失电支援负荷恢复情况

Tab. 5 Recovery status of power outage support load

负荷类型	额定功率 /kW	恢复功率 /kW	恢复率 (%)
重要负荷	35	35	100
次重要负荷	60	45	75
一般负荷	45	0	0
总计	140	80	57.1

4.4 分布式故障隔离效果分析

模拟台区3的柔性互联装置交流侧发生故障的情况，验证分布式故障隔离策略的有效性。故障隔离过程中的关键波形如图10所示。

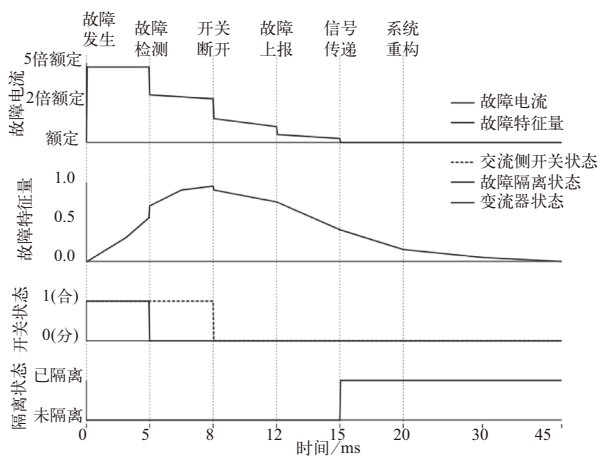


图 10 故障隔离过程中的关键波形

Fig. 10 Key waveforms during fault isolation process

故障隔离前后系统的拓扑结构变化如图 11 所示。

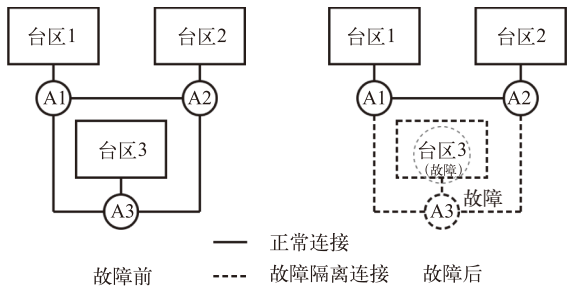


图 11 故障隔离前后系统的拓扑变化

Fig. 11 Topology changes of the system before and after fault isolation

从图 11 可以看出，故障隔离后，系统从原来的环网结构转变为链状结构，台区 1 和台区 2 之间的柔性互联装置继续正常工作，保证了系统的部分互联能力。

故障隔离前后系统性能指标的变化对比见表 6。

表 6 故障隔离前后系统性能指标对比

Tab. 6 Comparison of system performance indicators before and after fault isolation

性能指标	故障前	故障隔离后	变化率 (%)
系统可靠性	0.998 5	0.992	-0.65
最大转供能力 /kW	240	120	-50
台区负荷均衡能力	高	中	-
新能源消纳能力 /kW	100	60	-40
系统运行成本 /(元·日)	3 689.5	3 896.2	5.6

从表 6 可以看出，故障隔离后系统性能有所下降，但仍保持基本功能。系统可靠性降低了 0.65%，最大转供能力降低了 50%，新能源消纳能力降低了 40%，系统运行成本增加了 5.6%。这表明系统具有较强的故障适应能力，即使在部分设备故障的情况下，仍能保持基本运行。

5 结束语

本文提出了一种基于低压柔性互联的配电网台区自愈转供方案，主要结论如下。

- 1) 采用改进的分散式柔性互联拓扑结构，能够适应不同台区的负荷特性和地理分布，提高系统的灵活性和可靠性。仿真结果表明，在改进拓扑结构的情况下，系统可靠性达到 99.85%，优于传统放射状结构。
- 2) 所提台区融合终端与智能分布式 FA 终端协同架构，实现了中压层与低压层的故障联动自愈，填补了 10 kV 中压层和 400 V 低压层故障联动自愈的空白；系统通信可靠性高达 99.5%，通信时延控制在 5 ms 以内。
- 3) 设计的分布式源荷转供策略能够有效优化台区间的功率分配，将系统负荷率方差降低 99.7%，弃光量降低 82.5%，系统运行成本降低 4.1%。
- 4) 基于分布式失电支援策略的系统，能够在 45ms 内完成从故障发生到供电恢复的全过程，实现了毫秒级的快速自愈；重要负荷恢复率达到 100%，总体负荷恢复率达到 57.1%。

参考文献

[1] 张文杰, 杨东旗, 张颖, 等. 配电网综合柔性互联关键技术研究[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 68-78.

[2] 刘文军, 李帅虎, 马瑞, 等. 低压配电台区柔性互联系统多目标DDPG优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52(6): 62-70.

[3] 熊雄, 季宇, 李蕊, 等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6802-6813.

- [4] 张运洲, 杨珍珍, 董晓军, 等. 面向电力电子化电力系统的变革性关键技术分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(1): 1-10.
- [5] 史明明, 刘瑞煌, 张宸宇, 等. 考虑输电网与柔性互联配电网交互影响的可靠性评估方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(4): 77-87.
- [6] 王攀, 赵成勇, 马明, 等. 柔性开关技术在配电网中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 184-192.
- [7] 王成, 刘聪, 秦渊, 等. 基于柔性接口的中压配电网架构及其关键技术[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4567-4576.
- [8] 谭文勇, 杨冠楠, 陈熙, 等. 城市配电网多馈线灵活互联拓扑设计方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 54-62.
- [9] 刘益, 朱世强, 赵海霞, 等. 考虑故障恢复能力的配电网拓扑结构优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 73-81.
- [10] 冉启, 张鹏飞, 秦渊, 等. 基于多智能体协作的配电网自愈控制技术[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 565-573.
- [11] 李忠献, 刘旭东, 俞新伟, 等. 大规模配电网分层分布式自愈恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 69-78.
- [12] 陈硕, 杨阳, 钱玉良, 等. 配电网故障区域快速隔离与非故障区域恢复方法[J]. 电力建设, 2021, 42(8): 92-101.
- [13] 张潼, 缪向水, 何武, 等. 柔性互联对配电网可靠性和经济性的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 128-137.

作者简介

王思麒 (1989—), 男, 工程师, 主要研究方向为配电自动化。

黄亮亮 (1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配电自动化。

(收稿日期: 2025-03-12)