

引用格式:杨德昌,吴燕,Pandzic Hrvoje,等.考虑可平移负荷和智能软开关的主动配电网故障恢复方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):183-192.  
Citation: YANG Dechang, WU Yan, PANDZIC Hrvoje, et al. Fault recovery of active distribution network considering translatable load and soft open point[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 183-192.

# 考虑可平移负荷和智能软开关的主动 配电网故障恢复方法

杨德昌<sup>1</sup>, 吴燕<sup>2</sup>, Pandzic Hrvoje<sup>3</sup>, Tomin Nikita<sup>4</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国人民大学新校区建设办公室, 北京 100872; 3. 萨格勒布大学电气与计算机工程学院, 萨格勒布 10000; 4. 俄罗斯科学院西伯利亚分院能源研究所, 新西伯利亚 630090)

**摘要:**在配电网发生故障后,主动配电网能够实现用户侧参与功率的实时供需平衡,满足故障后的负荷恢复。用户参与配电网的调度也是提升故障后负荷恢复比例的途径之一,可平移负荷具有较强的可控性,有效提升了主动配电网的灵活性,智能软开关等新兴可控设备的接入,也使负荷的快速供电成为可能。本文建立了考虑可平移负荷和智能软开关的主动配电网故障恢复模型,并考虑了负荷的重要性系数。通过改进的 IEEE 33 节点算例进行仿真分析,构建单一故障、多点故障、短时故障的场景,验证了本文所提出方法的有效性以及可控装置对故障后负荷恢复量的提升。

**关键词:**主动配电网;故障恢复;可平移负荷;智能软开关;重要性系数

**DOI:** 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.018 **中图分类号:** TM863 **文章编号:** 1673-9140(2024)01-0183-10

## Fault recovery of active distribution network considering translatable load and soft open point

YANG Dechang<sup>1</sup>, WU Yan<sup>2</sup>, PANDZIC Hrvoje<sup>3</sup>, TOMIN Nikita<sup>4</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. New Campus Construction Office, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 3. Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, Zagreb 10000, Croatia; 4. Energy Research Institute, Siberia Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk 630090, Russia)

**Abstract:** After a fault occurs in the distribution network, active distribution network can realize the real-time power supply and demand balance of user side and meet the demand of load recovery after fault. Users' participation in the dispatching of distribution network is also one of the ways to improve the proportion of load recovery. The translational load has strong controllability, which improves the flexibility of active distribution network. The access of new controllable devices, such as soft open point, also makes it possible for power supply quickly. In this paper, a fault recovery model of active distribution network considering translatable load and soft open point is established. The importance coefficient of load is considered. Through the simulation analysis of the modified IEEE 33-node test system, three scenarios of single fault, multi-point fault and short-term fault are built, the effectiveness of the proposed method and the improvement of load recovery after fault by the controllable device are verified.

**Key words:** active distribution network; fault recovery; translatable load; soft open point; importance coefficient

在配电网发生故障后,为保证安全运行,保护装置将故障线路进行切除,之后,配电网故障恢复过程将着重考虑恢复失电负荷总量、开关操作次数、网络运行损耗等指标,使配电网满足恢复后的

收稿日期:2022-10-01;修回日期:2023-08-30

基金项目:国家自然科学基金(51977212);国家自然科学基金交流项目(52111530048)

通信作者:杨德昌(1983—),男,副教授,博士,主要从事新型电力系统的规划运行与控制研究;E-mail:yangdechang@cau.edu.cn

连通性、辐射状、安全性等条件。传统配电网多为闭环设计、开环运行,当系统发生故障时,能够依靠故障指示器或具有网络式保护功能的智能终端进行故障定位,进而通过配电网保护装置进行故障隔离,最终实现供电恢复<sup>[1-6]</sup>。

分布式电源的大量接入是主动配电网的重要特征之一<sup>[7-8]</sup>。考虑分布式电源的接入,可以通过其发出的有功功率补偿失电负荷,提高系统的供电可靠性指标;但同时,分布式电源的间歇性、随机性使其出力具有较强的不确定性,因此传统配电网故障恢复方法不能完全适用,需要对主动配电网的时序特征进行动态分析<sup>[4]</sup>。同时,用户参与配电网的调度也是主动配电网的特征之一,可平移负荷(translational load, TL)具有较强的可控性,在参与调度的时段内,仅需满足负荷总量即可,有效提升了主动配电网的灵活性,但同时,由于用户侧响应具有一定的延迟性,因此可平移负荷无法实时响应故障后的负荷恢复需求<sup>[9]</sup>。

目前,学术界已经广泛地开展了故障恢复的相关研究。文献[10]针对分布式电源接入配电网后故障自愈的现状进行分析,并展望了相关的研究重点和难点。文献[11]提出了一种考虑不同负荷的重要性等级的故障恢复方法,通过对单一电源供电的负荷进行合理区分,有效实现重要负荷的优先供电恢复。文献[12]建立了考虑随机性和不确定性的分析模型,用以适应分布式电源输出功率的随机性对配电网负荷恢复的影响。针对分布式电源可能带来的功率倒送、反向潮流等问题,文献[13]在考虑分布式电源出力特性的前提下,构建故障恢复模型。针对故障恢复后配电网运行状态分析计算维度较大的问题,文献[14-15]分别在算法上进行了创新。

传统的开关操作会产生大量的运行损耗,且对于现场人员的安全有一定的威胁。随着电力电子技术的发展和制造水平的提升,智能软开关(soft open point, SOP)已经逐步成为替代传统联络开关的选择<sup>[16-17]</sup>。相较于传统的联络开关,智能软开关具有响应速度快、损耗小等特点,且能够有效实现不同馈线之间的功率交换,在故障恢复阶段,能够有效实现失电区域的供电。针对智能软开关在故障恢复中的应用,文献[18]考虑了孤岛划分策略与智能软开关的结合方案,但并未考虑配电网用户参与到故障恢复过程中的情况。面向配电网的随机性,文献[19]提出了含智能软开关的配电网鲁棒恢复模型,用以保障重要用户的供电可靠性。充分考虑

智能软开关基于电力电子装置的可扩展性,文献[20]提出多端SOP在配电网供电恢复问题中的应用和建模分析。可以看出,智能软开关的接入改变了系统的运行模式,也必然将为故障处理和恢复供电带来新的问题和挑战。

本文面向主动配电网的故障恢复过程,提出一种考虑可平移负荷和智能软开关接入的故障恢复模型,分析新设备的接入对于负荷恢复量的影响。首先,介绍主动配电网的故障恢复模型,建立负荷动态平衡模型、网络模型,并考虑可平移负荷在故障恢复过程中的影响;之后,分析智能软开关的接入对负荷恢复量的提升机理,并构建故障状态下三端智能软开关的稳态模型;然后,构建故障恢复的分析模型,详细介绍采用的目标函数;最后,在改进的IEEE 33节点算例上进行仿真分析,验证本文所提出方法的有效性。

## 1 主动配电网故障恢复模型

在故障发生后,为保证配电系统的安全运行,首先需要将故障线路隔离,再进行故障恢复<sup>[17]</sup>。本文主要面向故障处理后的主动配电网,即不考虑故障的处理,仅考虑对未发生故障区域的负荷进行恢复的过程,此时的主动配电网满足功率的动态平衡以及稳态运行的相关约束,具体如下。

### 1.1 节点功率动态平衡

中国配电网多为辐射状供电的形式,因此在故障发生后,故障线路的下级节点处的负荷失电。在考虑新能源的分布式接入后,分布式电源可以就近供应一部分的负荷。在配电网中,现有的分布式电源大多为不可控型,因此其不能参与到配电网的优化运行中,但可以为临近的负荷进行故障恢复。为简化其模型,分布式电源此时的有功功率和无功功率均可预测给出的额定值<sup>[21]</sup>,在接入配电网后,将其视为功率给定的PQ节点,其有功功率、无功功率可以采用预测值进行计算。

从单一节点的功率平衡情况进行分析,需要满足源、荷的动态平衡,可以表示为如下的形式:

$$P_{L,i}^{\text{Grid}} = P_{L,i}^{\text{Res}} - P_{L,i}^{\text{DG}} \quad (1)$$

$$Q_{L,i}^{\text{Grid}} = Q_{L,i}^{\text{Res}} - Q_{L,i}^{\text{DG}} \quad (2)$$

式(1)、(2)中,以配电网向节点方向作为正方向, $P_{L,i}^{\text{Grid}}$ 为 $t$ 时段网络向节点 $i$ 的有功功率注入情况; $P_{L,i}^{\text{Res}}$ 为 $t$ 时段节点 $i$ 的有功负荷恢复量; $P_{L,i}^{\text{DG}}$ 为 $t$ 时段节点 $i$ 上分布式电源的有功功率输出值;以分布式电源的发电功率超过负荷恢复量为例,此时可得出

$P_{t,i}^{DG} > P_{t,i}^{Res}$ ,则有  $P_{t,i}^{Grid} < 0$  表示功率由节点流入到网络,反之当  $P_{t,i}^{Grid}$  数值为正时,表示网络向节点传输功率;同理,  $Q_{t,i}^{Grid}$  为  $t$  时段网络向节点  $i$  的无功功率注入情况;  $Q_{t,i}^{Res}$  为  $t$  时段节点  $i$  的无功负荷恢复量;  $Q_{t,i}^{DG}$  为  $t$  时段节点  $i$  上分布式电源的无功补偿功率。

## 1.2 网络模型

在发生故障之后,主动配电网在恢复过程中仍旧需要满足潮流稳态方程,与正常运行方式不同的是,需要通过保护装置切除故障线路,保证配电网其余部分的正常运行<sup>[17]</sup>,表示如下:

$$P_{t,ij} = P_{t,i}^{Grid} + \sum_{k:(j,k) \in L} P_{t,jk} + I_{t,ij}^2 r_{ij} \quad (3)$$

$$Q_{t,ij} = Q_{t,i}^{Grid} + \sum_{k:(j,k) \in L} Q_{t,jk} + I_{t,ij}^2 x_{ij} \quad (4)$$

$$v_{t,j}^2 = v_{t,i}^2 - 2(r_{ij}P_{t,ij} + x_{ij}Q_{t,ij}) + I_{t,ij}^2(r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad (5)$$

$$I_{t,ij}^2 v_{t,i}^2 = P_{t,ij}^2 + Q_{t,ij}^2 \quad (6)$$

式(3)~(6)中,  $P_{t,ij}$  为  $t$  时段流过有向线路  $ij$  上的有功功率;  $L$  为辐射状配电网中节点  $i$  到源节点唯一路径的线路集合;  $I_{t,ij}$  为  $t$  时段流过有向线路  $ij$  的电流幅值;  $r_{ij}$  为线路  $ij$  的电阻值;  $Q_{t,ij}$  为  $t$  时段流过有向线路  $ij$  上无功功率;  $x_{ij}$  为线路  $ij$  的电抗值;  $v_{t,i}$  为  $t$  时段节点  $i$  的电压幅值。

同时,在配电网安全运行的要求下,节点电压应处于一个确定的区间内,而线路上流经的电流应小于上限,具体如下:

$$v_i^{\min} \leq v_{t,i} \leq v_i^{\max} \quad (7)$$

$$|I_{t,ij}| \leq I_{ij}^{\max} \quad (8)$$

式(7)、(8)中,  $v_i^{\max}$ 、 $v_i^{\min}$  分别为节点  $i$  设定的电压值的上、下限;  $I_{ij}^{\max}$  为流过有向线路  $ij$  的电流幅值上限。

同时,在故障恢复过程中,应满足辐射状运行的原则,具体表达式如下:

$$\alpha_{t,ij} = \beta_{t,ij} + \beta_{t,ji}, ij \in \Omega_b \quad (9)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_b} \beta_{t,ij} = 1, \forall j \in \Omega_n / \Omega_0 \quad (10)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_b} \beta_{t,ij} = 0, \forall j \in \Omega_0 \quad (11)$$

$$\alpha_{t,ij} \in \{0, 1\}, ij \in \Omega_b \quad (12)$$

$$\beta_{t,ij} \in \{0, 1\}, ij \in \Omega_b \quad (13)$$

式中,  $\Omega_b$  为配电网中所有线路的集合;  $\Omega_n$  为系统中所有节点的集合;  $\Omega_0$  为配电网中的源节点的集合,单一电源的前提下有且仅有一个;  $\alpha_{t,ij}$  为时段  $t$  中支路  $ij$  的运行状态,其中,  $\alpha_{t,ij} = 0$  表示断开,  $\alpha_{t,ij} = 1$  表示运行;  $\beta_{t,ij}$  为时段  $t$  中节点  $i$  和节点  $j$  的从属关系,一般采用父节点的形式进行定义,其中,  $\beta_{t,ij} = 1$  表

示节点  $i$  是节点  $j$  的父节点,即功率从节点  $i$  流向节点  $j$ ,  $\beta_{t,ij} = 0$  则表示节点  $i$  不是节点  $j$  的父节点。

通过所得到的  $\beta_{ij}$  进一步分析故障后的功率流向,在主动配电网中,可通过分布式电源就近供电恢复部分负荷的供电,因此需要进一步构建各节点之间的功率传输路径,即功率传输矩阵。当节点  $i$  和节点  $j$  存在  $\beta_{ij} = 1$  的从属关系,且节点  $j$  和节点  $k$  存在  $\beta_{jk} = 1$  的关系时,可轻易得出节点  $i$  与节点  $k$  之间存在功率的交换路径;进一步可推得,在故障恢复过程中,节点  $i$  中的负荷可通过节点  $k$  的多余功率进行故障恢复,反之亦然。同时,由于已经定义了  $L_i$  为节点  $i$  到源节点唯一路径的线路集合,也可通过节点  $i$  与节点  $k$  的相关集合是否存在交集,确认2个节点间是否存在功率传输的通路。综合以上2种方法,最终构建功率传输矩阵  $T$ ,表示节点之间的功率交换关系,其中各节点间路径对应的元素  $T_{ik}$  如下:

$$L_{ik} = [(C_{\Omega_n} L_i) \cap L_k] \cup [(C_{\Omega_n} L_k) \cap L_i] \quad (14)$$

$$T_{ik} = \prod_{mn \in L_{ik}} \alpha_{mn}, T_{ik} \in \{0, 1\} \quad (15)$$

式(14)、(15)中,  $L_{ik}$  为连通节点  $i$  与节点  $k$  之间路径的线路的集合。式(14)首先构建了辐射状配电网中连通任意两节点之间的线路的路径,式(15)进一步引入路径上的线路的通断状态  $\alpha_{mn}$ ,计算两节点之间是否存在有功功率交互的可能,当  $T_{ik} = 1$  时表示此时节点  $i$  与节点  $k$  可进行功率交互,反之,  $T_{ik} = 0$  表示路径上存在有断开的线路。

## 1.3 储能系统

储能系统(energy storage system, ESS)在故障恢复过程中可以发挥功率在时间上的平移作用,通过配电网中储能设备对功率的调控,有效提升主动配电网源一荷的匹配程度,能够有效提升负荷的恢复量<sup>[22]</sup>。在主动配电网中接入储能系统后,式(1)、(2)应修改为如下所示的形式:

$$P_{t,i}^{Grid} = P_{t,i}^{Res} - P_{t,i}^{DG} - P_{t,i}^{ESS} \quad (16)$$

$$Q_{t,i}^{Grid} = Q_{t,i}^{Res} - Q_{t,i}^{DG} - Q_{t,i}^{ESS} \quad (17)$$

式(16)、(17)中,  $P_{t,i}^{ESS}$  为  $t$  时段节点  $i$  上储能装置的充放电功率;  $Q_{t,i}^{ESS}$  为  $t$  时段节点  $i$  上储能装置的无功补偿功率。以储能系统向配电网注入功率为正,当储能设备向节点注入功率时,则有  $P_{t,i}^{ESS} > 0$ 。

在主动配电网的故障恢复中,可以将储能系统进行简化分析,忽略其荷电的载体,其稳态运行约束可表示为

$$Q_i^{\text{ESS, min}} \leq Q_{t,i}^{\text{ESS}} \leq Q_i^{\text{ESS, max}} \quad (18)$$

$$\sqrt{(P_{t,i}^{\text{ESS}})^2 + (Q_{t,i}^{\text{ESS}})^2} \leq S_i^{\text{ESS}} \quad (19)$$

$$E_{t+1,i}^{\text{ESS}} = E_{t,i}^{\text{ESS}} + P_{t,i}^{\text{ESS}} \Delta t \quad (20)$$

$$E_i^{\text{ESS, min}} \leq E_{t,i}^{\text{ESS}} \leq E_i^{\text{ESS, max}} \quad (21)$$

$$E_{N_T,i}^{\text{ESS}} = E_{0,i}^{\text{ESS}} \quad (22)$$

式(18)~(22)中,  $Q_i^{\text{ESS, max}}$ 、 $Q_i^{\text{ESS, min}}$  分别为节点  $i$  上的无功补偿功率上、下限;  $S_i^{\text{ESS}}$  为节点  $i$  上储能系统的总装机容量;  $E_{t,i}^{\text{ESS}}$  为  $t$  时段节点  $i$  上储能系统的储电量;  $E_i^{\text{ESS, max}}$ 、 $E_i^{\text{ESS, min}}$  分别为节点  $i$  上储能系统的储电量上、下限;  $N_T$  为时序分析的系统时段总数。式(22)表示储能系统在一个运行优化周期内初始、最终电量  $E_{N_T,i}^{\text{ESS}}$  状态保持一致, 一般周期可设置为 1 d。

#### 1.4 可平移负荷

与储能系统类似, 可平移负荷是用户侧的可调度资源<sup>[23]</sup>。可平移负荷是用户侧参与主动配电网调度的重要方式之一, 从配电网调度层面分析, 通过在调度时段内对功率进行合理的时序分配, 降低故障恢复阶段的负荷需求, 有效提高了系统的灵活性。从用户侧分析, 可平移负荷自身主要的运行目标为盈利性, 在满足自身的实际需求后, 通过参与电力系统的优化调度, 可平移负荷在电力市场中能够获取更高的利润, 起到双赢的效果<sup>[24]</sup>。同时, 可平移负荷参与到配电网的运行和规划设计中后, 其对现有的网架建设、综合能源设施及变电站的规划将产生深远的影响<sup>[25-26]</sup>。因此, 在故障恢复过程中考虑可平移负荷的参与具有必要性。

为降低分析的复杂性, 在故障恢复阶段暂时不考虑可平移负荷用电需求的变化, 即在可平移负荷参与到主动配电网的调度过程中, 其功率因数保持不变。当用户参与到故障恢复阶段的调度后, 其总负荷需求会在之后的正常运行阶段予以供给, 满足其自身的负荷需求。相关运行约束如下:

$$\sum_{t \in T} P_{t,i}^{\text{TL}} \Delta t = E_i^{\text{DEM}} \quad (23)$$

$$\lambda = P_{t,i}^{\text{TL}} / \sqrt{(P_{t,i}^{\text{TL}})^2 + (Q_{t,i}^{\text{TL}})^2} \quad (24)$$

式(23)、(24)中,  $T$  为可平移负荷的参与调度时段;  $P_{t,i}^{\text{TL}}$  为  $t$  时段节点  $i$  上可平移负荷的实际需求;  $E_i^{\text{DEM}}$  为接在节点  $i$  上可平移负荷的总的能量需求;  $\lambda$  为可平移负荷的功率因数;  $Q_{t,i}^{\text{TL}}$  为可平移负荷的无功需求。

综合以上分析, 考虑多种可控设备的主动配电网的故障恢复源荷的动态平衡等式(16)、(17)应进一步修改为如下形式:

$$P_{t,i}^{\text{Grid}} = P_{t,i}^{\text{Res}} - P_{t,i}^{\text{DG}} - P_{t,i}^{\text{ESS}} + P_{t,i}^{\text{TL}} \quad (25)$$

$$Q_{t,i}^{\text{Grid}} = Q_{t,i}^{\text{Res}} - Q_{t,i}^{\text{DG}} - Q_{t,i}^{\text{ESS}} + Q_{t,i}^{\text{TL}} \quad (26)$$

值得注意的是, 当可平移负荷参与配电网调度时, 实际上的优化目标是降低其在故障恢复时段的负荷总量, 增加其余正常运行时段负荷比重, 本质上是削峰填谷的一种方式。在式(25)、(26)中, 故障恢复时段的  $P_{t,i}^{\text{TL}}$  和  $Q_{t,i}^{\text{TL}}$  的实际需求数值越低, 即平移部分占比越多, 其余不可平移的负荷的故障恢复比例越高。

## 2 智能软开关的接入对故障恢复的影响

智能软开关在故障情况下, 能够在极短时间内快速闭锁, 实现互联系统之间的故障隔离, 其灵活性远胜于联络开关<sup>[24]</sup>。同时, 智能软开关的接入并不改变原有的短路容量, 因此与保护装置的相性较好。相较于文 1.3、1.4 的可控设备, 考虑智能软开关装设位置的不同, 并不能对整个配电网中任意的失电区域产生影响。面向中压配电网, 根据文献<sup>[27]</sup>中分析, 两端智能软开关的接入情况可分为以下 3 种情况:

- 1) 智能软开关的两端均在失电区域外。
- 2) 智能软开关的一端在失电区域内, 而另一端在失电区域外。
- 3) 智能软开关的两端均在失电区域内。

智能软开关为无源设备, 因此情景 1、3 均无法实现智能软开关对配电网的供电恢复, 而仅有情景 2 可以满足条件。以图 1 为例, 当线路 4-5 发生接地故障后, 线路保护动作, 智能软开关可以实现不同馈线间的联络, 对节点 6、7 所带负荷进行供电, 有效提升了系统的负荷恢复量。

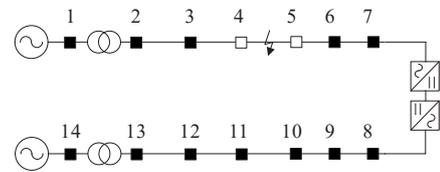


图 1 考虑智能软开关的故障恢复

Figure 1 Fault recovery considering soft open point

根据文 1.2 分析, 所构建的功率传输矩阵能够有效表示主动配电网中各节点的功率传输路径, 以图 1 中失电线路的下级节点 6、7 为例, 原始的功率传输矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

在装设智能软开关后,其功率传输矩阵变为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

可以看到,智能软开关的接入,为节点6、7提供了更多的功率传输路径,故障恢复后通过智能软开关有效连通2条馈线,使功率合理分布,因此其负荷恢复比例会随之有效增加。

传统的联络开关多为两端型结构,考虑到电力电子装置具有很强的可移植性,三端智能软开关的接入为主动配电网的故障恢复提供了有效的帮助,使得情景1、3发生的比例进一步减少。在主动配电网中接入智能软开关后,式(25)、(26)应进一步修改为如下形式:

$$P_{t,i}^{\text{Grid}} = P_{t,i}^{\text{Res}} - P_{t,i}^{\text{DG}} - P_{t,i}^{\text{ESS}} + P_{t,i}^{\text{TL}} - P_{t,i}^{\text{SOP}} \quad (27)$$

$$Q_{t,i}^{\text{Grid}} = Q_{t,i}^{\text{Res}} - Q_{t,i}^{\text{DG}} - Q_{t,i}^{\text{ESS}} + Q_{t,i}^{\text{TL}} - Q_{t,i}^{\text{SOP}} \quad (28)$$

式(27)、(28)中, $P_{t,i}^{\text{SOP}}$ 为 $t$ 时段节点 $i$ 上智能软开关的有功功率; $Q_{t,i}^{\text{SOP}}$ 为 $t$ 时段节点 $i$ 上智能软开关的无功功率,为准确表示智能软开关功率传输情况,以其向电网注入功率为正向,则 $P_{t,i}^{\text{SOP}} > 0$ 表示功率由智能软开关流入到节点中。

同时,三端智能软开关需要满足自身的运行约束,如下:

$$P_{t,i}^{\text{SOP}} + P_{t,j}^{\text{SOP}} + P_{t,h}^{\text{SOP}} + P_{t,i}^{\text{SOP,L}} + P_{t,j}^{\text{SOP,L}} + P_{t,h}^{\text{SOP,L}} = 0 \quad (29)$$

$$P_{t,i}^{\text{SOP,L}} = A_i^{\text{SOP}} \sqrt{(P_i^{\text{SOP}})^2 + (Q_i^{\text{SOP}})^2} \quad (30)$$

$$P_{t,j}^{\text{SOP,L}} = A_j^{\text{SOP}} \sqrt{(P_j^{\text{SOP}})^2 + (Q_j^{\text{SOP}})^2} \quad (31)$$

$$P_{t,h}^{\text{SOP,L}} = A_h^{\text{SOP}} \sqrt{(P_h^{\text{SOP}})^2 + (Q_h^{\text{SOP}})^2} \quad (32)$$

$$\sqrt{(P_i^{\text{SOP}})^2 + (Q_i^{\text{SOP}})^2} \leq S_i^{\text{SOP}} \quad (33)$$

$$\sqrt{(P_j^{\text{SOP}})^2 + (Q_j^{\text{SOP}})^2} \leq S_j^{\text{SOP}} \quad (34)$$

$$\sqrt{(P_h^{\text{SOP}})^2 + (Q_h^{\text{SOP}})^2} \leq S_h^{\text{SOP}} \quad (35)$$

式(29)~(35)中, $i,j,h$ 分别表示三端智能软开关接入网络的节点位置;针对每一个时序分析时段 $t$ ,式(30)~(32)表示智能软开关有功损耗的估测方法,式(33)~(35)表示智能软开关功率的运行上限约束。其中, $P_i^{\text{SOP,L}}$ 为节点 $i$ 上智能软开关的有功功率损耗; $A_i^{\text{SOP}}$ 为节点 $i$ 上智能软开关的损耗系数; $S_i^{\text{SOP}}$ 为节点 $i$ 上智能软开关的换流器装机容量。

### 3 故障恢复的目标函数

在故障恢复过程中,首先需要考虑在现有的网架结构下,实现对负荷的恢复供电,保证用户的电

能供应。此时可平移负荷、储能系统,SOP的接入位置为确定的状态;而其参与调度后的实际传输功率则视为待优化的状态变量。同时,在满足一定的负荷恢复量后,可以对网络整体的运行情况进行进一步的优化,实现诸如降低线损等运行目标。

故障恢复过程中主要目标为恢复负荷供电,次要目标则涵盖了降低损耗、改善电压偏差程度等目标,因此可以通过大 $M$ 法,构建主动配电网故障恢复的目标函数,如下:

$$f = M * f_D + f_L + f_V \quad (36)$$

式中, $f$ 为构建的目标函数; $M$ 为一个较大的常数,一般可取100; $f_D$ 为设定的恢复负荷供电目标函数,为故障恢复的主要目标; $f_L$ 为降低系统损耗目标函数; $f_V$ 为降低电压偏差目标函数。

在故障恢复过程中,首先需要考虑的目标是对负荷的恢复供电,保证用户的电能供应,目的是使得负荷失电量降低。因此首先需要构建恢复负荷供电的目标函数,如下:

$$\min f_D = \sum_{t=1}^{N_T} \left[ \sum_{i=1}^{N_N} (P_{t,i}^{\text{Load}} - P_{t,i}^{\text{Res}}) \right] \Delta t \quad (37)$$

式中, $N_N$ 为配电网中所有负荷节点的总数; $P_{t,i}^{\text{Load}}$ 为 $t$ 时段节点 $i$ 上的有功负荷总量; $P_{t,i}^{\text{Res}}$ 为 $t$ 时段节点 $i$ 上的负荷恢复总量。

在主动配电网的故障恢复中,还需要考虑不同负荷之间的重要性差别,应优先恢复重要负荷的供电。在运行优化的模型中,较为常用的方式是引入节点负荷的重要性系数,表示其重要性等级<sup>[11]</sup>。根据负荷的重要程度,此系数由重要负荷至不重要负荷递减,在计算过程中,能够有效实现优先恢复重要负荷的供电。将目标函数 $f_D$ 修改为

$$\min f_D = \sum_{t=1}^{N_T} \left[ \sum_{i=1}^{N_N} k_i^{\text{Im}} (P_{t,i}^{\text{Load}} - P_{t,i}^{\text{Res}}) \right] \Delta t \quad (38)$$

式中, $k_i^{\text{Im}}$ 在节点 $i$ 上的负荷的重要性系数。

之后构建故障恢复的次要目标。由于式(36)采用大 $M$ 法进行计算,因此其结果是优先满足了负荷恢复供电目标后,再满足其余目标函数。主动配电网的运行目标之一是降低网络的线损,可通过式(39)进行计算。另一个常用的运行目标为降低电压偏差,即保证配电网中各节点电压稳定在额定值附近,如下:

$$\min f_L = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{ij \in \Omega_b} r_{ij} I_{t,ij}^2 \Delta t \quad (39)$$

$$\min f_V = \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_S} |v_{i,j}^2 - 1| : (v_{i,j} \geq \bar{v}_{thr} \| v_{i,j} \leq \underline{v}_{thr}) \quad (40)$$

式中,  $\bar{v}_{thr}$  和  $\underline{v}_{thr}$  表示所期望的节点电压波动区间。

上述模型属于大规模非线性数学问题,可引入二阶锥规划方法,通过现有的求解器进行高效求解。相关非线性约束通过转化后,可以调用成熟的数学分析模型进行计算<sup>[20]</sup>。通过诸如 CPLEX、MOSEK 等算法包,能够有效进行优化分析计算,得到准确的结果。

## 4 算例分析

为验证本文提出方法的有效性,采用改进的 IEEE 33 节点算例<sup>[28]</sup>进行分析,图 2 为其结构。其中,配电网中线路的传输容量上限根据实际规模设为  $8 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,节点电压上、下限设置为  $0.9 \sim 1.1 \text{ p.u.}$ 。配电网中装有 2 类不可控型分布式电源,光伏接入点为节点 12、18,装机容量均为  $400 \text{ kW} \cdot \text{A}$ ,换流器功率因数均设置为 0.9;风机接入点为节点 22、25,装机容量均为  $300 \text{ kW} \cdot \text{A}$ ,换流器功率因数均设置为 0.9。为简化分析故障恢复阶段的负荷恢复情况,在计算过程中不考虑负荷重要程度的变化,即重要性系数为确定值。用户负荷节点重要性系数设置如表 1 所示,将其分为重要负荷、二类负荷、一般负荷。

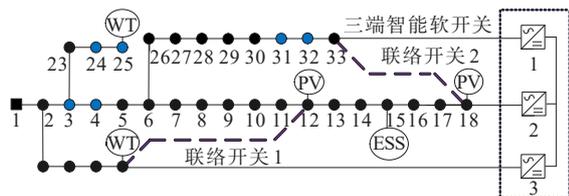


图 2 改进的 IEEE 33 节点算例

Figure 2 Modified IEEE 33 node test system

表 1 用户负荷节点重要性设置情况

Table 1 Importance of user load node

| 负荷节点编号  | 重要性系数 |
|---|-------|
| 5, 6, 8, 9, 23, 27                                  | 1.0   |
| 2, 3, 7, 10, 14, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 28, 33 | 0.5   |
| 4, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 29, 30, 31, 32       | 0.1   |

在上述 IEEE 33 节点算例中,进一步考虑可控设备的接入。在节点 15 处接入容量为  $500 \text{ kW} \cdot \text{h}$  的储能系统,在故障恢复过程中参与调度。为保障多条馈线之间的联络,考虑配电网中 2 个联络开关参与调度,接入位置为 12-22 和 18-33,传输容量与线路容量一致。根据文献<sup>[29]</sup>中结果,三端智能软开关接入位置在 18-22-33 节点处,能够实现对 3 条

馈线的协同优化。SOP 各端换流器的容量设置为  $1 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,其损耗系数设置为 0.02。在可平移负荷方面,一般选取重要性系数较低的节点进行用户侧参与调节,分别将节点 3、4、24、25、31、32 设置为可平移负荷,参与调度时间为 11:00—15:00,其可平移比例为 50%。

根据实际的运行数据,通过日运行潮流分析的方法,进行故障恢复分析<sup>[30]</sup>。考虑 1 d 中不同时段的随机性,采用日运行曲线的方式进行描述,其中负荷需求、光伏发电曲线、风机发电曲线如图 3 所示。针对单一线路故障、多点故障、短时故障 3 种情况,分别构建 3 个典型的故障场景进行分析,详细信息如表 2 所示。

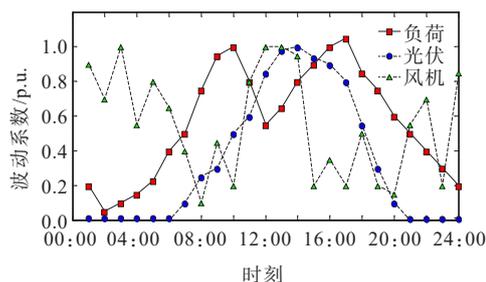


图 3 主动配电网的运行曲线

Figure 3 Operating curve of active distribution network

表 2 典型故障场景

Table 2 Typical fault scenarios

| 故障场景编号 | 故障线路编号    | 故障时间        |
|--------|-----------|-------------|
| 1      | 2-3       | 10:00—14:00 |
| 2      | 2-3; 6-26 | 10:00—14:00 |
| 3      | 2-3       | 18:00—19:00 |

根据实际的运行数据,通过日运行潮流分析的方法,进行交直流配电网运行优化分析。本文所提出的方法采用 YALMIP 平台<sup>[31]</sup>进行建模,平台为 MATLAB R2016b,算法包为 IBM ILOG CPLEX 12.6。通过此算法包,能够有效进行优化分析计算,得到准确的结果。所使用的处理器为 Intel(R) Core (TM) i5-5300M 3.20 GHz,运行内存为 16 GB。

首先设置故障场景 1,故障发生点设置为 2-3 处线路,故障发生的时间为 10:00:,在 14:00 时恢复正常运行方式,总失电时间为 4 h,在此时段内进行分析。故障发生后,线路 2-3 被故障隔离,配电网的其余部分正常运行,且各节点的负荷在确定的功率因数下运行。

构建 4 个典型恢复方案,分析可控设备的接入对于负荷恢复情况的影响。

方案 1:不接入可控设备,分析故障恢复后的总

负荷恢复量。

方案 2:调度储能设备,分析故障恢复后的总负荷恢复量。

方案 3:在方案 2 的基础上进一步调度可平移负荷,分析故障恢复后的总负荷恢复量。

方案 4:在方案 3 的基础上进一步调度传统联络开关,分析故障恢复后的总负荷恢复量。

方案 5:在方案 3 的基础上进一步调度三端智能软开关,用以替代传统的联络开关,分析故障恢复后的总负荷恢复量。

各方案中详细的仿真结果如表 3 所示,从中可以看出,随着可控设备的不断接入,在故障恢复过程中,负荷恢复量呈现增加的趋势,表明此时主动配电网的恢复力不断增加。各个场景下,故障时间内各个重要程度的负荷恢复总量情况如图 4~6。对比方案 1 和方案 2,随着储能设备的接入,配电网的负荷恢复量增加,同时在满足负荷恢复的前提下,使得次要目标运行损耗逐渐降低,反映出系统的经济性有所提升。对比方案 2 和方案 3,通过可平移负荷的接入,有效实现了负荷恢复量的提升,将非重要负荷在故障恢复期间平移,能够有效保障重要负荷的供电恢复,且可平移负荷的总量并未受到影响,实现了源一荷的动态平衡。方案 3 相较于方案 2,其系统运行损耗增加,但同时负荷恢复量增加的数值超过系统运行损耗提升的部分,对于用户的可靠供电起到了积极的作用。

表 3 场景 1 中可控设备对主动配电网故障恢复的影响

Table 3 Influence of controllable equipment on fault recovery of active distribution network in scenario 1

| 方案 | 负荷恢复量/<br>(kW·h) | 系统运行损耗/<br>(kW·h) | 智能软开关运行<br>损耗/(kW·h) | 最大电压<br>偏差/p.u. |
|----|------------------|-------------------|----------------------|-----------------|
| 1  | 3 903.14         | 1 192.73          |                      | 0.071           |
| 2  | 4 572.16         | 385.67            |                      | 0.071           |
| 3  | 4 730.59         | 612.19            |                      | 0.071           |
| 4  | 5 056.47         | 237.70            |                      | 0.048           |
| 5  | 9 224.19         | 561.77            | 113.42               | 0.045           |

对比方案 4 和方案 3,在调度传统的联络开关后,能够少量提升故障后配电网的负荷恢复量,并降低系统运行损耗和电压偏差。在智能软开关接入后,对比方案 3 和方案 5,负荷恢复量呈现显著提升的结果,反映出智能软开关能够有效实现故障发生后不同馈线间的功率交换,通过此方法,能够有效实现节点的负荷恢复。同时,在满足节点负荷需求后,通过向所连接节点补偿无功功率,节点电压

偏差最大值相较于其他方案有明显降低,反映出系统的电压稳定性有所提升。因此,采用智能软开关代替传统的联络开关,能够在故障恢复阶段充分发挥分布式电源的恢复能力、有效沟通失电区域与有电区域,对配电网的故障恢复起到明显的提升效应。

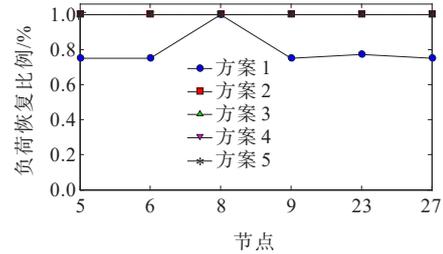


图 4 重要负荷的恢复情况

Figure 4 Recovery of important loads

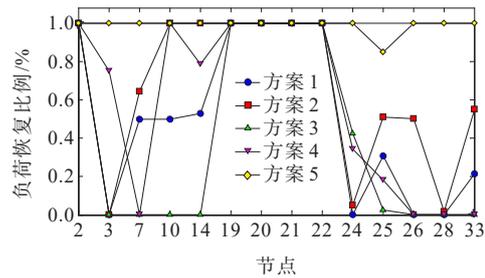


图 5 二类负荷的恢复情况

Figure 5 Recovery of class two loads

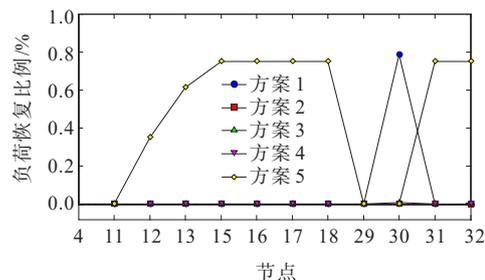


图 6 一般负荷的恢复情况

Figure 6 Recovery of normal loads

表 4 为场景 1 中不同重要性系数的负荷所对应的平均恢复比例,可以看出,通过主动配电网中的可控设备的调节作用,能够有效满足重要负荷 100% 恢复的需求。对比方案 2 和方案 1,2 类负荷的恢复比例有所提升,但一般负荷基本无恢复,整体分析负荷恢复总量有所提升。对比方案 3 和方案 2,2 类负荷恢复比例降低的原因为节点 3、24、25 上具有可平移负荷,其负荷需求被转移至故障恢复完成的状态,最终负荷恢复总量进一步提升。方案 4 相对于方案 3 在 2 类负荷的恢复上有一定的优势,但提升总量并不明显。方案 5 中由于智能软开关的接入,使得二类负荷、一般负荷的恢复比例大幅上升,反映了整个配电网的恢复力提高。

表4 场景1中不同等级负荷恢复情况

Table 4 Load recovery at different levels in scenario 1

| 方案 | 重要负荷恢复比例 | 二类负荷恢复比例 | 一般负荷恢复比例 |
|----|----------|----------|----------|
| 1  | 0.797 5  | 0.373 7  | 0.121 2  |
| 2  | 1        | 0.509 8  | 0        |
| 3  | 1        | 0.321 4  | 0.002 1  |
| 4  | 1        | 0.439 0  | 0        |
| 5  | 1        | 0.956 3  | 0.379 0  |

之后设置故障场景2,其中2个故障发生点分别设置为2-3线路和6-26线路,故障发生的时间与故障场景1相同,用以分析多点故障场景下主动配电网中各种可控设备对故障恢复量和运行状态的提升。故障发生后,除故障线路被隔离外,配电网的其余部分正常运行,且各节点的负荷在确定的功率因数下运行。

与前文分析类似,构建5个典型恢复方案分析可控设备的接入对于负荷恢复情况的影响。各方案中详细的仿真结果如表5所示。通过调度各种可控设备以及用户侧参与调节,能够有效减轻主动配电网故障后负荷的失电情况。但考虑到线路6-26下级节点仅能通过一条路径进行供电恢复,且此馈线上未设有分布式电源,因此区域内节点26-33均为失电状态。对比方案2、3和原始方案1,在接入储能、可平移负荷后故障恢复量仍提升有限,且可平移负荷并未影响重要负荷的供电恢复指标,其本质原因是缺乏有效的故障恢复路径。对比方案3和方案4,联络开关的动作能够有效沟通失电区域26-33,使得在节点27上的重要负荷优先恢复供电,同时有效降低网络的运行损耗,但整体负荷恢复比例仍旧较低。在方案5中,随着三端智能软开关的接入,使得节点26-33具有通过智能软开关恢复供电的可能,因此故障恢复的负荷恢复量有明显提升,且重要负荷恢复比例达到100%。对比4个恢复方案,与之前的分析结果相似,验证了本文所提出方法的有效性以及智能软开关的高效性。

最后构建故障场景3,用以验证短时故障场景下主动配电网中可控设备的快速应对对故障恢复的影响。故障发生点设置为2-3处线路,故障发生的时间为18:00,在19:00时恢复正常运行方式,总失电时间为1h,在此时段内进行分析。考虑故障发生与消除的时间较短,因此,用户侧的响应速度不能满足主动配电网源荷平衡的实时需求,故在此场景下可平移负荷并未参与到主动配电网的故障恢

复过程中。此时在主动配电网中仅考虑能够快速响应系统净负荷变化的设备,主要包括储能设备和智能软开关。构建4个典型恢复方案进行分析可控设备的接入对于负荷恢复情况的影响。

表5 场景2中可控设备对主动配电网故障恢复的影响

Table 5 Influence of controllable equipment on fault recovery of active distribution network in scenario 2

| 方案 | 负荷恢复量/(kW·h) | 重要负荷恢复比例 | 系统运行损耗/(kW·h) | 智能软开关运行损耗/(kW·h) | 最大电压偏差/p.u. |
|----|--------------|----------|---------------|------------------|-------------|
| 1  | 2 689.42     | 0.513 2  | 976.27        |                  | 0.023       |
| 2  | 4 580.51     | 0.886 8  | 388.57        |                  | 0.035       |
| 3  | 4 879.69     | 0.886 8  | 626.07        |                  | 0.043       |
| 4  | 5 102.68     | 0.894 3  | 137.65        |                  | 0.041       |
| 5  | 9 138.70     | 1        | 825.93        | 102.86           | 0.093       |

方案1:不接入可控设备,分析故障恢复后的总负荷恢复量。

方案2:调度储能设备,分析故障恢复后的总负荷恢复量。

方案6:在方案2的基础上进一步调度传统联络开关,分析故障恢复后的总负荷恢复量。

方案7:在方案2的基础上进一步调度三端智能软开关,用以替代传统的联络开关,分析故障恢复后的总负荷恢复量。

各方案中详细的仿真结果如表6所示。可以看出,储能设备、联络开关和智能软开关均能够有效满足主动配电网负荷恢复实时性的要求,反映为负荷恢复量的提升。但提升最为明显的仍为三端智能软开关,因为电力电子装备具有高效低损耗的特性,且能够有效沟通多条馈线,优化运行状态。因此,相较于未装设任何可控设备的配电网,主动配电网具备较强的故障恢复能力,可靠性较高。

表6 场景3中可控设备对主动配电网故障恢复的影响

Table 6 Influence of controllable equipment on fault recovery of active distribution network in scenario 3

| 方案 | 负荷恢复量/(kW·h) | 系统运行损耗/(kW·h) | 智能软开关运行损耗/(kW·h) | 最大电压偏差/p.u. |
|----|--------------|---------------|------------------|-------------|
| 1  | 826.24       | 288.21        |                  | 0.095       |
| 2  | 1 260.51     | 58.06         |                  | 0.095       |
| 6  | 1 318.54     | 39.05         |                  | 0.078       |
| 7  | 2 277.81     | 211.94        | 28.47            | 0.068       |

## 5 结语

面向配电网故障发生后的供电恢复过程,结合

主动配电网改造升级的现状,本文提出了一种考虑可平移负荷和智能软开关接入的故障恢复方法。通过在改进的IEEE 33节点算例上进行仿真分析,得到以下结论。

1) 所提出的主动配电网故障恢复模型,能够有效评估故障处理后配电网的运行情况以及负荷恢复情况,通过在目标函数中引入负荷权重指标,能够有效实现对重要负荷供电的故障恢复,保证重要用户的供电。同时,在负荷恢复完成后,通过进一步考虑网络运行损耗指标和节点电压偏差指标,有效提升主动配电网的运行状态,保证故障发生后网络运行的经济性和稳定性。

2) 通过可平移负荷和智能软开关的接入,有效提升了主动配电网在故障发生后的负荷恢复量。相较于传统的联络开关,智能软开关主要针对源荷在空间上分布不均衡的问题,在故障后,有效连通的不同馈线,使功率合理分布,有效增加了负荷的恢复量。可平移负荷作为用户侧的可调度资源,通过在时间上的合理规划,实现了最优的时序分配,满足故障恢复的实际需求。但可平移负荷具有一定的时滞性,因此在短时故障的场景下不适用。

#### 参考文献:

- [1] 范敏,杨青,郭祥富,等.面向不平衡数据的配电网故障停电预测方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(8):96-106.  
FAN Min, YANG Qing, GUO Xiangfu, et al. Prediction method of power outage in a distribution network for unbalanced data[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 96-106.
- [2] 孙守晶,丛伟,邱吉福,等.含智能软开关的智能配电网分布式供电恢复方法[J].电力系统自动化,2022,46(8):79-85.  
SUN Shoujing, CONG Wei, QIU Jifu, et al. Distributed power restoration method for smart distribution network with soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 79-85.
- [3] 潘俊迪,陈中,倪纯奕,等.基于无模型自适应控制的配电网电压控制方案[J].电力工程技术,2023,42(5):128-137.  
PAN Jundi, CHEN Zhong, NI Chunyi, et al. Distribution network voltage control scheme based on model-free adaptive control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 128-137.
- [4] 杨权,梁永昌,魏建荣,等.多谐波源下分布式电源并网逆变器的谐波抑制策略[J].电工技术学报,2023,38(11):2908-2920.  
YANG Quan, LIANG Yongchang, WEI Jianrong, et al. Research on harmonic suppression strategy of grid connected inverter under multi-harmonic sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11): 2908-2920.
- [5] 朱卫涛,邹文文,贾钦,等.基于DWT-SOM-HFS的配电台区短期负荷预测研究与应用[J].智慧电力,2023,51(6):78-85.  
ZHU Weitao, ZOU Wenwen, JIA Qin, et al. Research and application of short term load forecasting in distribution station area based on DWT-SOM-HFS[J]. Smart Power, 2023, 51(6): 78-85.
- [6] 杨鹏,郁丹,郭雨涵,等.考虑需求侧响应的新能源消纳优化模型研究[J].供用电,2022,39(11):79-86.  
YANG Peng, YU Dan, GUO Yuhuan, et al. Optimization model of new energy accommodation considering demand response[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(11): 79-86.
- [7] 刘建伟,李学斌,刘晓鸥.有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J].发电技术,2022,43(3):476-484.  
LIU Jianwei, LI Xuebin, LIU Xiaou. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 476-484.
- [8] 刘家好,沈冰,周健,等.计及关键负荷功能恢复需求的韧性城市配电网恢复方法[J].电力建设,2022,43(8):66-75.  
LIU Jiayu, SHEN Bing, ZHOU Jian, et al. Distribution system restoration method considering the function restoration requirements of critical loads[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(8): 66-75.
- [9] 符杨,蒋一鑫,李振坤,等.计及可平移负荷的微网经济优化调度[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2612-2620.  
FU Yang, JIANG Yiliu, LI Zhenkun, et al. Optimal economic dispatch for microgrid considering shiftable loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2612-2620.
- [10] 董旭柱,黄邵远,陈柔伊,等.智能配电网自愈控制技术[J].电力系统自动化,2012,36(18):17-21.  
DONG Xuzhu, HUANG Shaoyuan, CHEN Rouyi, et al. Self-healing control technology for smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 17-21.
- [11] 罗欢,周步祥,王小红,等.计及负荷分级与孤岛运行的配电网供电恢复策略[J].电测与仪表,2015,52(13):116-123.  
LUO Huan, ZHOU Buxiang, WANG Xiaohong, et al. Service restoration of distribution grid with load classification and isolated island operation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(13): 116-123.
- [12] 刘思聪,周步祥,宋洁,等.考虑分布式电源出力随机性的多目标故障恢复[J].电测与仪表,2018,55(2):123-128.  
LIU Sicong, ZHOU Buxiang, SONG Jie, et al. Multi-objective fault restoration considering the randomness of the output of distributed generator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(2): 123-128.
- [13] 刘刚,陈莎,全进,等.含分布式电源接入的配电网故障

- 恢复方法[J].电测与仪表,2020,57(18):50-56.
- LIU Gang, CHEN Sha, TONG Jin, et al. Fault restoration method for power distribution networks considering distributed generations[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(18): 50-56.
- [14] 王长瑞,刘军娜,杨琨,等.一种基于Petri网模型的配电网故障恢复算法[J].电测与仪表,2018,55(13):25-30.
- WANG Changrui, LIU Junna, YANG Kun, et al. A Petri nets based power distribution network restoration algorithm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(13): 25-30.
- [15] 范瑞娟,王倩,罗强.一种配电网故障恢复快速拓扑和潮流计算方法[J].电力系统保护与控制,2014,42(21):23-28.
- FAN Ruijuan, WANG Qian, LUO Qiang. A fast topology analysis and power flow calculation algorithm for distribution network service restoration[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(21): 23-28.
- [16] 杨行.主动配电网中分布式电源与智能软开关优化配置[D].北京:华北电力大学,2020.
- YANG Hang. Optimal configuration of distributed generation and soft open point in active distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [17] 刘莉,陈学锋,翟登辉.智能配电网故障恢复的现状与展望[J].电力系统保护与控制,2011,39(13):148-154.
- LIU Li, CHEN Xuefeng, ZHAI Denghui. Status and prospect of service restoration in smart distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(13): 148-154.
- [18] JI H R, WANG C S, LI P, et al. SOP-based islanding partition method of active distribution networks considering the characteristics of DG, energy storage system and load[J]. *Energy*, 2018, 155: 312-325.
- [19] LIU W X, FU M D, YANG M Y, et al. A Bi-level interval robust optimization model for service restoration in flexible distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 1843-1855.
- [20] LI P, JI J, JI H R, et al. Self-healing oriented supply restoration method based on the coordination of multiple SOPs in active distribution networks[J]. *Energy*, 2020, 195: 116968.
- [21] 杨珮鑫,张沛超.分布式电源并网保护研究综述[J].电网技术,2016,40(6):1888-1895.
- YANG Peixin, ZHANG Peichao. A survey on interconnection protection of distributed resource[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(6): 1888-1895.
- [22] 刘家好,马佳骏,王颖,等.多源协同的智能配电网故障恢复次序优化决策方法[J].电力建设,2020,41(6):100-106.
- LIU Jiayu, MA Jiajun, WANG Ying, et al. Restoration sequence decision-making for smart distribution system considering multiple sources coordination[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(6): 100-106.
- [23] 李丝雨,张彼德,彭丽维,等.考虑柔性负荷调节能力的主动配电网动态孤岛划分策略[J].高电压技术,2019,45(6):1835-1842.
- LI Siyu, ZHANG Bide, PENG Liwei, et al. Dynamic island partitioning strategy for active distribution network considering adjustment ability of flexible load[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(6): 1835-1842.
- [24] 李伟,韩瑞迪,孙晨家,等.基于用电偏好的可平移负荷参与需求响应最优激励合同与激励策略[J].中国电机工程学报,2021,41(S1):185-193.
- LI Wei, HAN Ruidi, SUN Chenjia, et al. Optimal incentive contract and incentive strategy of translatable load participating in demand response based on power consumption preference[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(S1): 185-193.
- [25] 李振坤,岳美,胡荣,等.计及分布式电源与可平移负荷的变电站优化规划[J].中国电机工程学报,2016,36(18):4883-4893+5112.
- LI Zhenkun, YUE Mei, HU Rong, et al. Optimal planning of substation considering distributed generation and shiftable loads[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(18): 4883-4893+5112.
- [26] 胡荣,张宓璐,李振坤,等.计及可平移负荷的分布式冷热电联供系统优化运行[J].电网技术,2018,42(3):715-721.
- HU Rong, ZHANG Milu, LI Zhenkun, et al. Optimal operation for CCHP system considering shiftable loads[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(3): 715-721.
- [27] 宋关羽.面向多运行场景的智能配电网软开关运行与规划方法[D].天津:天津大学,2017.
- SONG Guanyu. Operation and planning method of soft open point for multiple scenarios in active distribution network[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [28] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [29] 于文山,黎明,由蕤.含储能的三端SOP对主动配电网的潮流优化研究[J].太阳能学报,2022,43(3):101-110.
- YU Wenshan, LI Ming, YOU Rui. Power flow optimization study on active distribution network based on three-terminal SOP with energy storage system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(3): 101-110.
- [30] LI P, JI H R, WANG C S, et al. Coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(4): 1430-1442.
- [31] LOFBERG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB[C]//2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, China, 2005.