

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231606

极端气象灾害下考虑 MESS 主动调控的配电网故障恢复策略

许守东^{1,2}, 王建¹, 李铭益¹, 张丽², 欧阳金鑫¹, 熊小伏¹

(1. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 2. 云南电网有限责任公司
电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

摘要: 针对极端灾害天气下配电网的故障恢复问题, 计及极端灾害的时空演变特性, 提出了一种利用移动储能 (mobile energy storage system, MESS) 的灵活性主动参与抑制合环冲击电流, 辅助配电网故障恢复的策略。首先, 建立了暴风雨等不同气象灾害条件下配电线路的故障率统计模型。其次, 将复杂交通网与配电网进行耦合, 建立了以最小化 MESS 调度时空成本的上层预布局模型。然后, 分析了 MESS 出力对冲击电流的影响, 以抑制合环冲击电流、最大化负荷恢复率和最小化 MESS 调度成本为目标, 构建了 MESS 参与网络重构的下层调度模型。最后, 在改进的 IEEE 123 节点系统中进行测试, 验证了 MESS 对配网故障恢复安全性的提升效果。结果表明, 采用 MESS 主动参与调控能够有效应对移动的极端气象灾害引发的配电网动态故障恢复问题, 并抑制合环过程中电流的波动, 提升网络重构方案的可行性和增强配电网的韧性。

关键词: 配电网; 气象灾害; 合环冲击电流; 移动储能; 故障恢复

Distribution network fault recovery strategy considering active control of an MESS in extreme weather

XU Shoudong^{1,2}, WANG Jian¹, LI Mingyi¹, ZHANG Li², OUYANG Jinxin¹, XIONG Xiaofu¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Electric Power Research Institute of CSG Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: To address the problem of fault recovery of distribution networks in extreme weather, a strategy is proposed of using the flexibility of a mobile energy storage system (MESS) to actively participate in the suppression of loop closing impulse currents. This assists in the fault recovery of distribution network by considering the spatial and temporal evolution characteristics of extreme weather hazards. First, a statistical model is developed for the failure rate of distribution lines in different weathers, such as severe wind and rain storms. Second, complex transportation networks are coupled with the distribution networks, and an upper-level pre-dispatch model is established to minimize the spatial-temporal cost of MESS scheduling. Then, the influence of the MESS output power on impulse current is analyzed, and the lower-layer scheduling model of the MESS participating in network reconfiguration is constructed with the objectives of suppressing the loop closing impulse current, maximizing the load restoration rate, and minimizing the MESS scheduling cost. Finally, the modified IEEE 123-node system is adopted to verify the effectiveness of the MESS in improving the security of distribution network fault recovery. The results show that using the MESS to actively participate in scheduling can effectively cope with the dynamic fault recovery problem of a distribution network caused by extreme hazardous weather movement, and suppress the current fluctuation in the process of loop closing, enhance the feasibility of the network reconfiguration scheme, and strengthen the resilience of the network.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277079).

Key words: distribution network; weather hazards; loop closing impulse current; MESS; fault recovery

0 引言

近年来, 随着高比例可再生能源和多元化负荷

种类的融入^[1], 我国电网的运行方式和形态变得日益复杂, 既面临风光等新能源发电高不确定性的内部消纳挑战^[2-4], 又面临着自然灾害强度逐年递增的外部风险^[5-6]。现有研究提出了韧性电网的概念, 以全面、快速、准确地感知电网运行态势, 采取主动防御措施, 快速恢复重要负荷供电^[7]。因此, 当配

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277079); 重庆市出站留(来)渝博士后择优项目资助(2020LY23)

电网故障时,如何协调好配电网内外部灵活资源对各类极端天气时空演变过程中引发的故障做出预判与积极预备,并且考虑配电网负荷恢复方案的安全性,最终实现配电网韧性提升,成为当前研究的热点问题之一^[8-9]。

针对含高比例可再生能源配电网故障,为确保用户用电连续性和稳定性,现有的故障恢复方案重点关注负荷恢复率、恢复方案的经济性和稳态安全^[10-12]、分布式电源(distributed generation, DG)强波动性以及故障的动态发展过程^[13],通过网络重构的方式,采用“热倒”负荷进行合环转供。但是,针对气象因素引发的故障时,现有研究缺乏灾害条件下线路故障不确定性的考虑。文献[14]构建了配电线路故障率时空特性矩阵,利用移动储能(mobile energy storage system, MESS)的灵活性为配电网提供分阶段电力供应,但是未将实际交通网与配电网进行耦合,考虑的场景较理想化。文献[15]建立了灾前预防-灾后恢复的动态调度优化模型,但是对于灾害引发的线路故障定位缺乏理论分析,且没有考虑灾害的时变特性。文献[16-17]综合考虑电力系统运行的经济性和安全稳定性影响,以最小化调度成本和网损、最大程度提升系统稳定水平为目标函数,讨论了给定系统初始网络参数的拓扑优化策略。

同时,现有研究对于重构方案的暂态安全关注较少,并未考虑到故障恢复实施过程中电气量的暂态变化及其影响。例如,合环点两侧存在开环电压差,在合环过程中将产生过大的暂态冲击电流,可能引发保护非期望动作,甚至破坏设备^[18]。因此,针对配电网合环电流计算,文献[19-20]总结了配电网合环点的几种模式,并简化单相等效电路,使用叠加原理对合环冲击电流进行计算分析。文献[21-22]对配电网合环安全性和经济性进行了分析判断,在此基础上,文献[23]考虑了解环安全性,提出了考虑配电网合环转供安全校验提供指导,但它们均缺乏合环辅助决策。

为抑制电网合环冲击,文献[24]综合考虑了负荷重新分配、投切电容器、调节变压器分接头和限流电抗器4种措施来辅助系统调节,从而满足合环操作要求,但该文没有充分挖掘分布式电源在主动配电网中的调控潜力,受电网自身配置限制较大。文献[25]考虑了合环过程中的电压和功率波动,以合环波动最小为目标函数,确定了合环开关动作先后次序。文献[26-27]通过分析合环冲击的机理和影响因素,提出利用分布式电源主动参与调节的思想抑制合环冲击电流,辅助故障恢复中网络重构方案顺利进行。但是,现有研究主要关注固定资源的调

节利用,对电网配置要求较高,对于灵活可调的移动DG研究还有待开发^[28-29]。

鉴于此,针对极端天气下配电网故障恢复需求,本文计及配电网故障的时空演变特性和合环冲击电流越限问题,兼顾故障修复资源与恢复策略的交互影响,充分利用MESS的时空灵活特性和双向充放电特性,提出了一种利用MESS充放电的灵活性来辅助配电网灾后孤岛供电以及合环的策略。采用时空相依的配电线路故障统计方法,对配电网日内不同时刻的各线路可用度进行分析计算,以抽样的形式模拟配电网故障情形,在灾害发生前对MESS进行预布局。然后,结合气象信息获取灾害移动路径及强度,确定配电网故障线路,生成储能主动参与调控的配电网故障恢复策略,以实现在极端天气下应急储能的最快速、高效投入使用,提升配电网故障恢复过程的安全性和可靠性。

1 极端灾害下配电网故障恢复策略

在同一灾害下,线路故障为概率性事件。结合实际历史数据和气象预警信息,可以通过时空相依的线路故障统计方法预先对线路故障率进行计算,以故障抽样的形式对配电网故障失电风险进行量化分析,并由此对MESS进行提前布局,构建MESS预布局模型,缩短故障抢修时间。

为降低由气象因素对系统停电带来的威胁,通常采用合环操作对负荷进行转供,现有DG接入的主动配电网改变了配电网原有辐射状结构,可以通过构建MESS参与故障恢复调度模型,灵活调节各类DG出力 and 上网节点可以改善系统潮流分布,降低合环电流冲击对系统带来的损害,提高负荷供电可靠性。

如图1所示,为实现极端气象灾害下配电网故障恢复,分两层构建模型进行计算,上层预布局模型引入比例风险模型精细化天气状况影响因素对线路故障的影响,同时考虑实际交通道路对MESS参与的影响,将复杂交通网与电网耦合,以MESS在典型故障场景下时空调度成本最小化为目标,通过对高风险故障场景预演确定MESS初始分布节点。下层为MESS参与故障恢复调度模型,计及实际重构方案合环冲击电流对配电网安全的考虑以及对应的网络拓扑和电压电流安全约束,在发生故障后以最小化开关动作成本、MESS调度距离和响应时间以及最大化等效负荷恢复率为目标函数,构建模型计算并输出网络拓扑变化和MESS控制方案。



图1 极端气象灾害下配电网故障恢复方案

Fig. 1 Distribution network fault recovery scheme under extreme weather disasters

2 基于故障概率预测的 MESS 预布局模型

通常而言,暴雨、雷暴大风等强对流天气呈现多发性、强不确定性态势。当强对流天气生成和移动发展时,其对流中心移动速度快,具有明显的时空特性,雷、风、雨等多种类型气象组合均会引发电力系统故障,当线路或杆塔承受的风雨冲击超出自身强度承受范围时会出现断线、倒杆、断杆等。在 GB 50061-2010《66 kV 及以下架空电力线路设计规范》中,配电线路设计将当地气象条件纳入考虑,并针对性地对雷电、风雨及覆冰等常见气象条件留有设计安全裕度。

2.1 不同气象条件下的线路故障模型

配电网故障与灾害天气在时空上呈现出显著的关联,尤其考虑到气象灾害具有鲜明的季节性和时空转移特性,从而使得电网的失电风险也表现出时间的变动性。随着风雨荷载等天气强度增加,配电网元件失效概率也逐渐增大,因此,评估线路在极端天气下的故障停运率成为了至关重要的指标,它代表了每单位长度线路在特定时间段内由于故障而停运的频次。在统计配电网线路故障率时,在考虑线路年均值故障模型的基础上,还需从历史同期和外部致灾气象因素两个维度扩展,以更精确地描述各线路的故障停运风险,指导极端天气下配网故障恢复方案制定^[30-31]。

参考 DL/T 836.1-2016《供电系统供电可靠性评价规程》对常规配电线路故障率的计算,进一步精细化统计配电线路历史同期故障率,将其作为线路的基准故障率,如式(1)所示。

$$\lambda_0(x) = \frac{1}{T_x} \frac{\sum_{f=1}^{f'} N_{xf}}{\sum_{f=1}^{f'} L_f} \quad (1)$$

式中: $\lambda_0(x)$ 为第 x 月的故障率,次/(km·年); N_{xf} 为统计的 n 年内第 f 条线路在第 x 月中的故障停运次数; T_x 为历史同期第 x 个月持续的时间,年; f' 为同一电压等级下同一类型线路数量,条; L_f 为第 f 条线路的长度, km。

进一步参考主设备运行风险量化方法^[32],在线路的基准故障率 $\lambda_0(x)$ 的基础上,引入比例风险模型量化天气状况影响因素对线路故障率的影响,如式(2)所示。

$$\lambda_a(x) = \lambda_0(x) \exp\left(\sum_{n=1}^{n'} \alpha_n X_n\right) \quad (2)$$

式中: $\lambda_a(x)$ 为 a 类天气下的线路故障率,次/(km·年); n' 为协变量个数; X_n 为对配电线路、杆塔造成结构性失效的各类气象因素协变量,本文主要考虑风速和降雨量两类因素; α_n 为协变量的系数。

对于短时的运行风险,可以选用泊松分布计算 a 类天气下线路故障的概率,如式(3)所示。

$$P_{a,h}(t) = \frac{(\lambda_a t)^h e^{-\lambda_a t}}{h!} \quad (3)$$

式中: $P_{a,h}(t)$ 为在给定时间段内发生 h 次故障的概率; h 为故障发生的次数; t 为给定的时间,折算到年。

2.2 复杂交通网-电网耦合

在配电网故障恢复过程中,由于需要计及 MESS 的参与,而 MESS 的调度状态由荷电状态、初始位置以及交通运输状态决定,因此将道路交通节点与配电网节点在地理上建立耦合关系。以 9 节点配电网为例,图 2 展示了配电网与实际交通道路的对对应关系。从图中可知,由于实际道路走向和路况因素,储能调度路径与线路长度不完全正向相关,各节点间交通可达路线有多种方案选择,且可能存在交通堵塞因素造成部分电网节点不可及情况。

根据配电网各节点实际地理连接关系,建立反映各道路连接关系和地理距离的邻接矩阵 D ,如式(4)所示。

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1N} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & \cdots & d_{NN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

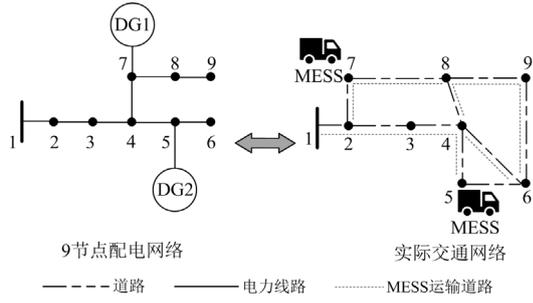


图2 配电-交通网络耦合示意图

Fig. 2 Coupling diagram of distribution network-transportation networks

式中： N 为系统总节点数； d_{ij} 为节点*i*至节点*j*之间的实际地理连接关系和道路距离，km。根据实际连接情况，若节点间无道路连接或路况不允许运输MESS的车辆通过，则视为两节点间距离无限远， d_{ij} 可用式(5)表示。

$$d_{ij} = \begin{cases} 0 & i = j \\ \infty & \text{节点 } ij \text{ 间无通路} \\ l_{ij} & i \neq j \end{cases} \quad (5)$$

式中， l_{ij} 为连通节点*i*与节点*j*的道路距离，km。

由于实际道路车流量状况实时变化，因此引入交通堵塞系数 κ 对邻接矩阵 D 进行修正。

$$\begin{cases} d'_{ij}(t) = \kappa \cdot d_{ij} \\ D'[i, j] = d'_{ij}(t) \end{cases} \quad (6)$$

为实现故障恢复中MESS时空调度成本最小化目标，进一步采用Floyd算法对节点距离矩阵 Y 进行计算，其为节点最短路径矩阵，初始值为加权邻接矩阵值 D' ，通过插值迭代的方法可以获得任意两节点间的最短移动路径，如式(7)所示，该方法实现简单且直观计算效率较高。

$$Y[i, j] = \min\{Y[i, j], Y[i, k] + Y[k, j]\} \quad i, j, k \in A \quad (7)$$

式中， A 为系统中所有节点的集合。算法的核心思想是寻找是否存在节点*k*，使节点*i*到*k*再到*j*的路径比已知的节点*i*到*j*路径更短，并进行更新。

2.3 储能预布局模型

综合考虑MESS参与调度的时空成本，确保在灾害发生后MESS运输成本最低且响应调度速度最快，需要预先确定好MESS的初始节点位置，即事故发生后MESS的初始位置。因此，为保证事故发生后关键负荷在较长时间的持续供电能力和失电负荷的快速恢复能力，以储能能在各类灾害天气下调度距离和响应时间最短作为目标函数，如式(8)所示。约束条件主要有运输时间、参与调度的MESS数量以及MESS功率约束，如式(9)一式(11)所示。由于

本文MESS主要作为应急资源抢险，不考虑前期投资和上网电价成本。

$$F_1 = \min \chi_1 \cdot \frac{1}{\phi_a} \sum_{a \in \phi} P_a \sum_{m=1}^M Y_{a,m}[i, j] + \min \chi_2 \max \frac{1}{v_{car}} Y_{a,m}[i, j] \quad (8)$$

式中： $Y_{a,m}[i, j]$ 为在*a*类天气下配电网故障恢复策略中，第*m*组储能由节点*i*调度至节点*j*的最短加权距离，km； M 为MESS总调度组数； P_a 为*a*类天气发生的概率； ϕ 为该地区灾害天气集合； ϕ_a 为该地区统计的灾害天气总数； v_{car} 为交通车辆移动速度，km/h； χ_1 和 χ_2 为两个目标的权重系数。

$$\frac{Y_{a,m}[i, j]}{v_{car}} \leq T_{max} \quad (9)$$

$$M \leq M_{t,max} \quad (10)$$

$$\begin{cases} -P_{max}^{dis} \leq P_{MESS,t} \leq P_{max}^{ch} \\ -Q_{max}^{dis} \leq Q_{MESS,t} \leq Q_{max}^{ch} \\ 0 \leq S_t = \sqrt{P_{MESS,t}^2 + Q_{MESS,t}^2} \leq S_{max} \end{cases} \quad (11)$$

式中： T_{max} 为单组MESS调度时间的上限，h； $M_{t,max}$ 为该时段内可参与调度的MESS总组数； P_{max}^{ch} 和 P_{max}^{dis} 分别为MESS参与充放电的最大有功功率，kW； Q_{max}^{ch} 和 Q_{max}^{dis} 分别为MESS参与充放电的最大无功功率，kvar； S_{max} 为MESS总容量，kVA。

3 MESS参与故障恢复调度模型

3.1 合环冲击电流推导

电力系统潮流计算是合环电流判断的基础依据，通过构建合环潮流的等效计算模型，可以得到各线路功率分布和各节点电压等，为后续合环可操作性提供判断依据，合环潮流计算模型如图3所示。

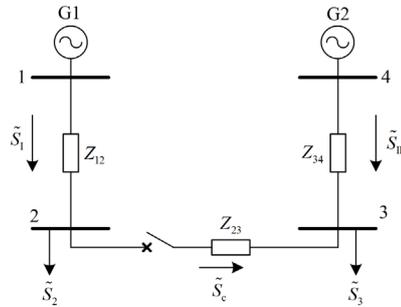


图3 合环潮流计算模型

Fig. 3 Loop flow calculation model

采用力矩法计算合环功率分布, 如式(12)所示, 并利用电压差和环路阻抗计算环路内循环功率, 如式(13)所示。

$$\begin{cases} \tilde{S}'_I = \frac{\tilde{S}_2(Z_{23} + Z_{34})^* + \tilde{S}_3 Z_{34}^*}{\sum Z^*} \\ \tilde{S}'_{II} = \frac{\tilde{S}_3(Z_{12} + Z_{23})^* + \tilde{S}_2 Z_{12}^*}{\sum Z^*} \end{cases} \quad (12)$$

$$\tilde{S}_c = \frac{U_N(\dot{U}_2 - \dot{U}_3)^*}{\sum Z^*} = \frac{U_N d\dot{U}^*}{\sum Z^*} \quad (13)$$

式中: \tilde{S}'_I 、 \tilde{S}'_{II} 是与负荷相关的线路功率分布, kVA; \tilde{S}_c 为由两端电压差产生的循环功率, kVA; Z 为各线路阻抗, Ω ; $d\dot{U}$ 为两端电源电压相量差, kV。

将各支路与负荷相关的线路功率和环路循环功率相加即可得到环路各处功率分布 \tilde{S}'_I 、 \tilde{S}'_{II} 。

由于系统中存在电感元件, 合环电流由周期分量和直流分量两部分组成。为计算合环暂态冲击, 建立如图 4 所示的合环暂态冲击等值模型, 电压激励为合环点两侧电压的差值, 无源环网等值阻抗 Z_{eq} 简化为 R 和 L 串联电路^[33]。

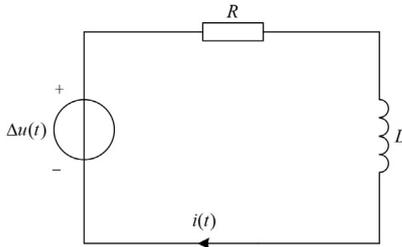


图 4 计算合环暂态电流的等值电路模型

Fig. 4 Equivalent circuit for calculating loop closing transient current

根据 KVL 可以构建电路的非齐次微分方程, 如式(14)所示。

$$\Delta u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (14)$$

$$\Delta u(t) = U_2 \sin(\omega t + \delta_2) - U_3 \sin(\omega t + \delta_3) \quad (15)$$

式中: $\Delta u(t)$ 为合环点两侧电压差瞬时值, kV; $i(t)$ 为电流瞬时值, A; U_2 和 U_3 为合环点两侧电压幅值, kV; δ_2 和 δ_3 为合环点两侧电压相角。

求解式(14)和式(15), 流过合环支路冲击电流的完全表达式为

$$i(t) = I_m \sin[\omega t + \varphi - \arctan(\omega L / R)] - I_m \sin[\omega t_0 + \varphi - \arctan(\omega L / R)] e^{-(t-t_0)/\tau_1} \quad (16)$$

$$\begin{cases} I_m = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 - 2U_2 U_3 \cos(|\delta_2 - \delta_3|)}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \\ \varphi = \arctan\left(\frac{U_2 \sin \delta_2 - U_3 \sin \delta_3}{U_2 \cos \delta_2 - U_3 \cos \delta_3}\right) \end{cases} \quad (17)$$

式中: I_m 为合环后的稳态电流幅值, A; τ_1 为衰减常数, $\tau_1 = L / R$ 。

由式(16)可知, 合环冲击电流与合环点两侧电压幅值及相角均有关系, 由于合环电流始终存在, 可以通过调节合环初相角来达到抑制式(16)中直流分量的目的, 如式(18)所示。

$$\omega t_0 + \varphi - \arctan(\omega L / R) = 0 \quad (18)$$

可以求得

$$\begin{cases} U_2 = \frac{\sin \delta_3 - c \cos \delta_3}{\sin \delta_2 - c \cos \delta_2} U_3 \\ c = \tan\left[\arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right) - \omega t_0\right] \end{cases} \quad (19)$$

此时冲击电流最小, 通过调节储能功率改变网络的潮流, 尽可能地使合环点两侧电压满足式(19)。

3.2 储能参与合环冲击电流抑制

3.2.1 MESS 功率调节需求

通常已知配电网拓扑连接、各节点类型、负荷功率以及线路运行参数即可通过常规潮流计算获得配电网潮流分布, 而由上节分析可知, 抑制合环冲击电流, 需要使合环点两侧电压满足式(19)。搭建含 MESS 的配电网, 以图 5 为例, 节点 3 为合环点一侧, 分析 MESS 功率调节需求量。

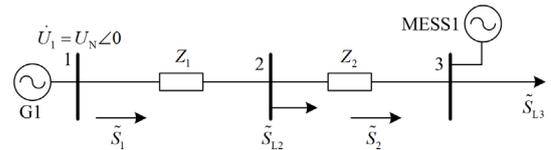


图 5 含 MESS 的配电网示意图

Fig. 5 Distribution network with MESS

将节点 1 作为平衡节点, 忽略线路对地导纳和网络损耗, 通过前推回代方法可建立方程组(20)。

$$\begin{cases} \tilde{S}_1 = \tilde{S}_2 + \tilde{S}_{L2} \\ \tilde{S}_2 = \tilde{S}_{L3} - \tilde{S}_{MESS} \\ \dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \left(\frac{\tilde{S}_1}{\dot{U}_1}\right)^* Z_1 \\ \dot{U}_3 = \dot{U}_2 - \left(\frac{\tilde{S}_2}{\dot{U}_2}\right)^* Z_2 \\ \tilde{S}_{MESS} = P_{MESS} + jQ_{MESS} \end{cases} \quad (20)$$

式中: \tilde{S}_1 、 \tilde{S}_2 为线路传输功率, kVA; \tilde{S}_{L2} 、 \tilde{S}_{L3} 为节点负荷功率, kVA; \tilde{S}_{MESS} 为合环点储能输出功率, kVA; $\dot{U}_i (i=1,2,3)$ 为各节点电压, kV。

联立式(19)和式(20), 并求解可得 MESS 上网功率 $P_{\text{MESS}}(U_3, \delta_3)$ 和 $Q_{\text{MESS}}(U_3, \delta_3)$, 如式(21)所示。

$$\tilde{S}_{\text{MESS}} = P_{\text{MESS}}(U_3, \delta_3) + jQ_{\text{MESS}}(U_3, \delta_3) = \tilde{S}_{L3} + \tilde{S}_{L2} - \left(\frac{(\dot{U}_1 + gZ_2 - \dot{U}_3) \left(\dot{U}_1 |\dot{U}_1^*|^2 + \tilde{S}_1 Z_1^* U_1^* \right)}{(Z_1 + Z_2) \dot{U}_1 \dot{U}_1^* + \tilde{S}_1 Z_1 Z_1^*} \right)^* \quad (21)$$

$$g = \frac{\dot{U}_1 \tilde{S}_{L2}^*}{\dot{U}_1 \dot{U}_1^* - \tilde{S}_1 Z_1^*} \quad (22)$$

由式(21)可知, MESS 待调节功率与合环点拟调节电压幅值和相角有关。随着合环点两侧电压相量差值增大, 对 MESS 的可调节容量需求也越大, 但是受 MESS 自身容量、最大充放电功率以及配置成本的限制, 对于此类应急响应资源如何在中长期的规划层面分析容量、优化配置问题, 也是进一步需要研究的方向^[34]。

3.2.2 MESS 调度方案

在本文中, MESS 主要承担支撑部分失电节点恢复供电和参与合环点电压幅值相角调节的作用。一方面, MESS 可以为部分与配电网断连的负荷提供稳态功率支撑, 另一方面所求解的拓扑变化方案在故障恢复过程中涉及到开关切换、孤岛并网等过程, 为了确保后续对重要负荷的持续供电, 需要利用 MESS 抑制此过程中所带来的暂态冲击以实现两种供电方案间的安全过渡。当恢复方案确定后, 以 MESS 调度距离和响应时间最短作为目标函数, 对各组 MESS 进行移动, 并确定其上网功率, 如式(23)所示。

$$F_2 = \min \chi_1 \cdot \sum_{m=1}^M Y_m[i, j] + \min \chi_2 \max_{v_{\text{car}}} \frac{Y_m[i, j]}{v_{\text{car}}} \quad (23)$$

式中, $Y_m[i, j]$ 为由 MESS 初始节点 i 至恢复方案规划上网节点 j 的最短加权距离, km。

约束条件为式(9)一式(11)。

3.3 故障恢复模型

3.3.1 恢复方案指标选择

随着电网的形态和运行方式日趋复杂, 电力系统面临的内外风险源也在增加, 因此构建韧性电网的概念也应运而生。为实现电网韧性提升, 故障发生后关键负荷的持续供电能力和失电负荷的快速恢复能力是重点关注对象。同时, 为兼顾在此过程中

的操作成本, 本文选取配网故障恢复期间加权负荷等效恢复率、开关总动作次数作为恢复方案的指标, 并通过赋予相应的成本权值, 最终构建的网络重构与孤岛划分目标函数如式(24)所示。

$$F_3 = \min \beta_1 \sum_{ij \in \varepsilon} |c_{ij} - c'_{ij}| - \beta_2 \sum_{i \in K} \omega_i b_i P_{\text{load}i} \Delta t \quad (24)$$

式中: ε 为配网所有线路集合; c'_{ij} 和 c_{ij} 为二进制变量, 分别表示线路 ij 的重构前后开闭状态; K 为配网节点集合; ω_i 为节点 i 的负荷权重; b_i 为二进制变量, 表示节点 i 带电状态; $P_{\text{load}i}$ 为节点 i 的负荷有功功率; Δt 表示故障持续时长; β_1 、 β_2 为各目标权重系数。

3.3.2 约束条件

选取辐射状网络约束以及故障支路集约束作为网络结构约束, 如式(25)所示。为满足连通性, 所有负荷节点都需要确保有一条通向电源节点的路径。

$$\begin{cases} \sum_{ij \in \varepsilon_1} c_{ij} = N_1 - N_s \\ c_{ij} \in \{0, 1\}, \forall (ij) \in \varepsilon_1 \\ c_{ij} = 0, \forall (ij) \in \varepsilon_2 \end{cases} \quad (25)$$

式中: ε_1 为配网故障后, 可正常运行支路集; ε_2 为故障支路集, 由于不能正常送电, 将其强制置 0; N_1 为故障隔离后, 参与网络重构的节点数; N_s 为参与网络重构的电源数量。

为提高计算效率, 忽略线路模型中的并联导纳, 并利用相角松弛, 结合节点 j 的 DG 或 MESS 的注入功率, 将潮流平衡约束分解为式(26)。

$$\begin{cases} \sum_{k:(jk) \in \varepsilon_1} P_{jk} = \sum_{i:(jk) \in \varepsilon_1} (P_{ij} - I_{ij} r_{ij}) + P_j \\ \sum_{k:(jk) \in \varepsilon_1} Q_{jk} = - \sum_{i:(jk) \in \varepsilon_1} (Q_{ij} - I_{ij} x_{ij}) + Q_j \\ P_j = P_{Gj} + P_{DGj} + P_{\text{MESS}j} - b_j P_{\text{load}j} \\ Q_j = Q_{Gj} + Q_{DGj} + Q_{\text{MESS}j} - b_j Q_{\text{load}j} \end{cases} \quad (26)$$

式中: P_j 和 Q_j 分别表示节点 j 的注入有功(kW)和无功(kvar); P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为支路的有功(kW)和无功(kvar); I_{ij} 为支路电流的平方; r_{ij} 和 x_{ij} 分别为支路电阻和支路电抗, Ω ; b_j 为二进制变量, 表示节点 j 带电状态; P_{Gj} 、 P_{DGj} 、 $P_{\text{MESS}j}$ 为节点 j 上各电源注入有功, kW; Q_{Gj} 、 Q_{DGj} 、 $Q_{\text{MESS}j}$ 为节点 j 上各电源注入无功, kvar。

配电线路电压、电流以及线路功率满足的等式约束, 如式(27)所示, 由于其是非凸形式, 进一步

按照二阶锥形式等价可得标准二阶锥形式, 如式(28)所示。

$$I_{ij} = i_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i} \quad (27)$$

$$\begin{cases} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ I_{ij} - V_i \end{cases} \leq I_{ij} + V_i \quad (28)$$

式中, V_i 为节点 i 电压的平方。

在整个故障过程中, 为维持电网安全可靠运行, 还应满足如下约束。

$$0 \leq i_{ij} \leq c_{ij} i_{\max} \quad (29)$$

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (30)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_G \leq P_{G\max} \\ -Q_{G\max} \leq Q_G \leq Q_{G\max} \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} -c_{ij} P_{\max} \leq P_{ij} \leq c_{ij} P_{\max} \\ -c_{ij} Q_{\max} \leq Q_{ij} \leq c_{ij} Q_{\max} \end{cases} \quad (32)$$

式中: i_{\max} 为支路最大允许电流; U_{\max} 和 U_{\min} 分别为节点电压上下限; P_{\max} 和 Q_{\max} 分别为支路最大有功和无功; $P_{G\max}$ 和 $Q_{G\max}$ 分别为电源有功、无功功率最大值。其中, 式(29)为支路电流安全约束, 式(30)为节点电压安全约束, 式(31)为电源功率约束, 式(32)为支路功率传输约束。

最终配电网故障恢复模型输出为网络重构配电网拓扑连接方案, 指导故障后配电网进行合解环操作恢复负荷用电。

4 模型的求解思路及流程

根据第 2 节和第 3 节所提的 MESS 预布局模型和 MESS 参与故障恢复调度模型, 利用 MESS 充放电的灵活性来辅助配电网灾后孤岛供电以及合环的策略, 具体步骤如图 6 所示。

1) MESS 预布局

由于本文计及 MESS 对于故障恢复过程中合环冲击电流的抑制, 以及对故障时段重要负荷的连续供电影响, 因此通过 MESS 预布局策略确定好 MESS 初始节点位置。首先, 采用时空相依法引入比例风险模型计算各类天气下线路的加权故障概率。其次, 输入已知配电网结构参数, 并与实际交通网连接情况进行耦合, 计算实际节点间最短调度距离。然后, 根据各线路故障概率计算配电网失负荷风险, 并根据故障恢复模型, 以储能调度时空成本最小化确定储能的初始节点分布。

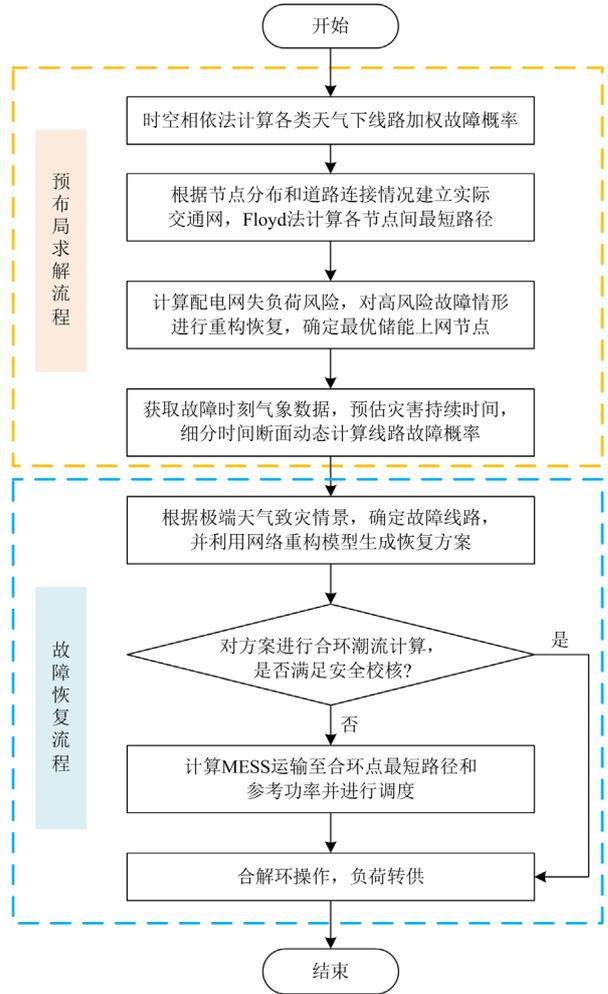


图 6 MESS 主动参与的配电网故障恢复流程

Fig. 6 Distribution network fault recovery process with MESS active participation

2) 故障恢复求解流程

在实际故障恢复过程中, 首先, 通过气象预警获取具体极端天气数据和配电网故障时刻分布式电源和负荷状态参数以及网络结构参数后, 根据故障持续时间尺度细分时间断面, 指导更新恢复方案。其次, 动态更新气象数据, 并模拟极端天气致灾情景确定故障线路, 代入故障恢复网络重构模型生成故障恢复方案。然后, 对方案进行合环潮流计算, 对于合环冲击电流进行安全校核。当冲击电流不满足安全校验时, 计算 MESS 调度的最佳方案和最优调节功率, 以达到故障恢复加权负荷恢复量最大、开关操作成本最少和方案操作的安全可行的目标。

5 算例分析

5.1 算例介绍

为测试本文所提策略对于极端天气导致的配网

故障的恢复效果,本文采用改进的 IEEE 123 节点系统进行算例分析,配电网采用 13.8 kV 电压等级,图 7 展示了该配电系统的节点分布和线路连接情

况,在系统中引入 6 个不同功率的 DG,其分布和相应的编号标于图 7 中,各 DG 出力如表 1 所示。

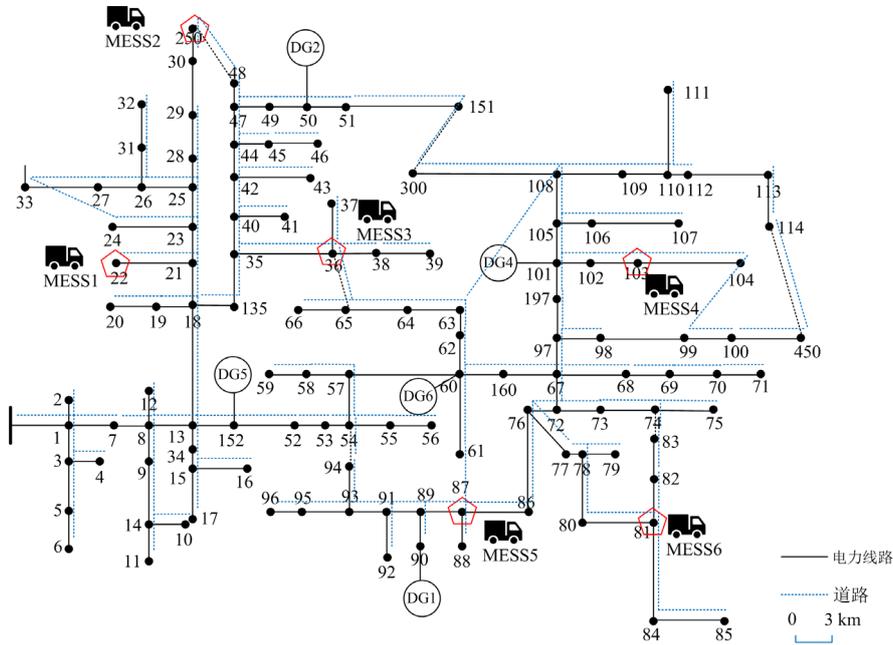


图 7 改进的 IEEE 123 节点系统及地理道路交通网

Fig. 7 Modified IEEE 123-node system and transportation network

表 1 DG 各时段最大出力(功率因数为 0.9)

Table 1 DG maximum output power (power factor is 0.9)

kW						
时段	DG1	DG2	DG3	DG4	DG5	DG6
18:00—19:00	550	800	100	1500	400	500
19:00—20:00	500	500	100	1500	500	500
20:00—21:00	500	500	120	1500	500	400
21:00—22:00	450	700	150	1500	500	500
22:00—23:00	550	800	100	1500	400	500
23:00—24:00	500	800	120	1400	400	400

设系统中含 6 组 MESS 可调度,每组 MESS 容量为 3 MVA 初始荷电状态(SOC₀为 0.6)。选取 ACSR 系列 Merlin 型号架空线路,允许载流量为 180 A。

为验证灾害天气移动对配网故障造成的影响,以某地区 2023 年 7 月的某次强对流天气过程为例,将 IEEE 123 节点系统映射到实际地理坐标图中,时间步长选取公布数据的时间分辨率(1 h)。同时由第 2 节分析可知,实际交通道路与配电网走向略有差异,因此建立如图 7 所示的地理道路交通网。各节点负荷权重等级信息如表 2 所示,提前对该系统线路故障次数进行统计,获取其历史天气故障率矩阵。

该地区在 7 月 11 日发生强对流天气,从出现到

消散历时约 5 h,其气象分布如图 8 所示。

表 2 各节点负荷权重

Table 2 Load weight of each node

负荷类型	节点	权重系数
一级负荷	12/32/49/77/82/85/87/96/103/104	10
二级负荷	4/31/46/58/62/65/92/107/112	5
三级负荷	其余节点	1

5.2 结果分析

根据历史天气线路故障率矩阵对故障线路抽样, L_{13-18} 、 L_{35-36} 、 L_{67-72} 、 L_{76-86} 、 $L_{101-102}$ 为异常天气下故障高发线路,初始情况下,6 组 MESS 分别位于节点 22、36、81、87、103、250,其分布如图 7 中红色五边形标注。

5.2.1 恢复方案

如图 8 所示,当出现极端强对流天气,强对流中心由西向东北方移动,在 18:00 时配电网线路 L_{18-19} 发生故障,19:00 时线路 L_{42-44} 、 L_{25-26} 均故障,20:00 时线路 $L_{108-300}$ 发生故障,21:00 时线路 L_{99-100} 发生故障,22:00 以后该配电网气象趋于正常,所有线路故障可以在 2 h 后得到修复。根据已知参数作为模型输入,在各周期内动态求解拓扑更新方案,结果如图 9 所示。

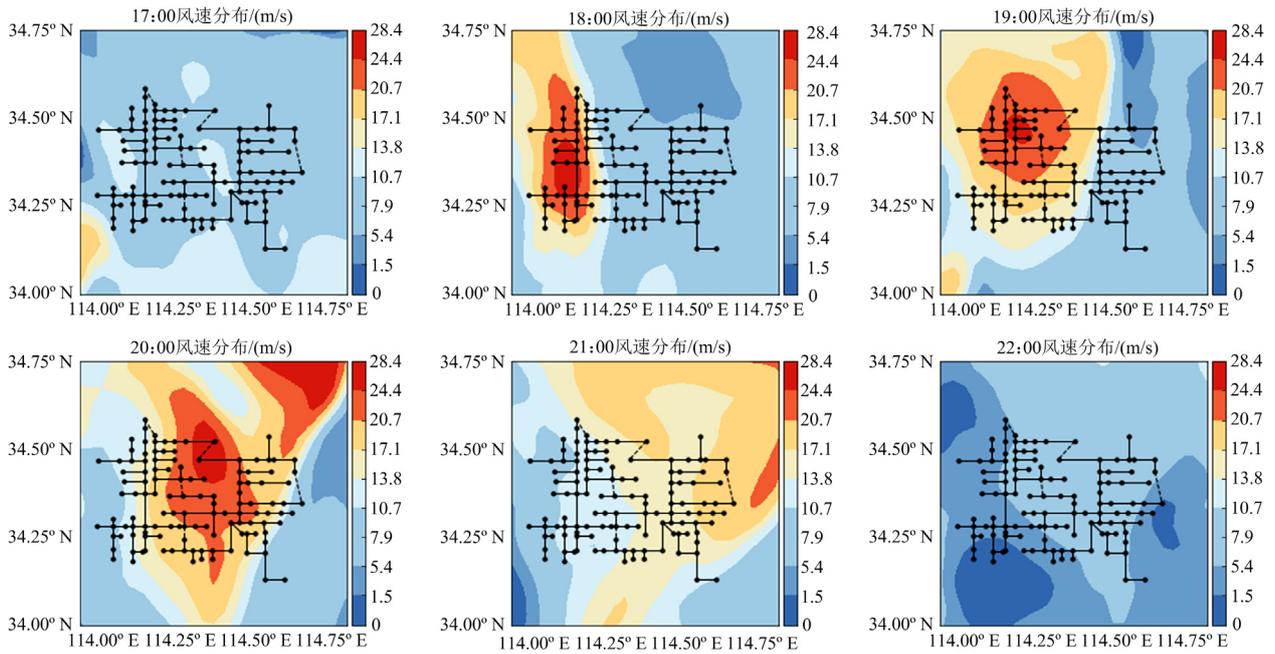


图 8 2023 年 7 月 11 日部分时段气象图

Fig. 8 Weather maps for selected hours on July 11, 2023

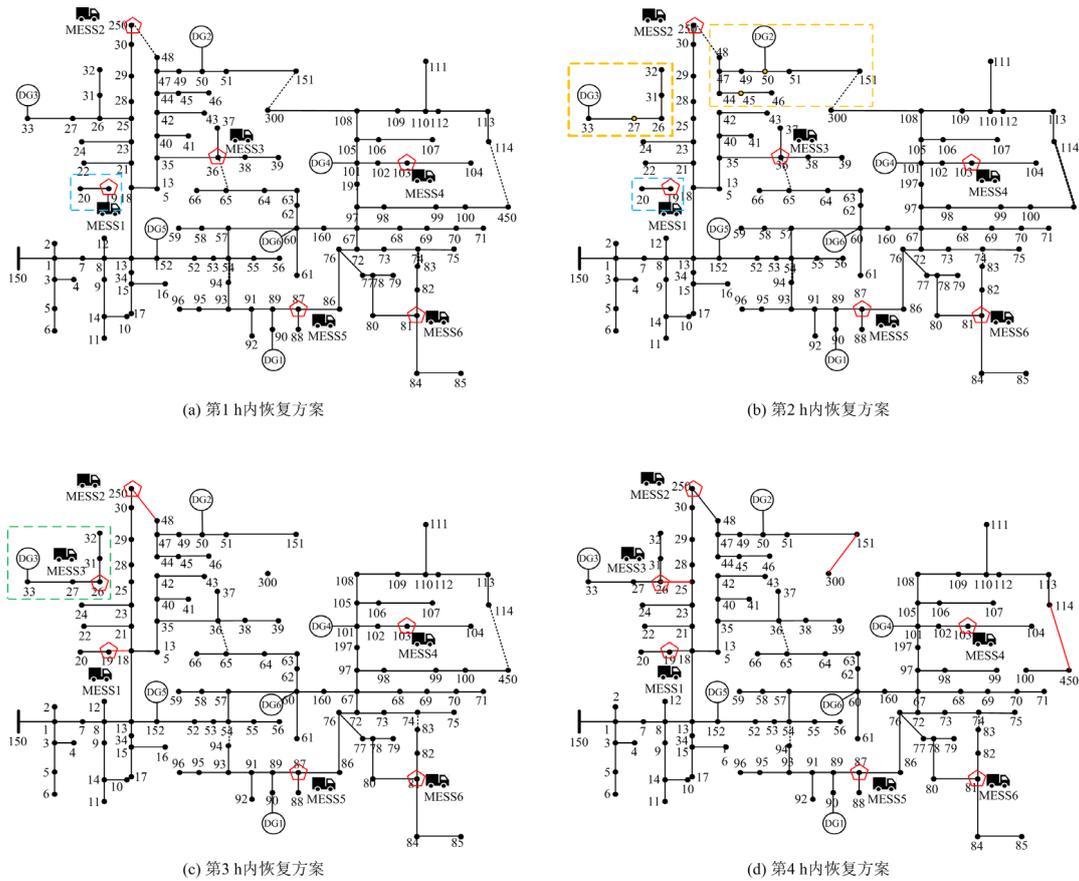


图 9 故障期间动态恢复方案

Fig. 9 Dynamic recovery program during faults

在故障后第 1 h, 由于节点 19、20 与配网失联, 通过计算该配电系统的节点最短路径矩阵, 优先调度位于节点 22 的储能至节点 19, 最短调度距离为 12.9 km, 假设 MESS 的移动速度为 40 km/h, 在 20 min 内可以实现负荷恢复供电。在故障后第 2 h, 线路 L_{25-26} 故障导致节点 26—27、31—33 均脱离配网供电, 经重构计算, 切除节点 27 负荷后, DG3 可作为单电源对节点 26、31—33 供电。同时调度节点 36 的储能至节点 26, 最短调度距离为 29.4 km, 在 45 min 内可以实现孤岛内全部负荷供电。线路 L_{42-44} 故障后, 经网络重构, 可以闭合线路 $L_{151-300}$ 或 L_{48-250} 以达到转供的目的, 但由于强对流中心在 18:00 时位于 $L_{151-300}$ 附近, 在 20:00 时位于 L_{48-250} 附近, 一旦线路故障后节点 44—51 将面临再次断供的风险。因此, 通过计算后切除位于节点 45、50 负荷, 选取 DG2 作为单电源对节点 44、46—49、51 进行供电。

故障后第 3 h, 闭合 L_{48-250} , 由 DG2 供电的孤岛重新连回配电网。经抢修闭合 L_{18-19} , 节点 19—20 连回配电网。故障后第 4 h, L_{99-100} 故障, 节点 100、450 经线路 $L_{114-450}$ 得到转供。

5.2.2 合环冲击电流

以出现极端气象灾害后第 3 h 为例, 闭合 L_{48-250} , 由 DG2 供电的孤岛重新连回配电网, 节点 250 与节点 48 有较大相角差异, 合环后出现冲击电流。如图 10 所示, 实线为合环过程中不考虑 MESS 的调节作用, 线路 L_{48-250} 的瞬时电流, 其中最大合环电流可达 301.81 A。

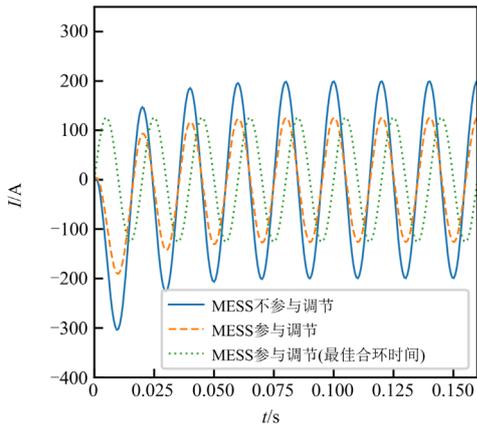


图 10 MESS 对合环电流的影响

Fig. 10 Effect of MESS on loop closing current

通过计算 MESS 的最佳出力点, 在合环前调节 MESS2 有功功率至 -2.7 MW, 无功功率至 1.3 Mvar, 合环过程中线路 L_{48-250} 的瞬时电流如图 10 中的短划

线所示, 其中最大合环电流可达 190.38 A。进一步, 计及合环时刻点对合环初相角的影响, 通过控制最佳合环时间, 该值可下降至 126.03 A。

储能调节功率受容量限制, 不同储能容量对合环点电流的抑制效果如图 11 所示。由图可以看出, 随储能可调节裕度增加, 合环点两侧电压相量差越小, 产生的最大冲击电流越小, 由 301.81 A 降至 148.91 A, 稳态电流由 199.60 A 降至 98.54 A。

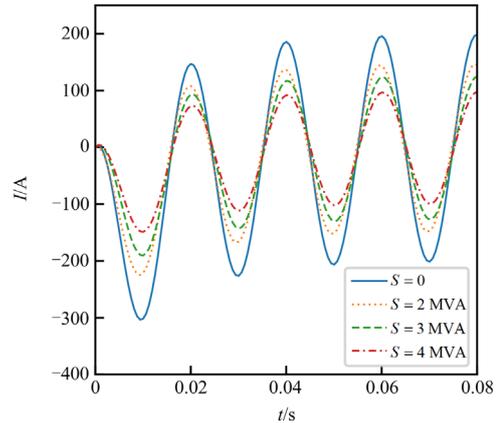


图 11 不同储能容量对合环电流的抑制效果

Fig. 11 Effect of different energy storage capacities on the suppression of loop closing current

5.2.3 故障恢复效果对比

从灾害的出现到转移, 整个配网系统开关共动作 5 次, 通过转供和 DG 支撑等可以实现加权等效负荷持续供电时间最长。图 12 对比了是否采取本文负荷恢复措施以及考虑将 MESS 的可调度性纳入恢复方案和各时段的等效负荷恢复率。当线路故障且无转供措施时, 在该气象灾害下最大失负荷功率可达 830 kW, 计及负荷权重的等效失负荷功率为 2350 kW; 当采用传统网络重构与孤岛划分, 并采取动态拓扑更新的方法时, 可以降低失负荷功率, 其最大值为 235 kW, 等效失负荷功率为 235 kW, 在故障恢复过程中存在合环点冲击电压电流过大的问题, 危害设备安全; 采用本文方法, 计及 MESS 的时空调度灵活性, 最大失负荷功率降至 155 kW, 负荷断供时间也对应有所下降。

在图 12 中, 红色和绿色阴影区域分别代表经过两组 MESS 移动及功率调控后可恢复的供电量; 蓝色阴影部分代表未经过重构和孤岛划分, 仅依靠线路修复所缺失供电量。

MESS 初始布局在故障恢复过程中所需时长和路线距离如表 3 所示。由表中数据可知, 储能的调度时间和距离与实际故障线路有关, 当 MESS 正好

处于故障线路附近时, 调度响应时间成本最小, 但由于故障线路带有不确定性, 无初始布局的方案不能保证 MESS 总是恰好处于故障线路最近的调度点。因此, 有初始布局的 MESS 分布能够具备较快的响应时间和响应成本。

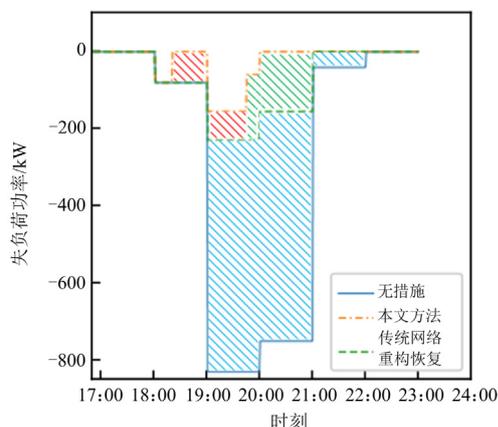


图 12 故障时段负荷动态恢复效果

Fig. 12 Dynamic recovery effect of load during fault hours

表 3 MESS 初始布局对故障恢复的影响

Table 3 Impact of pre-dispatch of MESS on fault recovery

布局策略	总调度 时长/min	单组最长响应 时长/min	最大调度 距离/km
有初始布局	63.45	44.1	29.4
无初始布局 (MESS 均位于节点 23)	25.65	14.4	9.6
无初始布局 (MESS 均位于节点 84)	155.25	84.95	30.3
无初始布局 (MESS 均位于节点 150)	98.55	57.6	38.4

6 结论

本文从含 DG 配电网故障恢复的角度探究了极端气象灾害下, 利用具有时空灵活特性和双向充放电特性的 MESS 参与配电网灾后动态恢复, 对电网韧性提升的效果。通过结合短临气象预报信息获取灾害移动路径及强度, 所提出的 MESS 主动调控的配电网故障恢复策略可以实现在极端天气下应急储能的快速投入使用, 并提升配电网故障恢复过程的安全性和可靠性。算例研究结果表明, 相比于传统网络重构手段, 期望缺供电量下降了 29.8%。同时调节储能功率可以将合环冲击电流抑制到 MESS 未参与控制前冲击电流的 49.4%, 以保证在线路及设备的安全承受范围内, 提升配网网络重构故障恢复方案的可行性。

参考文献

- [1] 王守相, 宋丽可, 舒欣. 分布式电源与多元负荷高渗透接入的主动配电网自适应过流保护方案[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1783-1794.
WANG Shouxiang, SONG Like, SHU Xin. Adaptive overcurrent protection of active distribution network with high penetration of distributed generations and multiple loads[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1783-1794.
- [2] 杨胡萍, 李晓馨, 曹正东, 等. 考虑风光的两阶段配电网动态重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 12-21.
YANG Huping, LI Xiaoxin, CAO Zhengdong, et al. A two-stage dynamic reconfiguration method for distribution networks considering wind and solar power[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 12-21.
- [3] 徐非非, 冯华, 覃洪培, 等. 计及不确定性的配电网分布式光伏承载能力区间分析方法[J]. 浙江电力, 2023, 42(11): 86-95.
XU Feifei, FENG Hua, QIN Hongpei, et al. An analysis method of DPV hosting capacity interval in distribution networks under uncertainties[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(11): 86-95.
- [4] WANG Chong, LEI Sunbo, JU Ping, et al. MDP-based distribution network reconfiguration with renewable distributed generation: approximate dynamic programming approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3620-3631.
- [5] 李雪, 孙霆锴, 侯恺, 等. 极端天气下电力系统大范围随机设备故障的 N-k 安全分析及筛选方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5113-5126.
LI Xue, SUN Tingkai, HOU Kai, et al. N-k security assessment and screening for large-scale random equipment faults in bulk power grid under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5113-5126.
- [6] 余潇潇, 宋福龙, 李隽, 等. 含高比例新能源电力系统极端天气条件下供电安全性的提升[J]. 现代电力, 2023, 40(3): 303-313.
YU Xiaoxiao, SONG Fulong, LI Jun, et al. Power supply security improvement of power grid with high proportion of renewable energy under extreme weather events[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(3): 303-313.
- [7] 阮前途, 谢伟, 许寅, 等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6773-6784.
RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, et al. Concept and key features of resilient power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773-6784.
- [8] 刘坤, 赵丽萍, 李建萍, 等. 考虑开关状态集调整的含

- 光伏并网配电网动态故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 24-31.
- LIU Shen, ZHAO Liping, LI Jianping, et al. Dynamic fault recovery method of a photovoltaic distribution network considering switch state set adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 24-31.
- [9] 庞凯元, 王崇宇, 文福拴, 等. 主动配电网灵活孤岛划分与实时调度策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 13-24.
- PANG Kaiyuan, WANG Chongyu, WEN Fushuan, et al. Flexible islanding partition and real-time scheduling strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 13-24.
- [10] XING Xuetao, LIN Jin, WAN Can, et al. Model predictive control of LPC-looped active distribution network with high penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1051-1063.
- [11] FAN Libo, SI Weiguo, XUAN Yi, et al. Multi-objective optimal configuration of multiple switchgear considering distribution network fault reconfiguration[J]. IEEE Access, 2021, 9: 69905-69912.
- [12] 蔡田田, 姚浩, 杨英杰, 等. 基于云-边协同的配电网快速供电恢复智能决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 94-103.
- CAI Tiantian, YAO Hao, YANG Yingjie, et al. Cloud-edge collaboration-based supply restoration intelligent decision-making method[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 94-103.
- [13] GAO Yuanqi, WANG Wei, SHI Jie, et al. Batch-constrained reinforcement learning for dynamic distribution network reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5357-5369.
- [14] 王钰山, 邓晖, 王旭, 等. 考虑台风时空演变的配电网移动储能优化配置与运行策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 42-51.
- WANG Yushan, DENG Hui, WANG Xu, et al. Optimal configuration and operation strategy of mobile energy storage in distribution network considering spatial-temporal evolution of typhoon[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 42-51.
- [15] 王月汉, 刘文霞, 姚齐, 等. 面向配电网韧性提升的移动储能预布局与动态调度策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 37-45.
- WANG Yuehan, LIU Wenxia, YAO qi, et al. Pre-layout and dynamic scheduling strategy of mobile energy storage for resilience enhancement of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 37-45.
- [16] LI Chongtao, CHIANG H D, DU Z. Online line switching method for enhancing the small-signal stability margin of power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(5): 4426-4435.
- [17] KOCUK B, DEY S S, SUN X A. New formulation and strong MISOCP relaxations for AC optimal transmission switching problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4161-4170.
- [18] 周自强, 张焰, 郭强, 等. 基于概率潮流的 10kV 配电网合环操作安全性评估[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1421-1429.
- ZHOU Ziqiang, ZHANG Yan, GUO Qiang, et al. Security assessment of loop closing operation in 10 kv distribution network based on probabilistic load flow[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1421-1429.
- [19] 肖辉耀, 高可夫. 10 kV 配电网合环的分析与应用[J]. 电气应用, 2015, 34(11): 18-23.
- XIAO Huiyao, GAO Kefu. Analysis and application of loop closing in 10 kV distribution network[J]. Electrotechnical Application, 2015, 34(11): 18-23.
- [20] 胡晓松, 张殷, 谢光彬, 等. 含 PV 节点的配电网合环潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 8-13.
- HU Xiaosong, ZHANG Yin, XIE Guangbin, et al. A loop closing power flow calculation algorithm of distribution network with PV nodes[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 8-13.
- [21] 刘健, 孙泉, 张小庆, 等. 配电网合环分析与合环条件判断[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 130-135.
- LIU Jian, SUN Quan, ZHANG Xiaoqing, et al. Analysis on and criteria for loop closing operation for distribution grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 130-135.
- [22] 冯欣桦, 黎洪光, 郑欣, 等. 计及不确定性的配电网合环点安全性与经济性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 30-37.
- FENG Xinhua, LI Hongguang, ZHENG Xin, et al. Security and economy evaluation of closed loop point of distribution network considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 30-37.
- [23] 李文云, 曹敏, 李坤, 等. 考虑合环调电约束的配电网快速重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 159-165.
- LI Wenyun, CAO Min, LI Kun, et al. A fast feeder reconfiguration method with loop closing network constraints considered[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 159-165.
- [24] 吴艳娟, 王皓月, 杨理. 基于优先级的配电网合环综合辅助决策算法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 57-67.

- WU Yanjuan, WANG Haoyue, YANG Li. A hybrid aided decision-making algorithm of distribution network loop closing based on priority[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 57-67.
- [25] HAN Tong, HILL D J, SONG Yue. Optimal topology transition[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(4): 3029-3042.
- [26] 周念成, 谷飞强, 雷超, 等. 考虑合环电流约束的主动配电网转供优化模型[J]. 电工技术学报, 2020, 35(15): 3281-3291.
- ZHOU Niancheng, GU Feiqiang, LEI Chao, et al. A power transfer optimization model of active distribution networks in consideration of loop closing current constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(15): 3281-3291.
- [27] 欧阳金鑫, 陈纪宇, 袁毅峰, 等. 考虑合环电压波动抑制的配电网故障恢复协同控制方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 193-201.
- OUYANG Jinxin, CHEN Jiyu, YUAN Yifeng, et al. Cooperative control method for fault restoration of distribution network considering closed-loop voltage fluctuation suppression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 193-201.
- [28] 孙伟卿, 刘唯, 张婕. 高比例可再生能源背景下配电网动态重构与移动储能协同优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 80-90.
- SUN Weiqing, LIU Wei, ZHANG Jie. Collaborative optimization for dynamic reconfiguration of distribution network and mobile energy storage in background of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 80-90.
- [29] 程杉, 钟仕凌, 尚冬冬, 等. 考虑电动汽车时空负荷分布特性的主动配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 1-13.
- CHENG Shan, ZHONG Shiling, SHANG Dongdong, et al. Dynamic reconfiguration of an active distribution network considering temporal and spatial load distribution characteristics of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 1-13.
- [30] 王建, 姚江宁, 刘泽青, 等. 恶劣天气下配电网故障统计分析及其概率分布拟合[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 143-153.
- WANG Jian, YAO Jiangning, LIU Zeqing, et al. Fault statistical analysis and probability distribution fitting for a power distribution network in adverse weather conditions[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 143-153.
- [31] PANTELI M, PICKERING C, WILKINSON S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(5): 3747-3757.
- [32] 张璞, 张波, 王建, 等. 计及主设备时变状态的变电站短时风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 73-81.
- ZHANG Pu, ZHANG Bo, WANG Jian, et al. Short-term risk assessment for a power substation considering the time-varying operation conditions of power equipment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 73-81.
- [33] 赖胜杰, 夏成军, 纪焕聪, 等. 计及负荷等值阻抗的配电网合环转供电分析模型[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2859-2868.
- LAI Shengjie, XIA Chengjun, JI Huancong, et al. An analysis model for power transfer from loop closing in distribution network considering load equivalent impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2859-2868.
- [34] 李吉侗, 王洲, 达紫祺, 等. 计及恶劣天气时空相关性的弹性配电网储能电站多层规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 128-137.
- LI Jitong, WANG Zhou, DA Ziqi, et al. Multi-level planning method of energy storage stations for resilient distribution networks considering spatio-temporal correlation of severe weather[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 128-137.

收稿日期: 2023-12-17; 修回日期: 2024-01-31

作者简介:

许守东(1979—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动控制、分布式能源与微电网等; E-mail: 741698897@qq.com

王建(1986—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电网风险评估与气象灾害预警、电力系统保护与控制; E-mail: wangrelay@foxmail.com

李铭益(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: mingyili2023@foxmail.com

(编辑 姜新丽)