

引用格式:夏周武,马文祚,杨德昌.考虑三端智能软开关与孤岛划分结合的主动配电网故障恢复研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):124-133.
Citation: XIA Zhouwu, MA Wenzuo, YANG Dechang. Fault recovery strategy of active distribution network considering the coordination between islanding partition and three-terminal intelligent soft open point[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 124-133.

考虑三端智能软开关与孤岛划分结合的 主动配电网故障恢复研究

夏周武¹, 马文祚¹, 杨德昌²

(1. 国网冀北电力有限公司, 北京 100054; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要:配电网中接入分布式电源和智能软开关后,其形态和特征发生了明显的变化,并逐步演变为主动配电网。在故障恢复阶段,通过对失电区域进行孤岛划分提升配电网中负荷的恢复率,是提高主动配电网供电可靠性的重要环节之一。为此,提出一种三端智能软开关和孤岛划分相配合的主动配电网故障恢复方法。首先,建立基于分布式电源供电能力的时序孤岛划分模型,并考虑相邻孤岛的结合方案;然后,分析智能软开关的接入对主动配电网故障恢复和三端智能软开关不同接入位置的影响,通过二阶锥转化,将难以求解的非线性问题转化为标准二阶锥模型并求解;最后,以改进 IEEE 33 节点主动配电网算例进行分析,验证该文所提方法的有效性。

关键词:主动配电网;故障恢复;孤岛划分;三端智能软开关;量化分析

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.014 **中图分类号:** TM863 **文章编号:** 1673-9140(2024)02-0124-10

Fault recovery strategy of active distribution network considering the coordination between islanding partition and three-terminal intelligent soft open point

XIA Zhouwu¹, MA Wenzuo¹, YANG Dechang²

(1. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100054, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The integration of distributed generation and intelligent soft open points into the distribution network has led to significant changes in its form and characteristics, gradually evolving into an active distribution network. Improving the load recovery rate in the power outage area through island partitioning is a crucial aspect of enhancing the reliability of active distribution networks during the fault recovery stage. Therefore, a fault recovery method is proposed for active distribution networks, which combines three-terminal intelligent soft open points with island partitioning. Firstly, a time-series island partitioning model based on the power supply capacity of distributed generation is established, considering the combination scheme of adjacent islands. Then, the impact of the access of intelligent soft open points on the fault recovery of active distribution networks and the influence of different access positions of three-terminal intelligent soft open points are analyzed. Through second-order cone transformation, the nonlinear problem difficult to solve is converted into a standard second-order cone model and solved. Finally, an improved IEEE 33-node active distribution network is used for analysis to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: active distribution network; fault recovery; island partition; three-terminal intelligent soft open point; quantitative analysis

大量分布式发电(distributed generation, DG)电源的接入显著地改变了配电网的形态和特征,配电网已逐步转化为潮流分布更加复杂的主动配

网(active distribution network, ADN)^[1]。在主动配电网线路发生故障恢复后,调度人员必须进行故障恢复过程。故障恢复过程是指:配电网故障发生后

收稿日期:2023-02-28;修回日期:2023-08-30

基金项目:国网冀北电力有限公司管理咨询项目(SGJB0000BGWT2250011);国家自然科学基金面上项目(51977212)

通信作者:杨德昌(1983—),男,博士,副教授,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

通过确定最优的开关组合方案,以恢复失电负荷最多、开关操作次数最少以及网损最小为目标,满足恢复后配电网连通性、辐射状和安全性等条件,对配电网中各负荷节点进行恢复供电的过程^[2-3]。

传统的配电网在故障发生后,依靠监控终端等设备进行故障定位,进而通过保护装置进行故障隔离,最终实现供电恢复,其电能来源仅为主网。随着分布式电源的接入,失电区域内的负荷既可以通过主网相连线路进行恢复供电,又可以通过临近区域内的分布式电源就近恢复供电^[4-5]。因此,在故障发生后,一个可行的调度方案是:在主动配电网中构建多个呈孤岛运行状态的区域,对部分负荷进行快速恢复供电^[6-9]。通过合理划分孤岛区域,能够有效满足区域内用户的负荷需求,提升供电可靠性。

考虑主动配电网中的可控设备调节能力不断增强,且传统的开关操作会产生大量的运行损耗,因此,以智能软开关(soft open point, SOP)逐步替代传统的联络开关已成为一个必然的趋势^[10-11]。传统的联络开关多为两端型结构,考虑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。三端智能软开关相较于传统的联络开关具有响应速度快、损耗小等特点,且能够有效实现多个区域间的功率交换。故障发生后也可通过调整各端换流器的运行策略,满足负荷恢复供电的需求,快速响应不同时段的孤岛划分方案。同时,三端智能软开关的接入为主动配电网带来了供电可靠性的提升,但也为配电网稳态分析的建模带来了新的挑战,因此,需要进一步分析故障恢复过程中三端智能软开关对负荷恢复量的影响。

目前,学术界已经广泛地开展了故障恢复的相关研究。文献[12]针对分布式电源及多种可控设备接入配电网后,故障恢复过程中实现自愈的可能性进行展望,并对以电力电子设备为核心的智能装置的研究重点和难点进行展望;文献[13]提出了一种考虑重要负荷优先恢复供电的故障恢复方法,以线路容量为判据生成孤岛划分方案;文献[14]考虑了分布式电源输出功率的随机性对配电网负荷恢复的孤岛划分方法,并建立了分布式电源的机会约束模型。但文献[13]、[14]中所提出的方法均存在运算量大、维度较高的问题。文献[15]进一步提出了考虑多微网运行的故障恢复策略,其方法优点在于求解速度快、精度高,但相关模型未考虑临近孤岛相互融合并进一步合并的情况;文献[16]提出以

功率平衡为故障发生后的孤岛划分原则,以尽可能多地恢复负荷供电为目标求解孤岛范围,但并未考虑分布式电源负荷需求的动态平衡问题,难以保证孤岛运行的安全性和可靠性。

综上所述,目前主动配电网关于故障恢复的研究中大多单独考虑孤岛划分过程,对诸如三端智能软开关可控设备的协同优化考虑较少;同时,现有方法针对分布式电源的建模较为复杂,孤岛划分模型存在运算量大等问题;最后,现有的研究大多针对负荷恢复总量进行优化,并未全面考虑孤岛划分后进行系统运行状态的进一步优化。针对以上问题,在充分考虑智能软开关的接入后,本文提出一种三端智能软开关和孤岛划分相配合的主动配电网故障恢复方法。首先,建立基于分布式电源供电能力的时序孤岛划分模型,并考虑相邻孤岛的动态结合方案;然后,分析智能开关的接入对主动配电网故障恢复和不同接入位置对故障恢复和孤岛方案的影响,再通过二阶锥转化,将难以求解的非线性问题转化为标准二阶锥模型并求解;最后,以改进的IEEE 33节点主动配电网算例进行分析,验证本文所提方法的有效性。

1 主动配电网孤岛划分模型

1.1 分布式电源模型

在故障恢复的过程中,配电网中的分布式电源可以分为2类:可控型和不可控型分布式电源。其中,可控型分布式电源的出力可根据实际运行需求进行调度,因此,在建模过程中可将其视为待求解的状态变量,需要满足其出力的上下限约束。在现有的规划设计中,以集中接入式的光伏、风机为典型的可控型分布式电源大多通过逆变器进行并网,此时其有功和无功功率均可以进行调节,在故障恢复阶段中,一般以1h作为调度其出力的时序步长^[6]。

$$\begin{cases} P_{t,i}^{\text{CDG},\min} \leq P_{t,i}^{\text{DG}} \leq P_{t,i}^{\text{CDG},\max} \\ Q_{t,i}^{\text{CDG},\min} \leq Q_{t,i}^{\text{DG}} \leq Q_{t,i}^{\text{CDG},\max} \\ \sqrt{(P_{t,i}^{\text{DG}})^2 + (Q_{t,i}^{\text{DG}})^2} \leq S_i^{\text{CDG}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P_{t,i}^{\text{DG}}$ 、 $Q_{t,i}^{\text{DG}}$ 分别为 t 时段节点 i 上分布式电源的有功、无功功率; $P_{t,i}^{\text{CDG},\min}$ 、 $P_{t,i}^{\text{CDG},\max}$ 分别为可控型分布式电源的有功功率上、下限; $Q_{t,i}^{\text{CDG},\min}$ 、 $Q_{t,i}^{\text{CDG},\max}$ 分别为可控型分布式电源的无功功率上、下限; S_i^{CDG} 为分布式电源的装机容量。

反之,不可控型分布式电源不能参与到配电网的优化运行中,主要以小水电、电动汽车及农村分

布式光伏为主,此时其有功和无功功率均为预测给出的额定值^[17],因此,不能作为孤岛划分过程中的电源节点按照日前给定的出力曲线进行调度。在接入配电网后,将其视为功率给定的PQ节点,其有功、无功功率可以表示为

$$\begin{cases} P_{t,i}^{\text{DG}} = P_{t,i}^{\text{UDG,Pre}} \\ Q_{t,i}^{\text{DG}} = Q_{t,i}^{\text{UDG,Pre}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P_{t,i}^{\text{UDG,Pre}}$ 、 $Q_{t,i}^{\text{UDG,Pre}}$ 分别为 t 时段不可控型分布式电源有功、无功出力的预测值。

1.2 网络模型

在发生故障后,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。正常运行的配电网^[18]表示为

$$\begin{cases} P_{t,ij} = P_{t,i}^{\text{Node}} + \sum_{k:(j,k) \in L} P_{t,jk} + I_{t,ij}^2 r_{ij} \\ Q_{t,ij} = Q_{t,i}^{\text{Node}} + \sum_{k:(j,k) \in L} Q_{t,jk} + I_{t,ij}^2 x_{ij} \\ v_{t,j}^2 = v_{t,i}^2 - 2(r_{ij} P_{t,ij} + x_{ij} Q_{t,ij}) + I_{t,ij}^2 (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \\ I_{t,ij}^2 v_{t,i}^2 = P_{t,ij}^2 + Q_{t,ij}^2 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)、(4)中, $P_{t,i}^{\text{Node}}$ 、 $Q_{t,i}^{\text{Node}}$ 为节点的净负荷; $P_{t,ij}$ 为 t 时段线路 ij 上传导的有向有功功率; $I_{t,ij}$ 为 t 时段线路 ij 的电流幅值; r_{ij} 为线路 ij 的电阻; $Q_{t,ij}$ 为 t 时段线路 ij 上传导的有向无功功率; x_{ij} 为线路 ij 的电抗; $v_{t,i}$ 为 t 时段节点 i 的电压幅值。

在主动配电网网络模型中,定义0节点作为源节点,节点集合 $N := \{1, 2, \dots, n\}$,节点间的无向线路集合为 L ,连通性约束表征了节点间的连通关系。在辐射状配电网中,节点 i 到源节点之间的路径有且仅有一条,对于每个节点 $i \in N$,定义 $L_i \subseteq L$ 为节点 i 到源节点唯一路径的线路集合。若节点 j 的线路集合 L_j 与 L_i 的交集 $L_i \cap L_j \neq \emptyset$,则证明节点 i 与 j 间连通并可以进行功率交换。同时,整个网络以及划分出的孤岛均应满足辐射状运行^[10]的原则,具体表达式为

$$\begin{cases} \alpha_{t,ij} = \beta_{t,ij} + \beta_{t,ji}, & ij \in \Omega_b \\ \sum_{ij \in \Omega_b} \beta_{t,ij} = 1, & \forall j \in \Omega_n / \Omega_0 \\ \sum_{ij \in \Omega_b} \beta_{t,ij} = 0, & \forall j \in \Omega_0 \\ \alpha_{t,ij} \in \{0, 1\}, & ij \in \Omega_b \\ \beta_{t,ij} \in \{0, 1\}, & ij \in \Omega_b \end{cases} \quad (5)$$

式中, Ω_b 为配电网中所有线路的集合; Ω_n 为系统中

所有节点的集合; Ω_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 t 时段支路 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 t 时段节点 i,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 t 时段节点 i 是 j 的父节点,即功率从节点 i 流向 j , $\beta_{t,ij} = 0$ 则表示 t 时段节点 i 不是 j 的父节点。

为进一步确保配电网的安全运行,节点电压与支路电流均需满足安全约束,具体如下:

$$\begin{cases} v_i^{\min} \leq v_{t,i} \leq v_i^{\max} \\ |I_{t,ij}| \leq I_{ij}^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中, v_i^{\max} 、 v_i^{\min} 分别为节点 i 设定电压值的上、下限; I_{ij}^{\max} 为流过有向线路 ij 的电流幅值上限。

此时需要满足源、荷的动态平衡,以单一节点进行分析,节点上的净负荷为正方向,而电源方向为负方向,数值上可表示为负荷恢复量减去分布式电源的输出功率,即

$$\begin{cases} P_{t,i}^{\text{Node}} = P_{t,i}^{\text{Res}} - P_{t,i}^{\text{DG}} \\ Q_{t,i}^{\text{Node}} = Q_{t,i}^{\text{Res}} - Q_{t,i}^{\text{DG}} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $P_{t,i}^{\text{Res}}$ 、 $Q_{t,i}^{\text{Res}}$ 分别为 t 时段节点 i 的有功、无功负荷恢复量。

1.3 孤岛构建模型

现有的故障恢复方案存在计算数据量大、生成速度较慢的问题,本文通过基于功率圆的计算方法,实现主动配电网内孤岛区域的快速构建,以分布式电源的预测功率、日前拟定的调度曲线作为依据,事先生成多个时段的孤岛划分方案,并在故障时直接进行拓扑结构调用,降低孤岛生成过程的计算复杂性。其中,分析步长一般以1h为宜。

功率圆是以所确定的可控型分布式电源直接相连的负荷节点为圆心,以分布式电源的发电功率为半径形成的圆,圆内所包含负荷点所形成的区域,即为DG电源所构建孤岛能够辐射的最大范围。进一步考虑DG电源和负荷的时序特性,构建多时段的方案,当DG电源的功率发生变化时,所得出的孤岛方案也随之变化。

以单个时段为例,利用上述DG电源模型和网络模型,通过功率圆方法进行初步的孤岛区域划分。考虑DG电源成为孤岛内供电的唯一电源,需要足够的无功功率支持,因此在孤岛划分的计算过程中,需要分别考虑有功、无功功率的限制,两者取交集。针对多个时段,DG电源输出的功率在计算过程中采用预测值,负荷功率同样采用预测值,线

路传输容量为额定值。本文以 1 h 作为孤岛划分的步长,即每个孤岛划分的方案维持时长为 1 h,用以匹配不同时间段的负荷需求和分布式电源的出力波动。

功率圆如图 1 所示,其中负荷节点 1 处接入功率为 1 的分布式电源,括号内表示网络中各负荷的功率,则功率圆所包围区域内的节点可划分为一个孤岛。在孤岛划分时,仅以单个分布式电源作为电源具有局限性,不能充分利用 DG 电源的发电功率。因此,进一步通过孤岛融合策略对相邻孤岛进行合并操作,孤岛融合过程如图 2 所示。

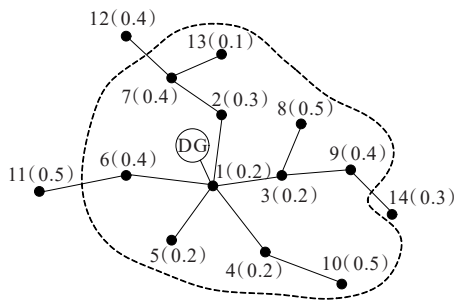
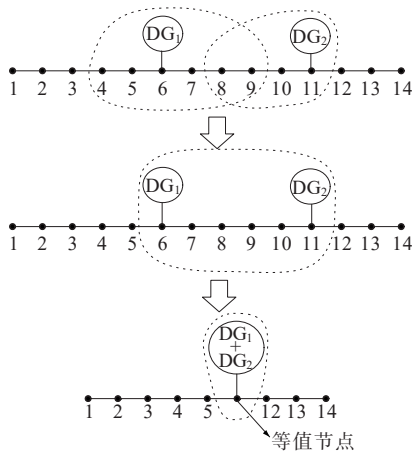
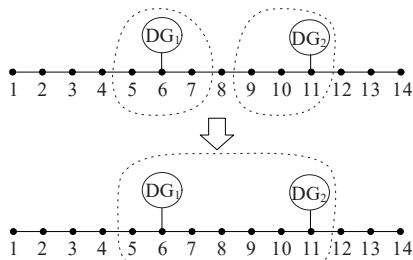


图 1 功率圆

Figure 1 Diagram of power string



(a) 孤岛划分存在交集时



(b) 孤岛划分不存在交集时

图 2 孤岛融合过程

Figure 2 Process of island fusion

1) 以每个分布式电源为中心,利用遍历搜索的方式进行初步的孤岛划分方案;

2) 当 2 个相邻孤岛划分存在交集时,将孤岛内 2 个分布式电源连通路径上全部节点合并;

3) 以等值节点为电源节点,再次计算孤岛范围,并重复步骤 2) 直至所有孤岛没有交集;

4) 重新计算划分出的孤岛的供电能力,校验此时是否满足有功、无功功率的约束条件;若满足,则进行孤岛融合,否则,取消孤岛融合,恢复至最初孤岛方案。

2 三端智能软开关的接入对故障恢复的影响

在故障情况下,基于全控型电力电子器件的智能软开关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;同时,其接入并不改变原有配电网的短路容量^[10]。配电网发生故障后经故障定位和故障隔离后形成失电区域。智能软开关由于其快速调节传输功率的特性,因此,能够有效配合故障恢复、孤岛划分等较长时间尺度的优化调度,有效回避了联络开关带来的时间尺度不匹配的问题。三端智能软开关作为取代联络开关的配电装置,其用作供电恢复并不能对整个系统中任意失电区域产生影响,仅可调节其接入节点的净负荷。配电网故障后经故障定位和故障隔离所形成的失电区域,依据智能软开关的接入位置可分为 4 种场景:①智能软开关三端均在失电区域外;②智能软开关一端在失电区域内,两端在失电区域外;③智能软开关两端在失电区域内,一端在失电区域外;④智能软开关三端均在失电区域内。

依据智能软开关的控制模式与作用机理,可知在三端智能软开关用于供电恢复问题,其本身无法产生有功功率,其一端(或两端)必须连接非失电区域,用以获得有功功率的支持;另两端(或一段)需连接失电区域,为其提供电压支持,即场景 2、3,此时三端智能软开关对当前故障形成的失电区域进行供电恢复是有效的。而对于场景 1、4,分布式电源无法沟通失电区域和外部区域,因此,在此场景下 DG 电源不能形成故障恢复策略,仅可完成诸如网损优化等运行目标。

同时,智能软开关的接入会影响孤岛划分方案,以场景 2、3 为例,当智能软开关电源侧功率充裕时,此时智能软开关能够提供功率支持。在失电区域内,可以将其视为一个功率为智能软开关额定功

率的电源,此时可在智能软开关的接入节点进行孤岛划分。针对场景1、4,失电区域内的智能软开关与联络开关的作用类似,为供电恢复提供了一条新的路径,孤岛划分方案中可将智能软开关视为一个传输功率有限的线路。因此,在主动配电网中,智能软开关的接入位置对于故障恢复过程具有一定的影响。在辐射状供电的配电网中,一般将三端智能软开关的接入位置置于末端节点处,用以保证智能软开关在故障恢复过程中的有效性。

以图3为例,三端智能软开关接入位置为末端节点8、9、17,当线路5-6发生接地故障后,线路保护动作,三端智能软开关可以实现不同馈线间的联络,通过下方2条馈线对末端节点7-8所带负荷进行供电,有效提升了系统的负荷恢复量。

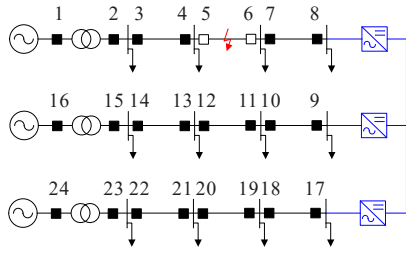


图3 考虑三端智能软开关的故障恢复

Figure 3 Fault recovery considering three-terminal soft open point

在主动配电网中接入三端智能软开关后,式(7)应修改为

$$\begin{cases} P_{t,i}^{\text{Node}} = P_{t,i}^{\text{Res}} - P_{t,i}^{\text{DG}} - P_{t,i}^{\text{SOP}} \\ Q_{t,i}^{\text{Node}} = Q_{t,i}^{\text{Res}} - Q_{t,i}^{\text{DG}} - Q_{t,i}^{\text{SOP}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $P_{t,i}^{\text{SOP}}$ 、 $Q_{t,i}^{\text{SOP}}$ 分别为 t 时段节点 i 上智能软开关的有功、无功功率。

以智能软开关向电网注入功率为正方向,同时,三端智能软开关需要满足自身的运行约束,考虑智能软开关的运行损耗后可表示为

$$\begin{aligned} P_i^{\text{SOP}} + P_j^{\text{SOP}} + P_h^{\text{SOP}} + P_i^{\text{SOP,L}} + \\ P_j^{\text{SOP,L}} + P_h^{\text{SOP,L}} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_i^{\text{SOP,L}} = A_i^{\text{SOP}} \sqrt{(P_i^{\text{SOP}})^2 + (Q_i^{\text{SOP}})^2} \\ P_j^{\text{SOP,L}} = A_j^{\text{SOP}} \sqrt{(P_j^{\text{SOP}})^2 + (Q_j^{\text{SOP}})^2} \\ P_h^{\text{SOP,L}} = A_h^{\text{SOP}} \sqrt{(P_h^{\text{SOP}})^2 + (Q_h^{\text{SOP}})^2} \\ \sqrt{(P_i^{\text{SOP}})^2 + (Q_i^{\text{SOP}})^2} \leq S_i^{\text{SOP}} \\ \sqrt{(P_j^{\text{SOP}})^2 + (Q_j^{\text{SOP}})^2} \leq S_j^{\text{SOP}} \\ \sqrt{(P_h^{\text{SOP}})^2 + (Q_h^{\text{SOP}})^2} \leq S_h^{\text{SOP}} \end{cases} \quad (10)$$

式中, i,j,h 分别为三端智能软开关接入网络的节点位置; P_i^{SOP} 、 Q_i^{SOP} 分别为接在节点 i 上智能软开关传输的有功和无功功率; $P_i^{\text{SOP,L}}$ 为接在节点 i 上智能软开关的损耗; A_i^{SOP} 为接在节点 i 上智能软开关的损耗系数; S_i^{SOP} 为接在节点 i 上智能软开关的容量。

3 主动配电网故障恢复模型及二阶锥转化

上述考虑三端智能软开关和孤岛划分相结合的主动配电网稳态分析模型中,具有大量的二次、非线性元素,因此,通过简单的求解方法难以得到全局最优解,需要采用有效的方法对模型进行处理^[18-19]。本文采取二阶锥转化技术对该模型进行凸松弛,所构建的模型以及二阶锥转化过程如下。

3.1 主动配电网故障恢复模型

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;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一步的优化,实现多个运行目标。例如,在保证负荷恢复之后,再进一步考虑降低损耗、改善电能质量等问题。因此,可以通过大 M 法构建多运行目标,即优先满足负荷恢复需求,之后对配电网的运行状态进行进一步的优化,其数学模型为

$$\begin{cases} \min f = Mf_D + f_L + f_V \\ \text{s.t. (1)~(6), (8)~(10)} \end{cases} \quad (11)$$

式中, f 为构建的多目标函数; M 为一个较大的常数,一般可取100; f_D 为负荷失电量降低目标函数; f_L 为系统损耗降低目标函数; f_V 为降低电压偏差的目标函数。子目标函数求解表达式为

$$\begin{cases} f_D = \sum_{t=1}^{N_T} \left(\sum_{i=1}^{N_N} (P_{t,i}^{\text{Load}} - P_{t,i}^{\text{Res}}) \right) \Delta t \\ f_L = \sum_{t=1}^{N_T} \left(\sum_{ij \in \Omega_b} r_{ij} I_{t,ij}^2 + \sum_{i=1}^{N_N} P_{t,i}^{\text{SOP,L}} \right) \Delta t \\ f_V = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_N} |v_{t,i}^2 - 1| : (v_{t,i} \geq \bar{v}_{\text{thr}} \vee v_{t,i} \leq \underline{v}_{\text{thr}}) \end{cases} \quad (12)$$

式中, Δt 为故障恢复时段; \bar{v}_{thr} 、 $\underline{v}_{\text{thr}}$ 分别为节点电压波动优化区间的上、下限。

3.2 二阶锥转化

上述模型属于大规模非线性数学问题,根据文献[10]中所述,在忽略配电网中存在的三相不平衡

的前提下,可通过引入二阶锥规划方法采用现有的求解器进行高效求解。针对主动配电网的优化运行模型进行锥模型转化,主要分为以下3步。

1) 引入新的优化变量,即节点电压幅值的平方 u_i 、支路电流幅值的平方 i_{ij} ,用以简化潮流约束。通过变量替换的方式,消去目标函数和约束条件中节点电压和支路电流的二次项,式(3)、(4)、(6)可转化为

$$\begin{cases} P_{t,ij} = p_{i,i}^{\text{Node}} + \sum_{k:(j,k) \in L} P_{t,jk} + i_{t,ij} r_{ij} \\ Q_{t,ij} = q_{i,i}^{\text{Node}} + \sum_{k:(j,k) \in L} Q_{t,jk} + i_{t,ij} x_{ij} \\ u_{t,i} = u_{t,i} - 2(r_{ij} P_{t,ij} + x_{ij} Q_{t,ij}) + i_{t,ij} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \\ i_{t,ij} u_{t,i} = P_{t,ij}^2 + Q_{t,ij}^2 \end{cases} \quad (13)$$

$$i_{t,ij} u_{t,i} = P_{t,ij}^2 + Q_{t,ij}^2 \quad (14)$$

$$\begin{cases} (v_i^{\min})^2 \leq u_{t,i} \leq (v_i^{\max})^2 \\ i_{t,ij} \leq (I_{ij}^{\max})^2 \end{cases} \quad (15)$$

2) 系统潮流约束式经变量替换后仍为二次非线性约束,考虑到目标函数中有 i_{ij} 的严格增函数项 f_L ,可将约束(4)锥松弛为二阶锥约束形式:

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ i_{ij} - u_i \end{array} \right\|_2 \leq i_{ij} + u_i \quad (16)$$

同时,对智能软开关的容量约束和损耗计算式(10)进行锥转化,可表示为

$$(P_i^{\text{SOP}})^2 + (Q_i^{\text{SOP}})^2 \leq 2 \frac{P_i^{\text{SOP,L}}}{\sqrt{2} A_i^{\text{SOP}}} \cdot \frac{P_i^{\text{SOP,L}}}{\sqrt{2} A_i^{\text{SOP}}} \quad (17)$$

$$(P_i^{\text{SOP}})^2 + (Q_i^{\text{SOP}})^2 \leq 2 \frac{S_i^{\text{SOP}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{S_i^{\text{SOP}}}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

经过上述步骤,所构建的模型由难以求解的非线性规划模型转换为二阶锥规划模型,可以调用成熟的数学分析模型进行计算。相关可行性已在文献[18-20]中加以证明,在此不做赘述。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

为验证本文所提方法的有效性以及分析可控设备的接入对主动配电网故障恢复过程中负荷恢复量的提升情况,采用改进IEEE 33节点算例^[21]进行分析,如图4所示。线路传输容量上限设置为 $8 \text{ MV} \cdot \text{A}$,节点电压上下限区间设置为 $1.1 \sim 0.9 \text{ p.u.}$;系统的基础容量设置为 $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$,采用标么值进行计算。

为充分考虑可控型分布式电源的高渗透率接入,设置光伏机组接入点为节点12、18,容量均为

$400.0 \text{ kV} \cdot \text{A}$,其换流器功率因数均设置为0.9;设置风机接入点为节点22、25,容量均为 $300.0 \text{ kV} \cdot \text{A}$,其换流器功率因数均设置为0.9;三端智能软开关的接入节点为18、22、33,各端换流器容量均为 $1 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

根据实际运行数据,通过日运行潮流分析方法进行故障恢复分析,时间尺度设置为小时级,即故障发生之后的阶段中,每小时进行一次孤岛划分并调度智能软开关的运行方案。负荷需求以及光伏、风机发电预测曲线如图5所示,由于设置的分布式电源均为可控型,因此,分布式电源运行曲线为输出功率的上限。

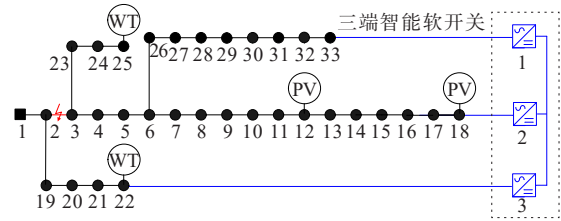


图4 改进的IEEE 33节点算例

Figure 4 Modified IEEE 33 node system

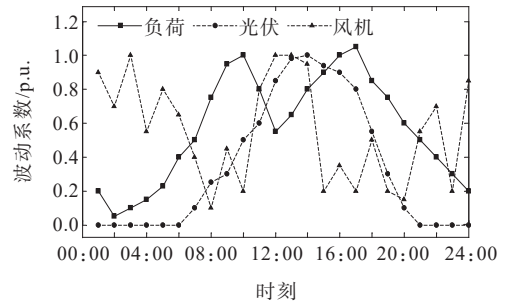


图5 主动配电网的运行曲线

Figure 5 Operation curve of active distribution network

设置故障场景,故障发生点设置为线路2-3处,故障发生时间为10:00,14:00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。考虑馈线19-22可以通过主网进行故障恢复,因此暂不考虑其形成孤岛,仍保持原方式运行。

首先,在MATLAB R2014b环境下编写孤岛划分程序和故障恢复程序,其中故障恢复程序采用孤岛划分结果,通过YALMIP优化工具箱^[22]进行求解计算,所得到的各个时段孤岛结果如图6所示,可以看出,由于10:00—11:00时分布式电源出力的波动系数较低,而负荷波动系数较高,因此,分布式电源的供电能力仅能涉及较近的区域,形成的孤岛数量少且包含节点数较少。

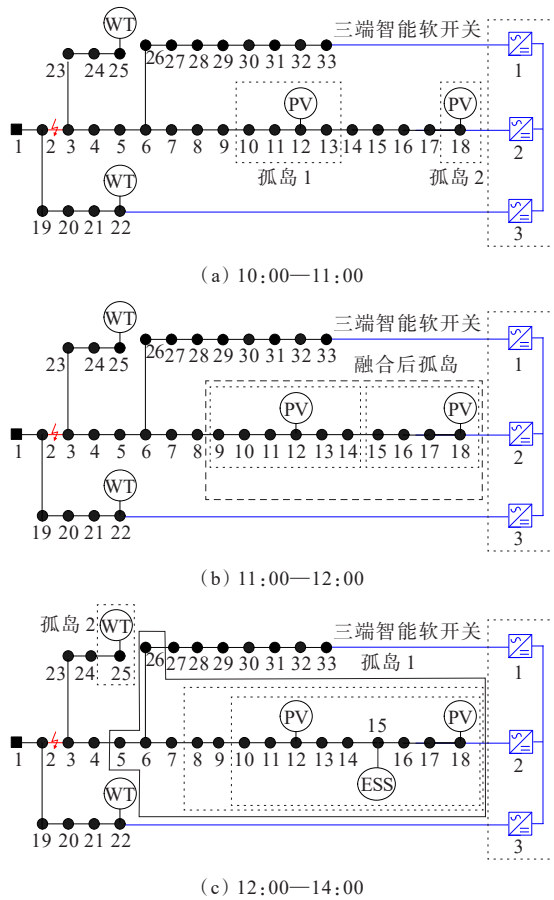


图6 各个时段孤岛划分结果

Figure 6 Results of island partition in each period

一个典型的例子是节点25,虽然接入分布式电源,但风机此时的输出功率较低,并不能完全满足该节点的负荷需求,因此并未形成孤岛。随着光伏出力增加,11:00—12:00时形成的2个孤岛逐步融合,最终形成面积较大的孤岛。1h后风机的出力升高且负荷需求降低,在节点25处形成仅包含一个节点的孤岛。13:00—14:00时设备运行情况与上一时段相比波动不大,因此孤岛结果与上一时段结果相同。

构建3个典型恢复方案,基于图6所构建的孤岛结果,分析不同调节策略以及可控设备的接入对负荷恢复情况的影响。

方案1 不进行孤岛划分,分析故障恢复后的总负荷恢复量和负荷恢复率;

方案2 根据事前计算的孤岛划分结果对主动配电网进行调度,分析故障恢复后的总负荷恢复量和负荷恢复率;

方案3 在方案2的基础上进一步调度三端智能软开关,按原有孤岛运行方案进行调度,分析故障恢复后的总负荷恢复量和负荷恢复率。

假设10:00—14:00时系统线路2-3发生故障,恢复时长为4h。仿真分析后得到的不同调度方案对故障恢复情况的影响如表1所示;各个时段下不同方案的故障恢复情况如表2所示。

表1 不同调度方案对主动配电网故障恢复的影响

Table 1 Effect of different dispatching schemes on fault recovery of active distribution network

方案	负荷总恢复量/ (kW·h)	系统运行损耗/ (kW·h)	岛内负荷恢复率	智能软开关运行损耗/ (kW·h)	最大电压偏差/ p.u.
1	4 235.83	814.84	0.875	—	0.095 2
2	4 105.37	1 192.37	0.878	—	0.095 2
3	7 417.13	662.98	0.983	105.83	0.069 4

表2 不同方案下各时段故障恢复结果

Table 2 Fault recovery results of each period in scheme 1~3

方案1			
故障时段	岛内负荷量/ (kW·h)	负荷恢复量/ (kW·h)	供电恢复率
10:00—11:00	315.00	269.97	0.857
11:00—12:00	540.00	429.52	0.795
12:00—13:00	921.25	836.35	0.908
13:00—14:00	1 088.80	965.01	0.886
方案2			
故障时段	岛内负荷量/ (kW·h)	负荷恢复量/ (kW·h)	供电恢复率
10:00—11:00	315.00	269.97	0.857
11:00—12:00	540.00	431.75	0.800
12:00—13:00	921.25	840.70	0.913
13:00—14:00	1 088.80	971.65	0.892
方案3			
故障时段	岛内负荷量/ (kW·h)	负荷恢复量/ (kW·h)	供电恢复率
10:00—11:00	315.00	269.97	0.857 0
11:00—12:00	540.00	540.00	1.000 0
12:00—13:00	921.25	921.24	1.000 0
13:00—14:00	1 088.80	1 084.70	0.996 6

根据所得到的孤岛结果进行故障恢复,对比方案1、2可以看出,基于分布式电源供电量的孤岛划分方案,能够有效实现负荷的就近恢复。在此故障场景下,大部分负荷都无法从主网通过配电变压器进行供电,因此,孤岛划分能够有效提高岛内负荷的负荷恢复率,但同时存在整体负荷恢复率降低的

情况。从方案 1、2 中数据可以看出,此时孤岛划分后的负荷恢复并未有显著提升。考虑孤岛内不需要进行远距离的电能传输,即能有效避免触及节点电压上下限约束和支路电流上限约束,因此,在最大电压偏差数值上无明显变化;同时,由于此时未调用智能软开关参与运行优化,因此系统运行损耗均维持相对较高的水平。

对比方案 2、3,随着智能软开关的接入,在故障恢复过程中,总负荷恢复量和负荷恢复率呈现增加的趋势,表明此时主动配电网的恢复力不断增加。其主要原因在于,智能软开关连通了失电区域的馈线与未失电区域馈线(19-22 节点区域);同时从中可以看出,相较于方案 2 中的系统运行损耗,方案 3 中的系统运行损耗明显降低,同时最大电压偏差指标相较于方案 2 明显降低。由于智能软开关的参与,其运行损耗数值从 0 变为 105.83 kW·h,但总运行损耗仍较方案 2 呈现降低的结果。其根本原因在于,三端智能软开关在满足供电恢复目标后,对主动配电网的潮流进行优化,使得系统的经济性有所提升。对比方案 2、3,可以看出通过三端智能软开关的优化,在某些时段(如 11:00—13:00)岛内的负荷恢复比例为 100%,有效提高了孤岛内的供电可靠性。

进一步分析智能软开关的接入对孤岛方案的影响,方案 3 中智能软开关的运行策略如图 7 所示。

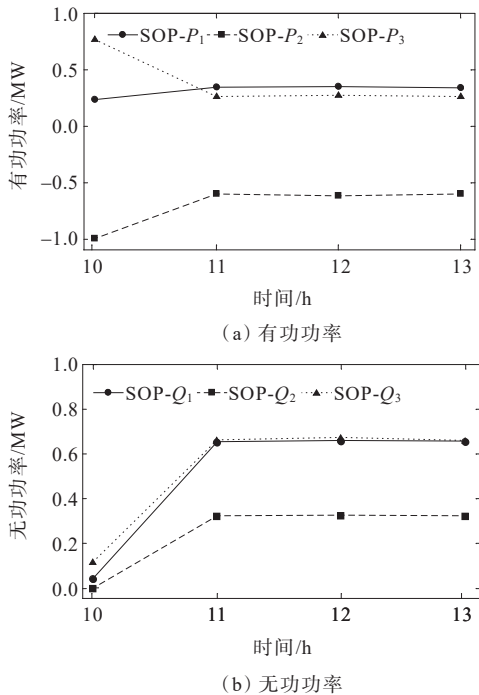


图 7 三端智能软开关的有功和无功功率

Figure 7 Active and reactive power of three-terminal SOP

由图 7 可以看出,三端智能软开关一端在正常运行的馈线中,能够有效将功率传输到另外两端,提高负荷的恢复量。但对比表 1 中方案 2、3 的负荷恢复总量,方案 2 中 10:00—11:00 仍有近 15% 的负荷并未恢复,可以看出负荷恢复的部分主要集中在馈线 26-33 内,因此,在考虑三端智能软开关的接入后,现有的孤岛方案需要进一步迭代优化。

根据文 2 中分析,此时节点 18、33 均可视为孤岛内的源节点,设置经由节点 22 的功率平均分配至节点 18、33,则两端容量为智能软开关传输功率的一半,即 500 kV·A,功率因数可变,此时重新构建含三端智能软开关的孤岛划分方案,如图 8 所示。重新分析主动配电网的故障恢复过程。

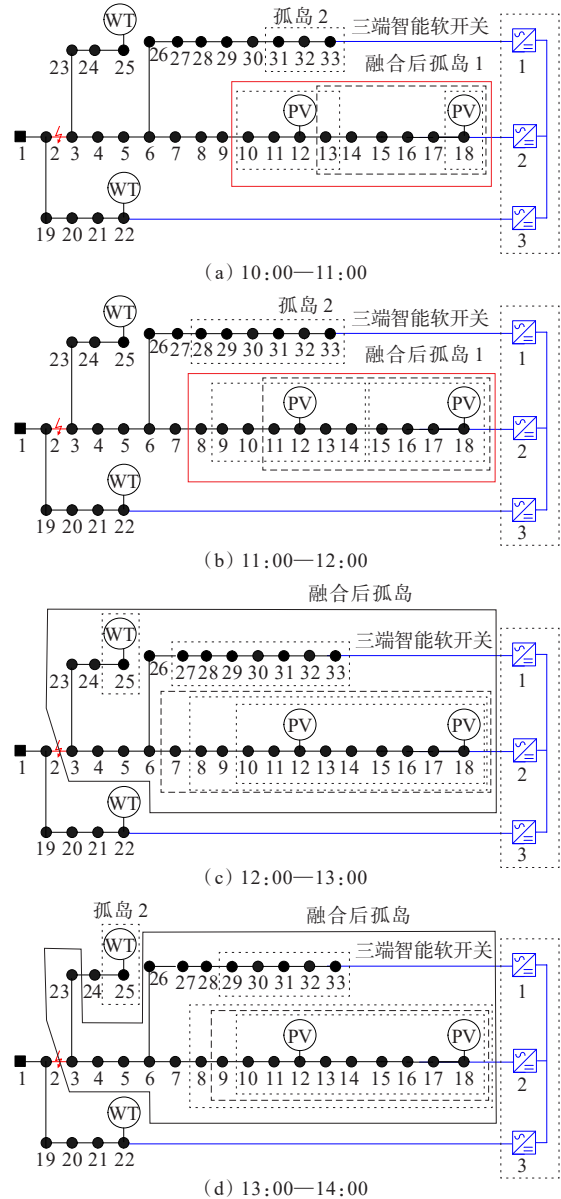


图 8 重新构建后各个时段孤岛划分结果

Figure 8 Results of island partition integrated with SOP in each period

方案4依据三端智能软开关接入后的孤岛方案进行调度,分析故障恢复后的总负荷恢复量和负荷恢复率。

各个时段下故障恢复情况如表3、4所示,可以看出,智能软开关的接入影响了孤岛划分的区域。对比方案3中数据可以看出,考虑三端智能软开关的传输能力,使得划分的孤岛区域更大,同时区内恢复比例均能够达到近100%,使得整体故障恢复时段的岛内负荷恢复率明显提升。既保证了岛内负荷的供电恢复比例,同时岛外负荷的恢复量也有所提升。

表3 方案3、4对主动配电网故障恢复的影响

Table 3 Effect of scheme 3 and 4 on fault recovery of active distribution network

方案	负荷总恢复量/ (kW·h)	系统运行损耗/ (kW·h)	岛内负荷恢复率	智能软开关运行损耗/ (kW·h)	最大电压偏差/ p.u.
3	7 417.13	662.98	0.983	105.83	0.069 4
4	7 654.91	741.98	1.000	101.23	0.071 8

表4 方案4各时段故障恢复结果

Table 4 Fault recovery results of each period in scheme 4

故障时段	岛内负荷量/ (kW·h)	负荷恢复量/ (kW·h)	供电恢复率
10:00—11:00	1 035.00	1 035.00	1.000 0
11:00—12:00	1 340.00	1 340.00	1.000 0
12:00—13:00	1 790.00	1 790.00	1.000 0
13:00—14:00	1 843.00	1 840.00	0.998 4

5 结语

本文通过对主动配电网发生故障后的故障恢复过程进行研究,结合三端智能软开关的接入,通过算例的仿真验证,得到以下主要结论:

1) 本文所提孤岛划分以及孤岛融合方案具有运算量简单的优点,故障发生后通过分布式电源供给临近的负荷,能够有效降低主动配电网中的负荷损失率,有效提升用户的供电恢复率;

2) 随着电力电子技术的提升,三端智能软开关通过实现馈线之间的功率交互,能够有效提升故障恢复效率,提高主动配电网的供电可靠性,同时可以对配电网的运行状态进行优化。通过合理优化孤岛运行的方案,能够使得岛内故障恢复率达到100%。

参考文献:

- [1] 王成山,李鹏.分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J].电力系统自动化,2010,34(2):10-14+23.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):10-14+23.
- [2] 徐艳春,张进,汪平,等.考虑配电网静态电压稳定性的微电网优化配置[J].电力建设,2022,43(8):87-101.
XU Yanchun, ZHANG Jin, WANG Ping, et al. Optimal configuration of microgrid considering static voltage stability of distribution network[J]. Electric Power Construction,2022,43(8):87-101.
- [3] 李豪,马驰,孙菊,等.基于改进BPSO算法的含微网的配电网故障恢复方法研究[J].电测与仪表,2022,59(11):105-110.
LI Hao, MA Chi, SUN Ju, et al. Research on distribution network fault recovery method with micro-grid based on improved BPSO algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(11):105-110.
- [4] 于文鹏,刘东,翁嘉明.含分布式电源的配电网供电恢复模型及改进贪婪算法[J].电力系统自动化,2013,37(24):23-30.
YU Wenpeng, LIU Dong, WENG Jiaming. A power restoring model for distribution network containing distributed generators and improved greedy algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(24):23-30.
- [5] 余墨多,黄文焘,邵能灵,等.逆变型分布式电源并网运行暂态稳定机理与评估方法[J].电工技术学报,2022,37(10):2596-2610.
YU Moduo, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Transient stability mechanism and judgment for inverter interfaced distributed generators connected with public grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022,37(10):2596-2610.
- [6] 陈伯达,林楷东,苏洁莹,等.基于鲁棒规划的综合能源微网孤岛划分方法[J].电力系统自动化,2020,44(10):32-40.
CHEN Boda, LIN Kaidong, SU Jieying, et al. Robust planning based method for integrated energy microgrid island partition[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(10):32-40.
- [7] 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.

- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 宋关羽.面向多运行场景的智能配电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.
- [11] 茹秋实,米雪峰,宋志刚,等.考虑储能-智能软开关的主动配电网混合时间尺度鲁棒优化[J].中国电力,2022,55(9):129-139.
RU Qiushi, MI Xuefeng, SONG Zhigang, et al. Hybrid-timescale robust optimization in active distribution network with energy storage system-soft open point[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 129-139.
- [12] 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 of smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 17-21.
- [13] 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.
- [14] 刘思聪,周步祥,宋杰,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.
- [15] 王旭东,林济铿.基于分支定界的含分布式发电配电网孤岛划分[J].中国电机工程学报,2011,31(7):16-20.
WANG Xudong, LIN Jikeng. Island partition of the distribution system with distributed generation based on branch and bound algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 16-20.
- [16] 陈攀峰,程浩忠,吕佳炜,等.基于二阶锥规划考虑主动管理的主动配电网故障恢复[J].电测与仪表,2019,56(21):46-51.
CHEN Panfeng, CHENG Haozhong, LÜ Jiawei, et al. Fault recovery of active distribution network considering active management based on second-order cone programming[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(21): 46-51.
- [17] 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):1893-1900.
YANG Peixin, ZHANG Peichao. A survey on interconnection protection of distributed resource[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1893-1900.
- [18] JI H, WANG C, LI P, et al. A centralized-based method to determine the local voltage control strategies of distributed generator operation in active distribution networks[J]. Applied Energy, 2018, 228: 2024-2036.
- [19] 张盛,汪李忠,刘航,等.基于混合整数二阶锥规划的恢复供电策略[J].电网与清洁能源,2022,38(3):32-41.
ZHANG Sheng, WANG Lizhong, LIU Hang, et al. Power supply recovery strategy based on mixed integer second order cone programming[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(3): 32-41.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] LOFBERG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in Matlab[C]//IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design, Taipei, China, 2004.