

DOI: 10.7667/PSPC160823

基于集对分析和风险理论的变电站主接线综合评价

栗然¹, 李永彬¹, 翟晨曦¹, 吕子遇¹, 段秦刚²

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600)

摘要: 新《调规》着重强调了负荷对于电网的重要性, 因此在评估和选择变电站主接线时, 有必要从电网层面评估不同变电站主接线形式的失负荷风险。针对变电站主接线评价过程中的不确定性信息, 提出一种基于集对分析和风险理论的变电站主接线综合评价方法。该方法首先从电网层面对变电站主接线进行风险评估, 将评估结果作为变电站主接线的可靠性评价指标。然后利用改进熵权法得到各评价指标的权重系数, 通过集对分析法对评价方案进行不确定性分析。最后综合一次、二次排序的结果选出最优方案。算例验证表明, 集对分析方法决策过程简单直观, 用于变电站主接线综合评价具有良好的不确定性信息处理能力, 从而为工作人员在评估变电站主接线时提供一定的参考和依据。

关键词: 变电站主接线; 不确定性; 风险理论; 集对分析; 综合评价

Comprehensive evaluation of substation main connection based on set pair analysis and risk theory

LI Ran¹, LI Yongbin¹, ZHAI Chenxi¹, LÜ Ziyu¹, DUAN Qingang²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China

Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Power Dispatch Control Centre of

Guangdong Power Grid Corp. Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: The new publication of the Rule No. 599 puts more emphasis on the importance of customers to the power grid, so it is necessary to assess the risk of load-shedding from the perspective of power grid in the assessment and selection of main connection. Aiming at the uncertainty information in the evaluation process of substation main connection, this paper presents a comprehensive evaluation method of substation main connection based on set pair analysis and risk theory. The method evaluates the risk of substation main connection from the perspective of network layer firstly, and its results are used as the reliability evaluation indices of substation main connection. Then the weight coefficients of evaluation indices are obtained by improved entropy weight method, meanwhile, the uncertainty analysis is carried out by set pair analysis. Finally, the optimal scheme is selected by integrating the results of first and second order. Numerical examples show that the process of set pair analysis method is simple and intuitive. When used in substation main connection comprehensive evaluation, set pair analysis method is capable of processing uncertainty information easily, therefore it can provide some reference and basis for designers to select the substation main connection.

This work is supported by Power Dispatch Control Centre of Guangdong Power Grid Corp. Ltd.

Key words: substation main connection; uncertainty; risk theory; set pair analysis; comprehensive evaluation

0 引言

为了响应国务院 599 号令^[1]的号召, 南方电网公司于 2014 年重新修编了《电力事故事件调查规

程》(以下简称新《调规》), 新增了事故处置与负荷恢复时间等方面的内容。从电网运行的角度看, 新《调规》在考虑社会对停电时间的容忍度的同时, 更加强调了对于负荷损失和停电用户数的考核标准。而变电站作为电网中的关键环节, 承担着从输电网到用户的供电任务^[2-4], 其主接线直接影响到电网的安全稳定和供电的可靠性。因此, 在对变电站

基金项目: 广东电网有限责任公司电力调度控制中心科技项目资助

主接线进行评估和选择时,有必要从电网层面评估不同变电站主接线形式的失负荷风险,以此衡量变电站主接线的可靠性。

在实际电网中,由于变电站与电网之间的相互影响,同样接线形式的变电站可靠性可能会随着变电站在系统中作用和位置的不同而变化。所以,从电网角度评估变电站主接线的可靠性时需考虑其对电网的影响。已有部分文献研究了计及变电站主接线的电网可靠性评估,但是,这些文献大多是先对变电站主接线进行可靠性分析,然后将其等效为一个具有故障概率母线节点,在此基础上分析电网可靠性^[5-6]。这种方法在提高电网评估速度的同时,也淡化了变电站主接线对电网的影响。

值得注意的是,变电站主接线综合评价是一个多角度、多因素影响的复杂问题,并且在评价过程中存在大量的不确定性信息^[7],如元件可靠性参数的不确定性、土地价格的不确定性等,这些不确定因素将会导致变电站主接线的风险评估以及综合评价也呈现不确定性,所以合理地处理各种不确定性信息成为变电站主接线客观评价的关键。集对分析理论^[8]是一种处理不确定性问题的系统分析方法,因其具有概念清晰、计算简便等优点而被广泛应用^[9-11]。

鉴于此,本文提出一种基于集对分析和风险理论的变电站主接线综合评价方法。该方法将变电站主接线完全纳入到电网中,首先从电网层面对变电站主接线进行风险评估,将风险评估结果作为变电站主接线的可靠性评价指标,同时定义了反映主接线灵活性和经济性的评价指标,然后利用改进熵权法得到各评价指标的权重系数,通过集对分析法对评价方案进行不确定性分析,综合一次、二次排序的结果选出最优方案。算例验证表明,集对分析模型简单,排序结果合理,能够为工作人员在选择和评估变电站主接线时提供一定的参考和依据。

1 集对分析理论

1.1 联系数

赵克勤在 20 世纪 80 年代提出了集对分析的相关理论,用以处理系统中随机、模糊、中介、不可知等多种不确定性因素。顾名思义,集对就是指具有一定联系的两个集合组成的一个系统。集对分析的基本思路是利用联系数把两个集合的各种关系用一定的数学运算符联系起来,将集合之间的确定性关系和不确定性关系作为一个不确定性系统加以处置。

联系数的一般形式为

$$U = A + Bi \quad (1)$$

式中: A, B 为实数, A 为联系数的确定部分, Bi 为

联系数的不确定部分; i 称为 B 的取值因子, $i \in [-1, 1]$, 以上联系数也称为确定-不确定联系数或同异型联系数。联系数的运算法则参见文献^[12]。

1.2 联系数对不确定性参数的处理

电气元件的可靠性参数可能会由于统计误差或者统计资料不足以及对电网未来运行环境预测不足而具有不确定性^[13]。而现有的变电站主接线风险评估方法均是建立在元件可靠性参数是确切值的基础上,得到的风险指标也是确切值,不能客观地反映评估结果。联系数能够表达大量信息,可根据 i 的不同取值表示数的波动范围^[14]。以元件故障率为例进行说明,元件 l 故障率的联系数形式为

$$\lambda_l = \bar{\lambda}_l + \lambda_{l\max} i \quad (2)$$

$$\begin{cases} \bar{\lambda}_l = \frac{\sum_{c=1}^{\tau} \lambda_{l,c}}{\tau} \\ \lambda_{l\max} = \max(|\max(\lambda_l) - \bar{\lambda}_l|, |\min(\lambda_l) - \bar{\lambda}_l|) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\lambda_{l,c}$ 为第 c 年元件 l 故障率的统计数据; $\bar{\lambda}_l$ 为元件 l 故障率的平均值; $\lambda_{l\max}$ 表示元件 l 故障率的不确定部分; $\lambda_{l\max}$ 和 i 共同决定了元件 l 平均故障率的不确定波动范围。

2 基于集对分析的变电站主接线风险评估

2.1 元件模型

2.1.1 断路器模型

断路器有三种失效模式:主动失效,非主动失效和断路器的拒动。根据断路器不同的失效模式对周围元件造成的影响,采用断路器四状态模型,包括正常状态(N)、计划检修状态(M)、扩大型故障状态(S)和在修状态(R),如图 1 所示。

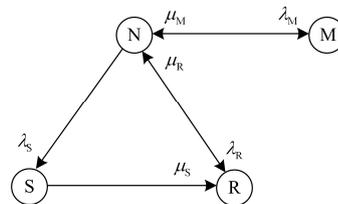


图 1 断路器的四状态模型

Fig. 1 Four-state model of circuit breaker

图中: λ_S 表示扩大型故障率; μ_S 表示扩大型故障修复率; λ_R 为故障率; μ_R 为故障修复率; λ_M 为计划检修率; μ_M 为计划检修修复率。

2.1.2 母线和变压器模型

母线和变压器属于静态元件,其故障时均会引起相邻的断路器动作,所以它们失效为扩大型故障。

因此, 母线和变压器可能的状态包括正常状态、计划检修状态和扩大型故障状态, 其状态空间转移图如图 2 所示。

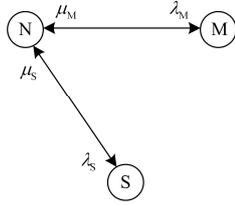


图 2 变压器和母线的三状态模型

Fig. 2 Three-state model of transformer and bus

2.2 变电站主接线连通性分析

变电站主接线风险评估的核心问题是分析内部元件故障或元件故障的组合是否会引起变电站进出线中断。本文中主接线连通性分析过程如下：首先建立变电站主接线的邻接矩阵, 在此基础上形成内部元件的受累停运矩阵, 通过蒙特卡洛法抽样变电站系统状态, 利用逻辑运算获得可达矩阵, 从而判断在该状态下系统的连通性。邻接矩阵在此不再赘述, 见文献[15]。

2.2.1 受累停运矩阵

当变电站内部元件发生扩大型故障时, 相邻的断路器动作隔离故障元件, 这时, 如果相邻的断路器也发生故障, 会使得故障的影响范围进一步扩大。因此, 有必要建立受累停运矩阵以确定变电站主接线元件故障的影响范围。受累停运矩阵是以故障元件 p 为行, 受累停运元件 q 为列表示的, 其矩阵表达式如(4)所示。

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} o_{11} & o_{12} & \cdots & o_{1h} \\ o_{21} & o_{22} & \cdots & o_{2h} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ o_{h1} & o_{h2} & \cdots & o_{hh} \end{bmatrix}_{h \times h} \quad (4)$$

式中, o_{pq} 为停运因子, $o_{pq}=1$ 表示元件 p 的扩大型故障使得元件 q 受累停运, $o_{pq}=0$ 表示元件 p 的扩大型故障对元件 q 无影响。

2.2.2 可达矩阵

在建立了变电站主接线邻接矩阵和内部元件受累停运矩阵后, 就可以利用逻辑运算得到可达矩阵^[16], 从而对变电站主接线进行连通性分析。设可达矩阵 $\mathbf{D} = (d_{xy})_{g \times g}$, 其计算过程如下: 首先, 求得邻接矩阵 \mathbf{B} 的各次幂: $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_g$; 然后利用逻辑运算就可以求得变电站主接线的可达矩阵 $\mathbf{D} = \mathbf{B}_1 \vee \mathbf{B}_2 \vee \dots \vee \mathbf{B}_g$ 。

通过可达矩阵便可判断任意变电站主接线中两个节点之间是否连通, $d_{xy}=1$ 表示节点 v_x 与 v_y

是连通的, $d_{xy}=0$ 表示节点 v_x 与 v_y 不连通。

2.3 蒙特卡洛抽样

非序贯蒙特卡洛模拟法抽样次数与系统规模无关, 具有收敛速度快等优点。每一元件的状态可通过对元件处于该状态的概率进行抽样来获得。以变压器为例, 设 P_N 、 P_M 、 P_S 分别表示变压器处于正常状态、计划检修状态、扩大型故障状态的概率, 令 s_r 表示第 r 个变压器的状态, 对元件 r 产生一个在区间[0,1]内均匀分布的随机数 R_r 。

$$s_r = \begin{cases} 0, & 0 \leq R_r \leq P_N \\ 1, & P_N < R_r \leq P_S \\ 2, & P_S < R_r \leq P_S + P_N + P_M \end{cases} \quad (5)$$

式中: $s_r=0$ 表示第 r 个变压器处于正常状态; $s_r=1$ 表示第 r 个变压器处于扩大型故障状态; $s_r=2$ 表示第 r 个变压器处于计划检修状态。

但是, 由于变电站内部各元件的可靠性参数具有不确定性的特点, 抽样过程中状态概率 P_N 、 P_M 和 P_S 也具有不确定性。如果按照元件参数联系数形式中 i 的不同取值确定各状态概率, 然后针对每一种情形下的状态概率进行模拟, 将会使得计算量异常庞大, 影响非序贯蒙特卡洛模拟的速度。借鉴极限场景集^[17]的相关理论, 本文将极限场景集的思想应用于非序贯蒙特卡洛模拟中, 在考虑元件参数不确定性的同时, 提高了蒙特卡洛模拟的速度。

极限场景集包括最好场景和最坏场景, 最好场景是指对变电站主接线风险评估结果最有利的场景, 最坏场景是指对变电站主接线风险评估结果最不利的场景。元件 r 的正常状态概率包络在波动区间 $[P_N^{\min}, P_N^{\max}]$ 中, 最坏场景是当 $P_N = P_N^{\min}$, 扩大型状态概率为 $P_S + (P_N - P_N^{\min})$ 时, 状态抽样满足以下原则:

$$s_r = \begin{cases} 0, & 0 \leq R_r \leq P_N^{\min} \\ 1, & P_N^{\min} < R_r \leq P_S + (P_N - P_N^{\min}) \\ 2, & P_S + (P_N - P_N^{\min}) < R_r \leq P_S + P_N + P_M \end{cases} \quad (6)$$

最好场景是当 $P_N = P_N^{\max}$, 计划检修状态概率为 $P_M + (P_N^{\max} - P_N)$ 时, 状态抽样满足以下原则:

$$s_r = \begin{cases} 0, & 0 \leq R_r \leq P_N^{\max} \\ 1, & P_N^{\max} < R_r \leq P_S \\ 2, & P_S < R_r \leq P_S + P_N + P_M \end{cases} \quad (7)$$

分别对最好场景和最坏场景进行蒙特卡洛模拟, 可以得到各个风险指标波动的上下限, 将风险指标值转换为联系数的形式, 从而实现了变电站主接线元件可靠性参数的不确定性在风险评估结果中的反映。

2.4 变电站主接线风险评估模型

本文假设发电机组 100%可靠，为了分析变电站主接线对电网的影响，分别对变电站内部设备和电网元件进行蒙特卡洛抽样，融合两者的抽样结果得到系统状态，变电站主接线风险评估流程如图 3 所示。

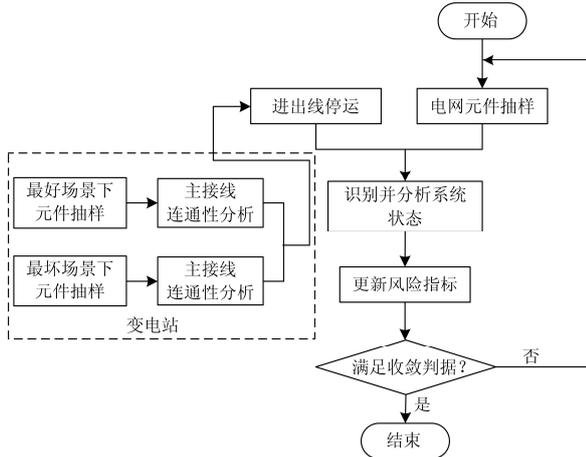


图 3 变电站主接线风险评估流程图

Fig. 3 Flow chart of substation main connection risk assessment

步骤 1：通过式(2)和式(3)将元件的可靠性参数处理成联系系数的形式。

步骤 2：分别对最好场景和最坏场景下变电站内部元件进行蒙特卡洛抽样。比较随机数与对应场景下站内设备状态概率，从而判断其是否停运；如果是非扩大型故障，只有故障元件停运，如果是扩大型故障，则停运故障元件以及相邻的断路器。

步骤 3：分析最好场景和最坏场景下变电站主接线的连通性，输出变电站进出线的停运集合。

步骤 4：对电网元件进行抽样，并将抽样结果与步骤 3 的抽样结果合并，得到整个系统的状态抽样结果。

步骤 5：识别并分析系统状态，利用最优潮流确定故障状态下系统的切负荷量。

步骤 6：根据切负荷量的结果计算风险指标，判断蒙特卡洛抽样是否满足收敛判据，若不满足，返回步骤 2。

步骤 7：仿真结束，运用联系数运算形成风险指标的计算结果。

3 基于集对分析和风险理论的变电站主接线综合评价模型

3.1 评价指标体系

变电站主接线综合评价的影响因素较多，根据主接线的基本要求从可靠性、灵活性和经济性三个

方面对变电站主接线进行评价。可靠性指标从电网层面评估变电站主接线造成的失负荷风险，包括负荷削减频率、负荷削减平均持续时间和期望缺供电量；经济性包括设备投资费用和变电站建筑费用；灵活性主要考虑变电站运行时的检修灵活性。变电站主接线的评价指标体系如表 1 所示。

表 1 变电站主接线评价指标体系

Table 1 Main connection of evaluation index system of substation

评价角度	评价指标
可靠性	负荷削减概率/%
	负荷削减平均持续时间/h
	期望缺供电量/MWh
经济性	设备投资费用/万元
	建筑费用/万元
灵活性	运行检修灵活性/%

评价指标按属性可分为效益型指标和成本型指标。对于某一方案而言，效益型指标越大，成本型指标越小，则该方案越理想。由表 1 中的评价指标体系可知，运行检修灵活性属于效益型指标，即越大越好；其余指标是成本型指标，其值越小，方案越优。

3.2 改进熵权法

熵权法是一种简单的客观赋权方法，其基本思想是根据各评价指标的指标值所提供信息量的大小来确定指标权重^[18]。然而，熵权法得到的指标权重可能与决策者的主观偏好有所差异。所以，本文采用一种改进的熵权法，首先利用熵权法确定指标的客观权重，然后与决策者给出的主观权重进行合并，最终得到能反映决策者主观偏好的客观权重向量。设有 n 个评价指标，熵权法得到第 k 个指标的客观权重为 w_k ，决策者给出的主观权重为 f_k ，各评价指标的综合权重 z_k 计算公式为

$$z_k = \frac{w_k f_k}{\sum_{k=1}^n w_k f_k} \quad (8)$$

3.3 集对分析的决策过程

本文运用集对分析处理评价指标的不确定性，将实数域的问题映射到二维确定-不确定空间，从而在二维确定-不确定空间建立联系数的多属性决策模型。设有 m 个评价方案： A_1, A_2, \dots, A_m ，每个方案有 n 个评价指标： C_1, C_2, \dots, C_n ，方案 A_i 在评价指标 C_k 下的指标值为 $u_{ik} = a_{ik} + b_{ik}i$ ， $1 \leq i \leq m$ ， $1 \leq k \leq n$ ，则决策矩阵为 $R = (u_{ik})_{m \times n}$ 。该方法的步骤如下所述。

1) 联系数评价指标的标准化处理。对于效益型评价指标, 其最优值为 $\max_t(a_{tk} + b_{tk})$, 标准化处理按式(9)计算。

$$v_{tk} = \frac{a_{tk}}{\max_t(a_{tk} + b_{tk})} + \frac{b_{tk}}{\max_t(a_{tk} + b_{tk})} i, t=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

对于成本型评价指标, 其最优值为 $\min_t(a_{tk} - b_{tk})$, 标准化处理公式为

$$v_{tk} = \frac{a_{tk} \cdot \min_t(a_{tk} - b_{tk})}{a_{tk}^2 - b_{tk}^2} + \frac{b_{tk} \cdot \min_t(a_{tk} - b_{tk})}{a_{tk}^2 - b_{tk}^2} i, t=1, 2, \dots, m \quad (10)$$

2) 计算加权后的决策矩阵和综合评价。利用联系数的乘法运算法则可计算出决策矩阵 $R_{m \times n} = [z_k v_{tk}]_{m \times n}$, 综合评价值的计算公式为

$$M(A_i) = \sum_{k=1}^n z_k v_{tk} \quad (11)$$

3) 对综合评价值 $M(A_i)$ 作不确定性分析, 分别计算 $i = -1, i = -0.5, i = 0, i = 0.5, i = 1$ 时 $M(A_i)$ 的取值, 并根据 $M(A_i)$ 的取值大小对评价方案进行一次排序。

4) 对评价方案进行二次排序。分别对每个评价方案在其他评价方案与其取不同值时的交叉取值排序分析, 并记录此时所有可能的排序数 q_{ti} , 最优的方案排序数记为 m , 次优的记为 $m-1$, 以此类推, 最差的方案排序数记为 1。计算各个评价方案在不同情况下不同排序数的总和, 记为 $N(A_i)$, 其计算公式为

$$N(A_i) = \sum_{i=-1, -0.5, 0.5, 1} \sum_{t=1}^m q_{ti} \quad (12)$$

5) 综合一次排序与二次排序的结果作出各个评价方案的最终排序, 选出最优方案。

4 算例分析

4.1 变电站主接线风险评估

利用本文中变电站主接线风险评估方法对 IEEE-RTS79 测试系统进行仿真, 如图4所示。由节点 9、10、11、12 构成的 220 kV 变电站包括 4 回进线、6 回出线、4 台变压器, 变电站内部元件参数见文献[19], 假设元件参数存在 5% 的偏差。

为分析不同变电站主接线形式对电网的影响, 分别针对 3/2 断路器、双母线、单母线分段和双母线带旁路 4 种接线形式进行蒙特卡洛仿真, 每种主接线形式抽样 50 000 次。选用负荷削减概率 PLC、期望缺供电量 EENS、负荷削减平均持续时间 ADLC 作为风险指标衡量仿真结果。4 种接线形式的风险

评估结果如表 2、表 3 所示。

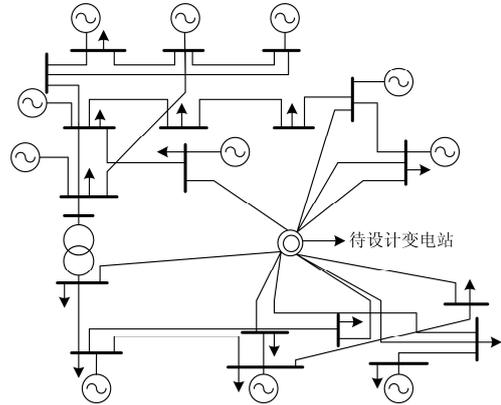


图 4 IEEE-RTS79 测试系统

Fig. 4 IEEE-RTS79 test system

表 2 不考虑元件参数不确定性的风险评估结果
Table 2 Risk assessment results without considering component parameter uncertainty

接线形式	PLC	ADLC/h	EENS/MWh
3/2 断路器接线	0.0437	10.4869	7457.9
双母线接线	0.0613	14.0123	8306.6
单母线分段接线	0.0702	15.7172	9422.7
双母线带旁路接线	0.048	11.31	7723.6

表 3 考虑元件参数不确定性的风险评估结果
Table 3 Risk assessment results considering component parameter uncertainty

接线形式	PLC	ADLC/h	EENS/MWh
3/2 断路器接线	0.0438+0.0015i	10.4696+0.2389i	7426+274.8i
双母线接线	0.062+0.0042i	14.1657+0.7685i	8318.7+412.3i
单母线分段 接线	0.0731+0.0059i	15.9715+0.8852i	9388.4+467.4i
双母线带旁路 接线	0.0478+0.0024i	11.2859+0.664i	7771.2+354.4i

对比表2、表3可以看出, 根据不确定分量 i 取值的不同, 联系数形式的风险评估结果包含了多个确定值的评估结果。与不考虑元件参数不确定性的风险评估结果相比, 联系数形式风险评估结果的确定部分相差不大, 验证了基于联系数的变电站主接线风险评估方法的正确性。联系数形式的风险评估结果能清晰地反映元件可靠性参数的不确定性对评估结果的影响, 更适用于工程应用。

由表2可知, 3/2 断路器接线形式的各项风险指标均优于其他三种接线形式, 当不考虑元件原始参数不确定性时, 就变电站主接线的可靠性而言, 3/2 断路器接线是最优方案, 这与定性分析得出的结果一致。但是, 当考虑元件参数不确定性时, 主接线

风险评估结果在某一范围内波动, 如表 3 所示, 此时, 各变电站主接线的优劣难以直观的比较。

4.2 变电站主接线综合评价

当考虑电气元件可靠性参数的不确定性时, 为验证本文所用方法的可行性, 以 4.1 节得到的风险

评估结果为变电站主接线的可靠性评价指标, 同时, 从经济性、灵活性等方面评价变电站主接线形式, 如表 4 所示。其中, C_4 、 C_5 参考文献[20], 并假设费用估算在此基础上存在 3% 的偏差, C_6 为专家打分值, 分数范围为 1(最差)~100(最优)。

表 4 变电站主接线可行方案的指标值

Table 4 Indices values of substation main connection feasible scheme

评价指标	3/2 断路器接线(A_1)	双母线接线(A_2)	单母线分段接线(A_3)	双母线带旁路接线(A_4)
负荷削减概率(C_1)	0.0438+0.0015 <i>i</i>	0.062+0.0042 <i>i</i>	0.0731+0.0059 <i>i</i>	0.0478+0.0024 <i>i</i>
负荷削减平均持续时间(C_2)	10.4696+0.2389 <i>i</i>	14.1657+0.2389 <i>i</i>	15.9715+0.8852 <i>i</i>	11.2859+0.664 <i>i</i>
期望缺供电量(C_3)	7426+274.8 <i>i</i>	8318.7+412.3 <i>i</i>	9388.4+467.35 <i>i</i>	7771.2+354.4 <i>i</i>
设备投资费用(C_4)	7785+233.55 <i>i</i>	4731+141.93 <i>i</i>	3496+104.88 <i>i</i>	4967+149.01 <i>i</i>
建筑费用(C_5)	2349+70.47 <i>i</i>	1604+48.12 <i>i</i>	1056+31.68 <i>i</i>	1620+48.6 <i>i</i>
运行检修灵活性(C_6)	98	81	70	90

根据式(9)和式(10)对评价指标进行标准化处理, 从而消除各个评价指标量纲和数量级之间的差异, 经标准化处理后的决策矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.9669 + 0.0331i & 0.6854 + 0.0464i & 0.5825 + 0.047i & 0.8872 + 0.0445i \\ 0.9777 + 0.0223i & 0.7243 + 0.0393i & 0.6425 + 0.0356i & 0.9097 + 0.0535i \\ 0.9643 + 0.0357i & 0.8618 + 0.0427i & 0.7636 + 0.038i & 0.9221 + 0.0421i \\ 0.436 + 0.0131i & 0.7174 + 0.0215i & 0.9709 + 0.0291i & 0.6833 + 0.0205i \\ 0.4365 + 0.0131i & 0.6392 + 0.0192i & 0.9709 + 0.0291i & 0.6329 + 0.019i \\ 1 + 0i & 0.8265 + 0i & 0.7143 + 0i & 0.9184 + 0i \end{bmatrix}$$

根据决策矩阵 R , 利用改进熵权法可确定各评

价指标的权重系数 W 。

$$W = [0.2604, 0.2204, 0.1547, 0.1582, 0.1558, 0.0505]$$

计算加权后的决策矩阵和综合评价价值, 利用联系系数的乘法运算法则可得到加权后的决策矩阵和综合评价价值, 其值如表 5 所示。

对 $M(A_i)$ 作不确定性分析, 分别计算 $i = -1, i = -0.5, i = 0, i = 0.5, i = 1$ 时 $M(A_i)$ 的取值, 并根据 $M(A_i)$ 的取值大小对评价方案进行一次排序。排序结果如图 5 所示。

表 5 加权后的决策矩阵和综合评价价值

Table 5 Weighted decision matrix and comprehensive evaluation values

	A_1	A_2	A_3	A_4
C_1	0.2518+0.0086 <i>i</i>	0.1785+0.0121 <i>i</i>	0.1517+0.0123 <i>i</i>	0.231+0.0116 <i>i</i>
C_2	0.2155+0.0049 <i>i</i>	0.1597+0.0087 <i>i</i>	0.1416+0.0078 <i>i</i>	0.2005+0.0118 <i>i</i>
C_3	0.1492+0.0055 <i>i</i>	0.1333+0.0066 <i>i</i>	0.1181+0.0059 <i>i</i>	0.1426+0.0065 <i>i</i>
C_4	0.069+0.0021 <i>i</i>	0.1135+0.0034 <i>i</i>	0.1536+0.0046 <i>i</i>	0.1081+0.00032 <i>i</i>
C_5	0.068+0.002 <i>i</i>	0.0996+0.003 <i>i</i>	0.1512+0.0045 <i>i</i>	0.0986+0.003 <i>i</i>
C_6	0.068+0 <i>i</i>	0.0996+0 <i>i</i>	0.1512+0 <i>i</i>	0.0464+0 <i>i</i>
$M(A_i)$	0.8039+0.0232 <i>i</i>	0.7263+0.0337 <i>i</i>	0.7523+0.0351 <i>i</i>	0.8273+0.0361 <i>i</i>

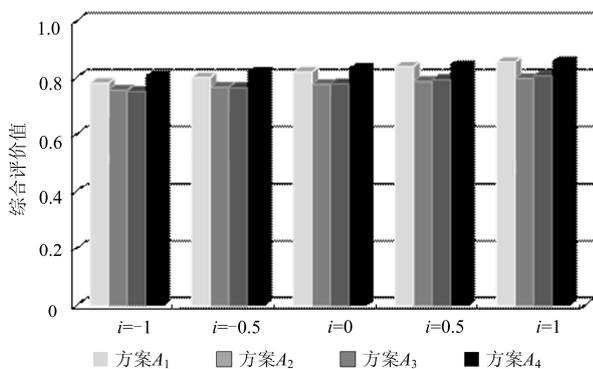


图 5 不同取值下的综合评价价值

Fig. 5 Comprehensive evaluation values of different situations

由图 5 可知, 当 i 分别取 -1, -0.5, 0, 0.5, 1 时, 评价方案 A_4 的综合评价价值都是最大的, 评价方案 A_1 次之; 评价方案 A_2 的综合评价价值均小于 A_3 。这说明, 当对每个方案综合评价价值中的 i 进行同步取值时, 双母线带旁路接线是最优方案。但是, 当各方案综合评价价值中 i 作不同步取值时, 方案的综合评价价值排序可能发生变化。例如, 当 $M(A_1)$ 中 i 取 -0.5, $M(A_4)$ 中 i 取 -1 时, 综合评价价值 $M(A_1) > M(A_4)$, 即方案 1 优于方案 4。因此, 需要在一次排序的基础上, 再分别对每个方案综合评价价值中的 i 与其他方案进行交叉取值, 通过不确定性分析实现评价方案的二次排序。

由表 6—表 9 可知, 不同评价方案的排序数总和存在以下关系: $N(A_4) > N(A_1) > N(A_3) > N(A_2)$, 所以评价方案的排序结果为 $A_4 \succ A_1 \succ A_3 \succ A_2$ 。二次排序与一次排序的排序结果一致, 因此, 从可靠性、经济性和灵活性三方面评价变电站的主接线形式, 双母线带旁路接线是最优方案。

表 6 评价方案 A_1 可能的排序结果Table 6 Possible sequence results of evaluation scheme A_1

可能排序	$A_i(i=2,3,4)$					
	$i=-1$	$i=-0.5$	$i=0$	$i=0.5$	$i=1$	
A_1	$i=-1$	3	3	3	3	2
	$i=-0.5$	4	3	3	3	2
	$i=0$	4	3	3	3	3
	$i=0.5$	4	4	3	3	3
	$i=1$	4	4	3	3	3
	$N(A_1)$	79				

表 7 评价方案 A_2 可能的排序结果Table 7 Possible sequence results of evaluation scheme A_2

可能排序	$A_i(i=1,3,4)$					
	$i=-1$	$i=-0.5$	$i=0$	$i=0.5$	$i=1$	
A_2	$i=-1$	1	1	1	1	1
	$i=-0.5$	1	1	1	1	1
	$i=0$	2	1	1	1	1
	$i=0.5$	2	2	1	1	1
	$i=1$	2	2	2	1	1
	$N(A_2)$	31				

表 8 评价方案 A_3 可能的排序结果Table 8 Possible sequence results of evaluation scheme A_3

可能排序	$A_i(i=1,2,4)$					
	$i=-1$	$i=-0.5$	$i=0$	$i=0.5$	$i=1$	
A_3	$i=-1$	2	2	1	1	1
	$i=-0.5$	2	2	2	1	1
	$i=0$	2	2	2	2	1
	$i=0.5$	2	2	2	2	2
	$i=1$	3	2	2	2	2
	$N(A_3)$	45				

表 9 评价方案 A_4 可能的排序结果Table 9 Possible sequence results of evaluation scheme A_4

可能排序	$A_i(i=1,2,3)$					
	$i=-1$	$i=-0.5$	$i=0$	$i=0.5$	$i=1$	
A_4	$i=-1$	4	3	3	3	3
	$i=-0.5$	4	4	4	3	3
	$i=0$	4	4	4	4	4
	$i=0.5$	4	4	4	4	4
	$i=1$	4	4	4	4	4
	$N(A_4)$	94				

5 结论

本文将集对分析法应用于变电站主接线的风险评估, 在此基础上, 建立了基于联系数不确定性分析的多属性决策模型, 实现了变电站主接线方案的综合评价。通过算例分析, 可以得出以下结论:

1) 文中的变电站主接线风险评估方法不仅可以用于变电站设计阶段, 而且还能应用于变电站运行阶段, 以评估变电站主接线对系统造成的风险。

2) 联系数能进行参数不确定性的风险评估, 评估结果表明了元件可靠性参数的不确定性对风险指标的影响。与实数型指标相比, 联系数指标根据 i 的不同取值, 包含了大量信息, 更适用于工程应用。

3) 联系数指标反映的是变电站主接线某一属性的变化范围, 并且在此范围内的每一个点都有可能取到, 导致各个方案的优劣排序具有不确定性。通过文中决策模型的不确定性分析, 综合一次、二次排序的结果, 作出了可靠的决策, 从而能够为工作人员在选择和评估变电站主接线时提供一定的参考和依据。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院. 电力安全事故应急处置和调查处理条例[EB/OL]. [2011-07-15]. http://www.gov.cn/jzwgk/2011-07/15/content_1906887.htm.
- [2] 徐小宁. 变电站主接线方式可靠性评估与方案优选[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 441-446.
XU Xiaoning. Reliability assessment and optimization of main electrical connection of substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 441-446.
- [3] LEITE DA SILVA A M, VIOLIN A, CLAUDIO F, et al. Probabilistic evaluation of substation criticality based on static and dynamic system performances[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1410-1418.
- [4] 徐岩, 迟成. 基于 LCC 管理的变电站主接线的风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 74-80.
XU Yan, CHI Cheng. Risk assessment of substation main connection based on LCC management[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 74-80.
- [5] 陈云峰, 张焰. 计及变电站主接线影响的输电网可靠性评估系统[J]. 现代电力, 2007, 24(3): 44-47.
CHEN Yunfeng, ZHANG Yan. Assessment system for transmission network reliability considering substation bus arrangement[J]. Modern Electric Power, 2007, 24(3): 44-47.
- [6] KUMAR N M G, SANGAMEWARA R, NEHA S N, et al. EHVAC substation reliability evaluation using simulation approach-case study[C] // 2013 International Conference on Advanced Computing Technologies (ICACT), 21-22 September, 2013: 1-7.

- [7] 王明东, 禹丽爽. 基于灰色局势决策的变电所电气主接线方案选择[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 79-82, 88.
WANG Mingdong, YU Lishuang. Selection of scheme of substation main electrical connections based on grey situation decision-making[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 79-82, 88.
- [8] 谢龙君, 李黎, 程勇, 等. 融合集对分析和关联规则的变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 277-286.
XIE Longjun, LI Li, CHENG Yong, et al. A fault diagnosis method of power transformers by integrated set pair analysis and association rules[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 277-286.
- [9] ARASU K T, ARYA D, BAKSHI A, et al. Constructions of punctured difference set pairs and their corresponding punctured binary array pairs[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(4): 2191-2199.
- [10] 卢凯, 荆彬彬, 吴焕, 等. 基于集对分析的干道绿波协调控制方案评价方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(3): 606-611.
LU Kai, JING Binbin, WU Huan, et al. Evaluation method of arterial green wave coordinated control scheme based on set pair analysis[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(3): 606-611.
- [11] 章恒全, 王慧. 基于模糊-集对分析的水电项目方案综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(2): 128-131, 135.
ZHANG Hengquan, WANG Hui. Comprehensive evaluation of hydropower project scheme based on analysis of fuzzy-set pair[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014, 25(2): 128-131, 135.
- [12] 陈卫东, 肖先勇, 陈礼频, 等. 考虑可靠性参数影响的电压暂降频次联系数评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 35-42.
CHEN Weidong, XIAO Xianyong, CHEN Lipin, et al. Connection number assessment of voltage sag frequency considering the influence of the reliability parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 35-42.
- [13] 任震, 万官泉, 黄雯莹. 参数不确定的配电系统可靠性区间评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 71-76.
REN Zhen, WAN Guanquan, HUANG Wenyong. An interval approach to evaluate distribution system reliability with parameters uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 71-76.
- [14] 熊小伏, 恭秀芬, 王燕祥. 输电网可靠性评估中基于气象因素的处理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 32-37.
XIONG Xiaofu, GONG Xiufen, WANG Yanxiang. A method for transmission network reliability evaluation considering meteorological factors[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 32-37.
- [15] 王小飞, 胡志坚, 吴方劼, 等. 基于改进邻接矩阵的稀疏技术及其在电力系统计算中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 50-56.
WANG Xiaofei, HU Zhijian, WU Fangjie, et al. Improved adjacent matrix based sparse technology and its application in power system calculation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 50-56.
- [16] 胡美玉, 胡志坚, 邓奥攀, 等. 基于元件层级和电源可达性的配电网可靠性评估混合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 22-29.
HU Meiyu, HU Zhijian, DENG Aopan, et al. Hybrid algorithm for reliability evaluation of distribution network based on element hierarchy and power accessibility[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 22-29.
- [17] 高红均, 刘俊勇, 魏震波, 等. 基于极限场景集的风电机组安全调度决策模型[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1590-1595.
GAO Hongjun, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. A security-constrained dispatching model for wind generation units based on extreme scenario set optimization[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1590-1595.
- [18] 吴奕, 朱海兵, 周志成, 等. 基于熵权模糊物元和主元分析的变压器状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 1-7.
WU Yi, ZHU Haibing, ZHOU Zhicheng, et al. Transformer condition assessment based on entropy fuzzy matter-element and principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 1-7.
- [19] 丁宣文. 变电站电气主接线的可靠性与经济性评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
DING Xuanwen. Reliability and economic evaluation of main electrical connection of substation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [20] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程典型设计[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

收稿日期: 2016-03-31; 修回日期: 2016-08-25

作者简介:

栗然(1965—), 女, 博士, 教授, 研究方向为新能源与并网技术、电力系统分析、运行与控制; E-mail: liranlele@163.com

李永彬(1990—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: lyb0207@126.com

翟晨曦(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制。

(编辑 姜新丽)