

# 考虑多配电网功率互济的交直流混联配电网灾后抢修策略

常康<sup>1,2</sup>, 郁琛<sup>2</sup>, 谢云云<sup>3</sup>, 燕子教<sup>3</sup>, 蔡胜<sup>3</sup>, 张玉坪<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106;

3. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**传统的配电网灾害抢修策略主要利用配电网的内部资源,无法考虑多个配电网间的功率互济和协同恢复。考虑到交直流混联配电网能够通过交直流混联的拓扑结构实现功率互济,建立交直流混联配电网的抢修决策模型,通过协调抢修队、线路开关、分布式电源、电压源换流器,最大限度地提高交直流混联配电网的负荷恢复量。对模型中存在的非线性约束进行线性化处理,将优化问题转化为可快速求解的混合整数模型,并采用CPLEX求解器求解最优抢修策略。基于IEEE 14节点系统建立一个交直流混联配电网并进行仿真分析,结果验证了所提抢修策略的有效性。

**关键词:**交直流混联配电网;自然灾害;弹性运行;抢修策略;负荷恢复

**中图分类号:**TM73

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202501016

## 0 引言

随着配电系统中分布式能源渗透率的提高以及电力电子技术的发展,交直流混联配电网成为当前研究的热点<sup>[1]</sup>,相较于传统交流配电网,其具有更高的运行可靠性和灵活性<sup>[2-4]</sup>。但配电网常因自然灾害造成大面积停电<sup>[5-6]</sup>。例如,2019年第9号台风“利奇马”造成168条110 kV及以上电压等级线路停运,759.17万用户遭受停电事故<sup>[7]</sup>。交直流混联配电网同样具备传统交流配电网的脆弱性,同样会受到极端自然灾害的破坏而造成大范围停电<sup>[8-9]</sup>。因此,研究交直流混联配电网灾后快速抢修和恢复供电策略具有重要意义。

配电网灾后抢修的关键在于抢修顺序和抢修资源协调。文献[10]考虑除冰抢修对电网运行的影响,建立了双层协同优化调度模型,协调除冰抢修、移动式储能调度与系统运行。文献[11-12]基于两阶段方法协调抢修队的路径和网架重构,包括第一阶段的网络重构和第二阶段抢修队的路径规划。文献[13]利用分布式电源(distributed generation, DG)恢复重要负荷的供电,并将冰灾下配电网的抢修过程分为3个阶段。在此基础上,以综合经济损失最小为目标,制定资源任务分配策略,实现动态抢修。文献[14]在主电网供电中断后,协调DG和可控开关形成了可供电的微电网(microgrid, MG)。文献[15]提出了一种分层停电管理方案,第一阶段包括

MG在内的可用资源的调度,第二阶段协调MG间的可供电力传输。文献[16]针对灾后配电网故障抢修需要优先保证重要负荷供电的实际情况,建立了含DG的配电网灾后多小队分阶段抢修策略的优化模型,通过网络重构、DG形成MG和孤岛运行,及时恢复部分负荷的供电。

上述研究主要针对交流配电网的负荷恢复,通过抢修队、DG和网络重构最大化负荷恢复量。然而,在极端情况下,在与主网断开后,负荷只能由应急电源或带有储能系统(energy storage system, ESS)的本地DG恢复,配电网中的负荷恢复能力非常有限。但对于交直流混联配电网,不同的配电网通过直流线路相互联系,在一个交流配电网与主网断开后,通过直流线路与其他配电网相连,从而减少交流配电网的停电损失,提升配电网的运行弹性。由于交直流混联配电网具有耦合特性,传统的配电网抢修和恢复策略难以直接应用于交直流混联配电网。

现有关于交直流混联配电网的研究主要集中于安全分析、经济调度、可靠性分析等方面。仅有少量研究分析了交直流混联配电网的故障恢复策略。文献[17]针对交直流混联配电网,构建了故障恢复模型,考虑了交直流混联配电网在故障恢复方法中所需计及的不同形式目标函数和约束条件。文献[18]基于直流线路的互连特点,提出了一种以直流线路为核心的拓扑搜索策略。文献[19]考虑极端灾害造成的时序故障及其修复过程,提出了面向韧性提升的交直流混联配电网协同故障恢复方法,充分协同利用了DG和交直流混联配电网的动态重构,实现了极端灾害下关键负荷的快速恢复。

收稿日期:2024-04-10;修回日期:2024-11-18

在线出版日期:2025-01-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52177090)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52177090)

以上研究均未考虑故障修复过程与抢修队耦合,且故障恢复时间为已知参数,但实际供电恢复时间需要根据灾害抢修情况进行动态决策。此外,上述研究针对的直流线路是配电网中的内部联络线,但直流线路的一个重要作用是连接不同的配电网,从而增加配电网的弹性,现有研究未能充分利用直流线路在不同配电网中的灵活控制从而提升弹性的能力。在交直流混联配电网中,换流站的非线性约束将会使优化模型成为混联整数非线性规划模型,其求解效率较低。

为此,本文考虑交直流配电系统互联多个配电网的拓扑结构,以加权负荷恢复量最大为目标函数,构建交直流混联配电系统的抢修模型,协调抢修队、线路开关、DG、电压源换流器(voltage source converter, VSC),利用DG的输出功率为停电区域的失电负荷提供电力,并调度配电网的抢修队来修复故障,增加恢复的负荷。针对交直流混联配电网抢修模型为非线性模型的问题,将非线性模型转化为线性优化模型,并采用CPLEX求解器进行快速求解。最后通过仿真算例验证所提策略的有效性。

## 1 交直流混联配电网抢修框架

相较于传统的交流系统,交直流混联配电系统在功能上具有降低电网损耗、优化系统运行状态等方面的优势,在网架结构上不仅包含交流支路,还包含直流支路和换流站。换流站连接直流支路和交流支路,能够实现两侧交流、直流能量的转换。直流混联配电网的网架结构一般是通过直流系统将配电网内不同部分的交流系统进行互联,并且在直流部分或交流部分可以接入直流、交流负荷或DG以及ESS<sup>[20]</sup>。其结构示意图如附录A图A1所示。

本文针对上述交直流混联配电网拓扑,提出了交直流混联配电网的抢修策略,通过协调抢修队、DG、VSC和交流网架,并调度VSC输出功率,如图1所示。灾害发生后,灾损信息被发送到配电系统控制中心,包括故障数量、故障位置、故障类型等,以估计维修人员的维修时间和维修资源。此外,还可以从能量管理系统(energy management system, EMS)和电力信息管理系统(power information management system, PMIS)中获得配电网的拓扑结构和DG的参数以及抢修队的位置、抢修时间、运动时间。然后,在上述数据的基础上,求解本文所提模型得到最优的抢修决策和系统运行方案。下发决策方案给抢修队、DG、VSC、交流线路开关等设备,以实现交直流混联配电网的快速恢复。

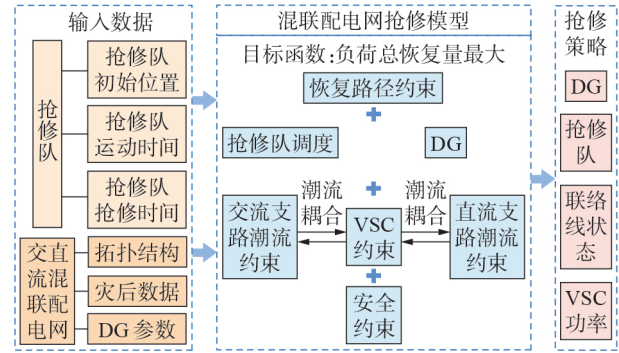


图1 抢修策略框架

Fig.1 Framework of repair strategy

## 2 数学模型

### 2.1 目标函数

在自然灾害下,故障修复过程中需要协调各种调度资源进行负荷恢复,为了使受灾配电网尽可能多地恢复停电负荷,本文以总恢复量最大为优化目标,目标函数 $f$ 可表示为:

$$f = \sum_i \sum_t w_i P_{i,t}^H \quad (1)$$

式中: $w_i$ 为节点 $i$ 所带负荷的重要性权重系数; $P_{i,t}^H$ 为 $t$ 时段节点 $i$ 的负荷恢复量。

### 2.2 恢复路径约束

传统交流配电网中的网络拓扑需要满足辐射状约束,而交直流混联配电网不需要满足该约束。整体的交直流混联配电系统中可能会存在环网结构,只需要局部的交流系统满足辐射状约束即可。交直流混联配电网的网络拓扑结构受到故障抢修、网架重构的影响,需要满足如下约束:①保证配电网中每条线路上的潮流单向,如式(2)所示;②确保故障线路恢复之后才会存在线路潮流,如式(3)所示;③开关闭合的线路上才会存在线路潮流,如式(4)所示;④限制每个交流节点最多只有1个父节点,以保证交流部分拓扑的放射性,如式(5)所示。

$$D_{i,j,t} + D_{j,i,t} = 1 \quad \forall i, j, t \quad (2)$$

$$D_{i,j,t} + D_{j,i,t} = s_{i,j,t}^F \quad \forall i, j, t \quad (3)$$

$$D_{i,j,t} + D_{j,i,t} = s_{i,j,t}^L \quad \forall i, j, t \quad (4)$$

$$\sum_{j \in \Omega_{AC}} D_{j,i,t} \leq 1 \quad i \in \Omega_{AC}, \forall t \quad (5)$$

式中: $D_{i,j,t}$ 为 $t$ 时段配电网中线路 $ij$ 的二进制状态变量,若线路断开则取值为0,若线路闭合则取值为1; $s_{i,j,t}^F$ 为二进制变量,表示 $t$ 时段是否已修复线路 $ij$ ,若已修复则取值为1,若未修复则取值为0; $s_{i,j,t}^L$ 为二进制变量,表示 $t$ 时段线路 $ij$ 开关的操作状态,若开关断开则取值为0,若开关闭合则取值为1; $\Omega_{AC}$ 为交直流混联配电网中交流节点的集合。

### 2.3 抢修队调度

抢修队调度约束用于约束抢修队在每个时段的运行状态,实现抢修过程中对抢修队的分配。抢修队调度约束可表示为:

$$\sum_{i \in \Phi_r} r_{C,i}^n = 1 \quad \forall n \quad (6)$$

$$\sum_{i \in \Phi_f} r_{i,C}^n = 1 \quad \forall n \quad (7)$$

$$\sum_{j \in \Phi_f} r_{j,i}^n - \sum_{k \in \Phi_f} r_{i,k}^n = 0 \quad \forall n, i \quad (8)$$

$$y_i^n = \sum_{j \in \Phi_f} r_{j,i}^n \quad \forall n, i \quad (9)$$

$$\sum_{n \in \Phi_n} y_i^n \leq 1 \quad \forall i \quad (10)$$

$$T_{RT,i}^n \leq t_{w,C,i}^n + (1 - r_{C,i}^n)M \quad \forall n, i \quad (11)$$

$$T_{RT,i}^n \geq t_{w,C,i}^n + (1 - r_{C,i}^n)M \quad \forall n, i \quad (12)$$

$$T_{RT,i}^n - T_{RT,j}^n \leq t_{w,i,j}^n + t_{rep,j}^n + (1 - r_{i,j}^n)M \quad \forall n, i, j \quad (13)$$

$$T_{RT,i}^n - T_{RT,j}^n \geq t_{w,i,j}^n + t_{rep,j}^n + (1 - r_{i,j}^n)M \quad \forall n, i, j \quad (14)$$

$$\sum_{t=1}^T e_{i,t}^F \leq 1 \quad \forall i \quad (15)$$

$$\sum_{t \in T} t e_{i,t}^F = \sum_{n \in \Phi_n} T_{RT,i}^n + \sum_{n \in \Phi_n} t_{rep,i}^n y_i^n \quad \forall i \quad (16)$$

$$s_i^F = \sum_{\mu=1}^{t-1} e_{i,\mu}^F \quad \forall i \quad (17)$$

式中: $C$ 为抢修队所在仓库所处节点; $\Phi_f$ 为故障设备所处节点集合; $\Phi_n$ 为抢修队集合; $r_{C,i}^n$ 为二进制变量,表示抢修队 $n$ 是否从仓库到达节点 $i$ ,若是则取值为1,若不是则取值为0; $r_{i,C}^n$ 为二进制变量,表示抢修队 $n$ 是否从节点 $i$ 到达仓库,若是则取值为1,若不是则取值为0; $t_{w,i,j}^n$ 为抢修队 $n$ 在故障节点 $i$ 、 $j$ 之间的运动时间; $t_{rep,j}^n$ 为故障节点 $j$ 的修复时间参数; $r_{i,j}^n$ 为二进制变量,表示抢修队 $n$ 是否从节点 $i$ 到达节点 $j$ ,若是则取值为1,若不是则取值为0; $y_i^n$ 为二进制变量,表示抢修队 $n$ 是否已修复节点 $i$ 处故障,若已修复则取值为1,若未修复则取值为0; $M$ 为一个无穷大数值; $T$ 为时段总数; $T_{RT,i}^n$ 为抢修队 $n$ 到达故障节点 $i$ 的时间; $e_{i,t}^F$ 为二进制变量,表示 $t$ 时段故障节点 $i$ 是否已被修复,若已修复则取值为1,若未修复则取值为0; $s_i^F$ 为二进制变量,表示故障节点 $i$ 的可用状态,若不可用则取值为0,若可用则取值为1。

式(6)和式(7)保证1组抢修队从1个仓库出发依次修复故障节点,并在完成所有指定任务后返回仓库。式(8)表示抢修队按照所分配的故障进行顺序修复。为了简化修复过程,假设每个故障只由1组抢修队修复,如式(9)和式(10)所示。附录A图A2更直观地展示了抢修队的路径。抢修队从仓库出发依次修复故障 $F_1$ — $F_3$ 后返回仓库。式(11)和式(12)表示,若抢修队到达初始故障节点处,则仅在当前故障节点修复后才能移动到下一个故障节点。

根据路径序列的决策结果,根据式(13)和式(14)计算抢修队到达故障节点的时间。可根据式(15)—(17)计算每个时段故障节点的修复状态和可用状态。

### 2.4 DG建模

在本文的抢修策略中,DG主要包括柴油发电机和ESS,两者结合形成MG,为一些重要失电负荷供电。具体模型见附录B式(B1)—(B7)。

### 2.5 直流换流站约束

直流换流站的稳态模型见附录C。VSC的运行约束包括无功调节量约束和载流量约束,分别如式(18)和式(19)所示。

$$-Q_{i,\max}^{\text{VSC}} \leq Q_{i,t}^{\text{VSC}} \leq Q_{i,\max}^{\text{VSC}} \quad (18)$$

$$(P_{i,t}^{\text{VSC}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{VSC}})^2 \leq (S_{i,\max}^{\text{VSC}})^2 \quad (19)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{VSC}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{VSC}}$ 分别为 $t$ 时段节点 $i$ 处VSC的有功功率、无功功率; $Q_{i,\max}^{\text{VSC}}$ 为节点 $i$ 处VSC的无功调节量最大值; $S_{i,\max}^{\text{VSC}}$ 为节点 $i$ 处VSC的载流量最大值。

### 2.6 交、直流潮流约束

本文采用线性化后的DistFlow交流支路潮流模型,如式(20)—(22)所示。

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{ac}} = \sum_{j \in \Omega_{\text{AC}}} D_{i,j,t} P_{ij,t}^{\text{ac}} - \sum_{k \in \Omega_{\text{AC}}} D_{k,i,t} P_{ki,t}^{\text{ac}} \\ Q_{i,t}^{\text{ac}} = \sum_{j \in \Omega_{\text{AC}}} D_{i,j,t} Q_{ij,t}^{\text{ac}} - \sum_{k \in \Omega_{\text{AC}}} D_{k,i,t} Q_{ki,t}^{\text{ac}} \end{cases} \quad i \in \Omega_{\text{AC}} \quad (20)$$

$$U_{j,t}^{\text{ac}} = U_{i,t}^{\text{ac}} - 2(P_{ij,t}^{\text{ac}} R_{ij}^{\text{ac}} + Q_{ij,t}^{\text{ac}} X_{ij}^{\text{ac}}) \quad ij \in Z_{\text{AC}} \quad (21)$$

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{ac}} = P_{i,t}^{\text{D}} + P_{i,t}^{\text{E,dech}} - P_{i,t}^{\text{E,ech}} - P_{i,t}^{\text{H}} \\ Q_{i,t}^{\text{ac}} = Q_{i,t}^{\text{D}} - k_{i,t}^{\text{H}} P_{i,t}^{\text{H}} \end{cases} \quad i \in \Omega_{\text{AC}} \quad (22)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{ac}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{ac}}$ 分别为 $t$ 时段流入交流节点 $i$ 的有功功率、无功功率; $P_{ij,t}^{\text{ac}}$ 、 $Q_{ij,t}^{\text{ac}}$ 分别为 $t$ 时段从交流节点 $i$ 流向交流节点 $j$ 的有功功率、无功功率; $Z_{\text{AC}}$ 为交流支路集合; $R_{ij}^{\text{ac}}$ 、 $X_{ij}^{\text{ac}}$ 分别为交流支路 $ij$ 的电阻、电抗; $U_{i,t}^{\text{ac}}$ 为 $t$ 时段交流节点 $i$ 的电压幅值; $P_{i,t}^{\text{D}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{D}}$ 分别为 $t$ 时段节点 $i$ 处柴油发电机的有功出力、无功出力; $k_{i,t}^{\text{H}}$ 为 $t$ 时段节点 $i$ 处的功率因数; $P_{i,t}^{\text{E,ech}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{E,dech}}$ 分别为 $t$ 时段节点 $i$ 处ESS的充、放电功率。式(20)和式(22)为交流侧的功率平衡约束;式(21)为交流支路电压降落方程。

直流支路潮流模型可表示为:

$$P_{i,t}^{\text{dc}} = \sum_{j \in \Omega_{\text{DC}}} D_{i,j,t} P_{ij,t}^{\text{dc}} - \sum_{k \in \Omega_{\text{DC}}} D_{k,i,t} P_{ki,t}^{\text{dc}} \quad i \in \Omega_{\text{DC}} \quad (23)$$

$$U_{j,t}^{\text{dc}} = U_{i,t}^{\text{dc}} - 2P_{ij,t}^{\text{dc}} R_{ij}^{\text{dc}} \quad ij \in Z_{\text{DC}} \quad (24)$$

$$P_{i,t}^{\text{dc}} = P_{i,t}^{\text{D}} + P_{i,t}^{\text{E,dech}} - P_{i,t}^{\text{E,ech}} - P_{i,t}^{\text{H}} \quad i \in \Omega_{\text{DC}} \quad (25)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{dc}}$ 为 $t$ 时段流入直流节点 $i$ 的有功功率; $P_{ij,t}^{\text{dc}}$ 为 $t$ 时段从直流节点 $i$ 流向直流节点 $j$ 的有功功率; $\Omega_{\text{DC}}$ 为直流节点集合; $Z_{\text{DC}}$ 为直流支路的集合; $R_{ij}^{\text{dc}}$ 为直流支路 $ij$ 的电阻; $U_{i,t}^{\text{dc}}$ 为 $t$ 时段直流节点 $i$ 的电压幅值。式(23)和式(25)为直流侧的功率平衡约束;式(24)

为直流支路电压降落方程。

## 2.7 安全约束

系统还需要满足如下安全约束:

$$\begin{cases} (P_{ij,t}^{ac})^2 + (Q_{ij,t}^{ac})^2 \leq [(D_{i,j,t} + D_{j,i,t}) S_{ij,max}^{ac}]^2 & ij \in Z_{AC} \\ -D_{i,j,t} S_{ij,max}^{ac} \leq P_{ij,t}^{ac} \leq D_{i,j,t} S_{ij,max}^{ac} & i, j \in \Omega_{AC} \\ U_{min}^{ac} \leq U_{i,t}^{ac} \leq U_{max}^{ac} & i \in \Omega_{AC} \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} -D_{i,j,t} S_{ij,max}^{dc} \leq P_{ij,t}^{dc} \leq D_{i,j,t} S_{ij,max}^{dc} & i, j \in \Omega_{DC} \\ U_{min}^{dc} \leq U_{i,t}^{dc} \leq U_{max}^{dc} & i \in \Omega_{DC} \end{cases} \quad (27)$$

式中:  $S_{ij,max}^{ac}$ 、 $S_{ij,max}^{dc}$  分别为交流支路和直流支路的最大载流量;  $U_{max}^{ac}$ 、 $U_{min}^{ac}$  分别为交流节点电压幅值的上、下限;  $U_{max}^{dc}$ 、 $U_{min}^{dc}$  分别为直流节点电压幅值的上、下限。

## 2.8 模型线性化

式(19)和式(26)中包含二次项,需要对其进行线性化处理。根据多边形内逼近(progressive iterative approximation, PIA)方法<sup>[21]</sup>,将圆的可行区域简化为一个多边形区域后,就可用一组线性不等式约束表示。PIA方法示意图如图2所示,式(19)的可行域可以用一个半径为  $S_{i,max}^{VSC}$  的圆表示,圆的内接十二边形为简化后的可行域,通过构造12条边的12个线性约束,使用1个十二边形区域来近似圆区域。十二边形的每条边都是通过连接圆上的2个可求端点  $(P_{i,a}^{VSC}, Q_{i,a}^{VSC})$  和  $(P_{i,b}^{VSC}, Q_{i,b}^{VSC})$  得到的,其相应的线性不等式约束为:

$$\begin{aligned} (Q_{i,b}^{VSC} - Q_{i,a}^{VSC})P_{i,t}^{VSC} - (P_{i,b}^{VSC} - P_{i,a}^{VSC})Q_{i,t}^{VSC} \leq \\ P_{i,a}^{VSC}Q_{i,b}^{VSC} - P_{i,b}^{VSC}Q_{i,a}^{VSC} \quad \forall i, t \end{aligned} \quad (28)$$

式(26)经线性化后可得:

$$\begin{aligned} (Q_{ij,b}^{ac} - Q_{ij,a}^{ac})P_{ij,t}^{ac} - (P_{ij,b}^{ac} - P_{ij,a}^{ac})Q_{ij,t}^{ac} \leq \\ P_{ij,a}^{ac}Q_{ij,b}^{ac} - P_{ij,b}^{ac}Q_{ij,a}^{ac} \quad ij \in Z_{AC}, \forall t \end{aligned} \quad (29)$$

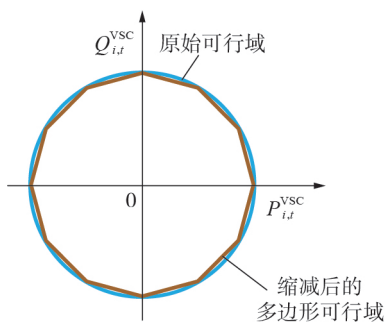


图2 PIA方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of PIA method

经过线性化后,上述模型被转化为一个混合整数线性优化模型,可通过 CPLEX 求解器进行快速求解。

## 3 算例分析

### 3.1 算例参数

本文以由3个IEEE 14节点系统拓展得到的54节点交直流混联配电网系统为算例,拓扑结构如附录

D图D1所示,图中实线表示正常运行的线路,虚线表示联络线,黑色实线表示交流线路,红色实线表示直流线路。配电网的3条联络线为8-13、20-25、36-42。节点1—42、52—54为交流节点,节点46—51为直流节点。分别在节点43—45处接入换流站。

在测试算例中,线路1-4、1-3、8-9、15-17、15-16、48-49、29-32、29-30被一场极端自然灾害破坏,3个DG分别接入节点3、16、49。极端灾害破坏了9条配电线路,部署2组抢修队进行抢修。另外,设置变电站总线的电压为13.6 kV,所有母线电压的运行范围均为0.9~1.1 p.u.。整个修复时间为4.5 h,以15 min为时段间隔分为18个时段。ESS参数、负荷权重参数、抢修队抢修时间参数如附录D表D1—D5所示。

### 3.2 仿真结果

本文所提恢复策略协调抢修队、DG、VSC、线路开关,最大限度地恢复失电负荷。由柴油发电机和ESS组成的3个DG可以形成MG来恢复失电负荷。DG的供电区域和抢修队的最优抢修顺序如图3所示。抢修队的时间规划如图4所示。恢复过程中联络线的闭合状态如附录E表E1所示。故障  $F_6$  和故障  $F_3$  距离上级配电网较近,产生的不良影响较大,所以优先选择抢修这2个故障。故障  $F_6$  和故障  $F_3$  维修完成后可以恢复沿馈线的许多母线,同时在满足交流部分辐射状约束的前提下,联络线8-13、36-42接入电源,充分利用联络线对负荷节点的供电能力。在时段4,抢修队1在完成抢修故障  $F_6$  后,优先抢修直流部分的故障  $F_7$ ,这样能够利用VSC的功率控制作用、恢复交直流混联配电网功率互济这一功能,使右侧14节点系统对左侧系统进行功率支援,同时也能沿线恢复直流负荷。

在时段11,故障  $F_4$  已被修复,由于联络线传输的功率最大值不高,此时线路16-21上的负荷由上级配电网进行供电,联络线20-25断开;联络线36-42在故障  $F_6$  修复完成后断开。节点9为单一负荷点,其负荷量不大,故障  $F_2$  对目标函数中的最大总恢复量影响最小,所以在抢修顺序中排在最后。抢修结束时故障  $F_1$  没有被修复,这是因为在抢修过程中以负荷总恢复量最大为准则,故障  $F_4$  之间的负荷由联络线8-13以及VSC<sub>1</sub>进行功率支援,故障  $F_1$  是否被修复并不影响节点4与节点47之间的负荷供电,但为了电网安全稳定运行,待供电完全恢复后也要指派相应的抢修队对故障  $F_1$  进行后续的维修。

恢复过程中3个VSC的功率曲线如图5所示,图中功率为正值表示功率从交流侧流向直流侧,为负值表示功率从直流侧流向交流侧。发生灾害后,两侧电源通过VSC进行功率互济,更加灵活地分配电源出力。

3个DG形成3个MG可以对区域内的失电负

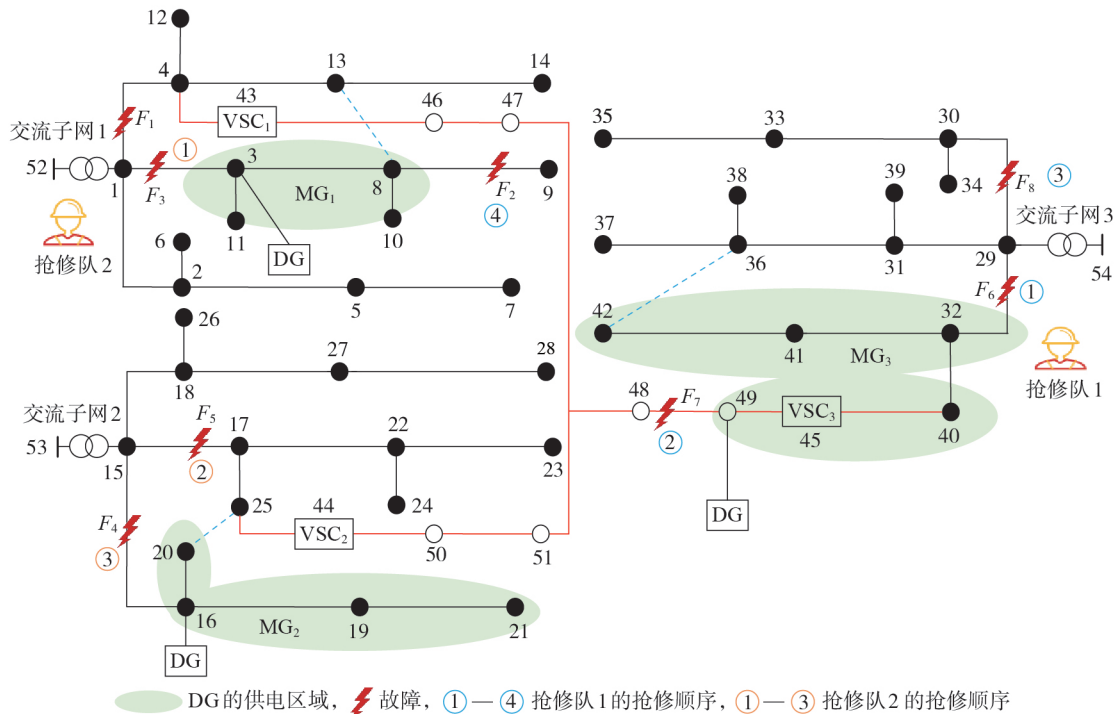


图3 抢修队的路径

Fig.3 Routes of repair crews

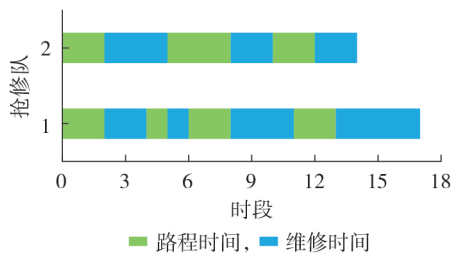


图4 抢修队的时间规划

Fig.4 Time schedule of repair teams

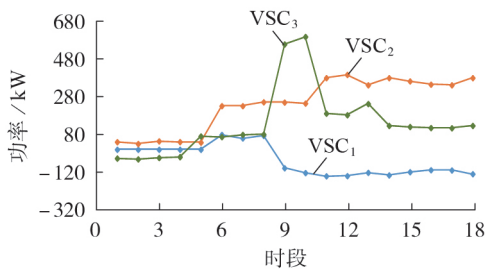


图5 VSC功率曲线

Fig.5 Power curves of VSC

荷进行恢复。3个MG中发电机出力、ESS充放电功率、两侧变电站对MG内负荷供电功率以及MG中负荷恢复功率如附录E图E1—E3所示。在抢修队没有修复故障 $F_3$ 之前,即时段1—5,  $MG_1$ 和 $MG_2$ 中的DG以孤岛模式运行,节点3处ESS在放电模式下工作,节点49处ESS因其初始荷电状态较低,所以发电机对其充电到一定程度后,节点49处ESS再进行放电,由于发电机出力不足,节点3处ESS和节点49

处ESS均持续为MG内的负荷供电直至荷电状态达到最小限制。对于 $MG_3$ 而言,右侧变电站通过联络线36-42对 $MG_3$ 中的负荷进行恢复。

### 3.3 有效性分析

为了验证交直流混联配电网中的VSC对两侧功率进行控制这一特性能够实现更快、更有效的停电负荷恢复,设置3种方案与本文方案进行对比:①方案1,将上述场景中直流部分的 $F_i$ 改为交流部分故障,即直流线路上没有发生故障;②方案2,沿用上述场景,但直流故障无法被修复,即直流线路在整个抢修过程中均不可用;③方案3,去除直流线路和VSC,在节点4与节点17、节点17与节点40、节点4与节点40之间加入联络开关。4种方案的负荷恢复率如图6所示。

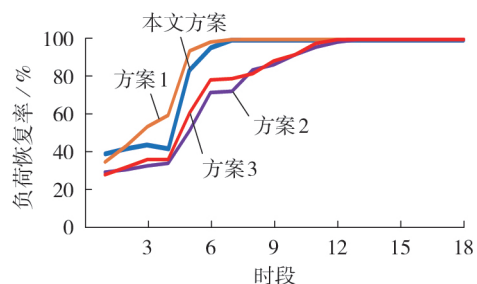


图6 4种方案的负荷恢复率

Fig.6 Load recovery rate of four schemes

由于方案2中的交流子网之间无功率互济,本文统计了其他3种方案中3个交流子网接受或支援

的总功率,结果如图7所示,图中功率为正值表示支援功率,为负值表示接受功率。

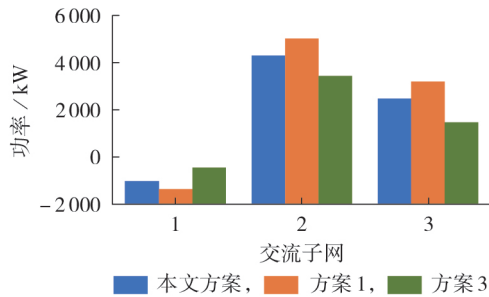


图7 交流子网支援或接受总功率

Fig.7 Support or accept total power of AC sub-systems

对于方案1,由于直流部分没有发生故障,所以不需要抢修队去抢修直流故障,在恢复全过程中直流线路均可用,这充分发挥了其功率传输的灵活性。依靠功率支援的作用,故障 $F_4$ 不需要维修即可实现全部负荷的恢复,且其负荷恢复完成时间最短。得益于直流线路的灵活功率传输,方案1的平均负荷恢复量比本文方案提高了11.3%。

对于方案2,由于在恢复过程交直流混联部分、交流部分和直流部分无法进行相互的功率支援,三部分的功率不能相互流通,所以只能依靠抢修队尽可能多地抢修发生的故障,负荷在时段13才能够完全恢复,但本文方案在时段7就已经实现完全负荷恢复,这主要是因为失去功率互济后,抢修队的路程时间和维修时间成为负荷完全恢复时间的关键。由于本文方案快速修复了直流故障,其平均负荷恢复量比方案2提高了17.5%。

方案3缺少直流线路的互联作用,仅依靠交流互联,其恢复效率较低。这是因为恢复过程中辐射状网络闭环设计、开环运行都导致拓扑和运行方式不灵活,使其可恢复路径较少,且联络线的传输容量小于直流线路的传输容量,通过功率互济提高负荷恢复率的效果远不如本文方案,其平均负荷恢复量比本文方案低15.8%。

## 4 结论

为了减少自然灾害下交直流混联配电网发生故障后的损失,本文提出了考虑多配电网功率互济的交直流混联配电网灾后抢修策略,通过协调抢修队、DG、直流联络线和交流配电网,提升交直流混联配电网的负荷恢复量。通过算例仿真进行验证,可得如下结论:

1)相比于不采用直流联络线参与配电网灾后抢修的策略,本文所提利用直流联络线功率互济的灾后抢修策略能够有效加快灾后抢修过程中的负荷恢

复速度;

2)相比于直流联络线发生故障后不修复的灾后抢修策略,本文所提抢修策略能够减少灾后抢修过程中的负荷损失量。

后续的研究将考虑负荷和新能源出力的随机性、新能源和负荷接入过程中的冲击、通信故障对灾害抢修的影响等问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 高志远,张晶,庄卫金,等. 关于新型电力系统部分特点的思考[J]. 电力自动化设备,2023,43(6):137-143,151.  
GAO Zhiyuan,ZHANG Jing,ZHUANG Weijin, et al. Thoughts on some characteristics of new style power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(6):137-143,151.
- [2] 耿少博,顾乔根,常风然,等. 交直流混合配电网分布式无功电压互动控制策略[J]. 电力工程技术,2019,38(4):26-33.  
GENG Shaobo, GU Qiaogen, CHANG Fengran, et al. Distributed reactive voltage and voltage interactive control strategy for AC/DC hybrid distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology,2019,38(4):26-33.
- [3] 席俊焯,童晓阳,李智,等. 考虑风电不确定性的交直流配电网低碳分布鲁棒优化调度[J]. 电力自动化设备,2023,43(11):59-66.  
XI Junye, TONG Xiaoyang, LI Zhi, et al. Low-carbon distributionally robust optimal scheduling for AC/DC distribution network considering wind power uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(11):59-66.
- [4] 马智刚,卫志农,陈胜,等. 基于柔性多状态开关的交直流配电网有功-无功优化调度[J]. 电力系统自动化,2023,47(6):48-58.  
MA Zhigang, WEI Zhihong, CHEN Sheng, et al. Active-reactive power optimal dispatch of AC/DC distribution network based on soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(6):48-58.
- [5] TON D T, WANG W P. A more resilient grid: the U.S. Department of Energy joins with stakeholders in an R&D plan[J]. IEEE Power and Energy Magazine,2015,13(3):26-34.
- [6] 蒋贤强,徐青山,柳丹,等. 含分布式电源的交直流配电网双层规划研究[J]. 电力工程技术,2018,37(4):27-32.  
JIANG Xianqiang, XU Qingshan, LIU Dan, et al. Two-layer model of AC/DC distribution network containing DGs[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(4):27-32.
- [7] 谷炜,朱炳铨,沈绍斐,等. 超强台风“利奇马”调度应急处置经验及启示[J]. 浙江电力,2020,39(8):35-41.  
GU Wei, ZHU Bingquan, SHEN Shaofei, et al. Emergency dispatching experience in super typhoon Lichma and the enlightenment[J]. Zhejiang Electric Power,2020,39(8):35-41.
- [8] BIE Z H, LIN Y L, LI G F, et al. Battling the extreme: a study on the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE,2017,105(7):1253-1266.
- [9] WANG X, SHAHIDEHPOUR M, JIANG C W, et al. Resilience enhancement strategies for power distribution network coupled with urban transportation system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(4):4068-4079.
- [10] 孙亮,孙萌萌,赵海猛,等. 考虑移动式储能的综合能源系统冰灾后抢修与调度协同优化[J]. 电力自动化设备,2024,44(1):10-16,56.  
SUN Liang, SUN Mengmeng, ZHAO Haimeng, et al. Coopera-

- tive optimization of emergency repair and dispatch for integrated energy system considering mobile energy storage after ice disaster[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(1):10-16, 56.
- [11] VAN HENTENRYCK P, COFFRIN C. Transmission system repair and restoration[J]. *Mathematical Programming*, 2015, 151(1):347-373.
- [12] COFFRIN C, VAN HENTENRYCK P. Transmission system restoration with co-optimization of repairs, load pickups, and generation dispatch[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 72:144-154.
- [13] 卢志刚, 李丹, 吕雪姣, 等. 含分布式电源的冰灾下配电网多故障抢修策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(2):423-432.  
LU Zhigang, LI Dan, LÜ Xuejiao, et al. Multiple faults repair strategy under ice storm for distribution network with distributed generators[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(2):423-432.
- [14] CAI S, XIE Y Y, WU Q W, et al. Robust MPC-based micro-grid scheduling for resilience enhancement of distribution system[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 121:106068.
- [15] FARZIN H, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M. Enhancing power system resilience through hierarchical outage management in multi-microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(6):2869-2879.
- [16] 卢志刚, 刘照拯, 张晶, 等. 含分布式电源的配电网灾后分阶段抢修策略[J]. *电工电能新技术*, 2015, 34(1):69-74.  
LU Zhigang, LIU Zhaozheng, ZHANG Jing, et al. Staged rush repair strategy of distribution networks with distributed generators after disaster[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2015, 34(1):69-74.
- [17] 马天祥, 王春英, 贾静然, 等. 基于二进制粒子群算法的交直流混合配电网故障恢复方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(9):112-119.  
MA Tianxiang, WANG Chunying, JIA Jingran, et al. Fault recovery method for AC/DC hybrid distribution network based on binary particle swarm optimization algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(9):112-119.
- [18] ZHANG L, WANG C, LIANG J, et al. A coordinated restoration method of hybrid AC/DC distribution network for resilience enhancement[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(1):112-125.
- [19] 傅守强, 陈翔宇, 张立斌, 等. 面向韧性提升的交直流混合配电网协同恢复方法[J]. *中国电力*, 2023, 56(7):95-106.  
FU Shouqiang, CHEN Xiangyu, ZHANG Libin, et al. Coordinated restoration method of hybrid AC/DC distribution networks for resilience enhancement[J]. *Electric Power*, 2023, 56(7):95-106.
- [20] 祖国强, 王蕾, 肖峻, 等. 蜂巢配电网的核心特征、关键问题与研究思路[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(11):1-10.  
ZU Guoqiang, WANG Lei, XIAO Jun, et al. Core features, key issues and research ideas of honeycomb distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(11):1-10.
- [21] FERREIRA R S, BORGES C L T, PEREIRA M V F. A flexible mixed-integer linear programming approach to the AC optimal power flow in distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(5):2447-2459.

#### 作者简介:

常康(1983—),男,正高级工程师,博士研究生,研究方向为电力系统外部灾害防御(E-mail: changkang@sgepri.sgcc.com.cn);

郁琛(1985—),男,高级工程师,博士,主要研究方向为新能源发电预测及电力系统外部灾害防御(E-mail: yuchen@sgepri.sgcc.com.cn)。

(编辑 陆丹)

## Post-disaster repair strategy of AC/DC hybrid distribution network considering interconnection power supply among multiple distribution networks

CHANG Kang<sup>1,2</sup>, YU Chen<sup>2</sup>, XIE Yunyun<sup>3</sup>, YAN Ziao<sup>3</sup>, CAI Sheng<sup>3</sup>, ZHANG Yuping<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The traditional disaster repair strategies of distribution network mainly use the internal resources of distribution network, and can not consider the interconnection power supply and cooperative recovery among multiple distribution networks. Considering that the AC/DC hybrid distribution network can realize interconnection power supply through its topology structure, a repair decision model of AC/DC hybrid distribution network is established to maximize the load recovery of AC/DC hybrid distribution network by coordinating the repair teams, line switches, distributed generations, voltage source converters. The nonlinear constraints in the model are linearized to transform the optimization problem into a hybrid integer model, which can be solved quickly. Then, the optimal repair strategy is solved by CPLEX solver. Based on IEEE 14-bus system, an AC/DC hybrid distribution network is established and simulated. The results verify the effectiveness of the proposed repair strategy.

**Key words:** AC/DC hybrid distribution network; natural disaster; resilient operation; repair strategy; load recovery

## 附录 A

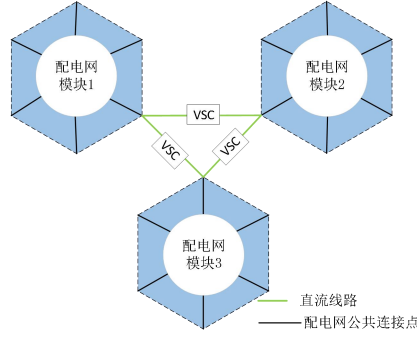


图 A1 交直流混联配电网结构

Fig.A1 Structure of AC/DC hybrid distribution network

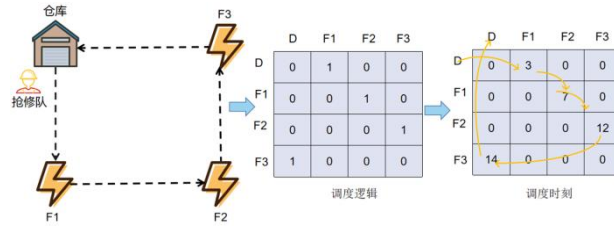


图 A2 抢修队调度顺序示意图

Fig.A2 Illustration of repair crew dispatch sequence

## 附录 B

在本文的抢修策略中，DG 主要包括柴油发电机和 ESS，两者结合形成 MG 为一些重要失电负荷供电。具体模型如下：

$$0 \leq P_{i,t}^D \leq P_{i,t,\max}^D, \forall i, \forall t \quad (\text{B1})$$

$$0 \leq Q_{i,t}^D \leq Q_{i,t,\max}^D, \forall i, \forall t \quad (\text{B2})$$

$$0 \leq g_{i,t}^{\text{dch}} + g_{i,t}^{\text{ch}} \leq 1, \forall i, \forall t \quad (\text{B3})$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{E,dch}} \leq g_{i,t}^{\text{dch}} P_{i,t,\max}^{\text{dch}}, \forall i, \forall t \quad (\text{B4})$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{E,ch}} \leq g_{i,t}^{\text{ch}} P_{i,t,\max}^{\text{ch}}, \forall i, \forall t \quad (\text{B5})$$

$$O_{i,t} = \Delta T \cdot (\eta_i^{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{E,ch}} - P_{i,t}^{\text{E,dch}} / \eta_i^{\text{dch}}) / S_E + O_{i,t-1} \quad (\text{B6})$$

$$O_{i,\min} \leq O_{i,t} \leq O_{i,\max}, \forall i, \forall t \quad (\text{B7})$$

式中： $Q_{i,t}^D$ 、 $Q_{i,t,\max}^D$  分别为  $t$  时段发电机在线路  $i$  上的无功功率和无功功率上限； $P_{i,t}^{\text{E,ch}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{E,dch}}$ 、 $P_{i,t,\max}^{\text{ch}}$ 、 $P_{i,t,\max}^{\text{dch}}$  分别为 ESS 在时段  $i$  的充电功率、放电功率、最大充电功率和最大放电功率； $g_{i,t}^{\text{ch}}$  和  $g_{i,t}^{\text{dch}}$  均为二进制变量，分别表示 ESS 是否在充电状态、是否在放电状态； $\Delta T$  为指定的一段时间；文中  $O_{i,t}$  为 ESS 在  $t$  时段的荷电状态， $O_{i,\max}$ 、 $O_{i,\min}$  为其最大、最小值； $\eta_i^{\text{ch}}$ 、 $\eta_i^{\text{dch}}$  分别为充电效率和放电效率； $S_E$  为 ESS 的额定容量。

式(B1)、(B2)保证发电机的输出在限制的容量范围内。式(B3)—(B5)表示 ESS 根据其运行模式的充放电限制。式(B6)计算 ESS 在  $t$  时段的荷电状态。式(B7)表示荷电状态的限制。



## 附录 C

直流换流站 VSC 的等值电路图如图 C1 所示。图中： $P_{ac}$ 、 $Q_{ac}$  分别为交流系统流向 VSC 的有功功率和无功功率； $P_{dc}$  为 VSC 流向直流系统的有功功率； $Q_{VSC}$  为 VSC 的无功出力； $R_{ac}$ 、 $X_{ac}$  分别为交流支路上的等效电阻、等效电抗； $I_{ac}$  为交流支路上流过的电流； $U_m$  为节点  $m$  的电压幅值； $U_n$  为 VSC 等值内电势幅值； $U_k$  为节点  $k$  的电压幅值。

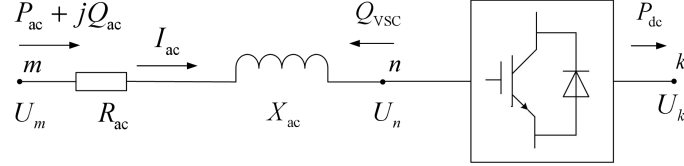


图 C1 VSC 等值电路

Fig.C1 Equivalent circuit of VSC

VSC 等效交流支路的功率平衡方程为：

$$\begin{cases} P_{ac} - I_{ac}^2 R_{ac} = P_{dc} \\ Q_{ac} - I_{ac}^2 X_{ac} = -Q_{VSC} \\ U_n^2 = U_m^2 - 2(R_{ac} P_{ac} + X_{ac} Q_{ac}) + I_{ac}^2 (R_{ac}^2 + X_{ac}^2) \end{cases} \quad (C1)$$

$$I_{ac}^2 = \frac{P_{ac}^2 + Q_{ac}^2}{U_m^2} \quad (C2)$$

VSC 通常采用脉宽调制控制技术，VSC 交流侧节点电压  $U_n$  和直流侧节点电压  $U_k$  之间满足多端直流架构的交直流混联配电网三相不平衡潮流计算：

$$U_n = \sqrt{3} \mu M U_k / 3 \quad (C3)$$

式中： $\mu$  为直流电压利用率，采用 SPWN 调制方式时为 0.866； $M$  为调制系数， $0 \leq M \leq 1$ ，通过基准值  $M_B = 2U_B^{AC} / U_B^{DC}$  ( $M_B$ 、 $U_B^{AC}$ 、 $U_B^{DC}$  分别为 VSC 调制度、交流母线电压幅值、直流母线电压幅值的基准值) 进行标幺化，节点电压标幺值关系可以近似为式(A4)。

$$U_n^* = U_k^* \quad (C4)$$

式中： $U_n^*$ 、 $U_k^*$  分别为  $U_n$ 、 $U_k$  的矢量值。式(C1)–(C4)构成了 VSC 的稳态模型。

## 附录 D

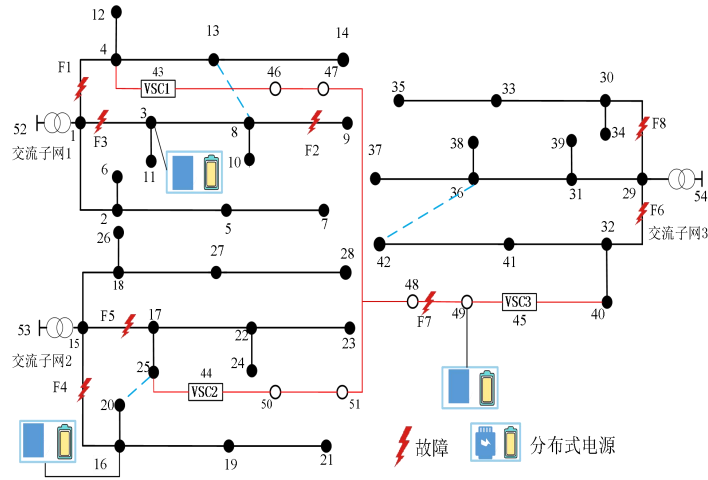


图 D1 基于 IEEE 14 节点系统的交直流配电网网架结构图

Fig.D1 Network frame structure diagram of AC/DC distribution network based on IEEE14-bus system

表 D1 ESS 的参数

Table D1 Parameters of ESS

节点	容量/kW	功率限制/kW	电量最大值/%	电量最小值/%	初始电量/%
3	110	30	0.85	0.15	0.50
16	90	25	0.80	0.20	0.25
49	130	60	0.90	0.10	0.75

表 D2 节点负荷等级

Table D2 Importance classification of node load

负荷类型	节点	权重系数
一级负荷	1,2,7,8,10—14,20,22,24,29,32—34,41,51	1.3
二级负荷	3—6,8—11,19,21,23,38,42,34,40,44,50,35	0.9
三级负荷	13—18,46—49,25—28,37,38	0.7

表 D3 故障修复所需时间

Table D3 Time required for trouble shooting

故障	修复时间 (时步数)	
	抢修队 1	抢修队 2
$F_1$	1	3
$F_2$	4	2
$F_3$	3	3
$F_4$	2	2
$F_5$	3	2
$F_6$	2	2
$F_7$	1	2
$F_8$	2	2

表 D4 抢修队 1 在仓库和故障点之间的移动时步

Table D4 Movement of repair team 1 between warehouse and point of failure

抢修队 1	仓库	故障 1	故障 2	故障 3	故障 4	故障 5	故障 6	故障 7	故障 8
仓库	0	3	2	1	4	3	2	1	4
故障 1	3	0	5	2	4	4	4	1	1
故障 2	2	3	0	2	1	4	1	2	2
故障 3	1	3	2	0	3	4	1	2	2
故障 4	3	3	1	3	0	2	3	3	3
故障 5	3	3	4	3	2	0	4	3	3
故障 6	4	1	1	1	3	4	0	3	4
故障 7	1	1	2	2	3	2	3	0	1
故障 8	4	1	2	2	3	2	4	1	0

表 D5 抢修队 2 在仓库和故障点之间的移动时步

Table D5 Movement of repair team 2 between warehouse and point of failure

抢修队 2	仓库	故障 1	故障 2	故障 3	故障 4	故障 5	故障 6	故障 7	故障 8
仓库	0	3	2	2	4	3	2	1	3
故障 1	3	0	4	3	3	4	3	1	1
故障 2	2	4	0	2	1	4	2	2	2
故障 3	1	3	2	0	3	3	3	2	2
故障 4	3	2	1	3	0	2	2	3	3
故障 5	3	4	4	3	2	0	3	3	3
故障 6	2	3	2	4	2	2	0	3	3
故障 7	1	1	2	2	3	3	4	0	1
故障 8	3	1	2	2	3	3	4	1	0

## 附录 E

表 E1 故障修复中联络线状态

Table E1 Status of tie lines during faults repairs

时步	联络线		
	8-13	20-25	32-46
1-3	1	1	1
4	1	1	0
5-13	1	1	0
14-17	1	0	0
18	1	0	0

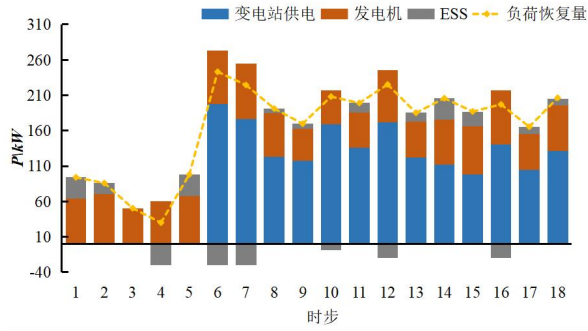


图 E1 MG<sub>1</sub> 中的恢复情况  
Fig.E1 Restoration condition of MG<sub>1</sub>



图 E2 MG<sub>2</sub> 中的恢复情况  
Fig.E2 Restoration condition of MG<sub>2</sub>

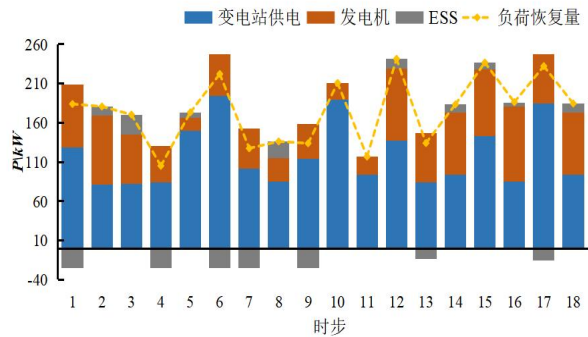


图 E3 MG<sub>3</sub> 中的恢复情况  
Fig.E3 Restoration condition of MG<sub>3</sub>