# 基于改进 TOPSIS 灰色关联投影法的主网网架结构评价

梁海平<sup>1</sup>,田圣双<sup>2</sup>,李秋燕<sup>3</sup>,刘英培<sup>1</sup>,张文朝<sup>4</sup>
(1.华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003;
2.国网陕西省电力公司检修公司,陕西 西安 710065;
3.国网河南省电力公司经济技术研究院,河南 郑州 450052;
4.南京南瑞集团公司,江苏南京 210003)

摘要:针对目前主网网架结构缺少全面客观评价的现状,提出一种基于改进逼近理想解法(TOPSIS)灰色关 联投影法的主网网架结构评价方法。定义归一化代数连通度指标,选取归一化代数连通度、负荷平均最短供 电距离、输电网网损、电压越限节点比例、重载线路比例、电压稳定裕度指标构建主网网架评价体系;使用主 客观最优组合赋权法确定各评价指标权重,并采用改进 TOPSIS 灰色关联投影法计算各网架的综合评分。以 IEEE 118 节点系统及某市级电网主网架为例进行计算分析,结果验证了所提方法能够客观有效地对主网网 架结构进行评价。

# 0 引言

随着社会的发展,人民生产生活越来越依赖于 高质量的电能,而电网的网架结构不仅影响电网供 电可靠性<sup>[1]</sup>、安全性<sup>[2]</sup>、经济性和稳定性<sup>[3]</sup>,也会影 响网架的联通性和运行灵活性以及系统的输电能 力<sup>[4]</sup>。为了更好地了解主网网架结构的发展现状, 并为电网建设规划提供参考依据,需对主网网架结 构做出客观合理的评价。

目前,国内外针对智能配电网综合评价<sup>[5]</sup>及主 网综合评价的研究<sup>[6]</sup>较多。主网一般指承担输送电 能作用的电网,本文所研究的主网为 220 kV 及以上 电压等级的电网。目前对主网网架结构评价的研究 较少,主要从主网拓扑结构角度、主网应对故障能力 角度<sup>[7]</sup>、主网结构对自组织临界性影响<sup>[8]</sup>等角度对 主网网架进行评价。文献[9]提出通道强度指标、 电压强度指标和频率强度指标,以此对交直流并列 系统电网结构进行综合评价,能够较合理评价交直 流并列电网系统的运行状态,但是缺少电网经济性 指标。文献[10]以技术性、安全性、经济性指标构 建评价体系,采用主客观赋权法及矩估计法对主网 网架结构进行综合评价,评价结果具有良好的公正 性及可操作性。文献[11]采用供电安全性、供电可 靠性、供电经济性、供电质量和电网适应性作为评价 指标,以德尔菲法确定各指标权重,并采用模糊隶属

收稿日期:2018-07-09;修回日期:2019-02-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607069);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2016MS88,2017MS-091)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607069) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016MS88,2017MS091)

度法计算各网架的最终评分,该方法具有良好的可 拓展性。

现有对主网网架评价的研究未考虑网架联通 性、网架结构对电网稳定性的影响以及电源与负荷 分布的评价指标,评价体系及评价方法存在缺陷。 针对以上问题,本文提出基于改进逼近理想解法 TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)灰色关联投影法的电网主网网 架结构评价方法。首先,根据电网的代数连通度<sup>[12]</sup>, 定义归一化代数连通度指标:接着,以归一化代数连 通度、负荷平均最短供电距离、输电网网损、电压越 限节点比例、重载线路比例、电压稳定裕度构建电网 主网网架评价体系;然后,通过主客观最优组合赋权 法、绝对理想解及加权马氏距离对 TOPSIS 灰色关联 投影法进行改进,以计算各主网架的综合评分。所 建评价体系及所提评价方法对于电网规划设计及运 行方式的制定有一定的指导作用,为主网网架的综 合评价提供了新思路。

## 1 网架结构评价体系

电力系统网架结构是电能输送的主要环节,一 个成熟的主网网架具有网架联通性好、负荷与电源 分布合理以及经济性、安全性与稳定性较优的特点。 因此,本文综合以上主要因素,选择归一化代数连通 度、负荷平均最短供电距离、输电网网损、电压越限 节点比例、重载线路比例、电压稳定裕度构建主网网 架评价体系。

#### 1.1 电网联通性指标

主网网架结构是影响电网联通性指标的主要因 素。本文定义归一化代数连通度指标,能够较全面 地评价网架拓扑结构的优劣。代数连通度为图的 Laplace 矩阵的最小非平凡特征值。在文献[13]的 基础上可进一步推导证明,随着电网中线路的规划 建设,网架结构越来越紧凑,其对应的代数连通度不 断增大,推导过程如附录A所示。因此,代数连通度 能够合理反映拓扑结构的优劣。为对比不同规模电 网结构的代数连通度,在计算时需要对其进行归一 化,定义电网结构归一化代数连通度:

$$M = 100\lambda_f / f \tag{1}$$

其中,M 为电网代数连通度; $\lambda_f$  为网络对应矩阵的 最小非平凡特征值;f 为节点数。M 值越大,电网结 构越成熟,全联通网络电网的M 值为 100。在计算 实际电网代数连通度时,采用线路电抗大小作为网 络支路权重,计算结果与实际电网更加契合。

#### 1.2 负荷平均最短供电距离指标

电源及负荷分布主要受地理位置及人口分布等 因素影响。可以通过搭建电源到负荷中心的线路, 缩短负荷到电源的距离,提高输电能力,以达到优化 电源与负荷分布的目的。因此网架结构对电源与负 荷的分布合理性具有一定的影响作用。定义负荷平 均最短供电距离指标:

$$D_{\rm sl} = \sum_{i=1}^{g} d_i / g \tag{2}$$

其中,*d<sub>i</sub>* 为负荷点 *i* 到距离最近电源的电气距离(即 两点之间的阻抗);*g* 为负荷节点数;*D<sub>sl</sub>*为负荷平均 最短供电距离指标。

由式(2)可知,电网的负荷平均最短供电距离 越小,负荷到电源的平均距离就越短,电源和负荷的 分布越合理。

#### 1.3 经济性指标

主网网架作为系统电能输送的主要环节,其输 电经济性也是判断网架结构优劣的重要指标之一。 本文采用输电网网损作为经济性指标:

$$P_{\rm loss} = \sum L_{\rm loss} + \sum T_{\rm loss} \tag{3}$$

其中, $\sum L_{\text{loss}}$ 为所有线路的有功损耗; $\sum T_{\text{loss}}$ 为所有变 压器的有功损耗; $P_{\text{loss}}$ 为输电网的损耗之和。

# 1.4 安全性指标

电网正常运行时遭受的安全威胁主要包括不可 预料的短路、断线及误操作故障,电压越限节点及重 载设备同样会对电网的安全性构成威胁。厂站母线 电压或线路电压长时间越限,会加速设备老化,甚至 损坏设备,导致短路或断线故障。而输电设备的长 时间重载容易使设备过热,甚至烧坏设备。本文以 节点电压越限比例及重载设备(主要指线路及变压 器)比例作为输电网安全性指标,其计算分别如式 (4)、(5)所示。

$$P_{v} = \frac{k_{\text{without}}}{g} \times 100\% \tag{4}$$

$$P_{\rm e} = \frac{e_{\rm without}}{e} \times 100\%$$
 (5)

其中, $k_{without}$ 为越限的节点数; $P_v$ 为节点电压越限比例; $e_{without}$ 为重载设备数;e为总设备数; $P_e$ 为重载设备比例。

# 1.5 电压稳定性指标

电压稳定性是电力系统在正常情况下或遭受扰 动之后系统中所有节点维持可接受的电压的能力。 当系统运行工作点位于静态稳定边界时,相应的潮 流雅可比矩阵 J 奇异, J 必然存在一个零特征值,此 时任意小的功率摄动都会引起状态变量的无限制漂 移,这种工况对应于系统的静态稳定的极限状态,因 此可以用 *ξ* "来度量全系统的电压稳定裕度<sup>[14]</sup>。电 压稳定裕度 *ξ* " 计算如下:

$$\boldsymbol{J} = \boldsymbol{E}\boldsymbol{\xi}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

其中, $E \approx F$ 分别为J的左、右奇异矩阵; $\xi$ 为J的 所有特征值形成的矩阵, $\xi_m$ 为 $\xi$ 的最小特征值。

# 2 改进的 TOPSIS 灰色关联投影法

在构建主网网架评价体系之后,选择改进的 TOPSIS 灰色关联投影法对待评价的主网进行综合 评价。TOPSIS 灰色关联投影法将 TOPSIS 法与灰色 关联投影法相结合,相比于传统方法灵敏度更 高<sup>[15]</sup>,但是仍然存在指标权重难以确定、评价样本 增减时可能会产生逆序、指标之间的相关性可能会 造成误判的问题。针对该方法的缺陷,本文提出改 进的 TOPSIS 灰色关联投影法。

# 2.1 基于矩估计理论的主客观最优组合赋权

指标权重的大小对评价结果的影响较大,只采 用主观赋权法容易受专家经验影响,而只采用客观 赋权方法,评价结果则易受数据规模影响,当评价指 标数据较少时,易造成误判。本文选择 G1 法、熵权 法与变异系数法计算指标权重,并采用矩估计理论 进行最优组合赋权,避免了主观和客观方法的缺点。

## a. 主观赋权法。

G1 法是一种计算多指标权重的方法,通过专家 评估指标的重要度做出判断,根据各指标的相对重 要度对相邻指标重要度的比值进行赋值,并计算各 指标的权重,计算方法可参考文献[16]。G1 法避免 了层次分析法中判断矩阵的构造一般不满足一致性 检验的问题,是一种受专家经验影响较大的主观赋 权法。

#### b. 客观赋权法。

熵权法是根据评价指标数据变异性的大小来确 定指标权重的客观赋权方法。若某个指标的信息熵 越小,则该指标值的变异程度越大,提供的信息量越 多,对综合评分的影响也越大,其权重也越大。熵权 法计算步骤可参考文献[17]。 变异系数法以各样本指标为基础建立评价指标 矩阵,通过考虑评价指标数据的变异系数以实现评 价指标客观赋权。该方法具有良好的适用性,计算 步骤可参考文献[18]。

c. 最优组合赋权法。

基于矩估计原理计算最优组合权重,避免了主 客观权重简单加权平均可能会产生较大方差的问 题,使最优组合权重既能反映专家主观意见,又能反 映指标数据的客观规律,赋权结果更公正,计算方法 可参考文献[10]。

#### 2.2 改进的 TOPSIS 灰色关联投影法

(1)数据预处理。

为减小负向指标与指标量纲对评价结果的影响,需要对评价指标数据进行处理。以各样本指标数据作为评价指标矩阵 Y:

$$\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nn} \end{bmatrix}$$
(7)

其中,p 为评价样本数;n 为评价指标数; $y_{ij}$ 为第i 个 评价样本的第j个指标; $Y_i$  为第i个评价样本的指标 向量, $Y_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}](i=1,2,\dots,p)$ 。

评价指标主要分为正向指标(又称为效益型指标,指标值越大越好)和负向指标(又称为成本型指标,指标值越小越好),为方便计算,需要将指标进行同向化与去量纲化处理。采用式(8)对评价矩阵进行同向化处理:

$$y'_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{k + \max | \mathbf{Y}_i | + y_{ij}} & y_{ij} \end{pmatrix} \hat{D} \hat{D} \stackrel{*}{lam} \\ y_{ij} & y_{ij} \end{pmatrix} \tilde{D} \hat{D} \stackrel{*}{lam} \end{cases}$$
(8)

其中, $y'_{ij}$ 为正向指标评价矩阵 Y'的元素; max  $|Y_i|$ 表示评价指标所在行元素中的最大值; k 一般取 0.1。

采用式(9)对 Y'进行去量纲化处理,得到标准 评价矩阵 Y",其元素为:

$$y_{ij}'' = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{p} y_{ij}^{2}}}$$
(9)

(2)改进的 TOPSIS。

TOPSIS 的原理是构建正理想样本和负理想样本,通过计算待评价样本与正负理想样本的距离来 给待评价样本评分。新增或删减评价样本后,正、负 理想样本可能会发生变化,导致评价结果出现逆序 问题。解决该问题的方法是设置绝对正、负理想样本,使增减样本后,所有评价样本均劣于绝对正理想 样本,优于绝对负理想样本。

经过数据预处理后的评价矩阵元素均为正向指

标,且均在0~1的范围内,因此可以设置绝对正、负理想样本 **B**<sup>+</sup>,**B**<sup>-</sup>分别为:

(3)改进的灰色关联投影法。

传统灰色关联投影法中,评价样本与理想样本 之间的相似度采用两向量的余弦角来度量,该值难 以衡量评价样本在每类指标上的差异,且余弦相似 度对数值的不敏感可能导致评价结果不合理的问 题。针对该问题,提出基于加权马氏距离的灰色关 联投影法,采用加权马氏距离来衡量评价样本与绝 对理想样本之间的相似度。计算步骤如下。

a. 计算正、负灰关联矩阵。

灰色关联投影法从矢量投影的角度出发解决多 指标综合评价问题。其中第*i*个评价样本与正理想 样本(负理想样本)的灰关联矩阵为 $R^+(R^-)$ ,矩阵 中元素 $r_{ij}^+(r_{ij}^-)$ 为:

$$\mathbf{f}_{ij}^{+(-)} = \frac{\min_{p} \min_{n} |y_{j}^{+(-)} - y_{ij}| + \rho \max_{p} \max_{n} |y_{j}^{+(-)} - y_{ij}|}{|y_{j}^{+(-)} - y_{ij}| + \rho \max_{p} \max_{n} |y_{j}^{+(-)} - y_{ij}|} \quad (11)$$

其中, $\rho$ 为分辨系数,一般取 $\rho=0.5$ ;  $|y_j^{+(-)}-y_{ij}|$ 表示 评价样本*i*与正理想样本(负理想样本)相应指标差 的绝对值,正灰关联矩阵元素对应上标"+",负灰关 联矩阵元素对应上标"-"。

**b.** 计算评价样本与绝对理想样本间的加权马 氏距离。

假设正灰关联矩阵与绝对正理想样本构成指标 矩阵  $G^+$ ,其协方差矩阵为  $\sum^+$ ;负灰关联矩阵与绝对 负理想样本构成矩阵  $G^-$ ,其协方差矩阵为  $\sum^-$ 。计 算第 i 个评价样本在正理想样本  $B^+$ (负理想样本  $B^-$ )的加权马氏距离:

$$\begin{cases} d_{i}^{*} = \sqrt{(\boldsymbol{r}_{i}^{*} - \boldsymbol{B}^{*})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{U}^{(+)})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}(\boldsymbol{\Lambda}^{(+)})^{-1}\boldsymbol{U}^{(+)}(\boldsymbol{r}_{i}^{*} - \boldsymbol{B}^{*})} \\ d_{i}^{-} = \sqrt{(\boldsymbol{r}_{i}^{-} - \boldsymbol{B}^{-})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{U}^{(-)})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}(\boldsymbol{\Lambda}^{(-)})^{-1}\boldsymbol{U}^{(-)}(\boldsymbol{r}_{i}^{-} - \boldsymbol{B}^{-})} \end{cases}$$
(12)

其中, $d_i^*$ 、 $d_i^-$ 分别为第i个样本距离绝对正理想样本 与负理想样本的加权马氏距离;**W**为各评价指标权 重组成的对角矩阵,本文采用基于矩估计理论的主 客观最优组合赋权法计算各指标权重; $\Lambda^{(+)}$ 为协方 差矩阵  $\sum^*$ 的特征值; $U^{(+)}$ 为  $\sum^*$ 所有特征值对应 的特征向量组成的正交基; $\Lambda^{(-)}$ 为协方差矩阵  $\sum^-$ 的 特征值; $U^{(-)}$ 为  $\sum^-$ 所有特征值对应的特征向量组成 的正交基。

c. 计算各样本的相对接近度与方法灵敏度。

各评价样本的相对接近度如式(13)所示。相 对接近度越大,评价样本越靠近绝对正理想样本,离 绝对负理想样本越远,据此可对各样本进行排名。

$$s_i = \frac{(d_i^+)^2}{(d_i^-)^2 + (d_i^+)^2}$$
(13)

综合评价中对各样本进行排名的评分可反映评 价方法的灵敏度  $\eta$ ,最优样本与其余样本的评分差 距越大,则灵敏度  $\eta$  越大,评价模型对样本的区分度 越大,灵敏度  $\eta$  为:

$$\eta = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{sec}}{\alpha_{\max}} \times 100\%$$
(14)

其中, $\alpha_{max}$ 为最优样本的评分值; $\alpha_{sec}$ 为次优样本的评分值。

## 3 算例分析

为验证所提评价方法的有效性,采用 IEEE 118 节点电网及我国某市实际电网为算例进行计算分 析,采用 MATLAB 编程实现各评价指标、主客观权 重及综合评价结果的计算。

# 3.1 IEEE 118 节点电网算例

以 IEEE 118 节点电网为例,通过删除不同线路 的方式对比不同网架下的多个指标。IEEE 118 节 点电网如附录 B 所示。计算 3 种网架下的各指标, 如表 1 所示(表中电压稳定裕度、负荷平均最短供电 距离为标幺值,后同),对比网架包括:

**a.** IEEE 118 节点原电网;

**b.** 在 IEEE 118 节点原电网基础上删除支路 8-30、11-13、33-37、48-49、88-89,所删除支路如附录 B 中红线所示;

**c.** 在网架 **b** 的基础上再删除支路 23-24、49-66、69-77、89-92、38-65,所删除支路如附录 B 中绿 线所示。

表 1	3 种网架的指标情况	(IEEE 118 节点电网)
-----	------------	-----------------

Table 1   Indexes of three	networks( I	EEE 118-b	us system)
评价指标	网架 a	网架 b	网架 c
归一化代数连通度	0.023 8	0.016 9	0.010 1
输电网网损/%	3.49	3.86	8.44
节点电压越限比例/%	2.54	4.24	11.02
重载设备比例/%	1.2	1.81	3
电压稳定裕度	0.184 9	0.157 8	0.037 8
负荷平均最短供电距离	1.091 7	1.1	1.107

由表1可知,在原网架a的运行方式下,各指标均优于网架b与c,而网架b下的各指标也均优于网架c下的指标,因此原网架比网架b和c更优。同时,随着支路的减少,电网联通性越来越差,归一化代数连通度也越来越小,验证了所提指标的有效性。

根据 G1 法计算各指标权重,本文设置 G1 法的 定量评价标度及含义如表 2 所示,表中 t<sub>j-1</sub>与 t<sub>j</sub> 表示 不同的评价指标。通过专家确定的各评价指标重要 度的序关系为:输电网网损>归一化代数连通度>电 压稳定裕度>节点电压越限比例>重载设备比例>负 荷平均最短供电距离,相对重要程度分别为: $s_1$  =  $1.3, s_2 = 1.2, s_3 = 1.2, s_4 = 1.1, s_5 = 1.1_{\circ}$ 

#### 表 2 G1 法的定量评价标度及含义

Table 2 Quantitative evaluation scale and corresponding implication of G1 method

$s_j$	语气算子
1.0	t <sub>j-1</sub> 与 t <sub>j</sub> 同等重要
1.2	<i>t</i> <sub>j-1</sub> 比 <i>t</i> <sub>j</sub> 稍微重要
1.4	<i>t</i> <sub>j-1</sub> 比 <i>t</i> <sub>j</sub> 明显重要
1.6	<i>t</i> <sub>j-1</sub> 比 <i>t</i> <sub>j</sub> 强烈重要
1.8	<i>t</i> <sub>j-1</sub> 比 <i>t</i> <sub>j</sub> 极端重要
1.1, 1.3, 1.5, 1.7	上述相邻判断的中间值

根据 2.1 节中的主客观指标权重计算方法计算 各指标的权重,并根据矩估计理论,采用最优组合赋 权法计算最优指标权重,其中主观与客观评价指标 的重要性系数分别为 0.501 和 0.499,计算结果如表 3 所示。

表 3 各计算方法中的指标权重(IEEE 118 节点电网)

Table 3 Index weights of each method (IEEE 118-bus system)

	权重				
评价指标	G1 法	熵权法	变异 系数法	最优组合 权重	
归一化代数连通度	0.243	0.141	0.251	0.212	
输电网网损	0.187	0.257	0.132	0.192	
节点电压越限比例	0.170	0.125	0.125	0.140	
重载设备比例	0.154	0.130	0.119	0.134	
电压稳定裕度	0.129	0.203	0.259	0.197	
负荷平均最短供电距离	0.117	0.145	0.115	0.126	

由表3可知,通过G1法、熵权法、变异系数法计 算所得的指标权重各不相同,这主要是因为G1法受 专家的主观影响较大,而熵权法和变异系数法分别 从指标的信息熵和变异系数角度对指标进行赋权。 最优组合权重的大小在G1法、熵权法、变异系数法 计算所得的权重之间,计算结果兼顾了专家主观意 见与指标数据的客观规律,使计算结果更具说服力。

其中,归一化代数连通度、电压稳定裕度及输电 网网损指标权重较大,表明主网网架的连通性、安全 性及经济性相差较大,指标权重分别为 0.212、0.197 和 0.192,因此以上 3 个指标对评价结果的影响较大。

经去量纲化、正向化后的标准评价矩阵如式 (15)所示。

	0.708	0.565	0.425	
	0.659	0.640	0.396	
V″′ _	0.673	0.619	0.404	(15)
<b>I</b> =	0.689	0.595	0.413	(13)
	0.671	0.622	0.403	
	0.712	0.557	0.427	

由式(11)计算可得正、负关联矩阵 R<sup>+</sup>及 R<sup>-</sup>:

	0.333	1.000	1.000	1.000	0.333	1.000
$\boldsymbol{R}^{\scriptscriptstyle +} =$	0.502	0.870	0.714	0.596	0.380	0.480
	1.000	0.333	0.333	0.333	1.000	0.333
	[1.000]	0.333	0.333	0.333	1.000	0.333]
$\boldsymbol{R}^{-} =$	0.498	0.351	0.385	0.431	0.731	0.522
	0.333	1.000	1.000	1.000	0.333	1.000
						(16)

由式(12)可以计算 3 种主网网架与绝对正、负 理想样本的加权马氏距离,如表 4 所示。由式(13) 可以计算各网架的相对接近度,其中网架 a 的相对 接近度为 0.93,高于网架 b、c;网架 b 的相对接近度 为0.714,高于网架 c 的 0.237。计算结果与实际指 标数据分析一致,验证了所提指标体系及评价方法 的有效性。

### 表 4 各网架的投影值(IEEE 118 节点电网)

Table 4 Projection values of each network (IEEE 118-bus system)

(IEEE TTO bus system)						
网架	$d_i^+$	$d_i^-$				
a	0.367	0.100				
b	0.291	0.184				
c	0.204	0.367				

#### 3.2 实际电网规划算例

为进一步验证所提评价方法在实际电网应用中的有效性,采用我国某市级电网 2016—2018 年 3 a 枯水大方式(简称枯大)运行规划网架作为对比算例,其地理接线图如图 1 所示。



图 1 某市级电网地理接线图

Fig.1 Geographical wiring diagram of a city network

图 1 中实心矩形表示火电厂,空心矩形表示水 电厂,实线线路表示 2016 年枯大方式下 220 kV 及 以上电压等级线路,2017 年投产 220 kV 线路 2 条, 如图中点线所示),2018 年投产 220 kV 线路 1 条,如 图中短划线所示)。评价样本各指标值如表 5 所示。

由表 5 可知,随着线路的建设,主网网架越来越 紧凑,主网网架的归一化代数连通度逐渐增大,验证 了所提指标的正确性。电压稳定裕度指标逐渐增 大,系统稳定性逐年增强;2018 年枯大方式下,输电

#### 表 5 3 种网架下的指标情况(某市级电网)

Table 5 Indexes of three networks(a city network)

评价指标	2016 年 枯大方式	2017 年 枯大方式	2018 年 枯大方式
归一化代数连通度	0.099 7	0.100 6	0.106 2
输电网网损/%	1.95	1.237	1.2
节点电压越限比例/%	6.955	7.22	5.15
重载设备比例/%	1.08	0.797 6	0.788
电压稳定裕度	2.68	2.69	2.72
负荷平均最短供电距离	2.405	2.26	2.218

网网损、重载设备比例、负荷平均最短供电距离等 指标相比往年均有所改善,但效果不明显,而节点 电压越限比例指标低于 2016、2017 年枯大方式,但 仍有必要采取一定调压措施,改善母线电压越限 情况。

根据 2.1 节中的主客观指标权重计算方法计算 各指标的权重,其中 G1 法的指标权重可参考 3.1 节 算例。根据矩估计理论,采用最优组合赋权法计算 最优指标权重,主观与客观评价指标的重要性系数 分别为 0.502 和 0.498,计算结果如表 6 所示。

表 6 各计算方法中的指标权重(某市级电网)

Table 6 Index weights of each method(a city network)

	权重					
评价指标	G1 法	熵权法	变异系 数法	最优组合 权重		
归一化代数连通度	0.243	0.201	0.285	0.243		
输电网网损	0.187	0.251	0.121	0.186		
节点电压越限比例	0.170	0.206	0.108	0.161		
重载设备比例	0.154	0.112	0.122	0.129		
电压稳定裕度	0.129	0.115	0.252	0.165		
负荷平均最短供电距离	0.117	0.114	0.112	0.115		

由表6可知,最优组合权重的大小在 G1 法、熵 权法、变异系数法计算所得的权重之间,计算结果兼 顾了主客观因素。其中,归一化代数连通度、输电网 网损及电压稳定裕度指标权重仍然较大,指标权重 分别为 0.243、0.186 和 0.165,即新建设线路后,网架 联通性、电网稳定性及经济性变化较明显,因此以上 3 个指标对评价结果的影响较大。

经去量纲化、正向化后的标准评价矩阵为:

	0.449	0.490	0.748	
	0.394	0.643	0.656	
<b>X</b> 7//	0.488	0.449	0.749	(17)
<b>Y</b> " =	0.393	0.646	0.655	(17)
	0.441	0.515	0.735	
	0.405	0.616	0.676	

由式(11)计算可得正、负关联矩阵  $R^+ \supset R^-$ ,如 式(18)所示。

	1.000	0.333	1.000	0.333	1.000	0.333]
$\boldsymbol{R}^{+} =$	0.783	1.000	0.478	0.938	0.667	0.692
	0.333	0.793	0.333	1.000	0.333	1.000

	0.333	1.000	0.333	1.000	0.333	1.000	
<i>R</i> <sup>-</sup> =	0.367	0.333	0.524	0.341	0.400	0.391	
	1.000	0.365	1.000	0.333	1.000	0.333	
						(18)	)

由式(12)可计算 3 种主网网架与绝对正、负理 想样本的加权马氏距离,如表 7 所示。

表7 各网架的投影值(某市级电网)

Table 7 Projection values of each network( a city network)

网架	$d_i^+$	$d_i^-$
2018 年枯大	0.308	0.194
2017 年枯大	0.279	0.271
2016 年枯大	0.284	0.287

由式(13)计算 3 种主网网架的相对接近度, 2016 年枯大方式为 0.494,2017 年枯大方式为 0.514,2018 年枯大方式为 0.717。由原指标数据分 析可知,2018 年主网网架所有指标均最优,2017 年 枯大方式下的指标除了节点电压越限比例指标外, 其他指标相比 2016 年均有所改善,因此 2016 年与 2017 年的相对接近度相近。因此,计算结果与指标 数据分析结果一致,进一步验证了所提评价体系与 评价方法的有效性。

计算原 TOPSIS 灰色关联投影法、改进 TOPSIS 灰色关联投影法、模糊评价法与逼近理想解法的灵 敏度,如表 8 所示。

表 8 评价方法灵敏度比较

Table 8 Sensitivity comparison of evaluation methods

评价方法	灵敏度/%
模糊评价法	42.5
逼近理想解法	30.1
原 TOPSIS 灰色关联投影法	47.8
改进 TOPSIS 灰色关联投影法	66.0

由表 8 可知,改进 TOPSIS 灰色关联投影法的灵 敏度明显高于另外 3 种方法,因此该评价方法更加 客观有效。综上所述,指标分析与计算结果相一致, 验证了所提指标及评价方法在实际电网应用中的有 效性。

# 4 结论

针对目前电网主网网架结构缺少全面客观评价 的现状,提出了一种基于改进 TOPSIS 灰色关联投影 法的主网网架结构评价方法,通过理论分析及算例 验证得到以下结论。

a. 所建立的评价体系弥补了以往网架评价缺少 电网稳定性指标及电源、负荷分布特征的缺点,评价 体系更加全面。所提归一化代数连通度指标适用于 电网拓扑联通性评价。

**b.**采用主客观最优组合赋权法确定指标权重, 避免了主观与客观赋权法的缺点;采用绝对正、负理 想解,避免了样本增减时可能会产生的逆序问题;在 计算评价样本的相对接近度时采用加权马氏距离, 提高了评价方法的准确性。所提改进 TOPSIS 灰色 关联投影法具有客观科学、简单有效、灵敏度高的优 点。所提主网网架评价方法对于电网规划设计及运 行方式的制定有一定指导作用,为主网网架的综合 评价提供了新思路。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

# 参考文献:

- [1]张衡,程浩忠,曾平良,等.考虑 N-1 安全网络约束的输电网结构优化[J].电力自动化设备,2018,38(2):123-129.
  ZHANG Heng, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Optimal transmission switching considering N-1 security network constraints
  [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2):123-129.
- [2] 刘利民,刘俊勇,魏震波,等. 基于协同效应分析的输电线路脆弱评估方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):30-37.
   LIU Limin,LIU Junyong,WEI Zhenbo, et al. Transmission line vulnerability assessment based on synergetic effect analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(5):30-37.
- [3] WU D, LIN C, PERUMALLA V, et al. Impact of grid structure on dynamics of interconnected generators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5):2329-2337.
- [4] 刘行,丁剑,何静波,等. 电网输电能力与拓扑结构的关系及其影响因素[J]. 高电压技术,2017,43(10):3463-3472.
  LIU Xing, DING Jian, HE Jingbo, et al. Influence factors of transmission capacity and the relationship between transmission capacity and power network topology[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10):3463-3472.
- [5]高贺,孙莹,李可军,等.一种新型智能配电网风险评估模型
  [J].电力自动化设备,2016,36(6):142-147.
  GAO He,SUN Ying,LI Kejun, et al. Risk assessment model of smart distribution grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2016, 36(6):142-147.
- [6] YE P,ZHAO X,ZHANG M,et al. Optimization of power grid structure considering comprehensive maintenance [C] // 2017 3rd IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering(ICCSSE). Beijing, China: [s.n.], 2017:439-442.
- [7]郑文杰,黄嘉健,孙川,等. 基于停电性质分类的多环节电网可 靠性评估方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):129-135.
   ZHENG Wenjie, HUANG Jiajian, SUN Chuan, et al. Reliability evaluation based on outage character classification for multi-level power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):129-135.
- [8] DIAO S, TIAN J, LIU J, et al. Self-organized criticality analysis of power grids based on electric structure-load entropy [C] // 2014 International Conference on Power System Technology. Chengdu, China; [s.n.], 2014;427-432.
- [9] XU Z, SONG P, HUANG H. Three macroscopic indices for describing the quality of AC/DC power grid structures [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(1):175-182.
- [10] 陈宏伟,孙可,彭明伟,等. 采用矩估计法的电网网架结构综合 评价模型[J]. 电力与能源,2014,35(3):260-263.
   CHEN Hongwei,SUN Ke,PENG Mingwei, et al. One kind of comprehensive evaluation model of power grid construction based on

moment estimation [J]. Power and Energy, 2014, 35(3):260-263.

- [11] 秦梁栋,宋静,徐海东,等.河北南网高压电网网架综合评价方 法探讨[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(3):89-94.
  QIN Liangdong,SONG Jing,XU Haidong, et al. Research on comprehensive evaluation approach of high-voltage power grid frame for Hebei south power grid[J]. Proceeding of the CSU-EPSA,2011,23 (3):89-94.
- [12] 张海霞,于洪全.按Laplace 谱半径对圈长和阶数固定的单圈图的排序[J].大连理工大学学报,2013,53(1):145-150.
   ZHANG Haixia,YU Hongquan. Unicyclic graphs ordering with fixed number vertices and cycle length by their Laplace spectral radii[J].
   Journal of Dalian University of Technology,2013,53(1):145-150.
- [13] 周后卿,徐幼专. 基于网络拓扑图的树的代数连通度[J]. 计算机工程与应用,2017,53(3):106-109.
  ZHOU Houqing, XU Youzhuan. Algebraic connectivity of trees based on network topology[J]. Computer Engineering and Applications, 2017,53(3):106-109.
- [14] 潘忠美,刘健,石梦,等. 计及电压/频率静特性的孤岛微电网电 压稳定性与薄弱节点分析[J]. 电网技术,2017,41(7):2214-2221.

PAN Zhongmei, LIU Jian, SHI Meng, et al. Static voltage stability and weak bus analysis of islanded microgrids considering static voltage/frequency characteristics[J]. Power System Technology, 2017, 41(7):2214-2221.

- [15] 李如琦,苏浩益,凌武能,等. 基于云模型和灰关联投影法的烟 气脱硫技术优选[J]. 中国电机工程学报,2012,32(23):21-26.
  LI Ruqi,SU Haoyi,LING Wuneng, et al. Optimization of flue gas desulphurization technologies based on cloud model and grey relation projection method[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32 (23):21-26.
- [16] 贾正源,赵亮,范辀. 基于属性测度区间理论的变电站优质工程

评价体系[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):67-71.

JIA Zhengyuan,ZHAO Liang,FAN Zhou. High-quality substation project evaluation based on attribute measurement interval theory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4):67-71.

- [17] 张俊光,宋喜伟,杨双. 基于熵权法的关键链项目缓冲确定方法
  [J]. 管理评论,2017,29(1):211-219.
  ZHANG Junguang,SONG Xiwei,YANG Shuang. Buffer sizing of a critical chain project based on the entropy method[J]. Management Review,2017,29(1):211-219.
- [18] 张文朝,顾雪平.应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J].电网技术,2014,38(10):2741-2746.
  ZHANG Wenchao, GU Xueping. Comprehensive evaluation of wind farms using variation coefficient method and technique for order preference by similarity to ideal solution[J]. Power System Technology,2014,38(10):2741-2746.

#### 作者简介:



梁海平(1979—),男,河北保定人,讲 师,博士,主要研究方向为现代电网评估、 智能技术在电力系统中的应用、电力系统 安全防御与恢复控制(E-mail:lianghaiping@ aliyun.com);

田圣双(1992—),男,河北邢台人,硕 士研究生,研究方向为智能电网评估及电

力系统恢复控制(E-mail:1498210067@qq.com);

刘英培(1982—),女,河北保定人,副教授,博士,研究方 向为新能源发电并网技术、直流输电等(E-mail:liuyingpei\_ 123@126.com)。

# Main grid structure evaluation based on improved TOPSIS grey relation projection method

LIANG Haiping<sup>1</sup>, TIAN Shengshuang<sup>2</sup>, LI Qiuyan<sup>3</sup>, LIU Yingpei<sup>1</sup>, ZHANG Wenchao<sup>4</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Maintenance Company of State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710065, China;

3. State Grid Henan Electric Power Company Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

4. Nanjing NARI Group Corporation, Nanjing 210003, China)

**Abstract**: Aiming at the status that there lacks comprehensive and objective evaluation of main grid structure, an evaluation method based on improved TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) grey relation projection method is proposed. The normalized algebraic connectivity index is defined, and the normalized algebraic connectivity, average shortest load power supply distance, power loss of transmission network, node voltage limit violation ratio, and voltage stability margin indexes are selected to construct the evaluation system of main grid structure. The combination weighting approach of subjective and objective is used to determine the weights of each index, and the TOPSIS grey relation projection method is adopted to calculate the comprehensive score of each grid. The main grid of IEEE 118-bus system and a city power grid are taken as examples to calculate and analysis, and results verify that the proposed method can objectively and effectively evaluate the main grid structure.

Key words: main power grid structure evaluation; normalized algebraic connectivity; combination weighting approach of subjective and objective; TOPSIS; grey relation projection method

# 附录 A 代数联通度指标推导过程

文献[16]为优化网络中节点在高维空间中的位置安排问题,在二次约束下,构建了优化模型。以在一维空间优化情况为例,优化模型为:

min 
$$Z = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{g} \sum_{j=1}^{g} (x_i - x_j)^2 a_{ij}$$
 (A1)

其中,  $x_i$  为节点i 在一维空间中的坐标值; s 为网络中节点个数;  $a_{ii}$  为网络对应邻接矩阵A 中的元素

(无权网络中节点*i*与节点*j*相连则 $a_{ij}$ 为 1,不相 连则为 0,且有 $a_{ii}$ =0),对应平面网络连接情况; 函数Z为一维空间中待优化的距离函数,优化目标 为函数Z最小。

优化模型对应的二次约束条件为:

$$\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X} = 1 \tag{A2}$$

其中,  $X = (x_1, x_2, \dots, x_g)$ , 为 $x_i$ 组成的一维空间中的解。

由式(A1)进一步可得:

$$Z = \boldsymbol{X}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{L} \boldsymbol{X} \tag{A3}$$

其中, *L*为网络对应的 Laplace 矩阵, 其非标准型为:

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{D} - \boldsymbol{A} \tag{A4}$$

其中,**D**为网络对应的度矩阵,其对角元素为各节 点的度数,其余位置均为0。

采用拉格朗日乘数法求函数 Z 最小值, 可得:

$$Lagrange_1 = X^T L X - \lambda (X^T X - 1)$$
 (A5)

其中, Lagrange<sub>1</sub>为一维空间中的拉格朗日函数;  $\lambda$  为拉格朗日乘数因子。

对式(A5)中X求一阶导数,可得:

$$(\boldsymbol{L} - \lambda \boldsymbol{I})\boldsymbol{X} = 0 \tag{A6}$$

由式(A6)可知,函数*Z*的解为矩阵*L*的特征向量;同时λ为矩阵*L*的特征值,不同λ对应不同的解。矩阵*L*的特征值又称为 Laplace 谱,一般记为:

$$\lambda_{g} > \lambda_{g-1} > \dots > \lambda_{f} > \lambda_{I}$$
(A7)

其中, λ<sub>1</sub>=0; λ<sub>f</sub> 为代数连通度; λ<sub>g</sub> 为谱半径。 由式(**A7**)进一步可得:

$$\lambda = \boldsymbol{X}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{L} \boldsymbol{X} \tag{A8}$$

由式(A3)和式(A8)可知,不同解 X 对应不同的 函数 Z 值,且该 Z 值等于对应的λ值。其中,最小 非平凡特征向量对应函数 Z 的非零最小解,此时函 数 Z 等于λ<sub>2</sub>。

若在节点*i*和*j*之间增加一条支路(假设*i*≠*j*, 原网络中节点*i*和*j*之间无支路),函数Z变为:

$$Z' = X^{T}L'X$$
(A9)  

$$L' = L + \begin{pmatrix} \ddots & \cdots & \\ l_{ii} & l_{ij} \\ \vdots & & \vdots \\ l_{ji} & l_{jj} \\ & \cdots & \ddots \end{pmatrix}$$

$$l_{ij} = l_{ji} = -1, \quad l_{ii} = l_{jj} = 1$$
进一步可得:

$$Z' = Z + (x_i - x_j)^2$$
 (A10)

式中,当且仅当 $x_i = x_j = 0$ 时,Z' = Z,此时节 点 $i \pi j$ 重合,或者本来两点就已经相连,与假设 不符。因此,在节点 $i \pi j$ 之间增加一条支路,函 数Z及对应的 $\lambda$ 值必然增大,且在不同节点之间增 加支路,函数Z及对应的 $\lambda$ 值的增量也有所不同。 当网络演化为全联通网络时, $\lambda_f$ 等于网络节点数8。 附录 B



图 B1 IEEE 118 节点电网

Fig.B1 IEEE 118-bus system