

DOI: 10.7667/PSPC160891

一种大电源接入电网接入点选取合理性的评估方法

徐玉琴, 李文帅, 赵蓓蓓

(华北电力大学, 河北 保定 071000)

摘要: 合理确定大电源接入点对于分层分区、合理化电网结构具有重要意义。为此, 研究了基于综合权重的改进灰色关联分析法对大电源接入点选取合理性进行评估的方法。该评估方法选取短路电流、潮流分布、网损、稳定性、 $N-1$ 故障校验结果作为综合评价的指标, 并且采用整体短路电流水平、潮流熵、网损、V-Q 灵敏度、 $N-1$ 故障过负荷线路条数来定量描述上述评价指标。为避免单一赋权法的局限性, 首先采用组合赋权法确定各指标的综合权重, 然后利用基于综合权重的改进灰色关联分析法对大电源接入点选取方案进行综合评估, 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: 大电源; 接入点; 组合赋权; 灰色关联; 综合评估

An evaluation method for the rationality of the voltage level of a large power supply connected to the power network

XU Yuqin, LI Wenshuai, ZHAO Beibei

(North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: The reasonable determination of the access point of the large power supply connected to the power grid is of great significance to the hierarchical partition and the rationalization of the power grid structure. Therefore, in this paper, the method of evaluating the rationality of the access point of the large power supply connected to the power grid by using the improved gray correlation analysis method based on the comprehensive weight is studied. The short circuit current, the power flow distribution, the network loss, the stability, and the $N-1$ fault check result are selected as the comprehensive evaluation index. And the overall short-circuit current level, the trend of entropy, network loss, V-Q sensitivity, and the number of $N-1$ fault load line are used to describe the above evaluation index quantitatively. In order to avoid the limitation of the single weighting method, firstly, the combined weighting method to determine the comprehensive weight of each index is used, and then the improved gray correlation analysis method based on the comprehensive weights is applied to evaluate the scheme of the access point of the large power supply connected to the power grid comprehensively. Finally, the PSD power system analysis software is adopted to carry out the simulation. The effectiveness and feasibility of the proposed method are verified by the simulation example.

Key words: large power supply; access point; combination weighting; gray relation; comprehensive evaluation

0 引言

随着西电东送以及特高压交直流混合输电等战略的提出^[1], 未来的电网格局将是远距离以及大规模输电, 并形成大区电网之间的相互连通。目前, 电厂在并网的时候, 主要是依据“简化接线, 分散外接电源, 分层分区接入”的原则。《电力系统安全稳定导则》中指出, 对于主力电厂, 应以直接接入最高一级的电压电网为宜。此外, 导则还提到, 在电厂并网时应该根据电厂规模以及负荷的不同, 将

电厂接入到合适的位置上, 实现合理分层。在受端网架发展的初始阶段, 该系统中的主力发电厂应该优先并入到 500 kV 的电网上, 这样能给予受端电压一定程度的支撑。可是当 500 kV 电网发展到一定阶段, 500 kV 侧就会出现诸如短路电流超标^[2]以及在故障情况下会引起潮流转移过大^[3]等问题。另外, 为考虑电网结构的合理性, 也应该将主力电厂分层分区地并入到 220 kV 的电网当中。但具体如何判断 500 kV 网架结构的发展状态, 以及如何确定接入 500/220 kV 系统的临界点, 导则中并没有明确指示。

现有大电源接入电网接入点的确定方法, 主要借助于专家经验, 主观依赖性过大。

现有文献表明, 降低短路电流、合理化电网结构的方法有很多, 许多学者已经进行了大量的研究, 并取得了丰富的成果。文献[4]针对乌鲁木齐地区短路电流超标的情况, 提出了将 220 kV 电网解环、750 kV 变压器采用高阻抗变压器、母线分列运行等方式, 有效地抑制了电网的短路电流。文献[5]在分层分区无法实施的情况下, 采用非全接线运行方式的限流原理, 实质上就是拉停线路、线路出串等措施在运行中的组合。这种运行方式在特高压电网建设初期应用的比较多。文献[6]针对华东地区部分 500 kV 变电站单相短路电流大于三相短路电流的情况, 分析了主变压器中性点所加小电抗参数不同对短路电流大小的影响。文献[7]提出了一种限制 500 kV 侧短路电流的网架调整优化算法, 该篇文章着重研究了如何选取一种开断最少线路以最大限度限制超标站点短路电流的断线组合。可见, 目前大多数研究都是针对电网出现短路电流超标之后采取电磁解环^[8]、加装限流电抗器、更换断路器、变压器中性点加装小电抗接地等方式进行短路电流限制, 进而进行电网分层分区。但是, 关于在电网规划阶段就考虑大电源接入点选取的合理性研究的较少。若大电源接入系统位置不合理, 随着网架的发展, 会出现大量的短路电流超标、大电源接入点改接等情况, 改接不仅费时费力, 还对电网的稳定性、经济性产生不良的影响。文献[9]针对大电源接入方式的不同对短路电流的影响进行了分析, 分析得出大电源接入高电压等级系统和电源电流贡献系数小的网络节点短路电流增量较小, 但该文献考虑因素较少, 只选取了短路电流一个因素。

本文针对大电源接入不同位置的合理性开展相关研究, 将组合赋权法和灰色关联分析法相结合之后应用于大电源接入的综合评估体系中, 该评估方法具有兼顾短路电流抑制效果、潮流分布、稳定性、经济性等优点, 有较好的实用价值。

1 大电源接入不同位置的评估决策指标

大电源接入电网会增加节点的短路电流, 同时还会迫使电网潮流的重新分布, 电网的稳定性、N-1 校验结果、网损都会有所改变。为了评价的完整性与评价结果的合理性, 在评价大电源接入电网不同位置合理性时要综合考虑以上指标。

1.1 潮流分布

为评估大电源接入后电网潮流分布情况, 引入了潮流熵^[10]的概念, 用来验证电力系统中潮流分布

的合理性。潮流熵的求解过程^[11]如下所述。

用参数 P_i^{\max} 来表征第 i 条线路的最大有功传输功率, 用 P_i^0 表征其实际的运行功率, 由此可将线路 i 的负载率 u_i 表示为

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

式中, n 为总的线路数。

确定区间 $[a, b]$ 使 u_i 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, 用 l_k 代表负载率在该区间范围内的所有线路条数, 可以计算出线路负载率落在第 k 个区间的概率为

$$P(k) = \frac{l_k}{\sum_{k=1}^n l_k} \quad (2)$$

根据上述的式(1)和式(2), 可以得到电网的潮流熵的表达式为

$$H = -C \sum_{k=1}^n P(k) \ln P(k) \quad (3)$$

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

从式(3)可以看出, 当存在概率 $P(k)$ 为 1 时, 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。与此相反, 当任意线路的负载率都分布在不同的区间时, 电网的潮流熵数值将会是最大, 说明线路的潮流分布是非常不均匀的, 有些线路已经过载, 而其他一些线路的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。

1.2 短路电流

大电源接入系统中, 无论在哪一节点接入, 都会有节点短路电流上升的情况。若大电源接入不合理, 会造成多数站点短路电流有较高的提升, 对系统的安全稳定运行是非常不利的。因此, 合理的短路电流是评估时非常重要的评价指标。短路电流的评价指标有多种, 如整体短路电流水平、短路电流越线水平^[12]。本文考虑大电源接入系统后对整个电网短路电流的影响, 若出现较极端情况, 如单个站点因大电源接入后短路电流出现越线情况, 则会针对是单相还是三相短路电流超标, 采取相对应的限流措施。本文综合考虑大电源接入位置对整体电网短路电流的影响, 所以采用整体短路电流水平为决策指标。

采用表征系统的整体短路电流水平, 具体表达式为

$$\lambda_{sc} = \sum_{\gamma} (I_{sc}/I_0)^2 \quad (4)$$

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

1.3 静态稳定

大电源接入系统后, 会出现注入功角稳定性、频率稳定性、电压稳定性等问题。稳定性分析作为安全性分析的一个重要组成部分, 同时也是可靠性评估的重要部分。本文主要以电压稳定性作为评估时的研究重点。

当前对电压稳定性进行分析的方法主要包括两类: 第一类是根据系统的潮流方程进行静态分析; 第二类是根据微分方程进行动态分析。其中静态分析法主要研究的是目前电压稳定指标、系统薄弱环节以及控制手段效果等内容。本文将静态电压稳定的分析作为重点研究内容。

静态电压稳定分析包含了很多方法, 如 $V-Q$ 灵敏度分析^[13]、模态分析^[14]等, 根据文献[15]可知, 在电压崩溃点处上述指标存在等价性的关系。所以本文只选取了 $V-Q$ 灵敏度作为评估稳定性的指标。可用 BPA 仿真得到具体数值。

1.4 $N-1$ 校验过负荷线路条数

$N-1$ 原则^[16]指的是在正常运行方式下, 当系统中的某一个元件因故障或者其他原因断开后, 整个系统仍能保持稳定的运行状态, 持续供电, 并且未出现过负荷等状况。

本文通过校验大电源接入不同位置的各个方案, 统计电网内各 500 kV、220 kV 线路和 500 kV 变压器 $N-1$ 方式下的过负荷情况, 确定各个方案情况下的过负荷线路条数作为评估体系中的评价价值。

1.5 网损

大电源并入电力系统之后, 必然引起整个系统的潮流分布发生变化, 进而影响系统网损。在没有考虑其他额外成本的前提下, 网损^[17]大小是系统运行经济性最直接的反映指标。

2 基于综合权重的改进灰色关联分析评估模型

2.1 改进的基于综合权重的灰色关联分析法

在 20 世纪 80 年代, 我国的邓聚龙教授首先提出了灰色关联分析法。这种方法是根据选取的序列曲线和参考序列曲线在几何特征上的相似度来确定两者的相互关联度。这种方法具有计算简单, 原理易懂的优点, 但同时由于未考虑相对重要性, 会导

致评估的准确度不高。

为了弥补灰色关联分析法存在的不足, 本文将基于改进灰色关联分析法^[18]的评估模型应用于大电源接入系统接入点选取的评估当中, 并采用组合赋权法确定各评价指标的综合权重。处理过程如下所述。

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, 每一个方案有 m 个指标, 将方案 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 的第 $j(j=1, 2, \dots, m)$ 个指标值采用 x_{ij} 表示, 把每一待评估的方案看作一个序列曲线, 用上述各个方案的所有指标值构造评估矩阵 $\mathbf{X}=(x_{ij})_{n \times m}$ 。方案中的每一个指标的属性和量纲互不相同, 所以无法做比较。因此考虑先对 \mathbf{X} 作标准化预处理, 处理方式如下所述。

对于收益型的指标, 所采用的标准化公式为

$$r_{ij} = (x_{ij} - \min_{i \in n} x_{ij}) / (\max_{i \in n} x_{ij} - \min_{i \in n} x_{ij}) \quad (5)$$

对于成本型的指标, 所采用的标准化公式为

$$r_{ij} = (\max_{i \in n} x_{ij} - x_{ij}) / (\max_{i \in n} x_{ij} - \min_{i \in n} x_{ij}) \quad (6)$$

对评估矩阵 \mathbf{X} 经过标准化预处理之后可以获得决策矩阵 $\mathbf{R}=(r_{ij})_{n \times m}$, $r_{ij} \in [0, 1]$, 根据 \mathbf{R} 可以获得每一个指标的最优值 $r_{*j} = \max_{i \in n} r_{ij}$, 进而得到虚拟理想方案 $\mathbf{R}^*=[r_{*1}, r_{*2}, \dots, r_{*m}]$, 把获得的虚拟理想方案选作参考序列曲线。

2) 计算关联系数

将待评估方案的序列曲线 i 与虚拟理想方案 \mathbf{R}^* 的序列曲线在指标 j 上存在的相对差值, 称之为关联系数 ε_{ij} , 可用式(7)计算。

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\min_{i \in n} \min_{j \in n} |r_{*j} - r_{ij}| + \rho \max_{i \in n} \max_{j \in n} |r_{*j} - r_{ij}|}{|r_{*j} - r_{ij}| + \rho \max_{i \in n} \max_{j \in n} |r_{*j} - r_{ij}|} \quad (7)$$

式中: ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 一般取 0.5;

$\min_{i \in n} \min_{j \in n} |r_{*j} - r_{ij}|$ 表示绝对最小值; $\max_{i \in n} \max_{j \in n} |r_{*j} - r_{ij}|$ 表示绝对最大值, ε_{ij} 的数值越大, 表示这两个序列在指标 j 上的关联度也就越大。由计算式(7)可以分别计算出每个待估方案和 \mathbf{R}^* 在各个指标上的关联系数矩阵 $\boldsymbol{\varepsilon}=[\varepsilon_{ij}]_{n \times m}$ 。

3) 求取各方案的合理性指标

合理性指标 G_i 用加权关联度来表征。

$$G_i = \sum_{j=1}^m w_j \varepsilon_{ij} \quad (8)$$

式中: w_j 为第 j 个指标的综合权重; G_i 表征待评估方案 i 与理想方案的平均整体关联程度, 关联度越大说明与理性方案越接近, 故合理性越高。

2.2 组合赋权法确定综合权重

本文将基于综合权重的灰色关联分析法应用到对大电源接入系统接入点选取合理性的评估当中, 权重的选择对于评价结果有着重要影响。当前采用的权重求取方法主要分为主观法和客观法两类。权重确定的主观法是专家凭借自己以往的经验优势, 给出各指标的权重。这种方法没有考虑客观数据, 主观性太强。客观法是对客观数据采用数学方法进行计算得出权重, 但忽略了主观喜好等信息。为综合考虑主客观因素, 本文借助组合赋权法^[19]确定综合权重。

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^[20]。具体的确定过程如下:

1) 构造判别矩阵 \mathbf{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 \mathbf{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 $\mathbf{W}_1 = \{\omega_{1j} | 1 \leq j \leq m\}$ 。

3) 一致性检验。把一致性指标 C_1 和同阶平均随机的一致性指标 R_1 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^[21]是根据数值进行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

$$f_{ij} = u_{ij} / \sum_{j=1}^n u_{ij} \quad (9)$$

2) 求取第 j 个评价指标的熵

$$H_j = -(\sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}) / \ln m, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

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

$$\omega_{2j} = (1 - H_j) / (n - \sum_{j=1}^n H_j) \quad (11)$$

2.2.3 确定综合权重

运用层次分析法计算主观权重, 采用熵权法计算客观权重, 但是由这些权重确定的评价结果可能是矛盾的。本文将基于博弈论的组合赋权法应用到对权重的确定当中, 在主观和客观权重之间得到一个平衡值。这种方法是通过极小化可能的权重与各个基本权重之间的偏差来确定一个兼顾主客观的综合权重^[22]。具体步骤如下。

1) 在分别计算出主观权重向量 $\mathbf{W}_1 = \{\omega_{1j} | 1 \leq j \leq$

$m\}$ 和客观权重向量 $\mathbf{W}_2 = \{\omega_{2j} | 1 \leq j \leq m\}$ 后, 由 2 种权重向量组成权重向量集 $\mathbf{W} = \{\omega_1, \omega_2\}$, 主客观权重向量构成任意线性组合为

$$\omega^* = \sum_{j=1}^2 \lambda_j \omega_j^T \quad (12)$$

2) 根据博弈论组合赋权思想, 对式(12)中的 2 个组合系数进行优化, 优化的目标是使 ω^* 与权重向量集 \mathbf{W} 中各权重向量的离差极小化, 用数学模型表示为

$$\min \left\| \sum_{j=1}^2 \lambda_j \omega_j^T - \omega_i^T \right\| \quad (i=1, 2) \quad (13)$$

根据矩阵的微分性质可知式(13)的最优一阶导数条件为

$$\sum_{j=1}^2 \lambda_j \omega_j \omega_j^T = \omega_i \omega_i^T \quad (14)$$

求解这个方程组可以得到系数 (λ_1, λ_2) , 并归一化处理得

$$\lambda_j^* = \lambda_j / \sum_{j=1}^2 \lambda_j \quad (15)$$

3) 最终得到的最优综合权重向量表达式为

$$\omega = \sum_{j=1}^2 \lambda_j^* \omega_j^T \quad (16)$$

3 大电源接入电网接入点选取合理性的评估步骤

基于上述综合权重的灰色关联评估模型, 得到大电源接入位置合理性的评估步骤如图 1 所示。

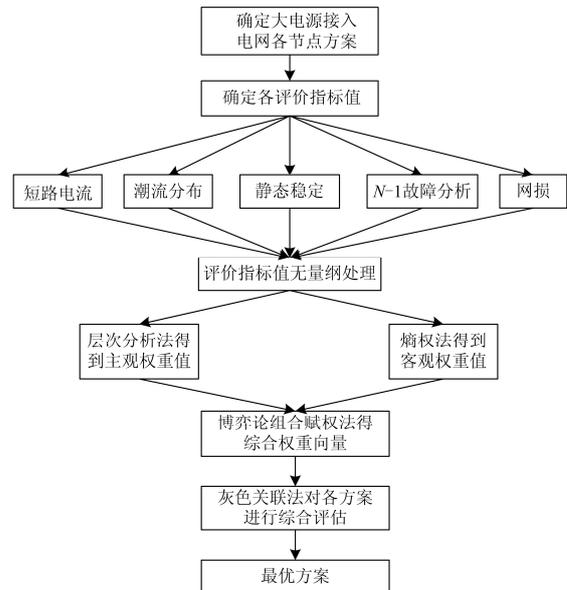


图 1 评估策略流程图

Fig. 1 Flow chart of assessment strategies

4 算例分析

冀北电网唐山地区负荷持续增长, 电力供应一直处于紧张状态。本文以该地区接入 600 MW 大电源为例进行大电源接入点选取合理性的分析, 拟定接入点距离姜家营和太平两地较近, 为了增加所证结论的可信度, 本文选取 4 个大电源拟定接入点, 方案一为大电源在姜家营 500 kV 侧接入, 方案二为大电源在姜家营 220 kV 侧接入, 方案三为大电源在太平 500 kV 侧接入, 方案四为大电源在太平 220 kV 侧接入系统。本文选取典型的节点和线路进行仿真分析, 包括 3 个 500 kV 节点, 8 个 220 kV 节点。如图 2 所示。

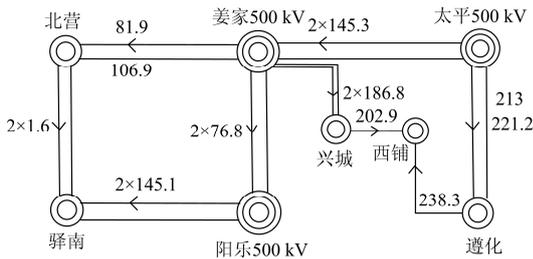


图 2 方案一潮流分布图

Fig. 2 Scheme trend map

4.1 原始数据分析

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唐山地区 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。4 种方案分别对应的各节点短路电流数据如表 1 所示。

表 1 各方案对应节点的短路电流

Table 1 Solution of the corresponding node short circuit current

	方案一	方案二	方案三	方案四
姜家 500 kV	46.628	44.827	45.343	44.725
太平 500 kV	48.541	48.045	49.987	48.202
唐北 500 kV	24.752	25.021	24.743	24.623
姜家 220 kV	49.186	49.988	32.417	48.860
太平 220 kV	46.466	46.293	46.613	47.512
唐北 220 kV	42.357	42.585	42.463	42.359
兴城 220 kV	27.144	27.074	27.093	27.090
西铺 220 kV	29.649	29.585	29.661	29.748
遵化 220 kV	35.363	35.277	35.409	35.661
北营 220 kV	32.711	32.627	32.341	
驿南 220 kV	41.047	40.994	40.327	40.437

2) 本文选取典型的节点和线路, 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。以方案一为例进行详细分析, 绘制成图, 方案一的系统潮流如图 2 所示。

3) 本仿真算例存在兴城、遵化、西铺、驿南、北营 5 个负荷节点, 应用 PSD-BPA 潮流程序进行仿真。本文指定其均值作为该方案对应的 V-Q 灵敏度指标。编写节点扰动控制语句, 得到 4 种方案下各节点的 V-Q 灵敏度具体数据如表 2 所示。

表 2 对应负荷节点的灵敏度

Table 2 Corresponding to the sensitivity of load node

	方案一	方案二	方案三	方案四
兴城	0.0594	0.0595	0.0594	0.0594
遵化	0.0612	0.0613	0.0614	0.0613
西铺	0.0522	0.0522	0.0522	0.0523
驿南	0.0421	0.0414	0.0413	0.0414
北营	0.0352	0.0355	0.0353	0.0357

4.2 应用改进模型进行评估

应用 PSD 电力系统分析软件得到了各节点的短路电流、线路潮流、N-1 故障下线路过负荷条数、灵敏度、网损等数值, 运用式(1)一式(4)得到各方案对应指标值的计算结果如表 3 所示。

表 3 各方案对应指标值的计算结果

Table 3 Program results of corresponding index calculation

	潮流熵	短路电流	N-1 过负荷	灵敏度	网损
方案一	4.9137	6.0933	0	0.2492	87.193
方案二	5.1871	6.0573	4	0.2498	84.952
方案三	4.6375	6.0447	0	0.2496	87.954
方案四	4.9134	6.0476	5	0.2501	85.311

1) 对评估矩阵进行标准化处理

由式(5)、式(6)对各方案指标进行标准化处理, 得到标准化的决策矩阵 R。

$$R = \begin{bmatrix} 0.4957 & 0.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0.2533 \\ 0.0000 & 0.7877 & 0.2000 & 0.3333 & 1.0000 \\ 1.0000 & 0.6258 & 1.0000 & 0.5556 & 0.0000 \\ 0.5000 & 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.8800 \end{bmatrix}$$

2) 组合赋权法计算指标的综合权重

层次分析法计算出主观权重向量 $W_1=(0.0911, 0.2726, 0.2726, 0.2580, 0.1050)^T$, 由式(9)一式(11)计算出客观权重向量 $W_2=(0.1827, 0.1611, 0.2373, 0.2018, 0.2171)^T$, 由式(14)得到线性方程组为

$$\begin{bmatrix} 0.2345 & 0.2001 \\ 0.2001 & 0.2035 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2345 \\ 0.2035 \end{bmatrix}$$

求解得 $\lambda_1 = 0.9099, \lambda_2 = 0.1053$, 归一化处理得 $\lambda_1^* = 0.8963, \lambda_2^* = 0.1037$ 。

由式(15)计算最优权重向量为

$$W=[0.1006, 0.2610, 0.2689, 0.2522, 0.1166]^T$$

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, 采用基于博弈论的组合赋权法能很好地弥补单一方法的不足, 使指标的权重更加合理。

3) 改进灰色关联分析法评估各方案的合理性

由式(7)计算得到各方案与理想方案的灰色关联系数矩阵 ε 为

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 0.4432 & 0.2857 & 1.0000 & 1.0000 & 0.3488 \\ 0.2857 & 0.6533 & 0.3333 & 0.3750 & 1.0000 \\ 1.0000 & 0.5167 & 1.0000 & 0.4737 & 0.2857 \\ 0.4444 & 1.0000 & 0.2857 & 0.2857 & 0.7692 \end{bmatrix}$$

根据式(8)得到各方案与理想方案的总体关联度 $G=[0.6809, 0.5000, 0.6571, 0.5443]$, 由计算结果可知, 大电源接入点选取的系统合理性评估效果综合排序依次为: 方案一、方案三、方案四、方案二。

由分析结果可知, 方案一的关联度高于方案三、方案二和方案四, 说明方案一合理性更高一些, 即该地区大电源接入点选择在 500 kV 姜家营站更为合理。由表 3 可知, 单从整体短路电流水平和潮流熵两个因素考虑, 方案三较方案一更好, 但若综合考虑灵敏度、网损等多个因素时, 方案一的合理性更高。该排序结果说明了大电源接入点的选取应综合考虑多个因素以确保正确, 同时也有效地论证了基于综合权重的改进灰色关联分析法对大电源接入点选取方案进行综合评估的合理性。

5 结论

本文构建了较为完整的适用于评价大电源接入点选取合理性的指标体系, 该指标体系考虑了系统潮流分布、短路电流、 $N-1$ 故障、稳定性、网损等多项指标, 使评估效果更具有合理性。同时, 本文采用基于博弈论的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。采用改进灰色关联分析法的评估模型, 使评估过程条理清晰, 评估结果更为准确。最后应用 PSD 电力系统分析程序, 利用唐山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] 刘翀. 多直流馈入系统运行特性分析[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
LIU Chong. DC operating characteristics of feed system analysis[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2009.
- [2] 郝文斌, 夏春, 王彪, 等. 一种基于图论搜索的限制短

- 路电流分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 38-44.
HAO Wenbin, XIA Chun, WANG Biao, et al. A new method based on graph theory to search the limit short circuit current partitioning method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 38-44.
- [3] 徐慧明, 毕天姝, 黄少锋, 等. 计及暂态过程的多支路切除潮流转移识别算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 24-30.
XU Huiming, BI Tianshu, HUANG Shaofeng, et al. Meter and the transient process of the multi branch removal trend transfer identification algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 24-30.
- [4] 刘新刚, 乔怡, 闫广新. 关于如何降低电网短路电流水平方法的研究[J]. 电气应用, 2013, 32(12): 97-100.
LIU Xingang, QIAO Yi, YAN Guangxin. Study on how to reduce the short-circuit current level[J]. Electrical Applications, 2013, 32(12): 97-100.
- [5] 许汉平, 徐敬友, 李继升. 500 kV 变电站限制短路电流措施研究[J]. 电气应用, 2014, 33(16): 68-72.
XU Hanping, XU Jingyou, LI Jisheng. Research on limiting short circuit current in 500 kV substation[J]. Electrical Application, 2014, 33(16): 68-72.
- [6] 崔勇, 郭强, 杨增辉. 华东 500 kV 主变中性点小电抗参数的选取[J]. 华东电力, 2012, 40(9): 1552-1556.
CUI Yong, GUO Qiang, YANG Zenghui. Selection of neutral point small reactance parameters 500 kV main transformer of East China[J]. East China Electric Power, 2012, 40(9): 1552-1556.
- [7] 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. The optimization algorithm for limiting the short circuit current of 500 kV grid power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 34-39.
- [8] 刘楠, 唐晓骏, 张文朝, 等. 特高压接入河南电网后电磁环网解环方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 131-136.
LIU Nan, TANG Xiaojun, ZHANG Wenchao, et al. Study on the solution scheme of the electromagnetic loop network in Henan power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 131-136.
- [9] 周吉安, 靳丹, 王维洲, 等. 大电源接入方式对短路电流的影响分析[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(1): 48-51.
ZHOU Ji'an, JIN Dan, WANG Weizhou, et al. Analysis of influence of huge power supplies grid-connection modes on short-circuit current[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(1): 48-51.
- [10] 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, 41(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, 41(7): 1-6.
- [11] 马斌, 张丽艳, 郭成. 一种变权重风电功率最优组合预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 117-121.
- MA Bin, ZHANG Liyan, GUO Cheng. An optimal combination forecasting model with variable weight for wind power[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 117-121.
- [12] 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.
- [13] 曹国云, 王强, 刘丽霞. 电压稳定分析中降阶潮流雅可比矩阵的研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 42-47.
- CAO Guoyun, WANG Qiang, LIU Lixia. Research on power flow reduced Jacobian matrix for voltage stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 42-47.
- [14] 张忠会, 胡一波, 朱文涛. 模态分析技术在系统薄弱环节分析中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 58-64.
- ZHANG Zhonghui, HU Yibo, ZHU Wentao. Modal analysis technology in the application of the weak parts of systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 58-64.
- [15] 刘丽霞, 曹国云, 陈陈. 基于静态电压稳定性指标的等价性研究[J]. 华东电力, 2005, 33(12): 1-4.
- LIU Lixia, CAO Guoyun, CHEN Chen. Study on equivalence of static voltage stability indices[J]. East China Electric Power, 2005, 33(12): 1-4.
- [16] 方芹, 杨建华, 马龙, 等. 基于 N-1 准则的配电网重构分区评估分析[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1090-1094.
- FANG Qin, YANG Jianhua, MA Long, et al. N-1 security criterion-based analysis and evaluation of partitions on distribution network reconfiguration[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1090-1094.
- [17] 杨俊友, 崔嘉, 田艳丰, 等. 计及网损最小的含分散式风电场配电网多目标优化策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2141-2147.
- YANG Junyou, CUI Jia, TIAN Yanfeng, et al. Multi-objective optimization strategy of distribution network containing dispersed wind farm considering minimum network loss[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2141-2147.
- [18] SONG B, YU P, LUO Y, et al. Study on the fault diagnosis of transformer based on the grey relational analysis[C] // Power System Technology Proceedings PowerCon International Conference on: IEEE, 2002, 4: 2231-2234.
- [19] 陈亮, 傅闯, 李兴源. 基于加权平均组合评价法的电网直流融冰计划决策[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2913-2918.
- CHEN Liang, FU Chuang, LI Xingyuan. Decision-making of power grid DC de-icing plan based on weighted average combinative evaluation[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2913-2918.
- [20] 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. Study on the health diagnosis of complex distribution network based on analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 7-13.
- [21] 杨志超, 张成龙, 葛乐, 等. 基于熵权法的绝缘子污闪状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 90-94.
- YANG Zhichao, ZHANG Chenglong, GE Le, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of insulator pollution flashover status based on entropy weight method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 90-94.
- [22] 张桦, 魏本刚, 李可军, 等. 基于变压器马尔可夫状态评估模型和熵权模糊评价方法的风险评估技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 134-140.
- ZHANG Hua, WEI Bengang, LI Kejun, et al. Research on risk assessment technology based on Markov state evaluation model for power transformer and entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 134-140.

收稿日期: 2016-06-17; 修回日期: 2016-08-03

作者简介:

徐玉琴(1964—), 女, 教授, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制、分布式发电与配电网、电力系统继电保护等; E-mail: xuyuqin_ncepu@126.com

李文帅(1990—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与规划; E-mail: 1491720520@qq.com

赵蓓蓓(1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与规划. E-mail: zhao_bbwn@sina.com

(编辑 周金梅)