

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191024

# 基于启发式规则与 AHP-CRITIC 算法的配电网故障恢复策略

汤旻安, 张凯越, 许希元

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 智能配电网的自愈控制对提高整个电力系统的供电可靠性至关重要。针对含分布式电源的配电网故障恢复问题, 提出了基于启发式规则与 AHP-CRITIC 算法的配电网故障恢复策略。首先, 通过广度优先搜索的方法遍历停电区域内所有具有黑启动能力的分布式电源, 形成孤岛供电。其次, 对剩余失电区域采用启发式规则, 以生成用于配电网故障恢复的候选方案集。最后, 考虑故障恢复的目标, 引入负荷容量裕度、负荷转移量、负荷恢复比例、开关操作次数和电压降落五个评价指标, 分别计算候选方案的各评价指标。并使用改进的 AHP 方法和 CRITIC 方法对方案进行评估。同时引入综合权重并计算各方案与理想点之间的偏离度, 确定最优故障恢复方案以恢复剩余失电区域供电。通过算例分析验证了所提方法在解决配电网故障恢复问题上的有效性。

**关键词:** 配电网; 故障恢复; 分布式电源; 启发式规则; 改进 AHP 法; CRITIC

## Service restoration strategy of a distribution network based on heuristic rules and the AHP-CRITIC algorithm

TANG Min'an, ZHANG Kaiyue, XU Xiyuan

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The self-healing control of the intelligent distribution network is of vital importance for improving the reliability of an electric power system. For distribution network fault recovery with distributed generation, a fault recovery strategy for a distribution network based on heuristic rules and the AHP-CRITIC algorithm is proposed. First, all distributed generators with black-start capability in the blackout area are traversed by a breadth-first search method to form islands and restore power supply. Secondly, by use of heuristic rules in the residual power-loss area, a candidate service restoration scheme set is generated. Thirdly, for service restoration, five evaluation indices such as the proportion of load restoration, switching times of circuit breakers, voltage drop, the margin of load capacity and the quantities of transferred load are introduced. Then the evaluation indices of candidate schemes are calculated, and these schemes are assessed by improved AHP and CRITIC methods. By introducing the idea of comprehensive weight, the deviation between each scheme and the ideal point is calculated to establish the optimal fault recovery scheme for restoring the power supply in the residual power-loss area. Calculation results of a distribution network with five feeders show that the proposed method is effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61663021, No. 61763025, and No. 61861025).

**Key words:** distribution network; fault recovery; distributed generation; heuristic rules; improved AHP method; CRITIC

## 0 引言

配电网作为电能从生产至用户的最后一道环节, 在电力系统中起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。当配电网

发生故障时, 通常希望快速恢复失电区域供电, 把损失降到最低, 因此建立合理而有效的故障恢复计划对提高系统的供电可靠性就显得非常重要<sup>[2]</sup>。配电网故障后的自愈控制是一个非线性组合优化问题, 需考虑各方面因素确定最佳供电恢复方案。

在配电网发生故障期间, 失电区域可通过系统重构恢复供电, 或形成孤岛为重要负荷持续供电。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(61663021、61763025、61861025)

通过满足恢复后配电网连通性、不过载、辐射状等条件,来实现开关操作次数最少、网损最小、恢复失电负荷最多等目标,确定最优的开关操作组合方案<sup>[3-4]</sup>。许多文献对智能配电网的自愈模型和自愈算法进行了深入的研究和探讨,配电网的自愈算法大体可分为3类:数学规划法<sup>[5]</sup>、人工智能算法<sup>[6]</sup>和启发式搜索算法<sup>[7]</sup>。当配电网规模较大时,实时性不强、计算时间较长等问题往往就表现在数学规划法和人工智能算法中<sup>[8]</sup>。启发式规则可以快速获取故障恢复候选方案集,能够将丰富的专家经验转化为相应的处理规则,大大减少搜索空间,有效避免了智能优化方法的维数灾难,其高效的实时性已经获得认可,并且在实际生产中其计算结果更容易被调度人员接受,但对于故障恢复候选方案的优劣性仍需有效的机制进行评价<sup>[9]</sup>。

科学、合理地设置权重值对综合评估故障恢复方案非常重要。文献[10]依靠专家经验直接赋予主观权重,评价结果具有较强的主观随意性,客观性较差。文献[11]在恢复方案评估中对专家权重的设置采用主观赋权法,未体现出专家权重设置的合理性,且在应用中有很大的局限性。文献[12]采用传统层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)构建多层次的指标体系结构模型,但计算过程需要通过一致性检验。文献[13]在利用逼近理想解排序法对方案进行综合评估时未考虑特殊情况,即各方案相对贴近度均相同时,无法作出比较。

确定最优的故障恢复方案是一个复杂的多目标决策问题,层次分析法(AHP)<sup>[14]</sup>、模糊综合评价<sup>[15-17]</sup>、熵权法<sup>[18-20]</sup>和基于指标相关性的指标权重确定(Criteria Importance Though Intercriteria Correlation, CRITIC)法等均可用于恢复方案的评价。改进 AHP 法能够计算评价指标的主观权重,通过构造标度值来建立判断矩阵,克服了传统 AHP 法一致性检验中计算的不便之处<sup>[21]</sup>。CRITIC 法是希腊学者 Danae Diakoulaki 提出的一种客观权重赋权法<sup>[22]</sup>,其基本思想是基于不同方案之间的对比度以及各指标间的冲突性来确立指标的客观权重,相对熵权法而言,CRITIC 法不仅有助于筛选评价指标,而且可以更客观地体现各评价指标的真实性,在实践中有着积极的意义。为了提高赋权过程的实用性和合理性,故可将主客观权重加以融合。

针对上述问题,本文提出了基于启发式规则与 AHP-CRITIC 算法的配电网故障恢复策略,共分为三个阶段。第一阶段通过广度优先搜索法遍历失电区域内具有黑启动能力的分布式电源(Distributed Generator, DG),形成孤岛供电;第二阶段对剩余失

电区域采用启发式规则,以生成用于配电网故障恢复的候选方案集;第三阶段利用 AHP-CRITIC 算法计算各评价指标的主观、客观权重进而得到主客观综合权重,综合评估后确定最优方案恢复剩余失电区域供电。最后利用 Matlab 软件在五馈线网络上对所提方法进行了验证。

## 1 配电网故障恢复目标和评价指标

### 1.1 配电网故障恢复目标

配电网故障恢复是考虑约束情况下的多目标组合优化问题,故障恢复目标通常应满足:(1)快速得出恢复方案,尽可能多地恢复失电区域;(2)考虑到开关寿命影响,应尽可能减少开关操作次数;(3)重构后保持辐射状;(4)满足系统电流、电压限制,不发生安全超负荷;(5)满足潮流约束;(6)尽可能避免重要负荷停电;(7)孤岛内必须含有至少一个具有黑启动能力且能够稳定输出功率的 DG;(8)孤岛内 DG 提供的功率必须大于负荷消耗的功率。

### 1.2 配电网故障恢复评价指标

为了实现上述故障恢复的综合目标,本文选择以下指标来衡量故障恢复方案的优缺点<sup>[23]</sup>。

#### (1) 恢复负荷比例 $K_1$

恢复负荷比例即可恢复负载占总故障负载的比例,电力系统故障恢复的主要目标是从功率损耗区域恢复尽可能多的负载,如式(1)所示。

$$K_1 = \frac{L_r}{L_{out}} \quad (1)$$

式中:  $L_r$  表示可恢复量;  $L_{out}$  表示故障负载总量。

#### (2) 开关操作次数 $K_2$

考虑到配电网故障恢复的经济性,开关操作次数越小,操作的成本就越小,耗时也越短。

#### (3) 负荷转移量 $K_3$

在供电恢复过程中,希望最小化对未失电区域的影响。负荷转移量可用电流的增量表示,定义为系统中各馈线可接受的转带负荷量,单位为 A。

#### (4) 电压降落 $K_4$

配电网故障后各馈线电压降落百分比的最大值即为电压降落,如式(2)所示。

$$K_4 = \frac{\Delta V}{V} = \max \left| \frac{V_i - V_0}{V_0} \right| \quad (2)$$

式中:  $V_i$  表示配电网节点电压的实际值;  $V_0$  表示电源电压。

#### (5) 负荷容量裕度 $K_5$

负荷容量裕度能够表征系统再次发生故障时的应对能力,代表馈线的额定容量与实际连接负荷的

差值, 用故障恢复方案中所有馈线的容量裕度最小值作为评价指标。

$$K_5 = \min \{L_{fd_1}, L_{fd_2}, \dots, L_{fd_n}\} \quad (3)$$

式中:  $n$  表示馈线数目;  $L_{fd_i}$  表示第  $i$  条馈线的负荷容量裕度, 单位为 A。

## 2 配电网故障恢复模型

配电网发生故障造成停电后, 利用带电区域与 DG 作为电源, 通过操作系统中联络开关和分段开关的开断与闭合对失电区域恢复供电。本文策略分为 3 个阶段: (1) 通过广度优先搜索法遍历失电区域内具有黑启动能力的 DG, 形成孤岛供电; (2) 针对剩余失电区域采用启发式规则生成候选方案集; (3) 利用 AHP-CRITIC 算法得出主、客观综合权重值, 排序得到最佳方案恢复剩余失电区域供电。

### 2.1 故障恢复的启发式规则

考虑到故障恢复目标与约束条件, 可通过相邻馈线恢复故障点下游失电区域的负荷, 具体的启发式规则如下:

(1) 进行自馈线恢复。若无法恢复, 转至步骤(2); 若可以恢复, 转至步骤(5)。

(2) 计算失电区域的负荷总量和各馈线的负荷裕量, 搜索相应的分段开关和联络开关, 并执行整区恢复或分区恢复。若无法恢复, 转至步骤(3); 若可以恢复, 转至步骤(5)。

(3) 转移相邻馈线自身所带负荷至次相邻馈线以增大联络开关容量, 并转至步骤(2)进行整区恢复或分区恢复。若无法进行负荷转移, 转至步骤(4)。

(4) 按规定好的优先级, 切除部分负荷, 转至步骤(2)直到生成一个可行的恢复方案。

(5) 输出可行的恢复方案。

### 2.2 故障恢复候选方案集的生成方法

设初始可行故障恢复方案包含  $p$  条相邻馈线和  $q$  条次相邻馈线, 利用 2.1 节提到的启发式规则得到初始可行方案后, 由以下规则生成故障恢复候选方案集。

(1) 当  $p=1, q=0$  时, 表明初始可行方案为整区恢复方案。恢复方案候选集由  $p$  条相邻馈线和  $p+1$  条相邻馈线构成。

(2) 当  $p>1, q=0$  时, 表明初始可行方案为分区恢复方案。候选集由  $p$  条相邻馈线,  $p+1$  条相邻馈线,  $p-1$  条相邻馈线和 1 条次相邻馈线,  $p$  条相邻馈线和 1 条次相邻馈线四组方案构成。

(3) 当  $p=1, q>0$  时, 表明初始可行方案为首先将相邻馈线上的部分负荷转移到次相邻馈线上,

然后进行整区恢复。候选集由  $p+1$  条相邻馈线和  $q$  条次相邻馈线构成。

(4) 当  $p>1, q>0$  时, 表明初始可行方案为首先将相邻馈线上的部分负荷转移到次相邻馈线上, 然后进行分区恢复。候选集由  $p$  条相邻馈线和  $q$  条次相邻馈线构成。

### 2.3 故障恢复方案的综合评价模型

(1) 基于改进 AHP 的主观权重计算

使用传统 AHP 法进行权重计算时, 一旦判断矩阵无法满足一致性检验则会导致庞大的计算量。本文采用改进 AHP 法, 构造比例标度值来确定判断矩阵, 根据专家意见对  $n$  个评价指标进行成对比较, 并依据重要程度不减的方式进行排名, 假设由比例构建法得到恢复方案中  $n$  个指标的重要性排序为  $x_1 \geq x_2 \geq \dots \geq x_n$ , 比较  $x_i$  与  $x_{i+1}$ , 并将相应的比例值记录为  $t_i$ , 然后根据重要程度的传递性获得判断矩阵中的其他元素, 最终得到判断矩阵  $R$  如式(4)所示, 此矩阵具有一致性, 不需要进行一致性检验, 且计算量显著减小, 方法简洁, 便于实际操作。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1 t_2 & \dots & L & \prod_{i=1}^{n-1} t_i \\ \frac{1}{t_1} & 1 & t_2 & \dots & L & \prod_{i=2}^{n-1} t_i \\ \frac{1}{t_1 t_2} & \frac{1}{t_2} & 1 & \dots & L & \prod_{i=3}^{n-1} t_i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{\prod_{i=1}^{n-1} t_i} & \frac{1}{\prod_{i=2}^{n-1} t_i} & \frac{1}{\prod_{i=3}^{n-1} t_i} & \dots & L & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

利用改进 AHP 法建立的判断矩阵  $R$  应满足如下条件: ①  $r_{ij} > 0$ ; ②  $r_{ji} = 1/r_{ij}$ ; ③  $r_{ii} = 1$ , 即  $R$  为互反矩阵; ④  $r_{ij} = r_{ik} r_{kj}$ ,  $i, j, k = 1, 2, \dots, n$ 。其中  $r_{ij}$  表示第  $i$  个元素与第  $j$  个元素相比较的标度值, 其含义如表 1 所示。

表 1 标度值含义

Table 1 Meaning of scale values

标度	含义
1	2 个因素同等重要
1.2	2 个因素相比, 一个因素比另一个稍微重要
1.4	2 个因素相比, 一个因素比另一个强烈重要
1.6	2 个因素相比, 一个因素比另一个明显重要
1.8	2 个因素相比, 一个因素比另一个绝对重要
以上标度的倒数	因素 $i$ 与 $j$ 比较得到 $r_{ij}$ , 则因素 $j$ 与 $i$ 比较得到 $r_{ji}=1/r_{ij}$

可由矩阵  $\mathbf{R}$  计算出各项评价指标的主观权重值如式(5)所示。

$$\alpha_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n r_{ij}} / \sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n r_{ij}} \quad (5)$$

式中:  $\alpha_i$  为第  $i$  项指标的权重值;  $\prod_{j=1}^n r_{ij}$  表示矩阵  $\mathbf{R}$  中第  $i$  行所有元素的乘积。

### (2) 基于 CRITIC 法的客观权重计算

假设共有  $m$  个方案, 每个方案有  $n$  个指标, 则评价矩阵可用式(6)表示。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

CRITIC 法计算客观权重的步骤如下。

#### ① 指标同向化处理

开关操作次数、馈线负荷转移量等负向指标往往出现在故障恢复方案评价指标中。正向指标与负向指标同时存在会增加指标体系的计算量, 为了方便计算本文统一转换为正向指标, 转换方式如式(7)所示。

$$x'_{ij} = \frac{1}{\lambda + \max |X_i| + x_{ij}} \quad (7)$$

式中:  $\max |X_i|$  表示第  $i$  个指标的最大值;  $\lambda$  为协调系数, 通常设置为 0.1。经过上述处理后, 获得正向化之后的评价矩阵  $\mathbf{X}'$ 。

#### ② 指标数据无量纲化处理

由于矩阵  $\mathbf{X}'$  中的各项指标含义、单位均不相同, 则需进行无量纲化处理获得标准矩阵, 处理方式如式(8)所示。

$$x''_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x'_{ij})^2}} \quad i=1,2,L,n \quad (8)$$

#### ③ 计算指标客观权重

在 CRITIC 法中, 指标的标准差用于表示方案之间的对比度; 基于指标之间的相关系数, 构建表征冲突的定量表达式来表示指标之间的冲突性。通过标准矩阵  $\mathbf{X}''$  可获得每个指标的标准差  $\sigma_i$  和指标之间的相关系数  $\rho_{ij}$ 。

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x''_{ij} - \bar{x}_i'')^2} \quad i=1,2,L,n \quad (9)$$

$$\rho_{ij} = \text{cov}(\mathbf{X}_i'', \mathbf{X}_j'') / (\sigma_i \sigma_j) \quad i=1,2,L,n \quad (10)$$

式中:  $\bar{x}_i''$  表示第  $i$  个指标的均值;  $\text{cov}(\mathbf{X}_i'', \mathbf{X}_j'')$  表示标准矩阵  $\mathbf{X}''$  第  $i$  行与第  $j$  行的协方差。

根据 CRITIC 方法计算每个指标中包含的信息量  $G_i$ , 如式(11)所示。

$$G_i = \sigma_i \sum_{j=1}^n (1 - \rho_{ij}) \quad i=1,2,L,n \quad (11)$$

式中,  $\sum_{j=1}^n (1 - \rho_{ij})$  表示第  $i$  个指标与其他指标之间冲突性的量化指标。  $G_i$  越大, 第  $i$  个指标中包含的信息量越大, 该指标就越重要, 赋权也应更大。计算客观权重  $\beta_i$  的公式如式(12)所示。

$$\beta_i = \frac{G_i}{\sum_{j=1}^n G_j} \quad (12)$$

#### (3) 综合权重的确定

主观权重向量  $\boldsymbol{\alpha}$  和客观权重向量  $\boldsymbol{\beta}$  可分别通过改进 AHP 法及 CRITIC 法获得, 鉴于两种权重的互补性, 将两种权重组合以全面地评估故障恢复方案。为了使综合权重  $\omega_i$  尽可能地接近  $\alpha_i$  和  $\beta_i$ , 在不偏重其中任意一项的情况下, 可以使用最小鉴别信息原理<sup>[13]</sup>来获得综合权重  $\omega_i$ , 目标函数为

$$\begin{cases} \min J(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{i=1}^n \left( \omega_i \ln \frac{\omega_i}{\alpha_i} + \omega_i \ln \frac{\omega_i}{\beta_i} \right) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \omega_i \geq 0 \quad i=1,2,L,n \end{cases} \quad (13)$$

求解此优化模型, 得到综合权重如式(14)所示。

$$\omega_i = \frac{\sqrt{\alpha_i \beta_i}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\alpha_j \beta_j}} \quad (14)$$

则综合权重向量为

$$\boldsymbol{\omega} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T \quad (15)$$

#### (4) 综合评价

##### ① 计算加权评价矩阵

根据指标的综合权重向量  $\boldsymbol{\omega}$  及标准矩阵  $\mathbf{X}''$ , 由式(16)计算加权评价矩阵的每个行向量  $\mathbf{B}_i$ , 然后得到加权评价矩阵  $\mathbf{B}$ 。

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{X}_i'' \boldsymbol{\omega}_i \quad (16)$$

##### ② 计算相对距离

理想点与负理想点定义为由最好值和最差值组成的向量<sup>[24-25]</sup>。由于对各评价指标进行了同向化处理, 所有指标都为正向, 评价矩阵  $\mathbf{B}$  的负理想点  $\mathbf{P}_0$  为零点, 理想点  $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$ , 其中

$$p_i = \max \{b_{ij} | j=1,2,L,n\} \quad (17)$$

被评价恢复方案与理想点  $P$  的距离为

$$d_j = \sqrt{\sum_{i=1}^m (b_{ij} - p_i)^2} \quad (18)$$

③ 计算偏离度

被评价恢复方案到理想点的偏离度为

$$T_j = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m b_{ij} p_i}{\sum_{i=1}^m (p_i)^2} \quad (19)$$

从式(18)和式(19)可知, 偏离度更能反映故障恢复方案的优点和缺点而不是距离。因此, 偏离度可用于获得综合评价结果以对恢复方案进行排序。如果两个或更多个方案的偏离度相等, 则将该部分方案到理想点  $P$  的距离进行比较, 并根据最终的排序结果评估每个恢复方案的优劣程度。

### 3 配电网故障恢复流程

当配电网发生故障时, 恢复失电区域供电主要有两种恢复策略, 分别为利用主网中馈线的转供恢复供电和利用 DG 形成孤岛供电, 故障恢复的实质是通过一系列开关的开断与闭合完成对失电区域的供电<sup>[26-27]</sup>。具体步骤如下:

(1) 通过广度优先搜索法遍历失电区域内具有黑启动能力的 DG, 有则进行孤岛供电, 无则进行主网馈线转供恢复。

(2) 生成故障恢复候选方案集的步骤如下:

- ① 统计所有失电区域并计算失电区域负荷总量;
- ② 计算每个馈线的负荷裕量, 搜索相应的联络开关和分段开关, 并进行整区恢复或者分区恢复;
- ③ 如果无法进行整区或者分区恢复, 则将相邻馈线的部分负载转移到次相邻馈线, 增加相邻馈线的负载裕量, 并返回步骤②再次搜索;
- ④ 如果仍然无法恢复所有的失电负荷, 执行切负荷处理, 并返回步骤②进行搜索;
- ⑤ 进行潮流计算并判定是否满足约束条件, 不满足则执行切负荷处理, 并返回步骤②再次搜索, 满足判定则输出初始可行方案, 生成故障恢复候选方案集。

(3) 评估故障恢复方案, 步骤如下: ① 计算每个方案的评价指标, 并进行指标同向化、无量纲化处理; ② 分别计算主观权重和客观权重, 得到综合权重, 并将综合权重分配给故障恢复方案中的每个评价指标; ③ 计算各恢复方案到理想点与负理想点的距离和偏离度, 排序得到最佳恢复方案, 恢复剩余失电区域供电。

根据第 2 节中的故障恢复模型和本节的故障恢

复流程, 本文的配电网故障恢复策略算法流程如图 1 所示。

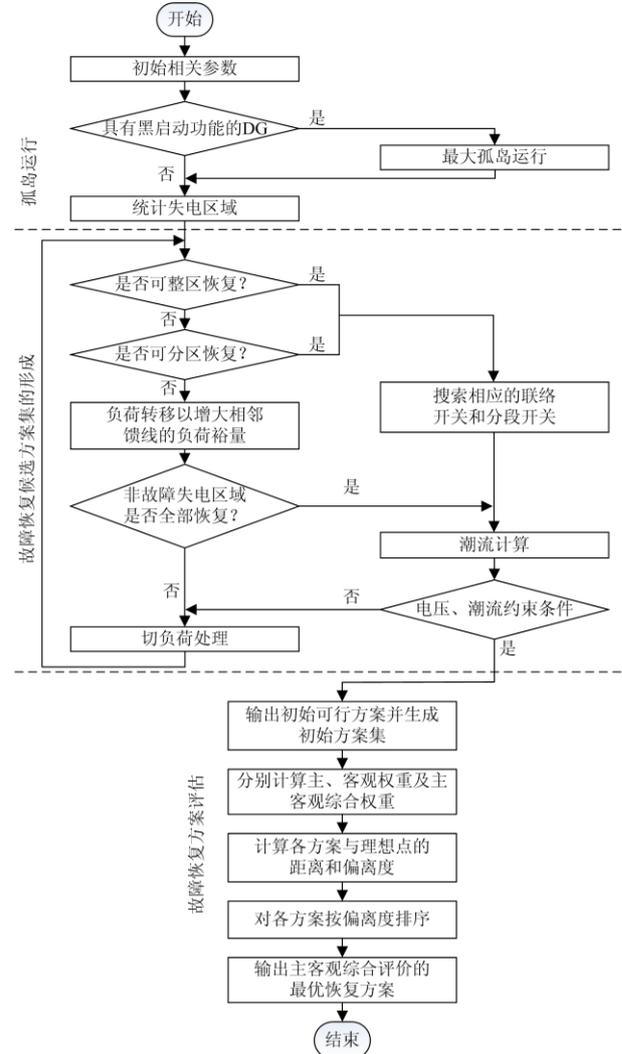


图 1 算法流程

Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

### 4 算例分析

为了验证本文算法的可行性和准确性, 在 Matlab R2016a 环境下, CPU 为 3.30 GHz, 内存 8.00 G, Windows 10 操作系统的 PC 上进行仿真。以图 2 五馈线配电网为例, 图中实线代表分段开关, 虚线代表联络开关, 网络参数见文献[8]。在节点  $b_8$  处接入  $DG_1$ , 容量为 250 kV·A,  $DG_1$  具有黑启动能力, 可以形成孤岛为失电区域供电, 功率因数为 1, 节点  $b_8$  为重要负荷, 需要优先恢复供电, 分段开关  $b$  与  $b_1$  处永久性故障已经发生。为了在故障发生后隔离故障, 必须断开分段开关  $b-b_1$  及所有分布式电源出口处的断路器, 以防止在单独供电时损坏电网。连接到  $b_1$  的下游区域需要快速恢复供电。

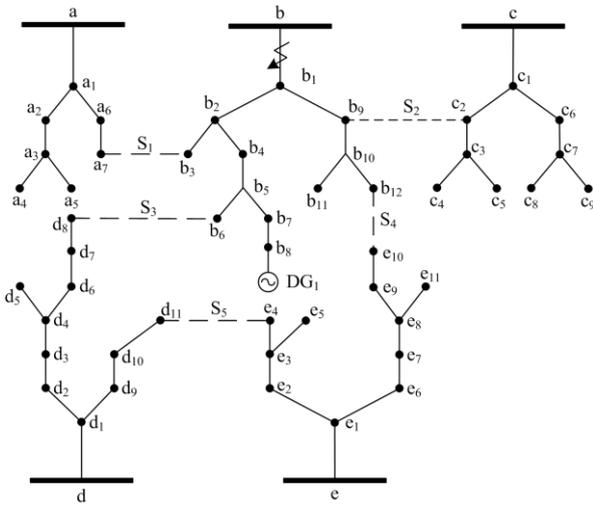


图2 五馈线网络  
Fig. 2 Five-feeder network

阶段一为孤岛供电，已知节点  $b_8$  是重要负荷，其负载量为 120 kW， $DG_1$  的容量为 250 kV·A，功率因数为 1，因此  $DG_1$  能以孤岛的形式优先恢复节点  $b_8$  的失电负荷，并且同时断开分段开关  $b_7$ - $b_8$ 。

阶段二根据启发式规则，无法通过闭合联络开关实现整区恢复，于是转入分区恢复。经搜索，可生成候选方案集，如表 2 所示。

阶段三利用 AHP-CRITIC 算法计算各评价指标的主、客观权重等相关参数，进而得到主客观综合权重，计算偏离度排序得到最佳方案恢复剩余失电区域供电。计算步骤如下。

(1) 由改进 AHP 法计算主观权重

收集专家意见并获得评估指标的顺序如下：负荷恢复比例  $K_1$  > 开关操作次数  $K_2$  > 电压降落  $K_4$  > 负荷容量裕度  $K_5$  > 负荷转移量  $K_3$ 。

可以通过收集专家意见来确定指标间的相对重要程度，在本文中该意见被假定为： $r_{12} = 1.4$ ， $r_{23} = 1.6$ ， $r_{34} = 1.2$ ， $r_{45} = 1.4$ 。

根据式(4)得出判断矩阵  $R$ ：

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1.4 & 2.24 & 2.688 & 3.7632 \\ 0.7143 & 1 & 1.6 & 1.92 & 2.688 \\ 0.4464 & 0.6250 & 1 & 1.2 & 1.68 \\ 0.3720 & 0.5208 & 0.8333 & 1 & 1.4 \\ 0.2657 & 0.3720 & 0.5952 & 0.7143 & 1 \end{bmatrix}$$

利用式(5)计算出各单项指标的主观权重： $\alpha_1 = 0.3573$ ， $\alpha_2 = 0.2552$ ， $\alpha_3 = 0.0950$ ， $\alpha_4 = 0.1595$ ， $\alpha_5 = 0.1329$ 。主观权重向量依次代表负荷恢复比例  $K_1$ 、开关操作次数  $K_2$ 、负荷转移量  $K_3$ 、电压降落  $K_4$  和负荷容量裕度  $K_5$  的主观权重值。

(2) 由 CRITIC 法计算客观权重

由表(2)可得评价矩阵  $X$ ：

$$X = \begin{bmatrix} 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 75 \\ 3 & 3 & 3 & 5 & 5 & 2 \\ 180 & 210 & 230 & 160 & 180 & 265 \\ 0.9540 & 0.9212 & 0.8996 & 0.9648 & 0.9574 & 0.9852 \\ 50 & 25 & 35 & 55 & 25 & 25 \end{bmatrix}$$

利用式(7)、式(8)对矩阵  $X$  进行标准化处理后得到标准矩阵  $X''$ ：

$$X'' = \begin{bmatrix} 0.4240 & 0.4240 & 0.4240 & 0.4240 & 0.4240 & 0.3180 \\ 0.4230 & 0.4230 & 0.4230 & 0.3393 & 0.3393 & 0.4826 \\ 0.4269 & 0.3999 & 0.3838 & 0.4470 & 0.4269 & 0.3584 \\ 0.4067 & 0.4134 & 0.4179 & 0.4046 & 0.4061 & 0.4006 \\ 0.5384 & 0.2692 & 0.3769 & 0.5922 & 0.2692 & 0.2692 \end{bmatrix}$$

根据 CRITIC 法，由式(11)可得各项指标的信息量  $G_1 = 0.1975$ ， $G_2 = 0.2553$ ， $G_3 = 0.1491$ ， $G_4 = 0.0288$ ， $G_5 = 0.6669$ ，由式(12)可得客观权重，向量  $\beta_1 = 0.1522$ ， $\beta_2 = 0.1967$ ， $\beta_3 = 0.1149$ ， $\beta_4 = 0.0222$ ， $\beta_5 = 0.5140$ ，结果如表 3 所示。

(3) 综合权重及方案决策

利用式(15)求得主、客观综合权重向量为  $\omega = [0.2144, 0.3180, 0.1937, 0.0844, 0.2229]^T$ ，分别代表负荷恢复比例  $K_1$ 、开关操作次数  $K_2$ 、负荷转移量  $K_3$ 、电压降落  $K_4$  和负荷容量裕度  $K_5$  的综合权重值，即为由改进 AHP 法与 CRITIC 法相结合求得的各评价指标综合权重。

表 2 故障恢复候选方案集与评价指标

Table 2 Candidate schemes of service restoration and their evaluation indexes

方案编号	开关操作		故障恢复评价指标				
	闭合	断开	负荷恢复比例	开关操作次数	负荷转移量/A	电压降落	负荷容量裕度/A
1	$S_1$ 、 $S_2$	$b_1$ - $b_2$	100	3	180	0.9540	50
2	$S_1$ 、 $S_3$	$b_2$ - $b_4$	100	3	210	0.9212	25
3	$S_1$ 、 $S_4$	$b_1$ - $b_9$	100	3	230	0.8996	35
4	$S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$	$b_1$ - $b_9$ 、 $b_2$ - $b_4$	100	5	160	0.9648	55
5	$S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_4$	$b_1$ - $b_9$ 、 $b_{10}$ - $b_{12}$	100	5	180	0.9574	25
6	$S_1$	$b_9$ - $b_{10}$	75	2	265	0.9854	25

表 3 CRITIC 法的计算结果

Table 3 Calculation results of CRITIC method

参数	$G_i$	$\beta_i$
$K_1$	0.197 5	0.152 2
$K_2$	0.255 3	0.196 7
$K_3$	0.149 1	0.114 9
$K_4$	0.028 8	0.022 2
$K_5$	0.666 9	0.514 0

利用式(16)对  $X''$  赋予综合权重后得到加权评价矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} 0.0909 & 0.0909 & 0.0909 & 0.0909 & 0.0909 & 0.0682 \\ 0.1345 & 0.1345 & 0.1345 & 0.1079 & 0.7079 & 0.1535 \\ 0.0827 & 0.0775 & 0.0743 & 0.0866 & 0.0827 & 0.0694 \\ 0.0343 & 0.0349 & 0.0353 & 0.0341 & 0.0343 & 0.0338 \\ 0.1200 & 0.0600 & 0.0840 & 0.1320 & 0.0600 & 0.0600 \end{bmatrix}$$

各恢复方案与理想点负理想点的偏离度可由式(18)、式(19)计算, 结果如表 4 所示。

表 4 基于主客观权重的方案顺序

Table 4 Scheme order based on subjective and objective weights

方案编号	偏离度	排序
1	0.083 9	1
2	0.216 3	5
3	0.165 4	3
4	0.108 2	2
5	0.280 4	6
6	0.214 4	4

$T_j$  越小, 表明该方案越优秀, 最终评价结果由表 4 可得故障恢复方案的优劣次序为: 方案 1 > 方案 4 > 方案 3 > 方案 6 > 方案 2 > 方案 5, 方案 1 为最佳恢复方案, 按照方案 1 恢复的网络如图 3 所示。

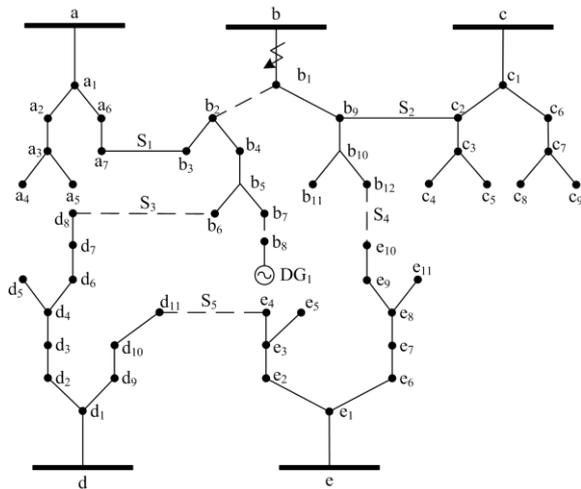


图 3 故障恢复后的五馈线网络

Fig. 3 Five-feeder network after service restoration

运用文献[11]提出的熵权理论对故障恢复方案进行综合评价, 可计算获得各方案的偏离度为  $T = [0.3487, 0.4165, 0.2395, 0.4620, 0.6845, 0.8336]^T$ , 此时方案 3 为最佳恢复方案。虽然由评价指标的具体参数可知方案 3 与方案 1 的负荷恢复比例与开关操作次数均相同, 但考虑到负荷转移量与负荷容量裕度时, 显然方案 1 更优于方案 3。因此, 对比这两种算法的评价结果可知, 方案 1 为最佳恢复方案, 且更符合实际情况, 这证明了本文方法在解决配电网故障恢复问题中的实用性和准确性。

表 5 给出的是本文算法对比遗传算法与粒子群算法在陷入局部最优次数和平均耗时上的对比数据。从表 5 中可以看出, 本文算法不仅在陷入局部最优次数上优于另外两种给定算法, 而且平均耗时最短, 说明本文算法能够避免智能优化算法易陷入局部最优解问题, 实时性较好, 并具有较高的计算速率。

表 5 算法性能对比

Table 5 Comparison of algorithm performance

算法	陷入局部最优次数	平均耗时/s
遗传算法	3	21.27
粒子群算法	5	16.64
本文算法	0	7.85

## 5 结论

本文在配电网故障恢复问题的基础上, 提出了一种基于启发式规则与 AHP-CRITIC 算法的故障恢复策略, 实现了含分布式电源的配电网故障恢复, 所得结论如下:

(1) 启发式规则用于生成故障恢复候选方案集, 改进的 AHP 和 CRITIC 方法分别用于获得主观和客观权重。基于最小信息鉴别原理, 将主观和客观权重相结合, 考虑主观因素和客观因素的影响, 使各项指标权重更加合理。

(2) 通过计算每个评估指标与理想点之间的距离和偏离度, 进而对偏离度排序实现故障恢复候选集的有效综合评价。

(3) 通过算例分析验证了所提出的配电网故障恢复策略的有效性。算例结果表明, 该方法不仅可以全面评估各个故障恢复方案, 还可以反映不同方案之间的对比度以及各指标间的冲突性, 以确保最佳的恢复计划, 是一种有效的综合评估恢复策略。

## 参考文献

[1] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 168-175.

- WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 168-175.
- [2] SINGH M. Protection coordination in distribution systems with and without distributed energy resources-a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 294-310. DOI: 10.1186/s41601-017-0061-1.
- [3] 蒋雷海, 万芳茹, 徐泰山. 电力系统故障恢复方法简述[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(5): 70-73.  
JIANG Leihai, WAN Fangru, XU Taishan. Review on approaches of power system restoration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(5): 70-73.
- [4] 冯杰, 陈骏宇, 陈明军, 等. 基于图论的含分布式电源配电网故障恢复算法[J]. 中国电力, 2015, 48(6): 63-71.  
FENG Jie, CHEN Junyu, CHEN Mingjun, et al. Fault recovery algorithms for distribution networks with distributed generation based on graph theory[J]. Electric Power, 2015, 48(6): 63-71.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] RODRIGUEZ J R A, VARGAS A. Fuzzy-heuristic methodology to estimate the load restoration time in MV networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 1095-1102.
- [8] 刘凯, 李文佩, 程潜善, 等. 基于启发式规则和人工免疫的智能配电网自愈[J]. 武汉大学学报, 2016, 49(2): 218-222.  
LIU Kai, LI Wenpei, CHEN Qianshan, et al. Self-healing of smart distribution network based on heuristic rules and artificial immune[J]. Journal of Wuhan University, 2016, 49(2): 218-222.
- [9] SINGH S P, RAJU G S, RAO G K, et al. A heuristic method for feeder reconfiguration and service restoration in distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2009, 31(7): 309-314.
- [10] 周永勇, 周淙, 刘育明, 等. 基于启发式搜索和模糊评价算法的配电网故障恢复[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(5): 78-82.  
ZHOU Yongyong, ZHOU Quan, LIU Yuming, et al. Heuristic research and fuzzy evaluation for-post-fault restoration in distribution networks[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(5): 78-82.
- [11] 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.
- [12] 李勇, 何蕾, 庞传军, 等. 基于层次分析法的火电厂运行情况量化评价方法[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 500-504.  
LI Yong, HE Lei, PANG Chuanjun, et al. An analytical hierarchy process based quantitative method to evaluate operating condition of thermal power plant[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 500-504.
- [13] 赵书强, 汤善发. 基于改进层次分析法、CRITIC法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 143-148, 162.  
ZHAO Shuqiang, TANG Shanfa. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 143-148, 162.
- [14] 李蕊, 李跃, 徐浩, 等. 基于层次分析法和专家经验的重要电力用户典型供电模式评估[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2336-2341.  
LI Rui, LI Yue, XU Hao, et al. Assessment on typical power supply mode for important power consumers based on analytical hierarchy process and expert experience[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2336-2341.
- [15] 刘小弟, 朱建军, 张世涛. 考虑可信度和方案偏好的犹豫模糊决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(7): 1368-1373.  
LIU Xiaodi, ZHU Jianjun, ZHANG Shitao. Hesitant fuzzy decision making method with confidence levels and preference information on alternatives[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(7): 1368-1373.
- [16] 周剑, 罗添允, 李智勇, 等. 基于改进可拓层次分析的停电影响综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 31-38.  
ZHOU Jian, LUO Tianyun, LI Zhiyong, et al. Comprehensive evaluation of power failure based on

- improved extension analytic hierarchy process[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(3): 31-38.
- [17] 杨斐然, 于永进. 基于时间约束的分层模糊 Petri 网的配电网故障诊断[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(12): 27-36.
- YANG Feiran, YU Yongjin. Fault diagnosis of distribution network based on time constrained hierarchical fuzzy Petri nets[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(12): 27-36.
- [18] 欧阳森, 石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(21): 156-159, 164.
- OUYANG Sen, SHI Yili. A new improved entropy method and its application in power quality evaluation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(21): 156-159, 164.
- [19] 聂宏展, 吕盼, 乔怡, 等. 基于熵权法的输电网规划方案模糊综合评价[J]. *电网技术*, 2009, 33(11): 60-64.
- NIE Hongzhan, LÜ Pan, QIAO Yi, et al. Comprehensive fuzzy evaluation for transmission network planning scheme based on entropy weight method[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(11): 60-64.
- [20] 刘旭娜, 魏俊, 张文涛, 等. 基于信息熵和模糊分析法的配电网投资效益评估及决策[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(12): 48-56.
- LIU Xuna, WEI Jun, ZHANG Wentao, et al. Investment benefits evaluation and decision for distribution network based on information entropy and fuzzy analysis method[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(12): 48-56.
- [21] 李娜娜, 何正友. 主客观权重相结合的电能质量综合评估[J]. *电网技术*, 2009, 33(6): 55-61.
- LI Nana, HE Zhengyou. Power quality comprehensive evaluation combining subjective weight with objective weight[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(6): 55-61.
- [22] 张立军, 张潇. 基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法[J]. *统计与决策*, 2015(22): 65-68.
- ZHANG Lijun, ZHANG Xiao. Weighted clustering method based on improved CRITIC method[J]. *Statistics & Decision*, 2015(22): 65-68.
- [23] 王成山, 罗凤章. 配电系统综合评价理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 206-226.
- [24] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-020-0154-0.
- [25] 邱玉婷, 李济沅, 邓旭, 等. 基于改进 TOPSIS-RSR 法的电能质量综合评价[J]. *高压电器*, 2018, 54(1): 44-50.
- QIU Yuting, LI Jiyuan, DENG Xu, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on improved TOPSIS-RSR method[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(1): 44-50.
- [26] 任志刚, 刘晓, 杨明. 配电网故障主动抢修指挥监控平台功能设计[J]. *电力信息与通信技术*, 2019, 17(12): 54-60.
- REN Zhigang, LIU Xiao, YANG Ming. Function design of command and monitoring platform for active rush-repair to distribution network[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2019, 17(12): 54-60.
- [27] 康小平, 王溢熹, 陈德炜, 等. 配电网大面积停电时快速恢复路径选择算法研究[J]. *电力信息与通信技术*, 2018, 16(4): 64-69.
- KANG Xiaoping, WANG Yixi, CHEN Dewei, et al. Research on fast recovery path selection algorithm of large blackout in distribution network[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2018, 16(4): 64-69.

收稿日期: 2019-08-24; 修回日期: 2019-11-25

作者简介:

汤旻安(1973—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为清洁能源发电及并网、智能交通信息系统的理论与技术、电厂智能控制; E-mail: tangminan@mail.lzjtu.cn

张凯越(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能电网自愈控制; E-mail: 290062535@qq.com

许希元(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为清洁能源发电及并网控制。E-mail: 2908949918@qq.com

(编辑 姜新丽)