

考虑移动储能装置的配电网韧性提升方法研究

文/侯保清 孙小晔 黄健钊 冯岩林 毕文方
国网河南省电力公司南召县供电公司

极端天气会影响配电网的正常运行，从而对生命财产和经济发展造成严重威胁，因此研究了考虑移动储能装置的配电网韧性提升方法。首先建立基于雷暴和强风等多种极端天气的配电网故障率模型和计算方法，并提出韧性评估指标；然后建立考虑移动储能装置调度的配电网韧性规划模型，采取极端天气发生前的预调度和发生后考虑交通情况的实时调度策略，综合修复发生故障的负荷节点；最后以沿海某城市实际发生的某次风灾为例，模拟了所提策略，结果表明所提策略可以有效提升配电网的韧性。

近年来，我国极端天气频发，电力系统尤其是配电网因而屡受破坏。如2020年12月严重寒潮使得江西、湖南多地出现限电，2021年“7·20”郑州特大暴雨致使1/3电力设施受损。极端天气事件的频繁出现，造成电力负荷特性不断恶化，典型场景为尖峰负荷规模不断增加、峰谷差不断拉大，给电力安全带来严峻考验。配电网系统作为重要的电力基础设施，其安全稳定运行极易受极端天气影响。在应对极端自然灾害时，配电网的灾害抵御能力相比于主网较弱，对灾害事件更为敏感。因此，针对极端天气的配电网可靠性评估以及提高电力系统抵御极端自然灾害的能力已成为现代电网规划建设的一项迫切任务^[1]。本文研究了基于移动储能装置的配电网韧性提升措施和规划模型。首先提出极端天气下的故障概率模型，然后建立基于移动储能装置的韧性评估方法，最后提出考虑移动储能装置的配电网韧性规划模型。通过算例仿真验证了所提方法的有效性。

极端天气下配电网可靠性评估方法

1. 配电线路故障概率模型

(1) 考虑强风影响的线路故障率

强风作用下架空配电线路会产生额外的附加弯矩和变形，极端情况下会达到抗拉强度从而产生破坏。因此，配电线路在强风作用下是否会发生故障取决于风速等级和导线抗拉强度。可认为导线的抗拉强度服从正态分布

$$f(\delta_r) = \frac{1}{2\pi r_r} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_r - \mu_r}{r_r}\right)^2\right] \quad (1)$$

式中， $f(\delta_r)$ 为概率密度函数； r_r 为抗拉强度的标准差； μ_r 为抗拉强度的均值。

因为任意时刻的风荷载为定值，所以配电线路在强风作用下的故障率为

$$P_1 = 1 - \int_s^{+\infty} f(\delta_r) d\delta_r \quad (2)$$

(2) 考虑雷击影响的线路故障率

雷暴天气对配电线路的影响可用跳闸率来表征。一般条件下，某地区的线路跳闸率可写成

基金项目：配电变压器防过载负荷控制技术的研究及应用（SGTYHT/23-JS-004）。

$$\begin{aligned} x_{R_r} &= x_{R_d} + x_{R_i} \\ x_{R_d} &= G_n \eta \frac{c_e + 2B_e}{10} 10^{-I_e(s)/88} \\ x_{R_i} &= 0.3G_n \eta \int_{B_e}^{+\infty} 10^{-I_e(s)/88} ds \end{aligned} \quad (3)$$

式中, c_e 为架空导线的投影宽度; G_n 为地闪密度; B_e 为线路的单侧引雷范围; I_e 为耐雷等级; s 为线路到雷击发生地点的距离。

通过线性函数拟合的方式可获得线路故障率和跳闸率的关系 κ , 雷击故障率为

$$P_2 = \kappa \chi_{R_r} \quad (4)$$

2. 配电网联合故障概率模型

综合考虑雷击作用下的跳闸率和强风作用下的线路抗拉故障率, 在强风和雷暴等联合极端天气下的配电线路故障率为

$$P = 1 - \prod_{j=1}^2 (1 - P_j) \quad (5)$$

基于移动储能的配电网韧性评估方法

基于移动储能的配电网韧性评估方法首先要提出可行的韧性评估指标, 常见的是以配电网在受灾过程中的电力负荷变化情况为根据, 如图1所示。其中, $ABCDE$ 表示传统配电网在遭受灾害后的电力负荷变化过程, 而 $ABFGHE$ 代表了采取移动储能策略的配电网在遭受灾害后的负荷变化曲线, 两者之间的面积差值表征了移动储能策略对配电网韧性的提高程度^[2]。

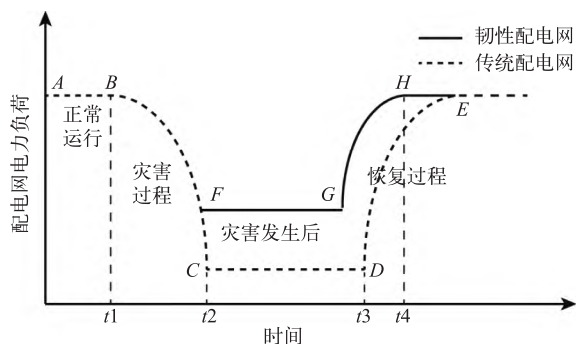


图1 配电网电力负荷变化曲线

为了方便定量描述移动储能策略对韧性的提升程度, 拟提出韧性指标TGH, 该指标根据 $BFGH$ (即灾害发生及回复段) 的灾害过程和对应的 timelines 之比来定义, 该指标越小, 表明所需恢复时间越短, 即配电网韧性越高, 具体表达式为

$$TGH = \sum_{t \in T_p} \sum_{k \in K} \frac{p_{n-t} - p_{ME-t}}{t_4 - t_1} \quad (6)$$

式中, T_p 为配电网发生故障后的持续时间 ($t_1 \leq T_p \leq t_4$); K 为所有灾害事件的集合 (包括强风和雷击); p_{n-t} 为正常情况下配电网的电力负荷; p_{ME-t} 为采取移动储能策略后配电网的电力负荷。

有了韧性指标后, 还需采取相应的韧性评估步骤, 本文拟采取的配电网韧性评估流程如下。

- 1) 将配电网网络结构的相关参数和天气数据输入故障率模型中。
- 2) 由极端天气下配电网故障率模型计算线路故障率分布。
- 3) 每隔一定时间 Δt_1 将配电网内各元件故障率及其限值进行对比, 决定是否触发预调度。若当前调度的位置和前一次的调度位置重合, 则判定当前不执行调度。
- 4) 厘清储存的移动储能装置是否已全数派出, 若储存的移动储能装置数量为0, 不执行预调度; 若储存的数量不为0, 判断极端天气是否发生, 如果发生, 进入下一步, 否则返回第三步。
- 5) 当极端天气发生后, 每隔时间间隔 Δt_2 判断各个元件的工作状态, 一旦元件出现故障, 立即执行基于移动储能装置的救援调度策略。
- 6) 经过极端天气前的预调度和灾害发生过程直至恢复正常功能的实时调度, 计算整个配电网的韧性指标TGH, 以估计其韧性^[3]。

考虑移动储能调度的配电网韧性规划模型

1. 基于联合故障概率模型的极端天气预调度

根据上述的韧性评估方法, 针对极端天气下配电网的故障采取预调度策略, 以最大限度减小损失, 将移动储能装置调度成本和配电网等效失负荷成本最小为目标函数

$$\min \left[\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T G_m \Phi_m W_{m,t} T_{i,m,j} + \frac{\varphi}{100} (G_j C_{i,m} + G_{ch} (W_c(t) + W_D(t)) \Delta t) \right] \quad (7)$$

式中, 把移动储能装置的一个完整调度周期平均分为 T 个子段, t 为每一个时间子段的起始点; i 和 m 为配电网的负荷节点; n 为储存的移动储能装置数量; G_m 为削减单位负荷的成本; Φ_m 为负荷节点 m 的状态表征量, 当 m 处的故障率超过限值时该值为1, 否则该值为0; $W_{m,t}$ 为负荷节点 m 的负荷大小;

$T_{i,m,j}$ 为移动储能装置从负荷节点 i 调度到节点 m 所需时间； G_j 为移动储能装置的单位调度成本； $C_{i,m}$ 为负荷节点 i 和 m 之间的道路距离； φ 为储能装置的折旧系数； G_{ch} 为移动储能装置充放单位电量的成本； $W_c(t)$ 和 $W_d(t)$ 分别为移动储能装置的充放电功率； Δt 为充放电所需时间。

有了目标函数后还需给定约束条件，方可进行最优值的求解，拟采用以下三种约束条件。

(1) 网络结构约束

交通情况在极端灾害天气影响下会比正常情况更加拥堵，进而导致运送移动储能装置前往目的地的时间有所延长。考虑此种情况下的时间为

$$T_{i,m,j} = \frac{C_{i,m}Q}{\mu g[(3\ 500-1.7Q)^2 - \frac{2Q^2L_{ij}}{\mu g}]^{1/2}}[1 + \beta_{ew}(\frac{Q}{C_{ew}})^\xi] \quad (8)$$

式中， Q 为该条道路的交通流量，且 $Q=Q_0(\theta_0+\theta_1R_p+\theta_2V_p)$ ， Q_0 是该条道路在一般情况下的交通流量； R_p 为风速等级； V_p 为可视程度， θ_0 、 θ_1 、 θ_2 为相关系数； μ 为道路路面的摩擦系数，和道路上的车流量有关； L_{ij} 为运送移动储能装置的车辆长度； C_{ew} 为极端天气下道路的容许通行能力； β_{ew} 和 ξ 是标定系数，相关规范规定 $\beta_{ew}=0.16$ ， $\xi=0.41$ 。

对于辐射状网络约束而言，为确保孤岛划分形式能够实现，使用潮流约束方法来描述配电网络的辐射约束，主要包含公式有

$$\begin{cases} \sum_{i,j \in \varepsilon_1} z_{ij} = N_1 - N_s \\ z_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (ij) \in \varepsilon_1 \\ z_{ij}=0 \quad \forall (ij) \in \varepsilon_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中， z_{ij} 为 ij 支路的虚拟潮流； ε_1 为故障隔离以后的可行支路； ε_2 为发生故障的支路； N_1 和 N_s 为参与网络重建的负荷节点和电源数量。

(2) 潮流约束

为了提升迭代效率，不考虑并联导纳，则有潮流约束公式

$$P_j = \sum_{k:j \in \varepsilon_1} P_{jk} - \sum_{i:j \in \varepsilon_1} (P_{ij} - R_{ij}Z_{ij}) \quad (10)$$

式中， P_j 为输入进负荷节点 j 的功率值； P_{ij} 为线路 ij 的功率值； I_{ij} 为线路 ij 的电流最大值的二次方； Z_{ij} 为线路 ij 中的阻抗。

可以把上式分解为有功功率和无功功率的形式

$$\begin{cases} S_j = \sum_{k:j \in \varepsilon_1} S_{jk} - \sum_{i:j \in \varepsilon_1} (S_{ij} - R_{ij}r_{ij}) \\ Q_j = \sum_{k:j \in \varepsilon_1} Q_{jk} - \sum_{i:j \in \varepsilon_1} (Q_{ij} - R_{ij}x_{ij}) \end{cases} \quad (11)$$

式中， S_j 和 Q_j 分别为输入负荷节点 j 的有功和无功功率； S_{ij} 和 Q_{ij} 分别为支路的有功和无功功率； r 和 x 为支路的电阻值和电抗值。

同时要考虑以下平衡约束条件

$$\begin{cases} S_j = S_{Gj} + S_{DGj} - L_j S_{L,j} \\ Q_j = Q_{Gj} + Q_{DGj} - L_j Q_{L,j} \\ S_{DG} \in \{S_{DGj} | S_{DGj} = \bar{S}_{DGj} + \mu_{DGj} \sigma_{DGj}\} \\ S_{L,j} \in \{S_{L,j} | S_{L,j} = \bar{S}_{L,j} + \mu_{L,j} \sigma_{L,j}\} \\ \mu_{DGj}, \mu_{L,j} \in \{\mu_j | -1 \leq \mu_j \leq 1\} \end{cases} \quad (12)$$

式中， S_{Gj} 、 S_{DGj} 分别为负荷节点电源和移动储能装置输入的有功功率； Q_{Gj} 、 Q_{DGj} 分别为负荷节点电源和移动储能装置输入的无功功率； $\bar{S}_{DGj}$ 为预测期望值； σ_{DGj} 和 $\sigma_{L,j}$ 为功率的最大偏差值。

引入大 M 法以对上述约束进行简化

$$\begin{cases} m_{ij} = (1 - z_{ij})M \\ U_i - U_j \leq m_{ij} + 2(r_{ij}S_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)I \\ U_i - U_j \geq -m_{ij} + 2(r_{ij}S_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)I \end{cases} \quad (13)$$

式中， U_i 为负荷节点 i 的电压最大值的二次方； M 为特别大的整数。

(3) 移动储能装置的调度约束

$$\begin{cases} \sum_{j \in \Omega, t \in T, i \in B} \sigma_{j,i,t} \leq n \\ \sigma_{j,i,t_0} + \Delta t_y \leq 1 \\ \sigma_{j,i,0} = lo_{j,i}, j \in n \end{cases} \quad (14)$$

式中， $\sigma_{j,i,t}$ 为移动储能装置的位置； Ω 为预调度的所有储能装置的集合； Δt_y 为调度所需时间； $lo_{j,i}$ 为移动储能装置存放地点。

2. 基于移动储能装置的极端灾害调度

配电网在遭受极端天气后的移动储能装置调度同样重要，目标函数为配电网络削减负荷成本最小

$$\min\{\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T G_m \Phi_m W_{m,i} T_{i,m,j}\} \quad (15)$$

和预调度不同，灾后调度需要考虑配电线路的修复约束，因为不同强度的极端天气会造成线路不同水平的损坏，修复也就需要不同的时间成本。本文将损坏等级分类为绿、黄、红三个等级，对应的修复时间为1 h、2 h和4 h。

$$\begin{aligned} t_{im}^j &\leq t_{im}^n \\ \sum_{t^j \in T_j} l_{im}^{t_j+\Delta t^j} &= \sum_{t^n \in T_n} f_{ks}^{t_n+\Delta t^n} \\ \Delta t^j &< T_j, \Delta t^n < T_n \end{aligned} \tag{16}$$

式中， t_{im}^j 和 t_{im}^n 分别为配电线路发现产生故障的时间和开始修复的时间； l_{im}^j 和 f_{ks}^n 为产生故障的线路数量和已经修复的线路数量； Δt^j 为时间间隔； T_m 为从发生故障起到不再有线路产生故障的时长； T_n 为从发生故障起到所有线路均修复的时间。

其余的网络结构约束和潮流约束仍与预调度阶段的相同，此处不再赘述^[4]。

算例分析

1. 算例背景

以发生在东南沿海地区的某次风灾为例，说明本文所提策略的可行性。该地区部分配电网络的结构图如图2所示。在风灾期间，该地区配电线路还遭受了雷暴影响，发生故障的线路包括P1-1、8-9、P3-14、30-31。

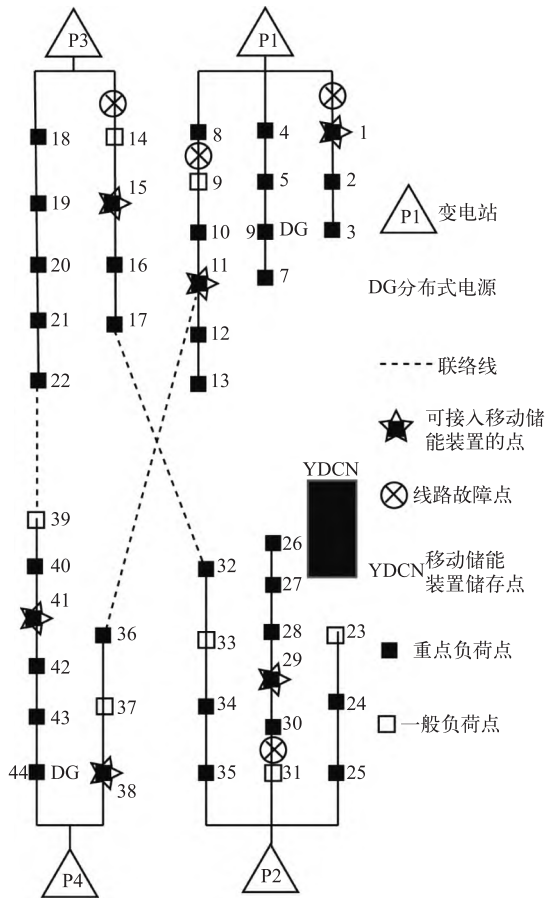


图2 某地区配电网络结构图

该地区的交通网络结构图如图3所示。假设遭受极端天气前每个移动储能装置都处于满电状态，并且有足够的时间到达预调度的目标地点。运送移动储能装置车辆的最大速度为60 km/h，充电放电效率为0.95，充电放电和运送的单位成本分别为1.55元和2.61元。综合考虑场地限制和配电网接口等实际因素，选取YDCG候选接入点为1、11、15、29、38和41。

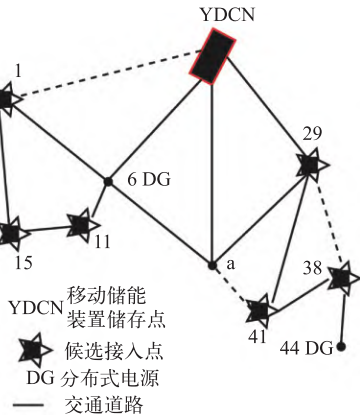


图3 某地区交通网络结构图

2. 基于移动储能的预调度模拟

假设该地区在5点时的线路故障率是随机分配的，将故障率的限制设置为0.5，可得到线路5-6、S3-14、30-31和42-43的故障率超限，所以将以上线路附近的候选接入点设置为预调度的目标地点。

3台YDCN的参数见表1。假设所有装置的起点位置均位于交通网络的0节点处，可得到最优接入点为15、29和41。

表1 YDCN相关参数

序号	最大有功功率/kW	最大无功功率/kW	总容量/(kW·h)
1	320	300	900
2	640	620	1 900
3	560	550	1 600

通过粒子群算法可求得YDCN装置到达预调度目标地点的最优行驶路径，具体的最优路径和所需要的时间见表2。

表2 YDCN预调度最优结果

序号	最优接入点	最优路径	时间/min
1	29	0-29	16
2	15	0-6-11-15	37
3	41	0-29-41	32

3. 基于移动储能的极端天气后调度模拟

极端天气发生后，移动储能装置以15、29和41节点为各自的起始点，3台移动储能装置的时空调度结果如图4所示。

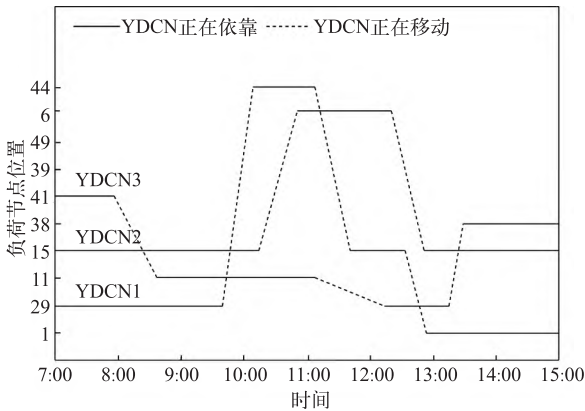


图4 YDCN时空调度图

以YDCN1举例说明，极端天气于早上7:00发生后，因为预先进行了调度，所以YDCN1已经预先停靠在负荷节点29处，可直接为29号节点提供救援，进入救援状态，持续供电共2 h 40 min。受天气影响，YDCN1花费32 min到达44号节点进行充电，11:10充电完成，随后花费26 min行驶到15号节点进行救援，持续供电57 min后，于12:50行驶到1号节点进行救援，对其进行供电直到极端天气结束。表3展示了所有的YDCN移动到目标地点所经过的节点。

表3 YDCN的具体路径

序号	道路	路过节点
1	29-44	29,38,44
	44-15	44,38,41,a,6,11,15
	15-1	15,1
2	15-6	15,11,6
	6-15	6,11,15
3	41-11	41,a,6,11
	11-29	11,6,a,29
	29-38	29,38

结束语

本文提出基于移动储能装置调度的配电网韧性规划模型，由数值模拟结果可得到以下结论：根据联合故障概率模型的结果进行储能装置的预先调度，大大缩短重要节点的停电时间，并且降低救援成本，最多可降低20%，提升配电网韧性。考虑天

气对道路情况的影响，相比于不考虑的情况有效降低了救援成本，提升恢复速度，也提高韧性恢复速度。本文所提预调度加考虑极端天气的策略可有效提升配电网韧性，具有重要的工程价值^[5]。EA

(收稿日期：2024-08-13)

参考文献

[1] 马伸铜. 极端自然灾害下计及储能配置的韧性配电网规划方法[D]. 北京：华北电力大学，2020.

[2] 王红斌，方健，何嘉兴，等. 极端灾害下配电网韧性研究综述[J]. 供用电，2019(36)：20-29.

[3] 赵晓琦，张智，姚琪，等. 面向韧性提升的配电网开关优化配置模型[J]. 电气工程学报，2020(15)：128-134.

[4] 赵天赐. 韧性配电网的储能系统配置规划研究[D]. 北京：北方工业大学，2024.

[5] 马继洋，蔡永翔，唐巍，等. 考虑电动汽车参与韧性提升的配电网状态平滑切换控制策略[J]. 电力建设，2024(45)：29-36.

