

DOI: 10.7667/PSPC170031

一种基于相对熵组合赋权法的区间联络线选取方法研究

王如伟, 孔剑虹, 吴港, 杨万清

(国网辽宁省电力有限公司大连供电公司, 辽宁 大连 116011)

摘要: 电网分区后合理确定区间联络线的选取对于抑制短路电流、合理化电网结构、避免连锁故障的发生具有重要意义。为此, 研究了一种基于相对熵组合赋权法的区间联络线选取评估方法。该评估方法选取短路电流、潮流分布、潮流转移、电压稳定和节点短路容量作为综合评价的指标, 并且采用整体短路电流水平、潮流熵、潮流转移熵、系统的最大负荷裕度和系统短路容量裕度来定量描述上述评价指标。为避免单一赋权法的局限性, 采用相对熵组合赋权法确定各评价指标的综合权重, 得到区间联络线选取方案的综合评估值, 进而确定最优方案。最后利用 PSD 电力系统分析软件进行仿真, 仿真算例验证了该方法的有效性和可行性。

关键词: 电网分区; 区间联络线; 相对熵; 组合赋权; 综合评估

Study on the selection of interval tie line based on combinatorial weighting method of relative entropy

WANG Ruwei, KONG Jianhong, WU Gang, YANG Wanqing

(Dalian Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Company Ltd, Dalian 116011, China)

Abstract: The reasonable selection of interval tie line after network partition is of great significance to reducing the short circuit current, adjusting the power grid structure and avoiding the occurrence of cascading failures. Therefore, an evaluation method for the selection of interval tie line based on combinatorial weighting method of relative entropy is studied. The short circuit current, the power flow distribution, the flow transferring, the voltage stability, the node short circuit capacity are selected as the comprehensive evaluation indexes. And the overall short-circuit current level, the trend of entropy, the entropy of power flow transfer, the maximal load margin, the short circuit capacity margin are used to describe the above evaluation index quantitatively. To avoid the limitation of the single weighting method, combinatorial weighting method of relative entropy is used to determine weight for each evaluation index. Comprehensive assessment values of the selection of interval tie line schemes are obtained and optimal scheme is determined. Finally, the PSD power system analysis software is used to carry out the simulation. The effectiveness and feasibility of the proposed method are verified by the simulation example.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 2016YF-32).

Key words: network partition; interval tie line; relative entropy; combinatorial weighting; comprehensive evaluation

0 引言

随着电网结构的不断扩大和网架布局的不断完善, 现阶段我国已有多数地区形成了以 500 kV 环网为主干网架、220 kV 电网为地区电网的分区结构^[1]。电网分区运行, 不仅能有效缓解短路电流超标的情况, 而且解决了电磁环网功率转移造成的稳定问题, 可有效避免连锁故障的发生。电网分区运行后, 网架结构更为清晰, 系统输电损耗有所下降, 电网整

体输电能力也有很大的提高, 为电网安全稳定运行提供了良好的环境。电网分区运行后, 若因系统故障产生区内功率缺额时, 相邻分区可互为备用, 分区间通过联络线提供功率补给或负荷转移是解决功率缺额的重要措施^[2]。

现已有较多研究电网分层分区的文献。文献[3]提出了一种基于社团发现的电网分区方法, 利用复杂网络理论中社团发现识别网络拓扑分区与电网分区结构极相似的特点, 将该方法引入到电网分区中。文献[4]提出了基于负荷电流场的电网分区方法, 将分区看作势值由中心向边界辐射衰减的连通区域。文献[3]、文献[4]均只提出了分区的方法, 并未提到

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(080); 国家电网公司科技项目(2016YF-32)

区间联络线的选取。

电网分区完成后,区间联络线的选取成为关键,当某一分区发生故障时,无论是区间联络线断开避免连锁故障的发生,还是区间通过联络线的连接互为备用的情况,区间联络线选取都至关重要。图1所示为分区联络图。

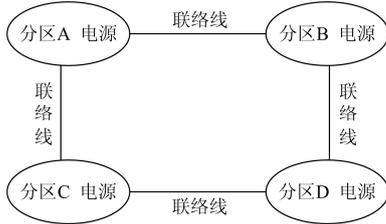


图1 分区联络图

Fig. 1 Partition map

分区间联络线作用主要体现如下:

1) 在网架结构还不够完善的情况下,电网一般采用弱开环方式,区间联络线可保证该区与外区域的连接,主变设备检修时,相邻分区合环运行,联络线起到功率输送的作用。

2) 当分区内有机组故障、负荷骤变等情况致使区内电力供应不足时,区间联络线可作备用线路供区间转移负荷。

文献[5]提出了一种限流综合决策模型,以加权短路电流灵敏度系数为判据,寻找若干组断线组合寻优。文献[6]提到开断线路与超标站点自阻抗有一个灵敏度关系,通过编程可实现开断最少线路以最大限度限流的目的。但文献[5]、文献[6]中的断线均以限流为主旨目标,未从区间联络线的选取角度考虑。现有文献对区间联络线的选取方法研究较少,文献[7-9]中提到区间联络线的选取原则,考虑优先断开潮流较小、跨度较大的线路,但叙述也较为模糊。文献[10]在评估过程中采用模糊层次分析法,无法避免该方法在评估过程中过于主观的缺点。文献[11]采用的熵权法是从客观数据出发,根据数值间的差异程度来得出指标的权重,所得的评估结果也过于主观。

由于评估问题自身的复杂性和信息的不确定性,使用单一赋权法很难对问题进行客观评价。目前相对熵在计算机、生物学等各评估领域都已取得了丰硕的研究成果^[12-14]。因此,本文针对区间联络线的选取方法,提出了一种基于相对熵组合赋权法的区间联络线选取评估体系。该评估体系具有兼顾断线对于短路电流、电压稳定、整体潮流、潮流转移和短路容量等多方面影响的优点,并将该体系应用到实际电网中,论证了该方法的有效性与合理性。

1 区间联络线的决策评估指标

区间联络线的选取涉及断线的问题,断线可有效降低短路电流,提高系统运行的可靠性与稳定性,但是也会对网架结构的完整性造成威胁。断线后系统的短路电流、潮流转移、整体潮流水平、节点电压稳定性和短路容量都会受到影响。为保证评价的完整性与有效性,本文在评价过程中综合考虑以上指标。

1.1 短路电流

在受端电网开断线路后节点自阻抗会相应变大,各节点短路电流值会减小,节点电压稳定性能降低,不利于系统的安全稳定运行。因此,短路电流是必不可少的评估指标。短路电流的评价指标有多种,如整体短路电流水平和短路电流越线水平^[15],本文采用的是前者。

采用 λ_{sc} 表示系统整体短路电流水平,表达式为

$$\lambda_{sc} = \sum_{\gamma} (I_{sc} / I_0)^2 \quad (1)$$

式中: γ 为站点母线集合; I_{sc} 表示短路电流值; I_0 表示母线断路器额定开断电流。

1.2 开断线路对系统电压稳定性的影响分析

节点电压稳定性受线路开断影响很大,严重情况会造成电压失稳甚至崩溃。系统不能满足负荷节点功率需求通常是电压失稳的原因^[16]。基于此,通过分析线路开断后短路电流超标节点电压对自身有功功率或无功功率的灵敏度,求电网戴维南等值参数中的电压和阻抗,再求出系统最大负荷裕度值,它能够有效反映出电压的稳定裕度。

首先运用牛顿-拉夫逊法求解潮流方程得到雅可比矩阵 J ,再求解直角坐标系下牛顿潮流修正方程,得到节点电压实部 e 和虚部 f 。

$$\Delta W = -J \cdot \Delta U \quad (2)$$

$$\dot{U} = e + jf \quad (3)$$

式中: ΔW 为各节点有功功率、无功功率及电压平方的修正量; ΔU 为各节点电压的修正量。

式(2)两边分别对开断线路后某超标节点有功功率增量 ΔP 、无功功率增量 ΔQ 求导,可得该超标节点电压 e 、 f 分别对 ΔP 、 ΔQ 的灵敏度。

若原网络中超标节点有功功率 P 、无功功率 Q 已知,则该节点负荷阻抗 Z 为

$$Z = R + jX = \frac{P(e^2 + f^2)}{P^2 + Q^2} + j \frac{Q(e^2 + f^2)}{P^2 + Q^2} \quad (4)$$

若超标节点按恒功率因数增长,即无功功率随有功功率增长而增长,则开断线路后超标节点有功

功率 P' 、无功功率 Q' 分别为 λP 、 λQ (λ 为负荷裕度值); 超标节点电压 e 、 f 对自身有功功率 P 、无功功率 Q 的灵敏度分别如式(5)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial e}{\partial P} = \frac{\partial e}{\partial \Delta P} + \frac{Q}{P} \cdot \frac{\partial e}{\partial \Delta Q} \\ \frac{\partial f}{\partial P} = \frac{\partial f}{\partial \Delta P} + \frac{Q}{P} \cdot \frac{\partial f}{\partial \Delta Q} \\ \frac{\partial e}{\partial Q} = \frac{\partial e}{\partial \Delta Q} + \frac{Q}{P} \cdot \frac{\partial e}{\partial \Delta P} \\ \frac{\partial f}{\partial Q} = \frac{\partial f}{\partial \Delta Q} + \frac{Q}{P} \cdot \frac{\partial f}{\partial \Delta P} \end{cases} \quad (5)$$

将节点简化电路图等效为戴维南等值电路模型, 如图 2 所示。设该戴维南模型中等值电压、等值阻抗分别为 $E_k = e_k + jf_k$ 、 $Z_k = R_k + jX_k$, 开断线路后增加的线路阻抗为 $z = (U^2/P) \cdot [1 + j(Q/P)]$ 。

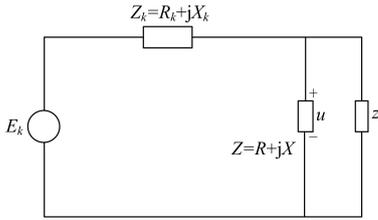


图 2 戴维南等值电路模型

Fig. 2 Thevenin equivalent circuit mode

根据图 2 所示的戴维南等效电路, 列出正常运行状态下超标节点电压与负荷阻抗之间的关系式方程, 得到如式(6)所示方程组。

$$\begin{cases} (ee_k + ff_k) \left[(R + R_k)^2 + (X + X_k)^2 \right] - \\ (e^2 + f^2) \cdot [R(R + R_k) + X(X + X_k)] = 0 \\ (fe_k - ef_k) \left[(R + R_k)^2 + (X + X_k)^2 \right] - \\ (e_k^2 + f_k^2) \cdot [X(R + R_k) - R(X + X_k)] = 0 \end{cases} \quad (6)$$

同理, 可得到线路开断后电压与阻抗的关系方程, 考虑到节点电压对有功功率增量的灵敏度, 对节点自身有功功率分别求一阶导数可得:

$$\begin{aligned} & \left[2(R_k P' + X_k Q') - (e_k + jf_k)^2 \right]^2 - \\ & 4(R_k + jX_k)^2 (P'^2 + Q'^2) \geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

推导出超标节点 k 的最大负荷裕度与戴维南等值参数 (e_k 、 f_k 、 R_k 、 X_k) 之间的关系:

$$\lambda_{mk} = (e_k + jf_k)^2 \cdot \frac{(R_k + jX_k) \sqrt{P^2 + Q^2} - (P + QX_k)}{2(PX_k - QR_k)^2} \quad (8)$$

求电网中所有超标节点的 λ_{mk} , 取该断线措施下系统最大负荷裕度为 $\lambda_m = \min(\lambda_{m1}, \lambda_{m2}, \dots, \lambda_{mk})$ 。 λ_m 值的大小可以反映整个系统节点电压安全稳定水平, 该值越大, 则表明系统电压安全性越好。

1.3 开断线路对潮流分布的影响

为评估断线对电网潮流分布的影响, 本文引入潮流熵^[17]来验证电力系统中潮流分布的合理性。潮流熵的求解过程^[18]如下。

参数 P_i^{\max} 表征第 i 条线路的最大有功传输功率, P_i^0 表征实际运行功率, 由此线路 i 的负载率 u_i 表示为

$$u_i = \left| \frac{P_i^0}{P_i^{\max}} \right|, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中, N 为总的线路数。

确定区间 $[a, b]$ 使全部落入其中, 将 $[a, b]$ 等分为 n 个区间(本文中区间长度为 0.05), 用 $(u_k, u_{k+1}]$ 表示第 k 个区间, l_k 代表负载率在该区间内的所有线路条数, 则线路负载率在第 k 个区间的概率为

$$P(k) = \frac{l_k}{\sum_{k=1}^{n-1} l_k} \quad (10)$$

根据式(9)和式(10)可以得到电网的潮流熵的表达式为

$$H = -C \sum_{k=1}^{n-1} P(k) \ln P(k) \quad (11)$$

式中, C 取 $\ln 10$, 若 $P(k) = 0$, 则 $P(k) \ln P(k)$ 按 0 处理。

根据式(11)的表达式可以看出, 当存在概率 $P(k)$ 为 1 时, 也即所有线路的负载率恰好都落在了同一个区间范围内, 那么此时的电网潮流熵数值为 0, 表明此时系统中的任意两条线路的实际运行功率和最大的有功传输功率的比值都很接近, 即此刻的潮流分布是最均衡的。相反, 当任意线路的负载率都分布在不同区间时, 电网潮流熵数值将会最大, 说明有些线路已过载, 而其他一些线路功率可能远小于额定容量。可见, 潮流熵大小直接反映了负载率的状况, 其数值越小, 那么线路的负载率也就越好。

1.4 开断线路对潮流转移的影响

当环网中线路断开后, 系统联络阻抗发生变化, 必然会引起与该断线相连的线路较大的功率转移。断开线路的潮流转移到其他线路的聚集程度用来衡量系统所受断线造成的潮流转移冲击大小^[19]。

电网中线路 i 断开后, 线路 k 获得转移潮流为

$$\Delta\alpha_{ki} = P_{ki} - P_{ko} \quad (12)$$

式中: P_{ko} 为初始线路潮流; P_{ki} 为线路 i 断开后线路 k 上的潮流; $\Delta\alpha_{ki}$ 为线路 i 对线路 k 的潮流转移冲击。

线路 k 受断线 i 影响的潮流转移冲击率为

$$\beta_{ki}^m = \frac{\Delta\alpha_{ki}}{\sum_{k=1}^L \Delta\alpha_{ki}} \quad (13)$$

线路 i 的潮流转移熵为

$$H_{Ti} = -\sum_{k=1}^L \beta_{ki} \ln \beta_{ki} \quad (14)$$

潮流转移熵 H_{Ti} 可用来衡量断线对系统造成的影响。数值越大, 表明断线造成的潮流转移对系统的危害越大, 该条线路不适宜断开。

1.5 断开线路对节点短路容量的影响

短路容量可反映系统节点抗扰动能力大小及网络关联强度^[20], 本文考虑断开线路尽量不破坏网络的完整性, 故选短路容量裕度为评价指标, 且越小对系统越有利。

系统全部节点的短路容量裕度之和如式(15)。

$$f = \sum_{k=1}^N \frac{S_{cck}^{\max} - S_{cck}}{S_{cck}} \quad (15)$$

式中: N 为节点总数; S_{cck}^{\max} 为节点 k 的短路容量控制上限; S_{cck} 为断线后节点 k 的短路容量。

2 基于相对熵组合赋权法的区间联络线选取评估模型

2.1 多目标评价综合决策模型

1) 评估矩阵的构造以及标准化预处理

假设存在 n 个待评估的方案, 每一方案有 m 个指标, 将方案 $i(i=1,2,\dots,n)$ 的第 $j(j=1,2,\dots,m)$ 个指标值用 x_{ij} 表示, 因方案中指标的属性和量纲互不相同无法比较, 故对 X 作标准化预处理。

对于收益型的指标, 所采用的标准化公式为

$$\mu_{ij} = (x_{ij} - \min_{i \in n} x_{ij}) / (\max_{i \in n} x_{ij} - \min_{i \in n} x_{ij}) \quad (16)$$

对于成本型的指标, 所采用的标准化公式为

$$\mu_{ij} = (\max_{i \in n} x_{ij} - x_{ij}) / (\max_{i \in n} x_{ij} - \min_{i \in n} x_{ij}) \quad (17)$$

标准化处理后获得决策矩阵 $U = (\mu_{ij})_{n \times m}$,

$\mu_{ij} \in [0,1]$ 。

2) 由于断开线路时需要考虑短路电流的大小、潮流分布、潮流转移和短路容量等多方面的影响, 属于多目标属性决策范畴, 建立多目标评价决策模型^[13], 选取 F_i 为最终的评价值, 则有

$$F_i = \sum_{j=1}^m \omega_j \mu_{ij} \quad i=1,2,\dots,m \quad (18)$$

式中: m 为总方案数; n 为总的评价指标; ω_j 为第 j 种评价指标的权重。 F_i 越大, 表示这种方案的评价值越高。由此可见, 权重的计算方法是评价值获取的关键。仅采用单一赋权法, 会造成结果的片面性。本文采用组合赋权法, 综合单一赋权法的优点, 既能反映决策者的主观态度, 又能体现其客观性。

2.2 单一赋权法

2.2.1 主观权重的确定

主观权重的确定是基于层次分析法^[21]。具体的确定过程如下:

1) 构造判别矩阵 P , 其中的元素 $a_{ij} = x_i / x_j$, 式中, a_{ij} 为第 i 个评价指标和第 j 个评价指标的相对重要程度, x_i 和 x_j 的选择参照 Saaty 标度。

2) 求矩阵 P 的最大特征根所对应的特征向量, 该向量为所需的权向量 $W_1 = \{\omega_j | 1 \leq j \leq m\}$ 。

3) 一致性检验。把一致性指标 C_i 和同阶平均随机的一致性指标 R_i 的比值称作随机一致性比率 C_R 。当 $C_R < 0.1$ 时, 认为是符合要求的, 反之就要重新进行评估。

2.2.2 客观权重的确定

熵权法^[22]是通过数理推导得到权重的一种客观计算方法。本文选取该方法进行指标客观权重的计算。主要步骤如下。

1) 对评价值进行标准化处理

$$f_{ij} = u_{ij} / \sum_{j=1}^m u_{ij} \quad (19)$$

2) 求取第 j 个评价指标的熵

$$H_j = -(\sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}) / \ln m, j=1,2,\dots,n \quad (20)$$

设当 $f_{ij}=0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

3) 求取第 j 个评价指标的熵权值

$$\omega_{2j} = (1 - H_j) / (n - \sum_{j=1}^n H_j) \quad (21)$$

2.3 基于相对熵的组合赋权法

在信息论或者概率论中, 相对熵用来描述两个概率分布之间的差异。基于相对熵原理的组合赋权法思想就是使组合权重与各单一赋权法之间的相对熵总和最小。

设层次分析法、熵权法求得的权重向量为 v^k , 它们的权重分配系数为 $k(k=1,2)$, 根据相对熵原理

建立数学模型为

$$\begin{cases} \min Q(\alpha) = \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^n \omega_j \ln(\omega_j / v_j^k) \\ \text{s.t. } \sum_{k=1}^2 \alpha_k = 1, \omega_j = \sum_{k=1}^2 \alpha_k v_j^k \end{cases} \quad (22)$$

3 区间联络线选取的决策步骤

根据多目标评价决策模型以及相对熵组合赋权法, 得到区间联络线选取的评估步骤如图 3 所示。

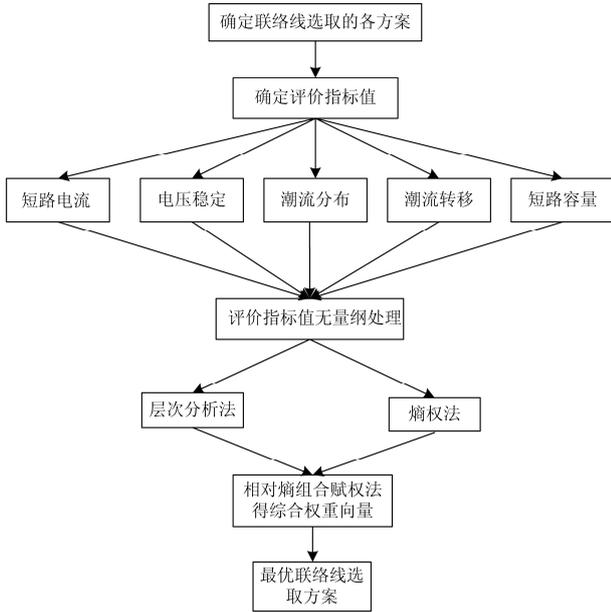


图 3 评估策略流程图

Fig. 3 Evaluation strategy flow chart

4 算例分析

本文以东北电网某地区为例进行区间联络线的选取评估分析。联络线的选取是在电网进行分区的基础上进行的, 本文选取的网架结构包括 500 kV 站 6 个, 220 kV 站 55 个, 电网的分区结果如图 4 所示。为了增加所提评估方法的可信度, 本文对区间联络线的选取拟定四个初始方案。

- 方案一: 断开 YS-JJY、HS-PH、DY-SH、CZS-HC;
- 方案二: 断开 YS-JJY、HS-PH、DY-SH、JAZ-ZJZ;
- 方案三: 断开 YS-JJY、XP-XC、DY-SH、CZS-HC;
- 方案四: 断开 YS-YSG、HS-PH、DY-SH、JAZ-ZJZ。

4.1 初始数据分析

1) PSD-SCCPC 电力系统短路电流计算程序有多种功能, 本文应用该短路电流计算程序进行某地区 500 kV、220 kV 节点短路电流的计算, 指定各节点为三相短路情况, 选择的计算条件为基于潮流。该地区有 61 个站点, 其中 4 个超标站点, 本文仅列

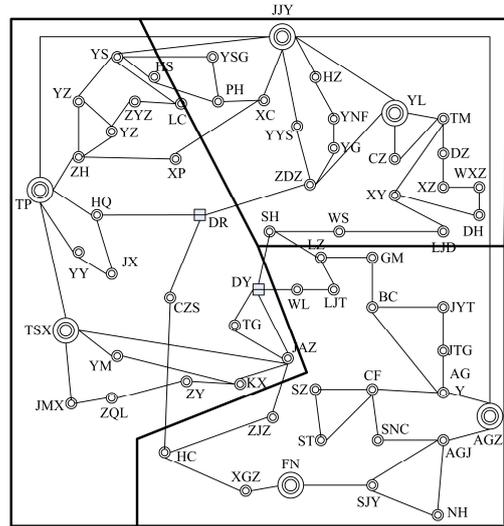


图 4 初始分区图

Fig. 4 Initial partition map

出前 15 个短路电流接近断路器遮断容量的站点。表 1 所示为各方案与初始分区下各节点的短路电流。

2) 因计算潮流熵与潮流转移熵都涉及线路的潮流问题, 本文应用 PSD-BPA 潮流程序进行仿真分析。为提高收敛性, 潮流程序首先采用了 PQ 分解法迭代 10 次得到一个较好的初值, 然后用牛顿-拉夫逊算法迭代 20 次, 仿真得到各支路的有功功率, 然后应用 PSD 软件绘制出地理图格式的潮流图画面如图 5 所示。本文仅画出方案一下线路的潮流分布图。

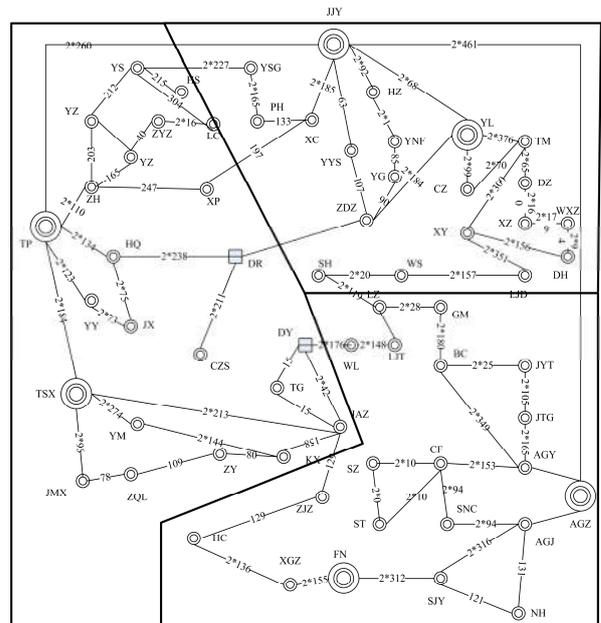


图 5 方案一线路潮流图

Fig. 5 Power flow chart of plan 1

表 1 各方案对应节点的短路电流

Table 1 Short circuit current of corresponding node of each scheme

站点名称	断路器 遮断容量/kA	初始分区/kA	方案一对应节点 短路电流/kA	方案二对应节点 短路电流/kA	方案三对应节点 短路电流/kA	方案四对应节点 短路电流/kA
CZ220 kV	50	60.769	47.964	55.459	49.672	50.636
CZS220 kV	50	53.607	45.341	46.875	52.479	47.864
HC220 kV	50	53.224	42.673	50.754	47.573	44.987
JJY220 kV	50	53.158	45.782	48.533	51.452	50.692
ZDZ220 kV	50	47.879	43.231	45.509	44.988	42.723
TP220 kV	50	47.413	40.551	45.768	44.796	40.357
TB220 kV	50	45.121	41.690	42.865	44.964	44.632
XGZ220 kV	50	44.659	43.259	42.557	41.557	42.557
YN220 kV	50	43.609	40.006	38.465	39.793	40.654
TJ220 kV	50	42.946	41.734	41.589	40.426	40.589
HQ220 kV	50	42.798	41.524	38.678	39.469	36.932
TP500 kV	63	49.669	47.668	45.675	45.887	40.663
AG500 kV	63	42.164	40.625	41.355	40.787	39.665
BY220 kV	50	34.775	33.598	32.592	30.834	30.792
SJ220 kV	50	36.034	34.613	35.730	34.629	33.689

4.2 评价指标的处理

1) 对评估矩阵进行标准化处理

应用 PSD 电力系统分析软件得到基础数据值, 并通过式(1)~式(15)的计算分析得到了包含系统的整体短路电流水平 λ_{sc} 、系统的最大负荷裕度 λ_m 、潮流熵 H_i 、潮流转移熵 H_{Ti} 、系统短路容量裕度 f_i 的评估矩阵。对评估矩阵进行标准化处理, 得到标准化的决策矩阵 U 。

$$U = \begin{bmatrix} 0.6251 & 1.0000 & 1.0000 & 0.5723 & 0.5642 \\ 0.0000 & 0.5473 & 0.0000 & 1.0000 & 0.7521 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.4762 & 0.3214 & 0.0000 \\ 0.4932 & 0.3758 & 0.7321 & 0.0000 & 0.3214 \end{bmatrix}$$

2) 组合赋权法计算指标的综合权重

层次分析法得到主观权重与熵权法得到的客观权重分别为

$$W_1 = (0.2732, 0.1050, 0.3756, 0.1428, 0.1034)^T$$

$$W_2 = (0.2018, 0.2171, 0.1623, 0.2177, 0.2011)^T$$

基于相对熵组合赋权法, 由式(22)得最优权重向量为

$$W = (0.2356, 0.1641, 0.2632, 0.1823, 0.1549)^T$$

由计算结果可知, 最优权重向量 W 介于 W_1 和 W_2 之间, 论证了单一的权重向量计算方法有明显的主观性或客观性, 使用相对熵组合赋权法可使指标的权重更加合理。

3) 根据多目标综合评价模型, 运用式(18)计算得到区间联络线选取的各方案的评价值 $F_i = (0.7808 \ 0.3878 \ 0.4195 \ 0.4203)$ 。根据评价值的大小得到区间联络线选取排序为: 方案一>方案四>方案三>方案二。由此得出方案一为最优方案。

根据方案排序结果分析, 若仅以短路电流的大小来作为区间联络线的选取标准时, 方案的优劣排序为方案一>方案三>方案二>方案四。若仅以潮流分布均匀与否作为区间联络线的选取标准时, 方案的优劣排序为方案一>方案四>方案二>方案三。可见, 区间联络线的选取综合考虑短路电流、潮流分布、潮流转移、电压稳定和短路容量等多指标时, 方案的排序发生了变化, 同样也说明了综合评判结果更具有说服力。

5 结论

本文构建了较为完整的适用于评价电网分区后区间联络线的选取指标体系, 该指标体系考虑了系统潮流分布、短路电流、潮流转移、电压稳定性和节点短路容量等多项指标, 使评判体系更具有合理性。同时, 本文采用基于相对熵组合赋权法确定权重值, 避免单一赋权法过于主观或客观的缺点, 使获得的权重值最优, 评估结果更为准确。最后应用 PSD 电力系统分析程序, 利用某电网数据进行实例仿真分析, 仿真结果同样也论证了该评价指标体系的完整性与该评估方法的合理性。

参考文献

- [1] 孙艳, 凌武能, 李如琦, 等. 采用分布系数和相角匹配分析的电磁环网潮流监控形式[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 22-28.
SUN Yan, LING Wuneng, LI Ruqi, et al. Power flow control of electromagnetic loop network based on distribution coefficient and phase angle matching analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 22-28.
- [2] 王莹, 刘兵, 刘天斌, 等. 特高压直流闭锁后省间紧急功率支援的协调优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2695-2702.
WANG Ying, LIU Bing, LIU Tianbin, et al. A coordinated optimal scheduling strategy for emergency power support among UHV DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2695-2702.
- [3] 潘高峰, 王星华, 彭显刚, 等. 复杂网络的社团发现方法在电网分区识别中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 116-121.
PAN Gaofeng, WANG Xinghua, PENG Xiangang, et al. Study of power grid partition identification method based on community structure detection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 116-121.
- [4] 许立雄, 刘俊勇, 刘洋, 等. 基于负荷电流场的电网分区方法[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1039-1044.
XU Lixiong, LIU Junyong, LIU Yang, et al. A load current field-based algorithm for partitioning power networks[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1039-1044.
- [5] 杨冬, 刘玉田, 牛新生. 分区电网限流运行方式的综合决策方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 34-38.
YANG Dong, LIU Yutian, NIU Xinsheng. Integrated decision method of operation schemes for limiting short-circuit currents in district grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 34-38.
- [6] 张永康, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 限制 500 kV 电网短路电流的网架调整优化算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 34-39.
ZHANG Yongkang, CAI Zexiang, LI Aimin, et al. An optimization algorithm for short-circuit current limitation of 500 kV power grid by adjusting power grid configuration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 34-39.
- [7] 李顺昕, 张隽, 赵峰, 等. 唐山地区 220 kV 电网分区供电方案研究[J]. 电气应用, 2015, 34(15): 30-34.
LI Shunxin, ZHANG Jun, ZHAO Feng, et al. Research on power supply scheme of 220 kV power grid in Tangshan area[J]. Electrotechnical Application, 2015, 34(15): 30-34.
- [8] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 95-107. DOI 10.1186/s41601-016-0023-z.
- [9] 任建文, 魏俊姣. 基于 GN 分区的输电断面快速搜索[J]. 现代电力, 2015, 32(3): 42-48.
REN Jianwen, WEI Junjiao. Fast search for transmission section based on GN partition[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(3): 42-48.
- [10] 杨小彬, 李和明, 尹忠东, 等. 基于层次分析法的配电网能效指标体系[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 146-150.
YANG Xiaobin, LI Heming, YIN Zhongdong, et al. Energy efficiency index system of distribution network based on analytic hierarchy process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 146-150.
- [11] 黄飞, 宋璇坤, 周晖, 等. 基于效果与基础互动的电网智能化水平综合评价指标体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 142-148.
HUANG Fei, SONG Xuankun, ZHOU Hui, et al. Research on comprehensive evaluation index system of grid's intelligence level based on interaction between effect and basis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 142-148.
- [12] 胡逢彬, 桂现才. 基于相对熵的决策表连续属性离散化算法[J]. 计算机与信息技术, 2006(4): 43-45.
HU Fengbin, GUI Xiancai. Discretization algorithm of continuous attributes in decision table based on relative entropy[J]. Computer and Information Technology, 2006(4): 43-45.
- [13] 李基康, 滕欢, 郭宁. 采用相对熵组合赋权法的 500 kV 电网短路电流抑制策略优化决策[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1811-1817.
LI Jikang, TENG Huan, GUO Ning. Optimal decision making of short circuit current suppression strategy for 500 kV power grid based on relative entropy combined weighting method[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1811-1817.
- [14] 曾鑫, 杨琦, 任建文. 基于组合赋权法的输电线路脆弱性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(8): 44-48.

- ZENG Xin, YANG Qi, REN Jianwen. Transmission line vulnerability assessment based on combination weighting method[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2016, 28(8): 44-48.
- [15] 林金娇. 冀北电网短路电流限制措施的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- LIN Jinjiao. Research on short circuit current limiting measures of North Hebei Power Grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [16] 黄根, 罗滇生, 李帅虎, 等. 基于综合灵敏度分析限流的最优断线措施[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 309-315.
- HUANG Gen, LUO Diansheng, LI Shuaihu, et al. Optimal line-outage measure based on comprehensive sensitivity analysis to limit short-circuit current[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 309-315.
- [17] 曹一家, 王光增, 曹丽华, 等. 基于潮流熵的复杂电网自组织临界态判断模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 1-6.
- CAO Yijia, WANG Guangzeng, CAO Lihua, et al. A model of self-organization critical state estimation model for complex power system based on power flow entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 1-6.
- [18] 周宇峰, 魏法杰. 基于相对熵的多属性决策组合赋权方法[J]. 运筹与管理, 2006, 15(5): 48-53.
- ZHOU Yufeng, WEI Fajie. Multiple attribute decision making based on relative entropy[J]. Operations Research and Management, 2006, 15(5): 48-53.
- [19] 李勇, 刘俊勇, 刘晓宇, 等. 基于潮流熵测度的连锁故障脆弱线路评估及其在四川主干电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 40-46.
- LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Evaluation of the fault line of chain fault based on power flow entropy and its application in Sichuan power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 40-46.
- [20] 杨冬, 周勤勇, 刘玉田. 基于灵敏度分析的限流方案优化决策方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 111-118.
- YANG Dong, ZHOU Qinyong, LIU Yutian. Optimal decision method of current limiting scheme based on sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 111-118.
- [21] 张姝, 谭熙静, 何正友, 等. 基于层次分析法的复杂配电网健康诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 7-13.
- ZHANG Shu, TAN Xijing, HE Zhengyou, et al. A study of health diagnosis for complex distribution grid based on analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 7-13.
- [22] 谭颖, 吕智林, 李捷. 基于改进 ELM 的风/光/柴/储独立微网分布式电源多目标容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 63-70.
- TAN Ying, LÜ Zhilin, LI Jie. Multi-objective optimal sizing method for distributed power of wind-solar-diesel-battery independent microgrid based on improved electromagnetism-like mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 63-70.

收稿日期: 2017-01-05; 修回日期: 2017-04-10

作者简介:

王如伟(1963—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度规划、电网信息规划与管理等; E-mail: 1491720520@qq.com

孔剑虹(1963—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电网信息规划与管理;

吴港(1965—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电网信息规划与管理。

(编辑 魏小丽)