

DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.24090579

台风灾害下分布式柔性移动资源协同调控

吴龙腾¹, 郭乾¹, 吴杰康², 张彬²

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东省广州市 510620;

2. 广东工业大学自动化学院, 广东省广州市 510006)

摘要: 近年来滨海城市台风频发, 受台风影响的配电网线路及负荷的脆弱性日益增强。为此, 提出了一种基于分层序列法的移动应急电源车优化调度模型。首先, 构建了极端灾害条件下的故障率模型, 并采用蒙特卡洛方法确定线路脆弱性模型。同时, 考虑了分布式电源、储能系统和移动应急电源车等多种灵活资源在不同时空尺度下的协同作用, 以制定孤岛与重构相结合的可靠配电网弹性评估模型。最后, 通过二阶锥松弛技术, 将原始非线性问题凸化为易于求解的标准混合整数二阶锥问题。该研究采用分层序列求解算法, 以重要负荷供电率为主要目标, 同时尽可能减少配电网整体负荷损失作为子目标。算例结果验证了该策略的有效性, 与其他调度方法进行对比后进一步证明了该算法在准确性方面的优势。

关键词: 台风灾害; 分布式柔性移动资源; 协同调控; 线路脆弱性

中图分类号: TK 01

文献标志码: A

Collaborative Regulation and Control of Distributed Flexible Mobile Resources Under Typhoon Disasters

WU Longteng¹, GUO Qian¹, WU Jiekang², ZHANG Bin²

(1. Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, Guangdong Province, China;

2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: In recent years, typhoons have occurred frequently in coastal cities, and the vulnerability of distribution network lines and loads affected by typhoons has been increasing day by day. Therefore, an optimal scheduling model of mobile emergency power supply vehicle based on hierarchical sequence method was proposed. Firstly, the failure rate model under extreme disaster conditions was constructed, and the Monte Carlo method was used to determine the line vulnerability model. At the same time, the synergy of multiple flexible resources such as distributed power sources, energy storage systems and mobile emergency power vehicles under different spatial and temporal scales was considered to formulate a reliable distribution network resilience assessment model combining islanding and reconfiguration. Finally, the original nonlinear problem was convexized into a standard mixed integer second-order cone problem that was easy to solve by the second-order cone relaxation technique. In this study, the hierarchical sequential solution algorithm is used to take the supply rate of important loads as the main goal, while reducing the overall load loss of the distribution network as much as possible as a sub-goal. The effectiveness of the strategy is verified by the example results. Compared with other scheduling methods, the accuracy of the algorithm are further proved.

KEY WORDS: typhoon disaster; distributed flexible mobile resource; collaborative regulation; line vulnerability

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金项目——粤港澳研究团队项目(2020B1515130001); 中国南方电网有限责任公司科技项目[036000KK52222036(GDKJXM20222392)]

This work is supported by Guangdong Province Basic and Applied Basic Research Fund Regional Joint Fund Project - Guangdong Hong Kong Macao Research Team Project (2020B1515130001); Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.[036000KK52222036(GDKJXM20222392)]

0 引言

近年来, 滨海城市遭受台风和风暴的频率日益增加, 这对其配电网造成了巨大的压力。在台风经过时引发的大规模停电事故, 不仅容易导致人员伤亡, 还可能造成严重的财产损失。因此, 针对受台风影响的配电网采取相应的保护措施显得尤为必要^[1]。

电力系统柔性资源是指具备灵活调节能力、维持系统动态供需平衡的各类资源,分布在源网荷储各个环节。源侧以常规电源为主,包括具备调节能力的煤电、气电、大型水电等;负荷侧既包括传统高载能工业负荷、工商业可中断负荷等,又包括电动汽车、虚拟电厂等新型负荷,而其中移动应急电源车在这种情况下,可以做到高机动性,快速部署能力和适应多种电力需求的能力备受关注,移动应急电源车的合理调配和使用是解决短时间内大范围停电事故、为重要负荷保持持续供电的重要举措^[2-4]。

国内外的学者对移动应急电源车的优化选址、配置、调度等方面做了大量研究。文献[5]以最大化负荷恢复量以及最小化停电损失为目标,构建了移动应急电源的动态优化调度模型。文献[6]针对极端事件,提出了一种考虑对电力线路和交通道路的双重破坏性的移动应急电源的预配置模型。文献[7]提出了一种考虑分布式电源运行的不确定性及负荷重要性的多微网应急优化调度方案。文献[8]构造了一种以各失电用户总停电损失之和最小为主目标,以移动应急电源的富余容量最小为次目标的城市移动应急电源的双目标优化调度模型。文献[9-10]采用分层控制思想提出分散控制策略,对停电区域进行区域划分,然后在各区域利用移动应急电源组成应急微电网对其中的重要负荷供电模型。文献[11]采用时间分级策略建立了总费用最小、接受移动应急电源重要用户数最大和移动应急电源供应点交通便利度最大的三目标优化模型。文献[12]提出了一种基于图论的移动应急电源孤岛划分及最优接入点搜索模型。

上述文献中,针对灾后移动应急电源车对重要负荷供电率的重要性考虑得不够充分,对重要负荷区域内分布式电源和储能没有做到很好的重构与合理调配。本文考虑移动应急电源车在灾害中对重要负荷的作用,首先构建台风影响下的配电网故障率模型,采用蒙特卡洛方法确定线路脆弱性模型,并考虑分布式电源、储能等多种灵活性资源的协同配合作用,制定孤岛与重构相配合的配电网弹性评估模型,并采用二阶锥松弛技术,将原始非线性问题凸化松弛为易于求解的标准混合整数二阶锥问题。以重要负荷供电率为主要目标,尽可能减少负荷损失,提出一种基于分层序列法的移动应急电源车优化调度选址模型。

1 台风对配电网的影响

1.1 台风天气下配电网故障特征

1.1.1 台风场景模拟

采用Batts风场^[13]模型来模拟台风范围内各点风速大小,即

$$V_r = \begin{cases} \frac{V_{ave, max} r}{R_{max}}, & r \leq R_{max} \\ V_{ave, max} \left(\frac{R_{max}}{r} \right)^x, & r \geq R_{max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_r 为风速; R_{max} 为最大风速半径; $V_{ave, max}$ 为平均最大风速; r 为配电线路距台风中心的距离; x 为强度衰减系数,与台风的衰减程度呈正相关,根据地理位置不同取值为0.5~0.7。

1.1.2 故障率模型

台风主要作用于配电网线路原件,而线路原件单位长度上承受的总风荷载为

$$\begin{cases} Q = \sqrt{Q_w^2 + Q_g^2} \\ Q_w = 0.6875 V_r^2 D a \mu_h \sin^2 \theta \\ Q_g = qg \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q 为导线实际受力; Q_w 为水平风荷载; Q_g 为导线自身重力荷载; D 为导线外径; a 为风压不均匀系数; μ_h 为风压高度变化系数; θ 为导线与风向的夹角; q 为导线的线密度; g 为重力加速度。

通过对最高悬挂点处的导线截面进行受力分析,判断是否会发生断线故障,最高点悬挂处导线截面所受应力大小为

$$\sigma_g = \frac{\sqrt{T^2 + Q^2 l_g^2}}{S_L} \quad (3)$$

式中: S_L 为钢筋铝绞线的截面积; T 为在弧垂最低点所受张力; l_g 为导线最高悬挂点与弧垂最低点间的水平距离。

通过分析台风在电杆根部截面上产生的弯矩大小,即可判断电杆是否会发生故障。在台风作用下,杆塔的综合弯矩 M_T 由2部分矢量和组成,分别为作用在导线上的水平风荷载对杆根产生的弯矩 M_1 和电杆本身受到的风荷载在杆根产生的弯矩 M_2 。其计算式分别为

$$\begin{cases} M_T = M_1 + M_2 \\ M_1 = \sum_{k=1}^n Q_{w,k} l h_k \\ M_2 = \frac{C}{3.2} V_r^2 (D_0 + D_p) h z \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Q_{w,k}$ 为电杆上第 k 根悬挂导线水平风荷载; l 为导线间的平均档距; h_k 为第 k 根导线与杆底间的垂直距离; n 为电杆上悬挂的导线总数; C 为体型系数; D_0 为电杆档径; D_p 为电杆杆根的杆径; h 为电杆高度; z 为杆身所受风压的合力点到杆根力臂。

对元件上风速的变化情况及受力情况进行模拟,可求出台风灾害强度为 s 时,导线和电杆的故障率 $^{[14]}$ $\rho_L(s)$ 和 $\rho_P(s)$ 分别为

$$\begin{cases} \rho_L(s) = \int_0^{\sigma_k} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma - \mu_L}{\sigma_L}\right)^2\right) d\sigma \\ \rho_P(s) = \int_0^{M_t} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_P} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{M - \mu_P}{\sigma_P}\right)^2\right) dM \end{cases} \quad (5)$$

式中: μ_L 和 σ_L 分别为导线抗拉强度的均值和标准差; μ_P 和 σ_P 分别为电杆抗弯强度的均值和标准差。

根据结构可靠理论 $^{[15]}$,只有当两节点之间的所有导线与电杆都处于可靠状态时,该条支路才能够正常运行,因此支路故障率模型为导线故障率与电杆故障率的串联模型,具体为

$$\rho_{ij}(s) = 1 - (1 - \rho_L(s))^{m_{ij}} (1 - \rho_P(s))^{y_{ij}} \quad (6)$$

式中: $\rho_{ij}(s)$ 为支路 ij 在台风强度为 s 时的故障率; m_{ij} 和 y_{ij} 分别为支路 ij 的导线和电杆数量。

1.2 线路脆弱性评估

假如台风在 t 时刻登陆,使用抽样方法 $^{[16]}$ 对配电线路 ij 生成1个在 $[0,1]$ 之间均匀分布的随机数 $R_{ij,t}$,并且与台风强度为 s 时的线路故障率 $\rho_{ij}(s)$ 相比较,有

$$S_{ij,t} = \begin{cases} 1, R_{ij,t} > \rho_{ij}(s) \\ 0, R_{ij,t} \leq \rho_{ij}(s) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $S_{ij,t}$ 表示配电线路 ij 在 t 时刻的运行状态,0为故障,1为正常运行。

在台风过境过程中,重复上述抽样过程,每发生1次故障,在该线路脆弱性上计1次,并重复抽样次数,得到配电网系统每条输电线路在台风灾害下的脆弱程度。最终通过蒙特卡洛 $^{[17]}$ 模拟得到1组故障场景。具体算法流程如图1所示。

2 配网风灾的调控能力

2.1 弹性调控能力

当电力系统面临台风灾害影响时,因其容易发生大量线路元件等故障,造成大面积大损失的停电事故。如图2所示, t_1 点是灾害发生点, t_2 和 t_3 分别

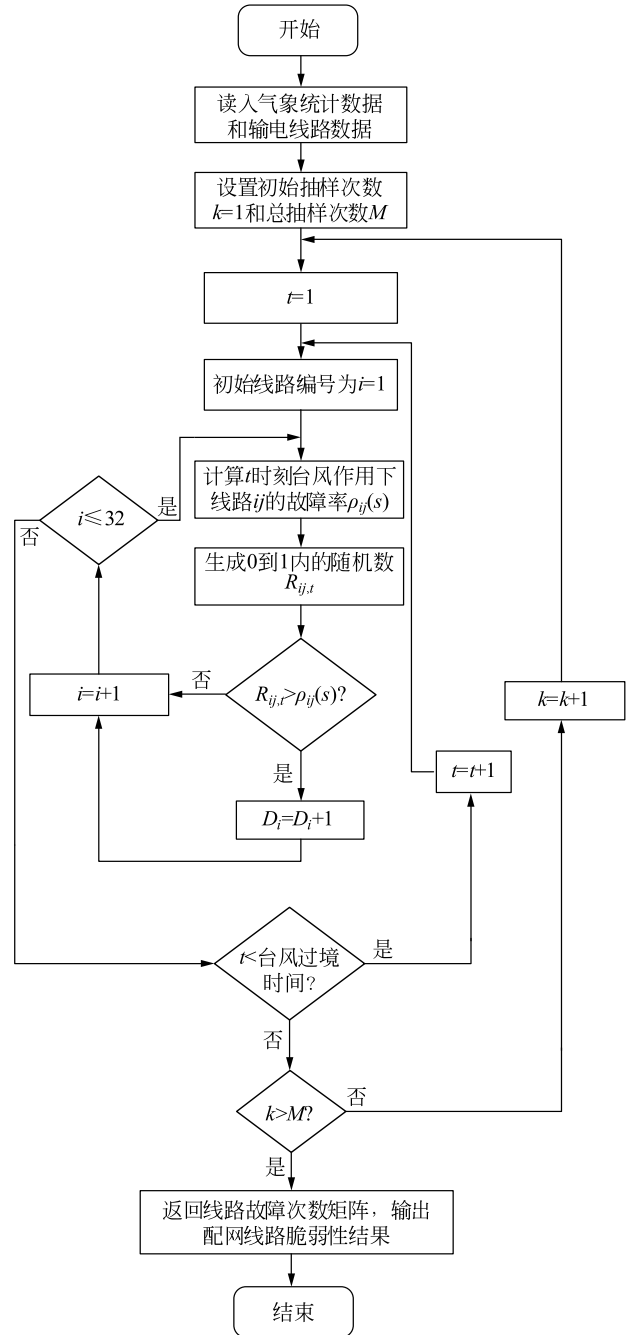


图1 基于蒙特卡洛随机抽样的线路脆弱性分析模型

Fig. 1 Line vulnerability analysis model based on Monte Carlo random sampling

表示电力系统降额运行的始末时刻, $t_3 - t_4$ 阶段为电力系统的恢复阶段, t_4 之后电力系统恢复正常运行。

在台风影响下,根据各场景对应的故障线路位置、故障时刻和恢复时刻,按照故障发展顺序依次计算各时刻下配电网的负荷供应情况,获取配电网在整个台风影响过程中的负荷曲线 $^{[18]}$ 。利用故障场景下对应的负荷曲线来和正常运行情况下的目

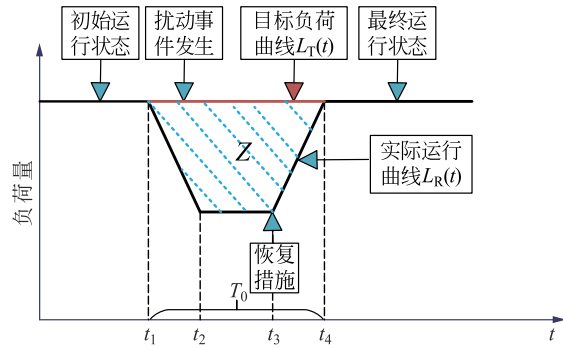


图2 配电网在台风影响过程中的负荷曲线
Fig. 2 Load curves of distribution systems under typhoon

标负荷曲线计算配电网的负荷缺失面积,即

$$Z = \int_0^{T_0} L_T(t) dt - \int_0^{T_0} L_R(t) dt \quad (8)$$

式中: $L_R(t)$ 为台风灾害影响下配电网带故障运行的负荷曲线; $L_T(t)$ 为配电网正常运行时的负荷曲线; T_0 为配电网受台风影响的时间,包括台风过境时间和供电恢复时间。本文考虑台风到来前的预布局配置,使得在台风登录时间 $t_1 - t_3$ 内实现对重要负荷的供应和配电网整体负荷损失的减少。

2.2 负荷重要性排序

根据负荷重要性如负荷损失所造成的生命安全、经济性、特殊性来建立负荷损失指标,如医院等涉及人生安全的,大型工厂或者铁路运输等带来巨大经济损失的,特殊企业或者军工类容易引起重大损失的,为一级重要负荷,不允许停电;其余根据生命安全、经济性、特殊性权重再进行排序,分二级重要负荷与普通负荷,为可允许部分停电。根据负荷重要性的排序,对极重要节点进行最低运行的负荷供给保证,避免造成该配电网的巨大损失^[19]。

2.3 弹性调控能力提升措施

考虑分布式电源、储能、移动应急电源车等多种灵活性资源的协同配合作用,灾前部署移动应急电源车的位置和容量,提高电网电力供应充足性,从而降低负荷损失,并在故障后通过网络重构实现关键负荷的快速复电,缩短故障恢复时间等弹性提升措施^[20]。

计及台风引发的配电网故障时间、位置和规模的时空不确定性影响,本文只考虑灾前防御的过程,从降低负荷损失、保证重要负荷的供电率2个方面入手,提高电网的坚强性、电力供应充足性以及拓扑控制灵活性。

3 柔性移动资源协同调控优化模型

3.1 目标函数

本文以重要负荷供电率最大保证为主要目标,尽可能减少负荷损失,建立优化模型来确定移动应急电源车的预布局优化选址调配。目标函数为

$$R_{\text{SROIL}} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^{N_{\text{IM, Bus}}} \Delta t S_{i, \text{CLD}}(t)}{\sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^{N_{\text{IM, Bus}}} \Delta t P_{\text{Load}, i}(t)} \quad (9)$$

$$f = \max_{R_{\text{SROIL}}} (\min(f_1 + f_2)) \quad (10)$$

$$f_1 = \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^{N_{\text{Bus}}} \Delta t S_{i, \text{CLD}}(t) \quad (11)$$

$$f_2 = \sum_{t=1}^N \sum_{j=1}^{N_{\text{Branch}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{Branch}}} \Delta t a_{ij} r_{ij} I_{ij}^2 \quad (12)$$

式中: R_{SROIL} 为一级重要负荷供电率; $N_{\text{IM, Bus}}$ 为网络中总的节点个数; N 为故障时段时间区间的总个数; N_{Bus} 为网络中总的节点个数; N_{Branch} 为网络中线路总的个数; Δt 为故障时段每个时间区间长度; $S_{i, \text{CLD}}(t)$ 为 t 时段内 i 节点甩负荷总量; $P_{\text{Load}, i}$ 为 i 节点的负荷; a_{ij} 为以 i 节点为始、 j 节点为末的支路的开关状态,为0-1优化变量; r_{ij} 为线路 ij 的电阻; I_{ij} 为线路 ij 的电流。

3.2 约束条件

3.2.1 移动应急电源车的约束条件

对每个地区的供电所,所能提供的移动应急电源车数和类别不应大于该地区的移动应急电源车可用数量总数和总类别。为了将每个移动应急电源车分配给最佳候选连接节点,对移动应急电源车调度问题的限制条件表述如下。

当备选连接点与移动应急电源车相连接时,有

$$\sum_{k=1}^{N_{\text{MEG}}} \zeta_{i, t, k} \leq 1, \quad \forall i \in \Omega \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^{N_{\text{MEG}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{Bus}}} \zeta_{i, t, k} \leq N_{\text{MEG, Total}} \quad (14)$$

$$\omega_{i, t+1, k}^{\text{MEG}} \leq \sum_{\tau=1}^t \zeta_{i, \tau, k} \quad (15)$$

$$\sum_{t=1}^N \sum_{k=1}^{N_{\text{MEG}}} \Delta t P_{k, \text{MEG}} \omega_{i, t, k}^{\text{MEG}} \leq E_{k, \text{MEG}} \quad (16)$$

式中: Ω 为节点集合; k 为该地区的移动应急电源车编号; N_{MEG} 为应急车辆总数; $\zeta_{i, t, k}$ 为0-1变量,表征备选连接节点 i 与移动应急电源车 k 是否连接,当备选连接节点与移动应急电源车相连接时, $\zeta_{i, t, k}$ 为1,否

则为0; $N_{\text{MEG, Total}}$ 为该地区移动应急单元的总数; $\omega_{i,t+1,k}^{\text{MEG}}$ 为0-1变量,表示某一移动应急电源车在时间上与候选节点的连接状态; $P_{k,\text{MEG}}$ 为第 k 辆应急移动电源车的有功出力; $E_{k,\text{MEG}}$ 为第 k 辆应急移动电源车的最大容量。式(13)表示为每个备选连接节点最多分配1辆应急移动电源车,且每个应急移动电源车只能被分配给候选连接节点1次,并且不能被重复分配。式(14)表示为备选连接节点所连接的应急移动电源车小于该地区移动应急单元的总数。式(15)表示为规定与候选节点连接的应急移动电源车在所有后续时间段中连接,即在 $t=1,2,3,4,5$ 时刻,若 $\zeta_{i,t,k}$ 在第3时刻为1,则有 ω 在3,4,5时刻为1,那么应急移动电源车可以在 $t=3,4,5$ 时刻向配电网失电区内负荷供电;式(16)表示第 k 辆车在 t 时段内 i 节点所消耗的应急移动电源车能量应小于等于装置的最大容量。

3.2.2 配电网辐射状约束

分布式发电机组组成多个微电网,为配电系统自然灾害时的关键负荷供给提供了一种弹性解决方案。然而,随着微电网数量的增加,需要更多的虚拟二元和连续变量,这将增加模型的复杂性。为了解决这一问题,本文采用单商品流方法的子图连通性约束,确保配电网满足辐射状拓扑要求^[21]。选择每个微电网中的分布式电源节点作为“源”节点,得到

$$\sum_{x \in \delta(i)} F_{xi} - \sum_{y \in \pi(i)} F_{iy} = -1, \quad i \in \Omega \setminus \Omega_{\text{DG}} \quad (17)$$

$$\sum_{x \in \delta(i)} F_{xi} - \sum_{y \in \pi(i)} F_{iy} = W_i, \quad i \in \Omega_{\text{DG}} \quad (18)$$

$$-Ma_{ij} \leq F_{ij} \leq Ma_{ij} \quad (19)$$

$$-M(2-a_{ij}) \leq F_{ij} \leq M(2-a_{ij}) \quad (20)$$

$$W_i \geq 1 \quad (21)$$

$$\sum_{ij \in \epsilon} a_{ij} = |\Omega| - |\Omega_{\text{DG}}| \quad (22)$$

式中: Ω_{DG} 为分布式电源节点集合; $\delta(i)$ 和 $\pi(i)$ 是节点 i 的所有父节点和子节点的集合; F_{ij} 为虚拟网络中 ij 线路上传输的功率; W_i 为虚拟网络中“源”节点提供的功率; M 为极大的数。

3.2.3 配电网运行约束

(1) 负荷约束。

主动配电网负荷主要分为可控负荷与不可控负荷,对于可控负荷甩负荷量为可控量,在遇到突发故障可依据与可控负荷用户签署的协议^[22],进行如下约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,\text{de}} \leq P_{\text{Load},i} \\ 0 \leq Q_{i,\text{de}} \leq Q_{\text{Load},i} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_{i,\text{de}}$ 和 $Q_{i,\text{de}}$ 分别为节点 i 的有功、无功可控负荷; $P_{\text{Load},i}$ 和 $Q_{\text{Load},i}$ 分别为节点 i 的有功、无功负荷。

(2) 储能约束。

储能容量变化约束为

$$\begin{cases} E_{\text{ESS},i}(t+1) = E_{\text{ESS},i}(t) + P_{\text{ch}}\eta_{\text{ch}}\Delta t - P_{\text{dch}}\Delta t/\eta_{\text{dch}} \\ E_{\text{ESS},i,\text{max}} \times 10\% \leq E_{\text{ESS},i}(t) \leq E_{\text{ESS},i,\text{max}} \times 90\% \end{cases} \quad (24)$$

式中: $E_{\text{ESS},i}(t)$ 为在 t 时段 i 节点储能装置的剩余容量; P_{ch} 和 P_{dch} 为储能装置的充电与放电功率; η_{ch} 和 η_{dch} 为储能装置的充电与放电效率; $E_{\text{ESS},i,\text{max}}(t)$ 为 i 节点储能装置最大容量。

最大充放电约束为

$$\begin{cases} \gamma_{i,\text{dch}}(t) + \gamma_{i,\text{ch}}(t) \leq 1 \\ 0 \leq P_{\text{ch}} \leq \gamma_{i,\text{ch}}(t)P_{\text{ch},\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{dch}} \leq \gamma_{i,\text{dch}}(t)P_{\text{dch},\text{max}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\gamma_{i,\text{dch}}(t)$ 和 $\gamma_{i,\text{ch}}(t)$ 分别为 t 时段 i 节点储能装置的放电、充电状态,为0-1变量; $P_{\text{ch},\text{max}}$ 和 $P_{\text{dch},\text{max}}$ 分别为储能装置的最大充电与放电功率。

分布式电源约束为

$$\begin{cases} P_{\text{DG},\text{min}} \leq P_{i,\text{DG}} \leq P_{\text{DG},\text{max}} \\ 0 \leq Q_{i,\text{DG}} \leq P_{\text{DG},\text{max}} \tan \varphi \end{cases} \quad (26)$$

式中: $P_{\text{DG},\text{min}}$ 和 $P_{\text{DG},\text{max}}$ 分别为分布式电源有功出力的最小值和最大值; $P_{i,\text{DG}}$ 和 $Q_{i,\text{DG}}$ 分别为 i 节点分布式电源有功出力和无功出力; φ 为功率因数角,取其上限为定值。

潮流约束为

$$\begin{cases} \sum_{x \in \delta(i)} P_{xi} - \sum_{y \in \pi(i)} P_{iy} - r_{ij}I_{ij}^2 + P_{i,\text{DG}} - P_{\text{ch}} + P_{\text{dch}} - P_{\text{Load},i} + P_{\text{MEG}} = 0 \\ \sum_{x \in \delta(i)} Q_{xi} - \sum_{y \in \pi(i)} Q_{iy} - x_{ij}I_{ij}^2 + Q_{i,\text{DG}} - Q_{\text{Load},i} = 0 \end{cases} \quad (27)$$

$$U_i^2 - U_j^2 - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)I_{ij}^2 = 0 \quad (28)$$

$$I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \quad (29)$$

式中: P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为由节点 i 到节点 j 传输的有功功率和无功功率; x_{ij} 为线路 ij 的电抗; U_i 和 U_j 分别为节点 i 和节点 j 处的电压。

电压与电流约束为

$$\begin{cases} U_{i,\min}^2 \leq U_i^2 \leq U_{i,\max}^2 \\ 0 \leq I_{ij}^2 \leq a_{ij} I_{\max}^2 \end{cases} \quad (30)$$

式中: $U_{i,\max}$ 和 $U_{i,\min}$ 为节点 i 处的电压最大、最小值; $I_{\max}$ 为配电网线路电流最大值。

3.3 二维锥松弛

在配电网发生故障后,对网络潮流而言,断开的支路无电流与功率的传输,则该支路无须再进行潮流计算。因此,根据网络拓扑中的0-1连接变量 a_{ij} ,配合一个足够大的整数 $M^{[23]}$ 对潮流约束进行简化,可以有效提高计算效率,即

$$\begin{cases} -Ma_{ij} \leq P_{ij} \leq Ma_{ij} \\ -Ma_{ij} \leq Q_{ij} \leq Ma_{ij} \\ 0 \leq I_{ij}^2 \leq Ma_{ij} \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} U_i^2 - U_j^2 - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)I_{ij}^2 + M(1 - a_{ij}) \geq 0 \\ U_i^2 - U_j^2 - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)I_{ij}^2 - M(1 - a_{ij}) \leq 0 \end{cases} \quad (32)$$

为使潮流约束满足配电网重构后的要求,式(32)代替原本潮流约束中的式(28),对于断开的线路,式(32)也能满足。

由于重构和孤岛模型有大量的0-1变量以及二次约束与二次目标函数,是一个混合整数非线性规划问题,无法应用常规解法对其求解。因此本文选用二阶锥松弛技术对该模型进行优化松弛^[24],具体方法如下。目标函数和约束中的平方项用一次中间变量代替,如 I_{ij}^2 、 U_i^2 分别用 ν_{ij} 和 μ_i 替代;对式(29)进行松弛。二维锥松弛后得到

$$f_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{\text{branch}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{branch}}} \Delta t a_{ij} r_{ij} \nu_{ij} \quad (33)$$

$$\begin{cases} \sum_{x \in \delta(i)} P_{xi} - \sum_{y \in \pi(i)} P_{iy} - r_{ij} \nu_{ij} + P_{i,\text{DG}} - P_{\text{ch}} + P_{\text{dch}} - P_{\text{Load},i} + P_{\text{MEG}} = 0 \\ \sum_{x \in \delta(i)} Q_{xi} - \sum_{y \in \pi(i)} Q_{iy} - x_{ij} \nu_{ij} + Q_{i,\text{DG}} - Q_{\text{Load},i} = 0 \end{cases} \quad (34)$$

$$\nu_{ij} \geq \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{\mu_i} \quad (35)$$

$$\begin{cases} \mu_i - \mu_j - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)\nu_{ij} + M(1 - a_{ij}) \geq 0 \\ \mu_i - \mu_j - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)\nu_{ij} - M(1 - a_{ij}) \leq 0 \end{cases} \quad (36)$$

经过松弛后,所有约束与目标函数都已变为线性式。可行域变换为一个二阶锥体,形成凸可行域。

将(35)转变为标准二阶锥形式,即

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ \nu_{ij} - \mu_i \end{matrix} \right\|_2 \leq \nu_{ij} + \mu_i \quad (37)$$

在模型优化过程中,经过适当的转换和处理后,所有的决策变量已经完全符合二阶锥优化模型的特性,其搜索空间被限定在了凸锥的结构内。这意味着问题的数学形式已经被适当地提炼,适应了广泛应用的数学规划求解技术。

4 求解方法

本文采用基于分层序列法的移动应急电源车优化调度模型的求解流程。分层序列方法^[25]是一种针对多目标优化问题的策略,其核心理念是通过有序的处理方式来管理复杂性。基于分层序列法的台风灾害下分布式柔性移动资源协同调控的求解流程如图3所示。

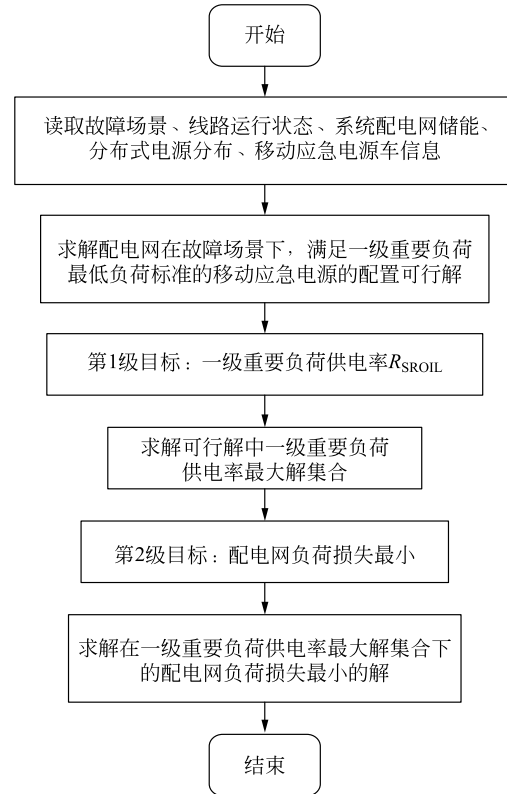


图3 基于分层序列法的台风灾害下分布式柔性移动资源协同调控的求解流程图

Fig. 3 Flow chart of solving algorithm for optimal scheduling model of mobile emergency power supply vehicle based on hierarchical sequence method

台风登录到离开期间,以线路6、9、21、24故障为例,节点2、6的储能装置为600 kW并且已储量90%,节点12的储能装置为900 kW并且已储量90%,故障后的线路重构形成孤岛微网拓扑块如

图6所示。在此故障下,对比有应急移动电源车的预调配、无应急移动电源车的预调配、使用分层序列法下的优化调度模型3种模式下的重要负荷供电率和负荷损失的不同。

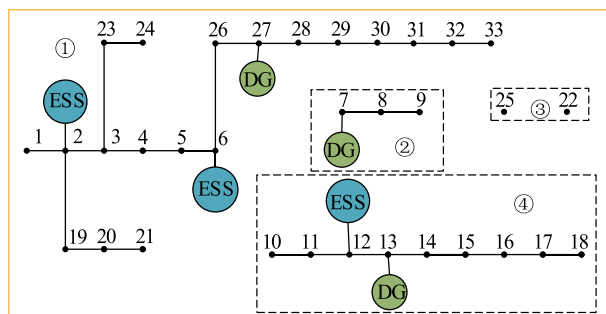


图6 故障下微电网拓扑块

Fig. 6 Microgrid topology block under fault

由表3可以看出在台风影响时间内,3种情况下的一级重要负荷节点供电功率最低值都能满足,均能保证负荷节点内重要用户的最低运行需求。

表3 不同方法的情况对比

Table 3 Comparison of different methods

调配方法	移动应急电源车预布置点	一级重要负荷节点	一级重要负荷节点供电功率最低值/kW	负荷损失/MW
无应急移动电源车的预调配	—	4	89.60	3.901 6
		7	101.00	
		9	31.40	
		24	313.70	
		32	156.90	
有应急移动电源车的预调配	7,14,18	4	89.60	2.997 7
		7	149.40	
		9	31.37	
		24	313.70	
		32	156.90	
使用分层序列求解算法,有应急移动电源车的预调配	9,16,17	4	89.60	2.998 8
		7	149.40	
		9	44.80	
		24	313.70	
		32	156.90	

以7号节点为例,比较各种调配方法的重要负荷供电率。如图7所示,有应急电源车的调配方法可以实现7号重要负荷节点的100%供电,更好保证重要用户的实际运行需求,可以体现出应急电源车在台风影响下,对重要负荷供电的重大作用。

台风影响下的各节点总的负荷损失情况如图8所示。由图8可知:相比于普通的应急移动电源车调配,使用分层序列求解算法的应急移动电源车调

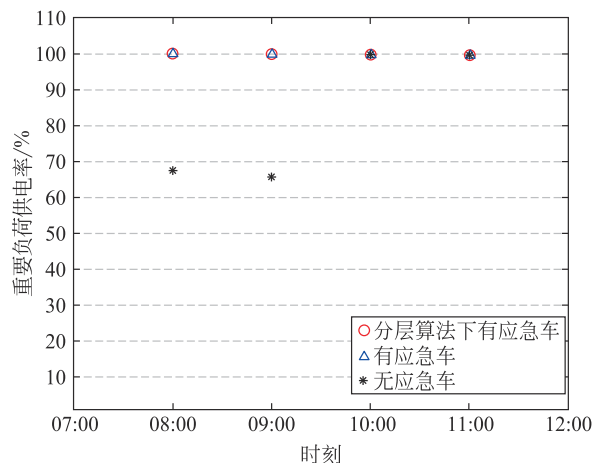


图7 7号节点(一级负荷)的重要负荷供电率对比

Fig. 7 Comparison of important load supply ratio of node 7 (level 1 load)

配可以更好地保障重要节点负荷供应。通过表3可以看出,两者其总体的负荷损失是相差不大的,即对整个配电网的负荷损失差不多的情况下,分层序列求解算法调配方法可以实现更好的重要负荷的供应,更好的完成本文的主要目标。

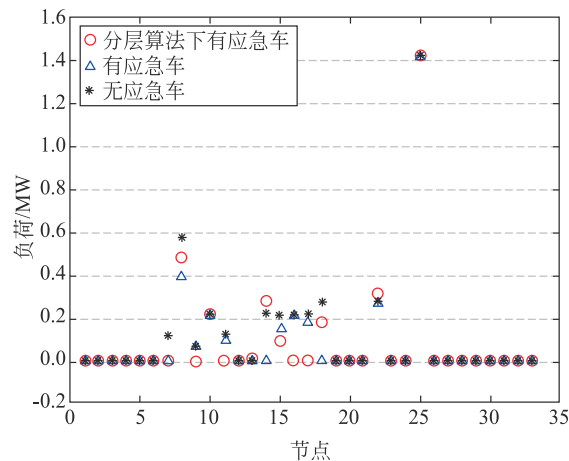


图8 台风影响下各节点的负荷损失情况

Fig. 8 Load loss of each node under the influence of typhoon

不同调配方法下配电网的负荷损失情况如图9所示。由图9可知:在台风影响下,考虑分布式电源、储能、移动应急电源车等多种灵活性资源,制定孤岛与重构相配合的作用,本文提出的3种调配方法对配电网保持可靠运行和负荷削减方面的效果,证实了本文策略的有效性。

6 结论

针对台风天气下电力系统的应急供电需求,本

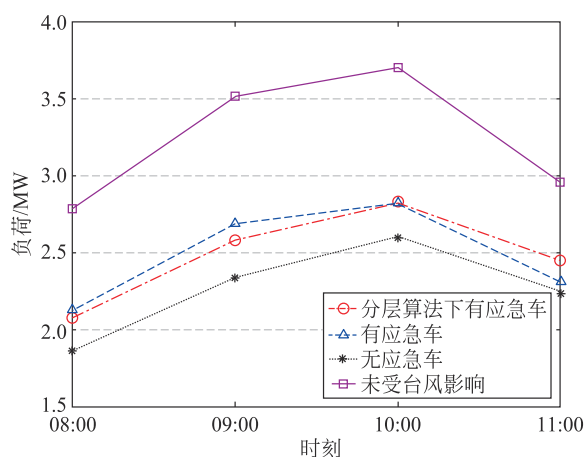


图9 在台风影响过程中不同调配方法下配电网的负荷曲线

Fig. 9 Load curves of distribution network under different deployment methods during typhoon influence

文提出了一种基于分层序列法的移动应急电源车优化调度模型的方法,建立了以重要负荷供电率最大为关键目标,配电网的负荷损失最小为次要目标采用的动态优化模型,考虑储能,分布式电源和配电网重构等因素,在IEEE 33节点系统对本文方法进行算例分析验证,得到如下结论:

(1) 本文所提出的基于蒙特卡洛的配电网线路脆弱性方法,能够有效模拟台风过境下的故障演化过程,相较于传统的方法,考虑了连锁故障和线路故障的随机性、不确定性,更贴合实际的台风过境故障发展情况,从而得到更准确的线路脆弱性评估结果。

(2) 通过分析和比对有应急移动电源车的预调配、无应急移动电源车的预调配、使用分层序列法下的优化调度模型,本文提出的方法,能在保证最重要负荷供应的前提下,最大程度恢复整个配电网的供电需求,并且考虑了储能、分布式电源和孤岛协同运行的作用,在台风天气下导致电力系统线路大规模故障场景下能够保证配电网中的重要负荷供电连续性和可靠性,更贴近实际电网运行特点,更为合理和科学。

后续研究将继续考虑实际周边环境对线路的影响,及其移动应急电源车在实际运行接入带来的供电质量等问题,探索更贴近现实生活的应急移动电源车优化调度方法。

参考文献

[1] 顾明宏, 孙为兵, 李培培, 等. 面对极端扰动事件的城市弹性配电网评估指标体系[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(7): 103-109.
GU Minghong, SUN Weibing, LI Peipei, et al. Evaluation

index system for urban elastic distribution network in the face of extreme disturbance events[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(7): 103-109.

- [2] 张小委, 滕增, 王月云, 等. 移动电源车在电力应急预案中的应用及发展前景[J]. 农业装备技术, 2017, 43(4): 50-52.
ZHANG Xiaowei, TENG Zeng, WANG Yueyun, et al. Application and development prospect of the power-supply vehicle in electric power emergency plan [J]. Agricultural Equipment & Technology, 2017, 43(4): 50-52.
- [3] 李历波, 王玉瑾, 王主丁, 等. 规划态中压配电网供电可靠性评估模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 84-88.
LI Libo, WANG Yujin, WANG Zhuding, et al. Two reliability evaluation models for medium voltage distribution networks[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(3): 84-88.
- [4] SHAHIDEHPOUR M. Microgrids for enhancing the economics, reliability, and resilience of smart cities: An IIT experience[C]//2014 Smart Grid Conference (SGC). Tehran, Iran: IEEE, 2014: 1.
- [5] 王承山, 黄靖, 董笑佟, 等. 移动应急电源动态优化调度策略[J]. 舰船电子工程, 2024, 44(1): 164-170.
WANG Chengshan, HUANG Jing, DONG Xiaotong, et al. Dynamic optimal scheduling strategy of mobile emergency powers [J]. Ship Electronic Engineering, 2024, 44 (1) : 164-170.
- [6] 张刊. 可移动应急电源在电力-交通网络中的配置与调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
ZHANG Kan. Research on configuration and scheduling of mobile emergency power supply in power-transportation network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [7] 傅其皓, 何坚, 吕林, 等. 考虑DG运行特性及负荷重要性的多微网应急综合资源优化调度[J]. 电测与仪表, 2019, 56(2): 33-40.
FU Qihao, HE Jian, LÜ Lin, et al. Optimal scheduling of disaster-relief integrated resources considering operating characteristics of DG and importance of load in multi-microgrid [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(2): 33-40.
- [8] 王宏, 林振智, 文福拴, 等. 城市移动应急电源的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 123-129.
WANG Hong, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. Optimal scheduling of urban mobile emergency power sources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (3) : 123-129.
- [9] 何小良, 章雷其, 张俊峰, 等. 灾害条件下移动应急电源组网和分散控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 107-112, 149.
HE Xiaoliang, ZHANG Leiqi, ZHANG Junfeng, et al. Formation scheme and decentralized control of microgrids consisting of mobile emergency power sources during natural disasters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 107-112, 149.
- [10] ZHANG J, JIANG F, ZHAO Y, et al. An improved hierarchical and decentralized control strategy for emergency power supply during disaster [C]//2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Guangzhou, China: IEEE, 2018: 3485-3490.
- [11] 区伟健, 房鑫炎, 俞国勤, 等. 考虑时间分级的移动应急电源

- 优化配置模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(7): 60-66.
- OU Weijian, FANG Xinyan, YU Guoqin, et al. Optimal allocation model of mobile emergency power supply considering time classification strategy [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(7): 60-66.
- [12] 倪程捷, 房鑫炎, 赵文恺, 等. 基于图论的移动应急电源孤岛划分及最优接入点搜索[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 34-40.
- NI Chengjie, FANG Xinyan, ZHAO Wenkai, et al. Island partitioning and optimal connecting point search of mobile emergency power source based on graph theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 34-40.
- [13] 王永明, 殷自力, 李琳, 等. 台风灾害场景下考虑运行状态的配电网风险评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 60-65.
- WANG Yongming, YIN Zili, LI Lin, et al. Risk assessment method for distribution network considering operation state in the scene of typhoon disaster [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12): 60-65.
- [14] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [15] 兰颖. 考虑台风影响的配电网可靠性评估和规划[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- LAN Ying. Distribution system reliability evaluation and design considering influence of typhoon [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [16] 贡金鑫, 张勤. 工程结构可靠性设计原理[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [17] 杜雅昕, 张婷婷, 张文. 极端天气下计及电-气互联影响的配电网弹性评估[J]. 供用电, 2019, 36(5): 8-13.
- DU Yaxin, ZHANG Tingting, ZHANG Wen. Resilience assessment for distribution systems considering interconnections with gas systems under extreme weather [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(5): 8-13.
- [18] 周潮, 李蹊, 王锦堂, 等. 基于负荷路径的序贯蒙特卡洛模拟法的配电网可靠性计算[J]. 机电信息, 2019(12): 24-27.
- [19] 赵丽敬. 电网的弹性建模与评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- ZHAO Lijing. Resilience modeling and assessment of power grid [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [20] 韩畅, 梁博森, 林振智, 等. 防灾应急电源优化调度的机会约束规划方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 147-154.
- HAN Chang, LIANG Bomiao, LIN Zhenzhi, et al. Chance-constrained programming method for optimal scheduling of emergency power source [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 147-154.
- [21] 吴疆. 极端灾害下配电网弹性评估方法及提升策略研究[D]. 成都: 四川大学, 2021.
- WU Jiang. The research on evaluation method and promotion strategy of distribution network resilience under extreme disasters [D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.
- [22] DING T, LIN Y, LI G, et al. A new model for resilient distribution systems by microgrids formation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4145-4147.
- [23] 张煜, 牟龙华, 王蕴敏, 等. 计及可控负荷动态调节的主动配电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 104-110.
- ZHANG Yu, MU Longhua, WANG Yunmin, et al. Optimal dispatching of an active distribution network considering dynamic regulation of controllable load [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 104-110.
- [24] 向月, 刘俊勇, 姚良忠, 等. 故障条件下含分布式电源配电网的孤岛划分与重构优化策略研究[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1025-1032.
- XIANG Yue, LIU Junyong, YAO Liangzhong, et al. Optimization strategy for island partitioning and reconfiguration of faulted distribution network containing distributed generation [J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1025-1032.
- [25] HUANG X, JI H, LI P, et al. A fast modeling method of distribution system reconfiguration based on mixed-integer second-order cone programming [C]//2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Changsha, China: IEEE, 2015: 397-401.
- [26] 陆野, 何永秀, 吕媛, 等. 基于分层序列法的配电网项目优选研究[J]. 山东电力技术, 2021, 48(11): 1-6.
- LU Ye, HE Yongxiu, LYU Yuan, et al. Research on distribution network project optimization based on stratified sequencing method [J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(11): 1-6.
- [27] 金力, 房鑫炎, 蔡振华, 等. 考虑特性分布的储能电站接入的电网多时间尺度源储荷协调调度策略[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3641-3650.
- JIN Li, FANG Xinyan, CAI Zhenhua, et al. Multiple time-scales source-storage-load coordination scheduling strategy of grid connected to energy storage power station considering characteristic distribution [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3641-3650.
- [28] GHASEMI S, MOSHTAGH J. Radial distribution systems reconfiguration considering power losses cost and damage cost due to power supply interruption of consumers [J]. International Journal on Electrical Engineering and Informatics, 2013, 5(3): 297-315.

收稿日期: 2024-09-15

作者简介:



吴龙腾

吴龙腾(1988),男,学士,高级工程师,研究方向为配电网调度运行控制;

郭乾(1994),男,硕士,工程师,研究方向为电网调度运行控制;

吴杰康(1965),男,博士,教授,通信作者,研究方向为电力系统规划、运行与控制等;

张彬(2001),男,硕士研究生,研究方向为电力系统规划与运行。