

一种引入熵函数进行组合赋权的直流落点选择方法

陈晶腾^{1,2}, 林 韩³, 蔡金锭¹, 李传栋⁴, 黄道姍⁴, 黄 霆⁴

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省电力有限公司技术中心, 福建 福州 350007;

3. 福建省电力有限公司, 福建 福州 350003; 4. 福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘要: 将一种考虑权本身随机性的组合赋权方法应用于直流落点选择目标函数的权系数求解。该组合赋权方法通过引入熵函数来同时考虑权本身具有的随机性以及权向量之间的一致性要求, 建立约束非线性优化模型, 并利用改进的粒子群优化算法进行求解, 将得到更具合理性的组合结果, 为直流落点选择建立更可靠的目标函数。将所建立的目标函数与其他目标函数的平均差异度进行比较, 结果表明该直流落点选择方法有效且相较于其他方法更为合理。

关键词: 直流落点; 直流输电; 多属性决策; 熵; 组合赋权; 目标函数

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.01.022

0 引言

随着国内沿海发达城市日益增长的负荷需求, 将有更多的直流输电工程投入运行, 直流落点的最优选择就显得越来越重要。

在直流落点选择方面需要考虑的因素有系统送电能力、电压稳定性等。文献[1]采用有效短路比(ESCR)、静态电压稳定指标(VSI)和有功功率损耗3个参数来反映相应的系统特征。综上所述, 直流落点的最优选择是一个复杂的多属性决策问题。求解相关目标函数的权系数比较好的方法是主客观的组合赋权方法^[2-3]。此类方法是通过一定的数学方法对权重进行组合。

然而权是通过数理统计得到的频率分布中的频率, 说明权是具有随机性的, 权重组合时还应考虑权本身随机性带来的影响。但目前国内大多数组合赋权方法未考虑这个问题。为此, 本文应用一种综合考虑权本身具有的随机性以及权向量之间的一致性要求的组合赋权方法对目标函数的权系数进行求解, 为直流落点的选择构建更为合理的目标函数。

1 落点选择的多目标决策问题的求解

1.1 多个指标的归一化处理

直流落点选择的目标包括: 降低受端系统整网的有功损耗, 提高 ESCR^[4-6]及 VSI^[7-8]。但上述各指标间缺少统一的度量标准, 难以进行比较。同时, 当 VSI 和 ESCR 大到一定值之后, 其数值大小对稳定性影响就很弱。

为解决上述问题, 引入一种含有门槛值的归一化处理方法如下:

$$\begin{cases} f_1(x) = \tau' = \max \left\{ \frac{\tau_{\max} - \tau}{\tau_{\max} - \tau_{\min}}, \frac{\tau_{\max} - \tau_{\text{margin}}}{\tau_{\max} - \tau_{\min}} \right\} \\ f_2(x) = \zeta' = \max \left\{ \frac{\zeta_{\max} - \zeta}{\zeta_{\max} - \zeta_{\min}}, \frac{\zeta_{\max} - \zeta_{\text{margin}}}{\zeta_{\max} - \zeta_{\min}} \right\} \\ f_3(x) = \rho' = \frac{\rho - \rho_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, τ, ζ, ρ 分别表示 ESCR、VSI 以及网络损耗这 3 个指标; $\tau_{\max}, \tau_{\min}, \zeta_{\max}, \zeta_{\min}, \rho_{\max}, \rho_{\min}$ 分别为 3 种指标的最大值与最小值; τ_{margin} 和 ζ_{margin} 分别为 ESCR 和 VSI 的门槛值。

a. τ_{margin} 的确定。

根据对交流系统强度划分^[9-10], 选择强系统与弱系统划分界线的 ESCR 作为门槛值, 令 $\tau_{\text{margin}} = 5$ 。

b. ζ_{margin} 的确定。

由于 VSI 大到一定值之后所表现出的饱和特性, 更大的值并不能使系统更稳定, 因此, 本文参考交流系统强弱系统的划分标准, 以 $\tau_{\text{margin}} = 5$ 时对应的 VSI 值作为该指标的门槛值。

文献[1]对直流系统模型特性用 9 个方程描述, 根据文献[3]中的公式变换得到 VSI 在额定运行情况下的表达式如下:

$$\begin{aligned} \zeta \approx 2CU \left\{ [2\mu + \sin(2\gamma) - \sin(2\gamma + 2\mu)] - \right. \\ \left. \frac{[\cos(2\gamma) - \cos(2\gamma + 2\mu)][1 - \cos(2\gamma + 2\mu)]}{\sin(2\gamma + 2\mu)} \right\} + \\ \frac{1}{|Z|} \left\{ [2U \sin \theta - E \sin(\delta + \theta)] + \right. \\ \left. \frac{[2U \cos \theta - E \cos(\delta + \theta)] \cos(\delta + \theta)}{\sin(\delta + \theta)} \right\} - 2B_c U \quad (2) \end{aligned}$$

其中, γ 为熄弧角; μ 为换相角; E 为交流系统等值电动势; Z 为交流系统戴维南等值阻抗; C 与 B_c 为与换流变压器参数及无功补偿设置有关的 2 个常数。

$$C = \frac{3}{4\pi} \frac{S_T}{P_{dN}} \frac{1}{u_k} \frac{1}{\tau_k^2} \quad (3)$$

其中, S_T 和 u_k 分别为换流变压器的容量和短路电压百分数; τ_k 为换流变压器分接头变比; P_{dN} 为直流输电系统额定传送的有功功率。

$|Z|$ 可以通过 ESCR 来表示:

$$\frac{1}{|Z|} = \tau + \frac{Q_{cN}}{P_{dN}} \quad (4)$$

其中, Q_{cN} 为当换流站交流母线电压 U 取额定值 U_N 时, 由交流滤波器和无功补偿电容器所产生的无功功率。

由此, 可得到换流站设备典型参数下, 当 $\tau_{\text{margin}} = 5$ 时对应的 VSI 值的大小。

1.2 确定权值的一般方法

完成多目标决策中指标度量标准的统一后, 本文采用线性加权法, 将多目标决策问题转化为单目标问题。目标函数是否合理, 权重的赋值起着至关重要的作用。

为减少后续权值确定时的计算量以及客观赋权值的合理性, 在确定权重前, 需先对指标进行初步判定。

1.2.1 根据门槛值的初步判定

当某一指标的门槛值低于所有节点在该指标下的最小值时, 将该指标从目标函数中移除, 仅考虑其他指标即可。

当各个指标的门槛值不低于各节点在该指标下的最小值时, 可按照式(2)对该指标下的各个值进行归一化, 然后按照下述方法确定权值。

1.2.2 主观赋权法

层次分析法(AHP)^[11]是主观确定权值的一种方法, 将所有的评价指标 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 分别按行和列排列, 构成一方阵; 再根据标度的表格^[11], 其指标间相对重要的程度用 1 至 9 的数及其倒数进行描述, 构成一判断矩阵; 最后对其求特征值, 并选取最大特征值进行一致性的校验, 若满足条件, 该最大特征值所对应的特征向量经过归一化处理后即是所需权向量。

相对比较赋权法^[12]将所有的评价指标 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 分别按行和列排列, 构成一个正方形的表; 再根据三级别比例标度对任意 2 个指标的相对重要关系进行分析并将评分值记入表中相应的位置, 将各个指标评分值按行求和, 得到各个指标的评分总和; 最后作归一化处理求得指标的权重系数。评分值矩阵的元素 q_{ij} 如下:

$$q_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i \text{ 比 } x_j \text{ 重要} \\ 0.5 & x_i \text{ 与 } x_j \text{ 重要性相同} \\ 0 & x_j \text{ 比 } x_i \text{ 重要} \end{cases} \quad (5)$$

1.2.3 客观赋权法

采用排序法^[13]进行权值选取, 具体步骤如下。

a. 确定这 3 个指标的最小值。假定 $\min(\tau')$ 对应的母线为 B_{escr} , $\min(\zeta')$ 对应的母线为 B_{vsi} , $\min(\rho')$ 对应的母线为 B_{loss} 。

b. 计算每 2 个指标之间的偏差。各个目标的偏差表达式如下所示:

$$\begin{cases} \varepsilon_e^v = \tau'(B_{\text{vsi}}) - \min(\tau') \\ \varepsilon_e^\rho = \tau'(B_{\text{loss}}) - \min(\tau') \\ \varepsilon_v^\zeta = \zeta'(B_{\text{escr}}) - \min(\zeta') \\ \varepsilon_v^\rho = \zeta'(B_{\text{loss}}) - \min(\zeta') \\ \varepsilon_\rho^\zeta = \rho'(B_{\text{escr}}) - \min(\rho') \\ \varepsilon_\rho^v = \rho'(B_{\text{vsi}}) - \min(\rho') \end{cases} \quad (6)$$

其中, ε_e^v 为 $\min(\zeta')$ 对应母线的 τ' 值与 $\min(\tau')$ 之间的偏差; ε_e^ρ 为 $\min(\rho')$ 对应母线的 τ' 值与 $\min(\tau')$ 之间的偏差; ε_v^ζ 为 $\min(\tau')$ 对应母线的 ζ' 值与 $\min(\zeta')$ 之间的偏差; ε_v^ρ 为 $\min(\rho')$ 对应母线的 ζ' 值与 $\min(\zeta')$ 之间的偏差; ε_ρ^ζ 为 $\min(\tau')$ 对应母线的 ρ' 值与 $\min(\rho')$ 之间的偏差; ε_ρ^v 为 $\min(\zeta')$ 对应母线的 ρ' 值与 $\min(\rho')$ 之间的偏差。

c. 计算各个目标的均差。由于 τ_{margin} 与 ζ_{margin} 的存在, 使得在可供选择的落点中可能会出现 $\min(\tau')$ 与 $\min(\zeta')$ 对应的节点不止一个, 因此在计算均差时假定 $\min(\tau')$ 、 $\min(\zeta')$ 、 $\min(\rho')$ 对应的节点个数分别为 a_1 、 a_2 、 a_3 , 得到这 3 个目标的均差计算式为:

$$\begin{cases} m_\tau = \frac{1}{a_2 + a_3} \left(\sum_{i=1}^{a_2} \varepsilon_{e,i}^v + \sum_{j=1}^{a_3} \varepsilon_{e,j}^\rho \right) \\ m_\zeta = \frac{1}{a_1 + a_3} \left(\sum_{i=1}^{a_1} \varepsilon_{v,i}^\zeta + \sum_{j=1}^{a_3} \varepsilon_{v,j}^\rho \right) \\ m_\rho = \frac{1}{a_1 + a_2} \left(\sum_{i=1}^{a_1} \varepsilon_{\rho,i}^\zeta + \sum_{j=1}^{a_2} \varepsilon_{\rho,j}^v \right) \end{cases} \quad (7)$$

d. 计算目标函数的权值(标准化处理):

$$\begin{cases} \lambda_\tau = \frac{m_\tau}{m_\tau + m_\zeta + m_\rho} \\ \lambda_\zeta = \frac{m_\zeta}{m_\tau + m_\zeta + m_\rho} \\ \lambda_\rho = \frac{m_\rho}{m_\tau + m_\zeta + m_\rho} \end{cases} \quad (8)$$

e. 目标函数的确定。对以上计算得到的均差与权值的大小进行比较并排序, 假设 $m_1 \geq m_2 \geq m_3$, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$, m_1, m_2, m_3 对应的指标分别为 f_1, f_2, f_3 , 则 $\lambda_3, \lambda_2, \lambda_1$ 分别为指标 f_1, f_2, f_3 的权值。

1.2.4 未考虑随机性的组合赋权法

为行文方便, 后文中“原组合赋权方法”表示未考虑随机性的组合赋权法。

原组合赋权法根据不同主客观赋权方法间的排序偏差, 选择其中偏差最小的一组主客观赋权方法, 再通过线性加权方法将其结合起来, 可用如下式子

表示:

$$\mathbf{w} = \alpha \mathbf{w}' + \beta \mathbf{w}'' \quad (9)$$

其中, $\alpha \geq 0, \beta \geq 0$, 且 $\alpha + \beta = 1$; $\mathbf{w}'$ 为主观赋权法得到的权向量; $\mathbf{w}''$ 为客观赋权法得到的权向量。

根据文献[14]给出的确定组合权值的方法, α 和 β 的计算式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha &= \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{ij}^2 w_j'' (w_j' + w_j'')}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{ij}^2 (w_j' + w_j'')^2} \\ \beta &= \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{ij}^2 w_j' (w_j' + w_j'')}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{ij}^2 (w_j' + w_j'')^2} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

其中, m 为可选直流落点的个数; n 为直流落点选择需要考虑的指标个数; r_{ij} 为决策矩阵中的元素。

1.3 确定权值的改进方法——考虑随机性的组合赋权方法

对于直流落点选择这样的复杂多指标决策评估而言, 各个影响因素权重的选取是评估的基础, 直接影响评价结果的有效性。在权威的韦氏字典[15]中对权重的定义有如下相关论述: “在一频率分布中某一项目的频率”, “表示某一项目相对重要性所赋予的一个数”。其中, 后者表明权重具有模糊性, 这一点在相关研究中已被较充分地考虑; 前者则表明权重具有随机性, 而这一点在相关研究中还鲜有关注。

为了解决现有直流落点最优选择中赋权方法组合所存在的问题, 本文应用一种通过引入熵函数来描述权向量的随机性的组合赋权方法[16], 它从权向量的随机性角度出发, 同时考虑不同赋权法所得指标权向量的不确定性以及与属性真实权向量之间的一致性要求, 将得到更具合理性的组合结果, 为直流落点选择建立更可靠的目标函数。为行文方便, 后文中“改进的组合赋权方法”表示该考虑随机性的组合赋权法。

1.3.1 模型的构建与求解

假设采用 s 种赋权方法对属性赋权, 记第 k 种方法所得权向量为 $\mathbf{w}^{(k)}$, 按照加权法对 s 种权向量进行集成即组合赋权, 得到组合权向量 $\mathbf{w}^{(*)}$, 满足:

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{w}^{(k)} &= (w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_n^{(k)}) \quad k=1, 2, \dots, s \\ \mathbf{w}^{(*)} &= (w_1^{(*)}, w_2^{(*)}, \dots, w_n^{(*)}) \\ \mathbf{w}^{(*)} &= \sum_{k=1}^s \lambda_k \mathbf{w}^{(k)} \\ \sum_{k=1}^s \lambda_k &= 1 \end{aligned} \right. \quad (11)$$

其中, λ_k 为权系数, 表示不同权向量的相对重要性; n 为指标个数。

显然, 计算组合权向量的关键就是科学合理地确定 λ_k 的取值。

a. 随机性描述。

考虑权本身具有的随机性, 本文将不同赋权法得到的权向量视为属性真实权向量的一个离散型随机变量, 权系数就是这些随机变量的概率函数。具体而言, 若将 s 种不同赋权法所得权向量视为一个随机事件, 则会产生 s 个可能的权向量结果(离散型随机变量)。不同赋权法所得权向量的各种结果均以一定概率出现, 具有不确定性。对这种不确定性的科学测度在一定程度上能够真实反映权具有的随机性。

由于熵可以说是“不确定性”的最佳测度[11], 故本方法引入熵函数来测度权向量空间中不同赋权法所得权向量的不确定性。

决策中, 如果事先对 s 种赋权方法确定的权向量发生的概率一无所知, 则其不确定性最大。从含有的不确定性角度来看, 等概率随机分布是最为随机的分布。其思想核心是, 如果没有理由和标准确信一个赋权法比另一个赋权法得到的权向量更有可能不发生或发生, 则认为这 2 个权向量出现的概率是等可能的。因此, 缺少先验信息时, 依据 Jaynes 的极大熵原理[17], 在给定约束条件下选择不确定性最大的概率分布作为权向量元素的权系数, 建立如下优化模型 1:

$$\left\{ \begin{aligned} \max H(\lambda) &= -\sum_{k=1}^s \lambda_k \ln \lambda_k \\ \text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^s \lambda_k &= 1, \lambda_k \geq 0 \quad k=1, 2, \dots, s \end{aligned} \right. \quad (12)$$

b. 一致性描述。

赋权方法指导思想不同, 带来了随机权向量的侧重不同, 集结时应充分重视不同权向量的隐含信息, 这些信息量与组合权重所含信息量越一致, 则越接近属性真实权向量。

据此, 本方法从权向量本身出发, 考虑不同权向量与真实权向量所含信息量的一致性要求, 采用相对熵度量不同赋权方法所得权向量与组合权向量的符合程度。基于概率测度导出的 Kullback 相对熵原理[14], 表示 2 个概率分布之间的“距离”, 常用来衡量离散分布的偏差, 或称符合程度。

由于相对熵值越趋近于零, 组合权向量和该赋权法所得权向量的差异越小、一致性程度就越好。所以在组合赋权时, 若要使各赋权法所得权向量和组合权向量具有最优一致性, 可通过最小化二者的相对熵实现。根据上述推论, 建立优化模型 2:

$$\left\{ \begin{aligned} \max Q(\lambda) &= \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^n w_j^{(*)} \ln \frac{w_j^{(*)}}{w_j^{(k)}} \\ \text{s.t.} \quad w_j^{(*)} &= \sum_{k=1}^s \lambda_k w_j^{(k)} \quad j=1, 2, \dots, n \end{aligned} \right. \quad (13)$$

将问题 1 转化为最小化目标后, 采用加权和法将上述 2 个多目标问题转化为单目标问题 3:

$$\begin{cases} \min f(\boldsymbol{\lambda})=a\sum_{k=1}^s\sum_{j=1}^nw_j^{(*)}\ln\frac{w_j^{(*)}}{w_j^{(k)}}+b\sum_{k=1}^s\lambda_k\ln\lambda_k \\ \text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^s\lambda_k=1, \lambda_k\geqslant 0 \quad k=1,2,\cdots,s \end{cases} \quad (14)$$

其中,决策变量为 $\boldsymbol{\lambda}=(\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_s)$; a 、 b 为 $(0,1)$ 内常数,满足 $a+b=1$,起到平衡两目标的作用。

c. 模型的求解。

问题 3 是一类非线性规划问题,目标函数复杂,常规方法求解困难。本文采用文献[16]中的改进粒子群优化算法进行求解。

1.3.2 组合赋权方法的合理性评价

赋权方法的合理性评价至关重要,不能仅采用排序偏差进行一致性检验,应依托权向量和决策矩阵本身信息,根据不同组合赋权法所得加权结果的差异性,来评价不同组合权重的合理性。

本文采用统计学中的离差函数^[18],对所有 s 种赋权法,计算第 p 种组合权重 $w_p^{(*)}$ 与原来所有 s 种赋权法之间的平均差异度:

$$D(w_p^{(*)})=\frac{1}{sm}\sum_{k=1}^s\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^n|r_{ij}(w_{pj}^{(*)}-w_j^{(k)})| \quad (15)$$

显然, $D(w_p^{(*)})$ 越小, $w_p^{(*)}$ 与 $w^{(k)}$ 的加权结果越接近、一致性越强,即 $D(w_p^{(*)})$ 越小,就越合理。

1.4 直流落点最优选择目标函数

完成了对各指标的度量标准的统一及各指标权重的赋值后,可作出落点最优选择的目标函数 $F(x)$ 为:

$$\min F(x)=w_1f_1(x)+w_2f_2(x)+w_3f_3(x) \quad (16)$$

其中, $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 分别为 ESCR、VSI 以及网络损耗 3 种指标归一化后的值; w_1 、 w_2 、 w_3 为依次对应上述 3 种指标的权重。

2 算例分析

2.1 算例系统

本文采用 IEEE 39 节点标准系统作为求解交直流系统落点选择目标函数的算例。算例中换流站具体参数为:直流系统基准功率和基准电压分别取额定直流功率 $P_{\text{dN}}=1\,000\text{ MW}$ 和额定直流电压 $U_{\text{dN}}=500\text{ kV}$;交流系统的基准功率和基准电压分别取额定直流功率 $P_{\text{dN}}=1\,000\text{ MW}$ 和换流母线额定电压 $U_{\text{N}}=345\text{ kV}$ 。换流变压器额定容量为 $S_{\text{T}}=1\,200\text{ MV}\cdot\text{A}$,在额定状态下, $P_{\text{d}}=1\text{ p.u.}$, $U=1\text{ p.u.}$, $\gamma=18^\circ$, Q_{cN} 取 600 Mvar 。

根据上述换流站运行参数,由式(3)可求得 $C=1.5915$;再由直流系统模型特性的 9 个方程^[1]计算得到 $\mu=21.80^\circ$; $B_{\text{c}}=0.6$ 。令 $\theta\approx 90^\circ$,根据式(2)与式(4)可计算得当 $\tau_{\text{margin}}=5$ 时,对应的 VSI 为 3.619。折算到有名值为 $\zeta_{\text{margin}}=3.619\,P_{\text{dN}}/U_{\text{N}}=3.619\times 1\,000/345=10.49\text{ Mvar/kV}$ 。

2.2 直流落点选择指标的计算

首先通过电力系统仿真软件 PSD-BPA 对未搭建直流系统的 IEEE 39 节点系统进行各个负荷节点的短路比(SCR)与 ESCR 的计算,再仿真计算已搭建直流系统的 IEEE 39 节点系统的不同落点所对应的 VSI 值及受端电网的有功功率损耗。本算例中换流站参数下的临界短路比(CSCR)^[19]为 2.13。由于节点 24 的 SCR 小于 CSCR,因此可以排除节点 24,并对其他节点的另外 2 项指标进行计算,计算结果见表 1 和表 2。综上,可知 3 个指标在归一化处理过程中的门槛值与最大、最小值分别为: $\tau_{\text{margin}}=5$, $\tau_{\text{max}}=7.11$, $\tau_{\text{min}}=2.14$; $\zeta_{\text{margin}}=10.49$, $\zeta_{\text{max}}=166.67$, $\zeta_{\text{min}}=5.46$; $\rho_{\text{max}}=170.10$, $\rho_{\text{min}}=63.70$ 。

根据上述计算所得到的各个值,对表 1 和表 2 的数据按式(1)进行归一化,得到的计算结果见表 3。

表 1 各落点方案所对应的 ESCR 指标

Table 1 ESCR indexes of different locations

节点	短路容量/(MV·A)	SCR	ESCR
new 12	2736.6	2.7366	2.1366
new 15	5921.9	5.9219	5.3219
new 16	7712.3	7.7123	7.1123
new 18	5993.4	5.9934	5.3934
new 20	4106.7	4.1067	3.5067
new 21	5692.5	5.6925	5.0925
new 23	4635.3	4.6353	4.0353
new 24	1714.9	1.7149	1.1149
new 25	6400.0	6.4000	5.8000
new 26	4712.1	4.7121	4.1121
new 27	4703.3	4.7033	4.1033
new 28	2880.3	2.8803	2.2803
new 29	3384.8	3.3848	2.7848
new 3	6884.4	6.8844	6.2844
new 4	6498.9	6.4989	5.8989
new 7	5431.0	5.4310	4.8310
new 8	5652.7	5.6527	5.0527

表 2 各落点方案所对应的 VSI 和网络损指标

Table 2 VSI and network loss of different locations

节点	$\Delta Q/\text{Mvar}$	$\Delta U/\text{kV}$	$\text{VSI}/(\text{Mvar}\cdot\text{kV}^{-1})$	网损/MW
new 12	10	1.83	5.464481	90.3
new 15	10	0.54	18.51852	84.7
new 16	10	0.33	30.30303	90.4
new 18	10	0.27	37.03704	81.2
new 20	10	0.42	23.80952	125.3
new 21	10	0.51	19.60784	100.0
new 23	10	0.39	25.64103	116.0
new 25	10	0.23	43.47826	140.8
new 26	10	0.27	37.03704	120.0
new 27	10	0.28	35.71429	101.7
new 28	10	0.06	166.6667	157.9
new 29	10	0.58	17.24138	170.1
new 3	10	0.27	37.03704	72.2
new 4	10	0.47	21.27660	69.8
new 7	10	0.59	16.94915	67.4
new 8	10	0.55	18.18182	63.7

表 3 各落点方案所对应指标归一化后的值
Table 3 Normalized indexes of different locations

节点	归一化值		
	ESCR	VSI	网络损耗
new 12	1	1	0.250000
new 15	0.4245	0.9688	0.197368
new 16	0.4245	0.9688	0.250940
new 18	0.4245	0.9688	0.164474
new 20	0.7246	0.9688	0.578947
new 21	0.4245	0.9688	0.341165
new 23	0.6184	0.9688	0.491541
new 25	0.4245	0.9688	0.724624
new 26	0.6030	0.9688	0.529135
new 27	0.6047	0.9688	0.357143
new 28	0.9711	0.9688	0.885338
new 29	0.8697	0.9688	1
new 3	0.4245	0.9688	0.079887
new 4	0.4245	0.9688	0.057331
new 7	0.4585	0.9688	0.034774
new 8	0.4245	0.9688	0

2.3 各种赋权方法权值的计算

本文根据 1.2 节所介绍的确定权值的一般方法,得到如表 4 所示的结果,并对各指标所占比重(即权重大小)进行排序,见小括号中的序号。

表 4 不同方法的指标权重值及其排序
Table 4 Index weights and numbers for different approaches

方法	权重		
	ESCR	VSI	网络损耗
层次分析法	0.3331(2)	0.5695(1)	0.0974(3)
相对比较赋权法	0.4444(1)	0.4444(2)	0.1112(3)
排序法	0.2645(2)	0.7355(1)	0(3)

2.4 不同组合赋权方法的合理性比较

2.4.1 原组合赋权方法

根据表 3 形成多目标决策矩阵 $R=(r_{ij})_{m \times n}$,其中 $m=16$ 代表可供选择的直流落点的方案个数, $n=3$ 代表所考虑的指标个数。观察表 4,易知层次分析法与排序法的权重大小排序偏差更小,因此将舍弃相对比较赋权法与排序法的组合。再由式(10)求得 α 和 β 值及其组合结果如表 5 所示。

表 5 原组合赋权方法计算结果
Table 5 Calculative results of original combination weighting approach

方法	α	β	权重		
			ESCR	VSI	网络损耗
层次分析法与排序法组合	0.5536	0.4464	0.3025	0.6436	0.0539

2.4.2 改进的组合赋权方法

根据式(14),利用改进粒子群优化算法求解得到最小 $f(\lambda)$ 所对应的 $\lambda=[0.2863 \ 0.2863 \ 0.4274]$;其中 λ 向量按列分别代表层次分析法、相对比较赋权法、排序法的权向量所占比重,再根据式(11)得到改进的组合赋权方法的计算结果如表 6 所示。

表 6 不同优化算法求解的改进组合赋权方法
计算结果

Table 6 Calculative results of improved combination weighting approach based on different optimization algorithms

方法	权重		
	ESCR	VSI	网络损耗
改进的组合赋权方法	0.3356	0.6046	0.0597

2.4.3 不同组合赋权方法的合理性比较

根据式(15)和表 3 中的多目标决策矩阵,可求得不同组合赋权方法间的合理性指标,即平均差异度 D ,具体如表 7 所示。

表 7 不同组合赋权方法的合理性比较
Table 7 Comparison of rationality between combination weighting approaches

方法	D
原组合赋权方法	0.1778
改进的组合赋权方法	0.1591

因此,2 种方法的直流落点选择的最终目标函数分别为:

$$\begin{cases} F_1=0.3025\tau'+0.6436\zeta'+0.0539\rho' \\ F_2=0.3356\tau'+0.6046\zeta'+0.0597\rho' \end{cases} \quad (17)$$

其中, F_1 、 F_2 分别为由原组合赋权方法、改进的组合赋权方法所确定的权值建立的落点选择目标函数。

结合表 3 的数据与式(17)计算各个节点的目标函数值,见表 8。2 种不同目标函数所得的值排序结果相同,且均选择节点 8 为最优落点,故证实了改进的组合赋权方法所构建的直流落点目标函数的有效性。

表 8 各落点方案所对应的目标函数值
Table 8 Objective function values for different locations

节点	目标函数值	
	F_1	F_2
new 28	0.964997	0.964492
new 12	0.959575	0.955125
new 29	0.940504	0.937308
new 20	0.873916	0.863475
new 23	0.837080	0.822617
new 26	0.834448	0.819693
new 27	0.825691	0.809995
new 25	0.790988	0.771459
new 21	0.770320	0.748566
new 16	0.765457	0.743180
new 7	0.764090	0.741685
new 15	0.762569	0.739982
new 18	0.760796	0.738018
new 3	0.756237	0.732968
new 4	0.755021	0.731621
new 8	0.751931	0.728199

设 W_1 、 W_2 分别为原组合赋权方法、改进的组合赋权方法所确定的权向量,观察表 7,易知 $D(W_2)<$

$D(W_1)$,验证了改进的组合赋权方法的结果比侧重于排序偏差的原组合赋权方法更为合理。

3 结论

综上所述,考虑随机性的组合赋权方法能建立有效的直流落点选择的目标函数,且它从权向量本身的随机性出发,同时考虑不同赋权法所得指标权向量的不确定性以及与指标真实权向量之间的一致性要求,将使该目标函数更具合理性。

本文建立直流落点选择的目标函数需做好2步:不同指标之间尺度的统一;权系数的求解。因此,该目标函数的求解与系统的大小无直接联系,不局限于网络的规模,所以未来将把该方法应用于实际电网中。

参考文献:

- [1] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004:61-71.
- [2] 李娜娜,何正友. 组合赋权法在电能质量综合评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(16):128-134.
LI Nana,HE Zhengyou. Combinatorial weighting method for comprehensive evaluation of power quality[J]. Power System Protection and Control,2009,37(16):128-134.
- [3] 王康,刘崇茹,韩民晓,等. 兼顾稳定性与经济性的交直流系统直流落点选择方法[J]. 电力系统自动化,2011,35(24):73-78.
WANG Kang,LIU Chongru,HAN Minxiao,et al. A method of selecting DC links termination at AC locations considering stability and economy at once[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(24):73-78.
- [4] 袁阳,卫志农,雷霄,等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):140-147.
YUAN Yang,WEI Zhinong,LEI Xiao,et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):140-147.
- [5] 周勤勇,刘玉田,汤涌. 计及直流权重多直流馈入落点选择方法[J]. 电网技术,2013,37(12):3336-3341.
ZHOU Qinyong,LIU Yutian,TANG Yong. A method to select terminal locations in multi-infeed HVDC power transmission system considering weights of HVDC transmission lines[J]. Power System Technology,2013,37(12):3336-3341.
- [6] 黄弘扬,徐政,许烽. 多馈入直流输电系统短路比指标的有效性分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):46-50.
HUANG Hongyang,XU Zheng,XU Feng. Effectiveness of short circuit ratio index for multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):46-50.
- [7] RAHIMI E,GOLE A M,DAVIES J B,et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2011,26(1):378-384.
- [8] 陈厚合,李国庆,姜涛. 计及静态电压稳定约束的交直流系统可用输电能力[J]. 电网技术,2012,36(2):75-81.
CHEN Houhe,LI Guoqing,JIANG Tao. Available transfer capability of hybrid AC/DC power system considering constraint of static voltage stability[J]. Power System Technology,2012,36(2):75-81.
- [9] 穆子龙,李兴源. 交、直流输电系统相互影响引起的谐波不稳定问题[J]. 电力系统自动化,2009,33(2):96-100.
MU Zilong,LI Xingyuan. Harmonic instability caused by interactions between AC and DC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(2):96-100.
- [10] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw Hill,2001:88-104.
- [11] 李亮. 评价中权系数理论与方法比较[D]. 上海:上海交通大学,2009.
LI Liang. Weights theory and weighting methods comparison in the evaluation[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2009.
- [12] 夏绍玮,杨家本,杨振斌. 系统工程概论[M]. 北京:清华大学出版社,1994:82-96.
- [13] 邱晓燕,张子健,李兴源. 基于改进遗传内点算法的电网多目标无功优化[J]. 电网技术,2009,33(13):27-31.
QIU Xiaoyan,ZHANG Zijian,LI Xingyuan. Multi-objective reactive power optimization based on improved genetic-interior point algorithm[J]. Power System Technology,2009,33(13):27-31.
- [14] 王中兴,张绍林,刘雁. 基于主客观加权属性值一致化的组合赋权法[J]. 广西科学,2007,14(3):247-249.
WANG Zhongxing,ZHANG Shaolin,LIU Yan. An synthetic approach to determine weights based on the identity of subjective and objective weighted attribute value[J]. Guangxi Sciences,2007,14(3):247-249.
- [15] WEBSTER N. Webster's dictionaries[M]. New York,USA:Merriam Webster,1961:478-484.
- [16] 石莉,杨善林,马英,等. 一种新的组合权重集结方法及合理性评价研究[J]. 系统工程学报,2012,27(4):481-491.
SHI Li,YANG Shanlin,MA Ying,et al. A novel method of combination weighting for multiple attribute decision making[J]. Journal of Systems Engineering,2012,27(4):481-491.
- [17] JAYNES E T. Information theory and statistical mechanics[J]. Physical Review,1957,106(4):620-630.
- [18] 邱苑华. 管理决策熵学及其应用[M]. 北京:中国电力出版社,2010:128-141.
- [19] 王鹏飞,张英敏,陈虎,等. 直流输电系统临界短路比的研究[J]. 华东电力,2011,39(11):1780-1783.
WANG Pengfei,ZHANG Yingmin,CHEN Hu,et al. Critical short circuit ratio of DC transmission system[J]. East China Electric Power,2011,39(11):1780-1783.

作者简介:



陈晶腾

陈晶腾(1990—),男,福建莆田人,硕士研究生,研究方向为电网规划与分析(E-mail: chenjingteng163@163.com);

林韩(1958—),男,福建莆田人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统生产、运行与科技管理工作以及系统分析、继电保护等。

DC-link location selection by combination weighting based on entropy function

CHEN Jingteng^{1,2}, LIN Han³, CAI Jinding¹, LI Chuandong⁴, HUANG Daoshan⁴, HUANG Ting⁴

- (1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;
- 2. Technology Center of Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China;
- 3. Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China;
- 4. Electric Power Research Institute of Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China)

Abstract: A combination weighting approach is proposed to solve the weight coefficients of the objective function for the selection of DC-link location, which adopts the entropy function to consider both the randomness of weights and the consistency among weight vectors, constructs a constrained nonlinear model and applies the improved particle swarm optimization algorithm to solve it, resulting in a more reasonable weight combination and a more reliable objective function. Comparison of the average difference between the proposed and other objective functions shows that, the proposed approach for the selection of DC-link location is effective and more reasonable.

Key words: DC-link location; DC power transmission; multi-attribute decision making; entropy; combination weighting; objective function

.....

(上接第 84 页 continued from page 84)

Optimal design of resonant circuit parameters for CLL resonant converter

WU Jianxue, XU Jianping, CHEN Zhangyong

- (Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education,
- School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The performance of CLL resonant converter relates to the parameter design of its resonant network, for which, an optimal parameter design scheme is proposed based on the fundamental harmonic approximation method and the characteristic impedance analysis method. The DC gain characteristics of CLL resonant converter, the RMS current of resonant network and the voltage stress of resonant capacitor are analyzed, and the characteristic impedance method is applied to achieve the restrictive conditions for realizing the soft switching of power switch. The correctness of the proposed scheme is verified by the experimental results.

Key words: CLL resonant converter; resonant inductance ratio; quality factor; circulating current loss; operational characteristics; electric converters; resonant circuits; design