

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191441

# 考虑节点电价机制的主动配电网两阶段动态故障恢复方法

景皓, 贾伯岩, 李小玉, 李璠, 张姿姿, 姬艳鹏

(国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 针对含分布式发电并网的主动配电网故障恢复问题, 考虑系统节点电价机制提出基于两阶段优化的主动配电网故障恢复方法。该方法第一阶段优化以开关状态集为控制变量, 以失电负荷价值最小为目标函数, 计及功率平衡约束, 网络拓扑辐射状约束等必要约束条件。第二阶段优化首先建立配电网节点电价制定机制以及负荷响应模型, 以决定系统节点电价方案的支路容量约束拉格朗日乘子为控制变量, 以支路容量越限量最小为目标函数, 计及节点电价机制约束等约束条件建立模型。最后通过一个仿真算例表明, 考虑节点电价机制的主动配电网故障恢复方案相比于不考虑的情形下故障恢复指标更优, 说明所建立的模型能够降低失电负荷量, 提升系统在故障恢复期间运行的可靠性。

**关键词:** 主动配电网; 故障恢复; 节点电价; 两阶段优化; 需求响应

## A two-stage dynamic fault recovery method for an active distribution network considering the node price mechanism

JING Hao, JIA Boyan, LI Xiaoyu, LI Fan, ZHANG Zizi, JI Yanpeng

(State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** Given the problem of active distribution network fault recovery with distributed energy connected, a fault recovery method for an active distribution network based on two-stage optimization is proposed considering the node price mechanism. In the first stage of the proposed method, the switch state set is taken as the control variable, the minimum loss load value is regarded as the objective function, and the necessary constraints such as power balance and network topology radial constraints are taken into account. In the second stage, the mechanism of node price formulation and the negative load response model are established first, taking the Lagrange multipliers of branch capacity constraints which determine the node price plan as the control variables and the minimum over limit of branch capacity as the objective function. The model is established considering the constraints of the node pricing mechanism. Finally, a simulation example shows that the index of an active distribution network fault recovery scheme with the node price mechanism is better than that without consideration. This shows that the model can reduce load loss and improve the reliability of the system during the fault recovery period.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. kj2019-066) "Application Technique Research on Intelligent Sense Recognition of Power Distribution Equipment".

**Key words:** active distribution network; fault recovery; node price; two-stage optimization; demand response

## 0 引言

主动配电网是指以传统配电网网络为架构, 借助信息化设备, 通过分布式发电的并网运行, 实现源网荷储各环节高度协调的区域性供用电平衡系

统<sup>[1-5]</sup>。主动配电网将不同形式的分布式发电进行集成管理, 并引入需求侧管理技术, 其对于提升分布式发电消纳水平以及系统经济性有着重要意义<sup>[6-8]</sup>。主动配电网故障恢复方法作为其重要的关键技术之一关系到系统运行可靠性, 已经成为一门重要研究课题。

传统的主动配电网故障恢复是一个多目标、多约束的非线性优化问题, 最终得到的解是一系列开

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(kj2019-066)  
“配电设备智能感知识别应用技术研究”

关状态组合<sup>[9-10]</sup>，该开关状态集能够在系统发生故障时重新分配系统功率，实现恢复供电的功能。在这方面已有较多文献进行了研究，比如文献[11]建立了基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复模型。文献[12]则是考虑了含光伏发电并网的配电网故障恢复模型，并且计及了光伏出力的不确定性。文献[13]提出了配电网故障恢复的区间数灰色关联决策方法。文献[14]采用瞬时值处理分布式发电出力与负荷水平，对失电负荷进行故障恢复，并考虑制定孤岛。文献[15]建立了基于负荷均衡的智能配电网故障恢复，提升了系统的供电可靠性。在故障恢复模型求解领域也有较多文献进行了研究，事实上配电网故障恢复求解方法<sup>[16]</sup>主要有启发式搜索方法和遗传算法<sup>[17-18]</sup>、禁忌搜索算法<sup>[19]</sup>，而近年来蚁群算法<sup>[20]</sup>、多代理理论<sup>[21]</sup>等前沿智能算法也开始被应用在了配电网故障恢复领域。

近年来，开始出现文献将主动配电网需求侧管理技术引入作为对故障恢复方案的支撑，比如文献[22]采用用户和供电侧进行博弈的模型并基于需求响应视角下的主动配电网故障恢复策略；文献[23]研究需求侧响应特性，建立价格型需求响应负荷的时变模型，并基于激励型响应负荷的中断补偿模型制定故障恢复策略。然而目前还很少有文献考虑主动配电网基于节点电价机制建立系统故障恢复方案。

目前仅仅依靠调节发电侧出力和传统需求侧资源从而追踪负荷以及新能源出力的变化使系统安全、稳定、经济地运行是远远不够的。相比于传统的需求侧管理技术手段，节点电价机制具备对负荷曲线调节范围广、调节程度高的优势，同时节点电价机制对用户用电习惯影响相对较小，此外有利于揭示电网输配电设备和发电设备容量价格信息，促进电力市场平衡并指导电力系统投资规划<sup>[24]</sup>。节点电价机制能够根据各用户在不同时段下的节点电价信息，通过优化其用电方式改善负荷曲线，从而能够对负荷起到“削峰填谷”的作用。目前节点电价机制已经在用户用电优化、降低峰谷差、加大新能源消纳水平以及减少发生“弃风”、“弃光”、阻塞管理等方面得到了广泛的应用，是“坚强”智能电网建设的核心与关键<sup>[25]</sup>。

配电网节点电价(Distribution Locational Marginal Price, DLMP)机制一方面能够指导系统投资规划，另一方面可以对系统功率紧张区域进行阻塞管理<sup>[26-27]</sup>。当主动配电网发生支路故障时，不同区域产生的功率紧缺情况存在差异，在制定开关状态集之后如果能够再制定合理的节点电价方案，则能够有效引导功率流向，从而通过价格型需求响应机制

改善系统潮流，降低失电负荷量。本文工作的主要创新点在于在制定配电网故障恢复方案的同时，将系统节点电价机制也考虑到故障恢复计划当中，通过节点电价机制改善负荷曲线，降低失电负荷功率，提升系统在故障发生时的供电可靠性。

综合考虑开关状态集和系统节点电价方案的制定，基于两阶段优化理论制定主动配电网故障恢复方法。所建立的模型中，第一阶段优化对故障恢复期间开关状态集进行优化，第二阶段优化基于第一阶段优化的结果，通过优化节点电价方案对支路越限情况进行阻塞管理。以河北省某地典型城区配电网为例，设置两种情况下的故障对所建立的方法验证合理性和可行性。

## 1 两阶段优化故障恢复模型

### 1.1 第一阶段优化模型

在传统的配电网故障恢复优化模型中，需要考虑支路容量约束以便对系统中支路传输容量做出限制，防止线路过载运行。在考虑节点电价机制下的配电网故障恢复模型第一阶段优化中，不计及支路容量越限约束，而是在第二阶段优化中采用节点电价机制进行阻塞管理。

第一阶段优化的控制变量为故障发生之后的系统开关状态集，目标函数为失电负荷量最小，如式(1)所示。

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^N u_i c_i P_i \quad (1)$$

式中： $N$ 为主动配电网负荷点数； $u_i$ 为第 $i$ 个负荷节点的失电系数，当 $u_i = 1$ 时表示第 $i$ 个负荷节点发生了失电， $u_i = 0$ 时表示第 $i$ 个负荷节点没有发生失电； $c_i$ 为第 $i$ 个节点负荷的权重，表示该负荷的重要程度级别； $P_i$ 为第 $i$ 个节点失电负荷功率。

1) 功率平衡约束。主动配电网在制定故障恢复计划时也会响应调节可控微电源出力以及公共耦合点交换功率。整个系统需要满足功率平衡约束如式(2)所示。

$$P_{PCC} + P_{MT} + P_{WT} + P_{FC} + P_{SB} + P_{PV} = \sum_{i=1}^N P_{L,i} - \sum_{i=1}^N u_i P_i \quad (2)$$

式中： $P_{PCC}$ 为公共耦合点交换功率； $P_{MT}$ 和 $P_{FC}$ 分别为故障恢复期间微燃机和燃料电池出力； $P_{WT}$ 和 $P_{PV}$ 分别为故障恢复期间风电和光伏出力； $P_{SB}$ 为储能出力，大于零时表示放电状态； $P_{L,i}$ 为系统节点 $i$ 原来负荷水平。

2) 网络辐射状约束。故障恢复后系统的网架结构必须满足辐射状约束, 该约束如式(3)所示。

$$\mathbf{g} \in \mathbf{G} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{g}$  为系统拓扑结构, 基于每个开关的状态变量决定;  $\mathbf{G}$  为满足辐射状的配电网开关状态集合。

采用广度优先搜索法对给定的一个网络结构进行辐射状拓扑判断, 具体步骤如下:

(1) 从节点  $n_0$  出发访问, 并记录;

(2) 访问所有与节点  $n_0$  相邻的节点, 同时只继续访问未访问的节点, 并进行记录;

(3) 分别从所有邻接节点出发, 依次访问所相邻的节点, 直到无法访问更多的节点为止;

(4) 如果还存在未访问节点, 则说明故障恢复后的网络存在孤岛, 那么在孤岛内进行同样的访问进程。

在以上的访问过程中, 如果在某一步中访问的相邻节点出现在记录中, 则说明网络结构中存在环网, 如果未出现则说明网络结构满足该约束。

3) 节点电压约束。在故障恢复过程中需要满足该约束, 如式(4)所示。

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (4)$$

式中:  $U_i$  为第  $i$  个节点的电压幅值;  $U_{i,\min}$  和  $U_{i,\max}$  分别为第  $i$  个节点的电压幅值最小值和最大值。其中  $U_i$  通过式(5)、式(6)示的潮流计算方程得到<sup>[28]</sup>。

$$P_{\text{in},i} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (5)$$

$$Q_{\text{in},i} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (6)$$

式中:  $n$  为系统节点数;  $P_{\text{in},i}$  和  $Q_{\text{in},i}$  为第  $i$  个节点注入的有功和无功功率, 由制定的公共耦合点以及微电源出力决定;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  和  $\delta_{ij}$  分别为第  $i$  个节点和第  $j$  个节点之间支路的电导、电纳和电压相角差;  $U_i$  和  $U_j$  分别为第  $i$  个节点和第  $j$  个节点的电压幅值。

4) 可控微电源运行约束。该约束如式(7)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{MT}} \leq P_{\text{MT,max}} \\ 0 \leq P_{\text{FC}} \leq P_{\text{FC,max}} \\ -P_{\text{SB,max}} \leq P_{\text{SB}} \leq P_{\text{SB,max}} \\ \pi_{\min} Q_{\text{SB}} \leq S_{\text{SB}} \leq \pi_{\max} Q_{\text{SB}} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{MT,max}}$  和  $P_{\text{FC,max}}$  分别为微燃机和燃料电池的出力功率限值;  $P_{\text{SB,max}}$  为储能最大充放电功率;  $Q_{\text{SB}}$  为储能容量;  $\pi_{\min}$  和  $\pi_{\max}$  分别为储能最低放电深度和最大充电深度;  $S_{\text{SB}}$  为储能剩余容量。

## 1.2 第二阶段优化模型

### 1.2.1 故障恢复下节点电价计算

根据文献[29-30], 节点边际电价的计算一般采用直流潮流, 能够在满足精度要求的前提下提高计算速度。故障恢复时配电网主要的目标是提升供电可靠性, 此时经济性指标暂时处于次要位置, 因此以失电负荷价值量最小作为最优潮流目标函数即如式(1)所示。

节点电价计算模型中需要满足以下约束条件。

1) 功率平衡约束。该约束如式(8)所示, 并针对每个节点成立。

$$\sum_{i=1}^N P_{G,i} = \sum_{i=1}^N P_{L,i} - \sum_{i=1}^N u_i P_i \quad (8)$$

式中:  $P_{G,i}$  为节点  $i$  的微电源出力;  $\sum_{i=1}^N P_{G,i}$  为系统微电源出力之和。

2) 配网支路容量约束。该约束如式(9)所示。

$$\sum_{i=1}^N F_{k-i} (P_{G,i} - P_{L,i} + u_i P_i) \leq P_{k,\max} \quad (9)$$

式中:  $F_{k-i}$  为支路  $k$  对节点  $i$  的直流功率传输分布因子<sup>[31]</sup>;  $P_{k,\max}$  为支路  $k$  的功率传输上限。其中  $F_{k-i}$  衡量了支路传输功率对节点注入功率变化的响应, 具体计算如式(10)所示。

$$F_{k-i} = \frac{\Delta P_k}{\Delta P_i} = \frac{Y_{m,i} - Y_{n,i}}{z_k} \quad (10)$$

式中:  $\Delta P_k$  为支路  $k$  传输功率响应量;  $\Delta P_i$  为节点  $i$  注入功率变化量;  $Y_{m,i}$  为节点导纳矩阵  $m$  行  $i$  列元素,  $Y_{n,i}$  为节点导纳矩阵  $n$  行  $i$  列元素;  $z_k$  为支路  $k$  的阻抗, 该支路联接了节点  $m$  和节点  $n$ 。式中的  $Y$  和  $z$  指的是第一阶段优化制定了开关状态集之后的系统节点导纳矩阵和阻抗值。

计及以上约束, 该故障恢复期间直流最优潮流的拉格朗日函数如式(11)所示。

$$L = \sum_{i=1}^N u_i c_i \beta_i P_i - \lambda \left( \sum_{i=1}^N P_{G,i} - \sum_{i=1}^N P_{L,i} + \sum_{i=1}^N u_i P_i \right) - \sum_{k=1}^K \mu_k \left[ \sum_{i=1}^N F_{k-i} (P_{G,i} - P_{L,i} + u_i P_i) - P_{k,\max} \right] \quad (11)$$

式中:  $\lambda$  为功率平衡约束的拉格朗日乘子;  $\mu_k$  为支路  $k$  功率传输约束的拉格朗日乘子, 反映了支路  $k$  的容量经济价值;  $K$  为配电网中支路数量, 包括联络线支路。将以上拉格朗日函数对节点  $i$  负荷求导得到式(12)。

$$\frac{\partial L}{\partial P_{L,i}} = \lambda + \sum_{k=1}^K \mu_k F_{k-i} \quad (12)$$

式中,  $\sum_{k=1}^K \mu_k F_{k-i}$  为支路  $k$  对节点  $i$  的节点阻塞边际成本, 作为阻塞电价。假设主动配电网原来运行在分时电价机制下, 则可以进一步得到在故障恢复期间制定的节点  $i$  电价如式(13)所示。

$$q_i(t) = q_{i,\text{TOU}}(t) + \sum_{k=1}^K \mu_k F_{k-i} \quad (13)$$

式中:  $q_i(t)$  为制定的节点  $i$  在  $t$  时段电价;  $q_{i,\text{TOU}}(t)$  为主动配电网原来的  $t$  时段分时电价。

### 1.2.2 第二阶段优化目标函数

第二阶段优化以第一阶段制定的网络拓扑结构为基础, 以支路  $k$  功率传输约束的拉格朗日乘子  $\mu_k$  为控制变量, 以系统支路传输容量越限最小为目标函数制定节点电价方案。第二阶段优化目标函数如式(14)所示。

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^K \max(0, P_{k,\text{CON}} - P_{k,\text{max}}) \quad (14)$$

式中:  $P_{k,\text{CON}}$  为节点电价机制下支路  $k$  的传输容量; 其中  $P_{k,\text{CON}}$  的计算如式(15)所示, 其中支路  $k$  联接了节点  $i$  和节点  $j$ 。

$$P_{k,\text{CON}} = U_{i,\text{CON}} \sum_{j=1}^n U_{j,\text{CON}} (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (15)$$

式中:  $U_{i,\text{CON}}$  和  $U_{j,\text{CON}}$  为节点电价机制下系统节点电压向量  $U_{\text{CON}}$  的元素,  $U_{\text{CON}}$  由如式(16)、式(17)所示的潮流平衡方程得到。

$$P_{i,\text{CON}} - U_{i,\text{CON}} \sum_{j=1}^n U_{j,\text{CON}} (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (16)$$

$$Q_{i,\text{CON}} - U_{i,\text{CON}} \sum_{j=1}^n U_{j,\text{CON}} (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (17)$$

式中:  $P_{i,\text{CON}}$  和  $Q_{i,\text{CON}}$  为计及节点电价机制下的需求侧响应的节点注入功率, 采用价格弹性系数模型计算如式(18)所示<sup>[32]</sup>。

$$\begin{cases} P_{i,\text{CON}} = P_i + \Delta P_i \\ Q_{i,\text{CON}} = Q_i + \Delta Q_i \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $\Delta P_i$  和  $\Delta Q_i$  为价格型需求响应负荷, 由式(19)得到。

$$\begin{cases} \frac{\Delta P_i(s)}{P_i(s)} = \sum_{t=1}^T \frac{e_{st} P_i(t) \sum_{k=1}^K \mu_k(s) F_{k-i}}{q_{i,\text{TOU}}(s)} \\ \frac{\Delta Q_i(s)}{Q_i(s)} = \sum_{t=1}^T \frac{e_{st} Q_i(t) \sum_{k=1}^K \mu_k(s) F_{k-i}}{q_{i,\text{TOU}}(s)} \end{cases} \quad (19)$$

式中: 电价弹性系数  $e_{st}$  衡量了  $s$  时段负荷对  $t$  时段

电价变化的响应;  $T$  为故障恢复预期时长, 可通过检修计划预估得到。

### 1.2.3 第二阶段优化约束条件

1) 节点电价约束。当配电网运营商在故障恢复期间制定节点电价机制时, 需要满足节点电价约束如式(20)所示。

$$\Delta q_i = \sum_{k=1}^K \mu_k F_{k-i} \in [-\Delta q_{i,\text{max}}, \Delta q_{i,\text{max}}] \quad (20)$$

式中,  $\Delta q_{i,\text{max}}$  为节点  $i$  电价调节上限。

2) 用户平均购电价格约束。为了避免节点电价机制对用户造成权益损失, 需要满足如式(21)所示的用户平均购电价格约束。

$$\frac{\sum_{i=1}^N P_{i,\text{CON}} (q_{i,\text{TOU}}(t) + \sum_{k=1}^K \mu_k F_{k-i})}{\sum_{i=1}^N P_{i,\text{CON}}} \leq \frac{\sum_{i=1}^N P_i q_{i,\text{TOU}}(t)}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (21)$$

## 2 主动配电网故障恢复综合模型

基于两阶段优化的计及节点电价机制的主动配电网故障恢复方法原理框架图如图 1 所示。图中标示了优化过程中各个信息的流动情况。

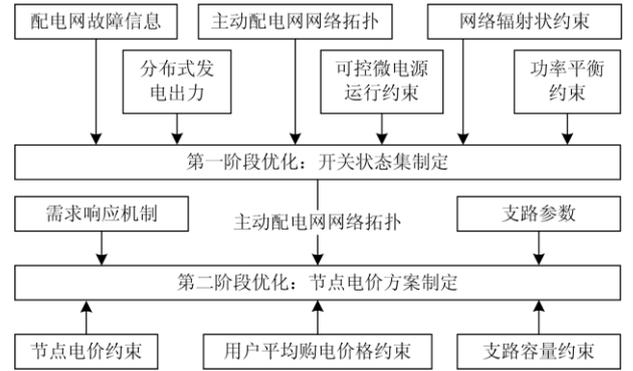


图 1 主动配电网故障恢复方法原理结构图

Fig. 1 Principle and structure diagram of fault recovery method for active distribution network

从图 1 可以看出, 第一阶段和第二阶段优化尽管有着不同的控制变量和约束条件, 计及的因素和约束条件也不尽相同, 当两者是一个相辅相成的关系, 第二阶段优化需要以第一阶段优化作为基础, 两者的优化结果共同构成了主动配电网故障恢复方案。考虑到需求侧资源对节点电价的响应时间, 系统在制定的节点电价方案实施之后的一定时段内将对开关状态集计划进行调整, 从而降低失电负荷量, 电力现货市场机制一般以 0.5 h 作为一个结算时段, 同时根据实际调研本文将需求响应时间取为 0.5 h。

### 3 算例分析

#### 3.1 故障恢复场景设置

本文以河北省某地典型城区配电网为例对所建立的模型进行验证。其中系统网架结构图如图 2 所示, 系统中包含分布式发电并网, 整个系统通过公共耦合点与上级电网进行功率交换。故障恢复模型中, 储能的充放电功率上限为 300 kW, 并网容量为 2 MW。系统网架结构图中实线为运行线路, 虚线为联络线, 包括支路 4-19, 8-14, 27-29, 36-38, 37-41, 30-39, 在正常运行情况下联络线处于断开状态, 只有当制定故障恢复计划时才可能将联络线投入运行状态。外网原有分时电价机制参考文献[33]。

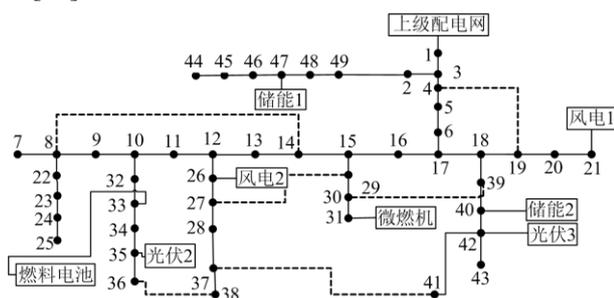


图 2 河北省某地典型城区配电网系统结构图

Fig. 2 System structure of active distribution network in a typical urban area of Hebei Province

设置两种典型的故障场景, 其中故障方式一为支路 14-15 发生永久性短路故障, 故障方式二为支路 4-5 发生永久性短路故障。假定故障发生时间为 11:00, 故障持续时间为 3 h, 该时间由实际检修工作决定。主动配电网中各个负荷节点的重要程度系数如表 1 所示。

表 1 主动配电网节点负荷等级

Table 1 Importance classification of node load in

active distribution network		
负荷重要程度	负荷节点集合	权重系数
一级负荷	1, 2, 5, 8, 13, 14, 22, 37, 38	1
二级负荷	3, 4, 6, 7, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 33, 34, 35, 40, 42	0.5
三级负荷	9, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 29, 30, 46, 41	0.1

#### 3.2 故障恢复结果及其分析

运行所建立的模型, 可以得到故障方式一下的系统故障恢复方案如表 2 和图 3 所示, 其中表 2 为开关状态集计划, 图 3 为系统节点电价调节计划。

表 2 故障方式一下的主动配电网初始故障恢复方案

Table 2 Initial fault recovery scheme for distribution

network under fault mode 1	
恢复方案内容	故障恢复方案
故障支路	14-15
断开支路	14-15, 22-23, 32-33, 35-36,
	10-32, 27-28, 28-37
合上联络线	27-29, 37-41, 36-38
失电负荷节点	23, 24, 25, 32, 28
形成孤岛	孤岛一(33, 34, 35)

从表 2 中可以看出, 故障支路 14-15 是系统网络中主干线的一段, 是系统向西片区供电的重要通道。当支路 14-15 发生故障的时候, 系统向末端节点负荷的供电能力减弱, 其中处于支路末端而且重要程度较低的节点 23, 24, 25 成为了失电负荷以便保证对剩余节点的负荷转供能力。故障恢复计划中合上了 27-29, 37-41 以便加强对西片区的负荷转供。与此同时, 系统中的可控分布式发电也尽可能进行功率支撑, 其中储能 2 和微燃机增大出力通过联络线 38-41 向西片区支撑, 燃料电池同样尽可能增大出力以便降低失电负荷功率。而储能 1 的出力基本上没有变化, 这是因为储能 1 即使增大出力也需要通过主干线支路 4-5 才能对可能的失电片区进行支撑, 而主干线支路 4-5 的输电容量已经达到了最大程度。由于故障恢复方案下负荷转供能力有限, 而部分节点尽管不能得到网络的供电, 但是却能够充分利用所并网的分布式电源形成孤岛运行, 从而避免成为失电负荷节点, 这在故障方式二下体现为节点 33, 34, 35 形成了孤岛, 利用岛内的燃料电池和光伏发电进行功率支撑。故障方式一下的节点电价方案制定如图 3 所示, 故障恢复期间系统各节点负荷水平情况如图 4 所示, 图中以 0.5 h 为一个时段。

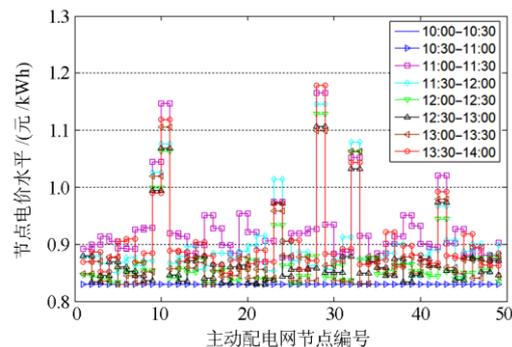


图 3 故障方式一下主动配电网节点电价方案

Fig. 3 Scheme of node price of active distribution network under the fault mode 1

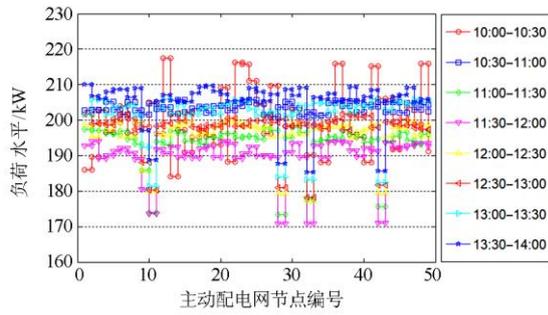


图 4 故障方式一下主动配电网各节点负荷水平情况

Fig. 4 Load level of each node of active distribution network under fault mode 1

从故障方式一的节点电价方案可以看出，故障恢复中心制定的各节点电价均高于故障发生前的电价水平，根据负荷价格弹性模型，如果不考虑到负荷水平本身随着时段的变化则并不存在负荷增大的节点。这主要有两方面的原因，一方面配电网在故障发生情况下，无论是原来运行的馈线支路还是联络线支路，其功率传输都将非常紧张，因此此时系统基本上不会存在多余的传输容量用于提升部分节点的供电负荷；另一方面，所建立的故障恢复模型的第一阶段目标函数是最小化失电负荷功率，因此模型在寻优过程中并不会考虑到增大部分节点的供电负荷，因为这对提升目标函数没有意义。但是，由于故障时段考虑到了数个小时的时间范围，在这段时间内负荷水平本身会随着时段的变化而变化，因此实际上存在部分节点负荷水平增大的情况，但是这样的增大并不是因为节点电价机制引起的，而是负荷水平本身的变化，如果不采取节点电价机制进行需求侧管理，则系统失电负荷水平将会更加严重。

在节点电价机制下，随着需求侧资源的响应，在一个时段之后故障恢复中心在原有制定的开关状态集基础上重新调节网络中的开关状态集如表 3 所示。从表 3 中可以看出，在节点电价机制下，节点 28 的负荷发生了需求响应从而使得重新并网运行成为可能；节点 23 从原来的失电负荷节点成为供电节点，然而由于系统运行的限值，节点 24、节点 25 仍然为失电负荷；节点 32 在实行节点电价管理之后，重新并入孤岛运行，形成新的孤岛(32, 33, 34, 35)。事实上，在节点电价机制下，故障方式一下系统在故障恢复期间的失电负荷量为 678.41 kWh。

同理得到故障方式二下的系统故障恢复方案如表 4 和图 4 所示，其中表 4 为开关状态集计划，图 4 为系统节点电价调节计划。

表 3 故障方式一下的主动配电网开关状态集动态调整

Table 3 Dynamic adjustment of switch state set of active distribution network under fault mode 1

恢复方案内容	故障恢复方案
故障支路	14-15
断开支路	23-24, 10-32
合上支路	22-23, 27-28, 28-37, 32-33
新的失电负荷节点	24, 25, 32
新的孤岛	孤岛一(32, 33, 34, 35)

表 4 故障方式二下的主动配电网初始故障恢复方案

Table 4 Initial fault recovery scheme for distribution network under fault mode 2

恢复方案内容	故障恢复方案
故障支路	4-5
断开支路	4-5, 46-47, 35-36, 10-11, 7-8, 8-22, 11-12, 12-13, 9-10, 10-32, 12-26
合上联络线	4-19, 30-39, 37-41, 8-14, 27-29
失电负荷节点	44, 45, 46, 7, 22, 23, 24, 25, 11, 12, 10, 41
形成孤岛	孤岛一(32, 33, 34, 35) 孤岛二(40, 42, 43)

从表 4 中可以看出，当支路 4-5 发生故障时，相比于故障方式一要严重得多。在该故障情形下系统对后续节点的供电主要通过联络线 4-19 进行转供。由于转供能力有限，较为靠近末端的一些节点为了避免成为失电负荷节点，利用分布式发电形成孤岛运行。事实上，配电网内形成了两个孤岛，分别为孤岛一(32, 33, 34, 35)以及孤岛二(40, 42, 43)。故障方式二下的节点电价方案制定如图 5 所示，故障恢复期间系统各节点负荷水平情况如图 6 所示。

故障方式二下节点电价机制下当需求侧进行响应后系统进行的开关状态集调整如表 5 所示。

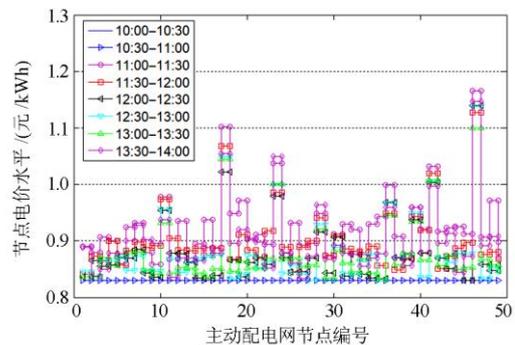


图 5 故障方式二下主动配电网节点电价方案

Fig. 5 Scheme of node price of active distribution network under the fault mode 2

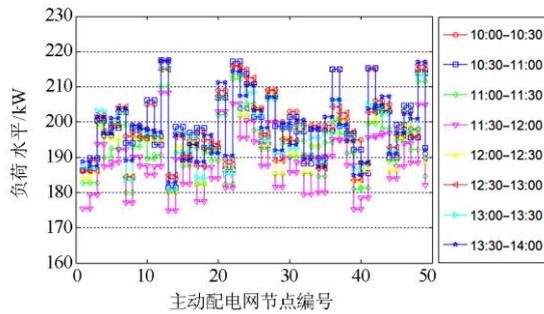


图6 故障方式二下主动配电网各节点负荷水平情况

Fig. 6 Load level of each node of active distribution network under fault mode 2

表5 故障方式一下的主动配电网开关状态集调整

Table 5 Dynamic adjustment of switch state set of active distribution network under fault mode 2

恢复方案内容	故障恢复方案
故障支路	4-5
断开支路	45-46, 23-24
合上支路	46-47, 7-8, 22-23, 10-32, 41-42
新的失电负荷节点	44, 45, 23, 24, 25, 11, 12
新的孤岛	孤岛一(10, 32, 33, 34, 35) 孤岛二(41, 40, 42, 43)

在节点电价机制下, 节点负荷 7, 46, 23 重新并入主网运行, 节点负荷 10 并入原有孤岛一运行, 节点 41 并入原有孤岛二运行, 以上措施共同通过节点电价机制降低了失电负荷损失。事实上, 在节点电价机制下, 故障方式一下系统在故障恢复期间的失电负荷量为 1 534.30 kWh。

为了对比节点电价机制对故障恢复计划的支撑作用, 在相同的系统配置以及故障方式下, 不考虑节点电价机制下以及本文考虑节点电价机制下的故障恢复指标对比如表 6 所示。

表6 考虑节点电价机制对故障恢复指标的影响对比

Table 6 Comparison of the effect of considering mechanism of node electricity price on fault recovery index

	不考虑节点电价机制	
	故障方式一	故障方式二
故障方式	故障方式一	故障方式二
失电负荷量	843.61 kWh	1 960.74 kWh
形成孤岛数目	1	2
考虑节点电价机制		
故障方式	故障方式一	故障方式二
失电负荷量	678.41 kWh	1 534.30 kWh
形成孤岛数目	1	2

从表 6 中可以看出, 考虑到节点电价机制下的主动配电网故障恢复计划能够降低失电负荷量, 提

升系统运行的可靠性。

## 4 结论

本文考虑节点电价机制, 基于两阶段优化建立主动配电网故障恢复方法, 仿真算例表明:

1) 所建立的模型适用于计及节点电价机制的主动配电网故障恢复方案制定, 能够在制定开关状态集的同时, 制定系统节点电价方案对故障恢复方案进行支撑。

2) 考虑节点电价机制下的主动配电网故障恢复指标相比于不计及节点电价机制下的要更优, 体现在更少的失电负荷节点以及失电负荷价值量更小, 表明节点电价机制能够对故障恢复方案提供有效的支撑, 提升系统运行可靠性。

## 参考文献

- [1] 赵波, 王财胜, 周金辉, 等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 125-135.  
ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125-135.
- [2] MURTY V V S N, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-019-0147-z.
- [3] 张建华, 曾博, 张玉莹, 等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23.  
ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.
- [4] 梁云, 黄莉, 胡紫巍, 等. 面向未来智能配用电的信息物理系统: 技术、展望与挑战[J]. 供用电, 2018, 35(3): 2-9.  
LIANG Yun, HUANG Li, HU Ziwei, et al. Cyber physical systems in future smart power distribution and utilization: technologies, prospects and challenges[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(3): 2-9.
- [5] 戴志辉, 陈冰研, 谢军, 等. 含多微网的主动配电网分层调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 121-127.  
DAI Zhihui, CHEN Bingyan, XIE Jun, et al. Hierarchical distributed coordinated control of active distribution network including energy interconnection micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 121-127.

- [6] 张光亚, 赵莉莉, 边小军, 等. 考虑供需互动和分布式电源运行特性的主动配电网网架规划[J]. 智慧电力, 2018, 46(6): 81-87.  
ZHANG Guangya, ZHAO Lili, BIAN Xiaojun, et al. Framework planning of active distribution network considering supply and demand interaction & DG operation characteristics[J]. Smart Power, 2018, 46(6): 81-87.
- [7] 华煌圣, 甘霖, 伍竹林, 等. 基于物联网技术的能源互联网数据支撑平台[J]. 供用电, 2018, 35(1): 40-45.  
HUA Huangsheng, GAN Lin, WU Zhulin, et al. Data platform of energy internet based on techniques of internet of things[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1): 40-45.
- [8] 章雷其, 汪湘晋, 徐珂, 等. 基于柔性互联的源网荷储协同主动配电网设计研究[J]. 供用电, 2018, 35(1): 28-33.  
ZHANG Leiqi, WANG Xiangjin, XU Ke, et al. Research on design of a source-grid-load-storage-collaborated active distribution network based on flexible interconnection[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1): 28-33.
- [9] 王甜婧, 许阔, 朱永强. 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 10-19.  
WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Economic dispatch strategy of active distribution network based on source-network-load multi-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 10-19.
- [10] 黄河, 高松, 朱磊, 等. 考虑多能互补的主动配电网规划与高效 Benders 求解方法[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 11-18.  
HUANG He, GAO Song, ZHU Lei, et al. Active distribution network planning model and benders solution strategy considering multi-energy complementation[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 11-18.
- [11] 王增平, 姚玉海, 郭昆亚, 等. 基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 185-192.  
WANG Zengping, YAO Yuhai, GUO Kunya, et al. Distribution network service restoration based on rank preference optimal and load shedding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 185-192.
- [12] 陈昕玥, 唐巍, 陈禹, 等. 基于机会约束规划含光伏发电的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 99-106.  
CHEN Xinyue, TANG Wei, CHEN Yu, et al. Chance constrained programming based fault recovery of distribution network containing photovoltaic generations[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 99-106.
- [13] 臧天磊, 钟佳辰, 何正友, 等. 基于启发式规则与熵权理论的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 251-257.  
ZANG Tianlei, ZHONG Jiachen, HE Zhengyou, et al. Service restoration of distribution network based on heuristic rules and entropy weight[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 251-257.
- [14] 卢志刚, 董玉香. 含分布式电源的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 89-92.  
LU Zhigang, DONG Yuxiang. Service restoration strategy for the distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 89-92.
- [15] 庞清乐, 高厚磊, 李天友. 基于负荷均衡的智能配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 342-348.  
PANG Qingle, GAO Houlei, LI Tianyou. Load balancing based fault service restoration for smart distribution grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 342-348.
- [16] 王守相, 李晓静, 肖朝霞, 等. 含分布式电源的配电网供电恢复的多代理方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 61-65, 81.  
WANG Shouxiang, LI Xiaojing, XIAO Chaoxia, et al. Multi-agent approach for service restoration of distribution system containing distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 61-65, 81.
- [17] IRVING M R, LUAN W P, DANIEL J S. Supply restoration in distribution networks using a genetic algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(6): 447-457.
- [18] 巩伟峥, 房鑫炎. 基于混合编码方式的配电网故障恢复算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 105-108.  
GONG Weizheng, FANG Xinyan. Research of distribution system service restoration algorithm based on hybrid encoding[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 105-108.
- [19] SHIN D J, KIM J O, KIM T K. Optimal service restoration and reconfiguration of network using genetic-Tabu algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71(2): 145-152.
- [20] 张钊, 封亚琴. 一种新型的配电网供电恢复重构寻优算法[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 51-55, 65.  
ZHANG Zhao, FENG Yaqin. A novel optimization reconfiguration algorithm for power supply restoration of distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 51-55, 65.

- [21] 杨丽君, 刘建超, 曹良晶, 等. 基于黑板模型的配电网故障恢复多代理协作机制设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 85-89.  
YANG Lijun, LIU Jianchao, CAO Liangjing, et al. Multi-agent coordinated mechanism design of distribution network fault restoration based on blackboard model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 85-89.
- [22] 杨丽君, 曹玉洁, 梁景志, 等. 基于博弈思想的需求响应视角下的主动配电网故障恢复[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(4): 1-9.  
YANG Lijun, CAO Yujie, LIANG Jingzhi, et al. Active distribution network fault restoration based on game theory in demand response perspective[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(4): 1-9.
- [23] 刘文霞, 李校莹, 王佳伟, 等. 考虑需求侧资源的主动配电网故障多阶段恢复方法[J]. 电力建设, 2017, 38(11): 64-72.  
LIU Wenxia, LI Xiaoying, WANG Jiawei, et al. Multi-stage service restoration method of active distribution network considering demand side resource[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11): 64-72.
- [24] 曹佳, 马洪艳, 刘扬, 等. 基于节点电价的需求响应策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1536-1542.  
CAO Jia, MA Hongyan, LIU Yang, et al. Research on demand response strategy based on nodal price[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1536-1542.
- [25] 沈同, 夏清. 实现资源时空优化配置的现货市场及其应用研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(1): 1-6.  
SHEN Tong, XIA Qing. Spot market with temporal and spatial distribution optimization of resource and its application in China[J]. Smart Power, 2018, 46(1): 1-6.
- [26] TAYLOR J A, NAYYAR A, CALLAWAY D S, et al. Consolidated dynamic pricing of power system regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4692-4700.
- [27] LI Ruoyang, WU Qiuwei, SHMUEL S O. Distribution locational marginal pricing for optimal electric vehicle charging management[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 29(1): 203-211.
- [28] 麻秀范, 王超, 洪潇, 等. 基于节点阻塞电价的电动汽车双层充电优化策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3706-3716.  
MA Xiufan, WANG Chao, HONG Xiao, et al. A two layer model for electric vehicle charging optimization based on location marginal congestion price[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3706-3716.
- [29] 杨晓静, 秦超. 考虑风电调度策略的电力系统随机潮流计算[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 54-59.  
YANG Xiaojing, QIN Chao. Probabilistic load flow calculation of power systems considering wind power dispatching strategies[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 54-59.
- [30] 马天祥, 程肖, 贾伯岩, 等. 基于不确定二层规划模型的主动配电网故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 48-57.  
MA Tianxiang, CHENG Xiao, JIA Boyan, et al. Service restoration method for active distribution network based on uncertain bi-level programming model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 48-57.
- [31] HEYDT G T, CHOWDHURY B H, CROW M L, et al. Pricing and control in the next generation power distribution system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 907-914.
- [32] 陈之栩, 张粒子, 舒隽. 交直流迭代法求解含网损节点边际电价[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 22-25.  
CHEN Zhixu, ZHANG Lizi, SHU Jun. AC-DC iterative methods for calculating location marginal price with losses algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 22-25.
- [33] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.  
NIU Ming, HUANG Wei, GUO Jiahuan, et al. Research on economic operation of grid-connected microgrid[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 38-42.

收稿日期: 2019-11-18; 修回日期: 2020-04-01

作者简介:

景皓(1982—), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配电设备关键技术, 主动配电网能量管理技术; Email: jinghaohb1982@126.com

贾伯岩(1978—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事输配电系统运行分析与运行管理, 输配电线路关键技术研究;

李小明(1994—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配网运行管理与经济调度。

(编辑 姜新丽)