

# 考虑负荷不确定性与差异化需求的配电网网架结构混合多属性评价优选模型

陈诗杰, 向月, 刘俊勇, 沈晓东  
(四川大学电气工程学院, 四川成都 610065)

**摘要:**传统配电网网架结构选择以定性决策为主,受人为因素影响大,决策繁琐。提出了一种考虑负荷不确定性与差异化需求的混合多属性评价优选模型。从拓扑结构、可靠性、经济性3个方面建立多属性评价指标体系,基于集对分析的混合多属性评价方法在评价过程中量化负荷不确定性,在此基础上进一步利用熵权法得到各指标客观权重及由指标权重表征的各网架性能;引入K-means聚类算法及模糊层次分析法建立多专家决策加权的需求方案静态获取模型,得到差异化需求方案以及指标主观权重;利用基于主客观权重及模糊熵的多属性关联关系分析模型,计算差异化需求方案与各备选网架的关联程度,最终建立考虑负荷不确定性与差异化需求的混合多属性评价优选模型。以多个地区的配电网规划为研究对象,利用所提出的混合多属性评价优选模型,分析了不同地区差异化需求下所适合建设的最优网架,验证了所提模型的有效性。

**关键词:**配电网;网架结构;负荷不确定性;差异化需求;多属性混合评价;优选模型

**中图分类号:**TM 715

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202009039

## 0 引言

配电网网架结构的选择关乎电网的可靠、经济及安全运行<sup>[1-2]</sup>。《配电网建设改造行动计划(2015—2020)》指出,2020年全国平均供电可靠率需达到99.82%,然而根据2019年11月国家能源局发布的《2019年上半年全国电力可靠性指标报告》,目前仍有十余个省级行政区未达要求,可见我国配电网还需进一步发展建设。不同地区对经济性和可靠性<sup>[3-4]</sup>等网架属性需求不同,如何在不同地区的差异化需求下选择最优的网架结构,由传统的定性评价转化为定量评价,同时考虑未来所面临的负荷不确定性,是迫切需要解决的问题。因此,有必要提出一种量化的配电网网架结构优选模型。

目前,对配电网的评估主要从可靠性评价<sup>[5-6]</sup>及经济性评价<sup>[7]</sup>这2个方面入手,相关研究已经比较成熟,但并不能够反映配电网在发生元件故障时的负荷转供的能力及配电网拓扑结构的通达度。在指标体系的基础上需要建立多属性综合评价方法,现有的文献多是通过主观赋权法<sup>[8]</sup>或客观赋权法<sup>[9-10]</sup>对每个指标赋权,根据综合加权分数排序决策。主观

赋权法中人为因素对决策的影响较大,且不能反映各种网架方案内在的多属性差异;客观赋权法无法考虑用户及专家的差异化需求。在此背景下有学者提出了主客观权重相结合的赋权方法<sup>[11]</sup>,并广泛应用于多个领域。然而现有的主客观权重相结合的方法大多是简单地将主观权重与客观权重相乘,经归一化处理后转化为综合权重,难以实现考虑差异化需求的网架优选。此外,负荷不确定性在上述研究中考虑不足。尽管有少数文献研究了在负荷不确定性下的配电网评价<sup>[12-13]</sup>,但主要是通过建立新指标进行评价,增加了综合评价的复杂度,针对负荷不确定性对现有指标的影响研究较少。

本文提出了一种考虑负荷不确定性与差异化需求的配电网网架结构混合多属性评价优选模型。在现有研究的基础上,引入配电网拓扑结构评价指标。提出基于集对分析SPA(Set Pair Analysis)的混合多属性评价方法,量化规划过程所面临的不确定性。利用模糊层次分析法FAHP(Fuzzy Analytical Hierarchy Process)<sup>[14-15]</sup>获取各指标权重表征的差异化需求方案,基于聚类对各专家方案进行赋权,增加综合方案合理性。基于熵权法<sup>[16]</sup>计算各备选网架中各指标所占权重以及各个指标客观权重;提出基于主客观权重及模糊熵<sup>[17]</sup>的多属性关联分析方法,将备选网架与差异化需求方案转化为由各指标权重表示的模糊集,进而计算各模糊集之间的交互关联关系,基于关联度实现网架优选。最后将上述模型用于实际某地区的配电网规划,并分析差异化需求下的最优网架,以期对配电网规划过程中的网架初选提供决策参考。

收稿日期:2020-02-16;修回日期:2020-08-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807127);四川省科技计划项目(2019YFH0171,2019YFG0152);中国电机工程学会青年人才托举项目(CSEE-YESS-2018006)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807127),the Science and Technology Project of Sichuan Province(2019YFH0171,2019YFG0152) and the Young Elite Scientists Sponsorship Program by Chinese Society of Electrical Engineering(CSEE-YESS-2018006)

## 1 混合多属性评价优选模型理论基础

### 1.1 多属性指标体系分析

为了量化各备选网架的多方面性能以及用户的差异化需求,本文将从拓扑结构、可靠性及经济性这 3 个方面建立多属性指标体系。

#### 1.1.1 拓扑结构评价指标

网架的拓扑结构反映的是网架坚强度、网架规模及其整体的带载能力,从配电网自身结构出发,提出了将转供能力 TC(Transfer Capacity)和网架连通度 NC(Network Connectivity)作为网架拓扑的评价指标,并设二者指标值分别为  $\lambda_{TC}$  和  $\lambda_{NC}$ 。

不同网架结构的 TC 存在差异,  $\lambda_{TC}$  越大,在故障发生后长时停电的负荷越少,网架的带载能力越强。故而在分析拓扑结构时,TC 是一个重要指标,其反映的是当线路发生故障时,网架对故障线路所带负荷进行转供的能力。  $\lambda_{TC}$  的计算公式为:

$$\lambda_{TC} = P_{N-1} / P_{all} \quad (1)$$

其中,  $P_{N-1}$  为当线路发生故障时,其他线路对该线路所带负荷进行转供的负荷量;  $P_{all}$  为故障线路正常运行时所带负荷。

NC 能够实际地表达网络中各个节点的连通状态,  $\lambda_{NC}$  越大,网架受  $N-1$  故障的影响越小,网架结构越坚强,其值的大小从整体上反映了网架结构的通达程度。  $\lambda_{NC}$  的计算公式为:

$$\lambda_{NC} = \frac{1}{2N^B} \sum_{x=1}^3 D_x^c N_x^b \quad (2)$$

其中,  $x$  为节点类型,  $x=1$  表示终端节点,  $x=2$  表示一般节点,  $x=3$  表示交叉节点;  $D_x^c$  为第  $x$  类节点的连通度;  $N_x^b$  为第  $x$  类节点数;  $N^B$  为总节点数。

#### 1.1.2 可靠性评价指标

配电网的可靠性指标是定量评价配电网可靠性的基础,本文基于 IEEE 的配电网可靠性评价指标标准选取了 4 个指标:失负荷量 ENS(Energy Not Supplied)、系统平均停电频率指标 SAIFI(System Average Interruption Frequency Index)、系统平均停电时间指标 SAIDI(System Average Interruption Duration Index)、平均供电可用率指标 ASAI(Average Service Availability Index),并设其指标值分别为  $\lambda_{ENS}$ 、 $\lambda_{SAIFI}$ 、 $\lambda_{SAIDI}$ 、 $\lambda_{ASAI}$ 。具体计算方法见附录 A。

#### 1.1.3 经济性评价指标

经济性指标除了需能够反映配电网建设初期所需的设备及人工成本等,还需要考虑投入使用后的运行经济性及报废时进行回收产生的费用,本文将总投资成本  $F_{TC}$ 、停电损失  $F_{sc}$  及单位负荷费用  $C_{uc}$  作为经济性评价指标,各指标具体计算方法见附录 B。

#### 1.1.4 无量纲化处理

为了消除指标量纲不同对评价结果的影响,需要将各个指标的计算结果进行无量纲化处理。为了

避免无量纲化过程中出现极大或极小值,引入缩放系数  $\varepsilon$ ,指标类型分为利益型和成本型,其规范化处理方式如下:

$$z_{nod} = \begin{cases} \frac{z - (1 - \varepsilon)z_{min}}{(1 + \varepsilon)z_{max} - (1 - \varepsilon)z_{min}} & \text{利益型} \\ \frac{(1 + \varepsilon)z_{max} - z}{(1 + \varepsilon)z_{max} - (1 - \varepsilon)z_{min}} & \text{成本型} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $z_{nod}$  为无量纲化后的数据;  $z$  为原始数据;  $z_{min}$ 、 $z_{max}$  分别为  $z$  的最小值、最大值。

### 1.2 SPA

由于我国经济的快速增长以及新能源的高度渗透,配电网的规划过程充满不确定性,在所建立的指标体系上负荷不确定性分析成为配电网投资规划的核心问题之一。SPA 是研究自然界和人类社会中普遍存在的确定性和不确定性之间相互作用的理论,由中国学者赵克勤于 1989 年提出<sup>[18]</sup>。集对是将 2 个相关的集合组成对子系统,SPA 针对集对内部的差异度、同一度以及对立度进行分析。联系数  $\mu$  为 SPA 的数学表征,其表达式为:

$$\mu = a + bg + ch \quad (4)$$

其中,  $a$ 、 $b$  和  $c$  分别为指标的同一度、差异度和对立度的度量,其值越大表示相应的程度越大;  $h$  为对立度的标记,  $h = -1$ ;  $g$  为差异度的标记,在分析中可表征该指标的不确定性,根据所分析系统的具体情况,其取值范围为  $[-1, 1]$ 。

由于本文分析配电网评价中各指标的确定性与不确定性,方案  $j$  关于指标  $i$  的联系数  $\mu_{ji}$  可简化为:

$$\mu_{ji} = a_{ji} + b_{ji}g \quad (5)$$

其中,  $a_{ji}$  和  $b_{ji}$  分别为方案  $j$  对指标  $i$  的同一度和差异度。定义形如  $\underline{d}_{ji} = [\underline{d}_{ji}, \bar{d}_{ji}]$  的数为区间数,设  $\bar{d}_{ji}$ 、 $\underline{d}_{ji}$  分别为方案  $j$  关于指标  $i$  不确定性取值上、下界,则:

$$a_{ji} = (\underline{d}_{ji} + \bar{d}_{ji}) / 2 \quad (6)$$

$$b_{ji} = (\bar{d}_{ji} - \underline{d}_{ji}) / 2 \quad (7)$$

为比较不同网架在同一指标属性上的差异性, 2 个联系数  $\mu_1 = a_1 + b_1g$  与  $\mu_2 = a_2 + b_2g$  之间的关系<sup>[18]</sup> 可分为以下 4 种: ①若  $a_1 = a_2$ ,  $b_1 = b_2$ , 则  $\mu_1 = \mu_2$ ; ②若  $a_1 = a_2$ ,  $b_1 > b_2$ , 则  $\mu_1$  拟大于  $\mu_2$ ; ③若  $a_1 > a_2$ , 则  $\mu_1 > \mu_2$ ; ④若  $a_1 > a_2$ ,  $a_1 + b_1 > a_2 + b_2$ , 则  $\mu_1$  显著大于  $\mu_2$ 。

### 1.3 基于聚类的多方案赋权

在实际工程中,差异化需求方案通常由多位专家共同决定,需对多专家方案进行聚类,从而得到统一的方案。本文将利用  $K$ -means 方法对多种需求方案进行聚类,具体见附录 C。基于聚类结果对多方案进行赋权:对于所含方案数较多的类别,赋予各方案较大权重;对于所含方案数较少的类别,赋予各方案较小权重,使得加权后的差异化需求方案更为合理。

假设有  $m$  位专家, 专家  $l$  提出基于指标权重表征的差异化需求方案为  $S^{d,l} = [s_1^{d,l}, s_2^{d,l}, \dots, s_n^{d,l}]$ , 其中  $s_i^{d,l} (i=1, 2, \dots, n)$  为专家  $l$  所提需求方案的第  $i$  项指标。通过  $K$ -means 算法将所提需求方案分为  $k$  类, 第  $c$  类方案的聚类中心和所含方案数分别为  $\omega_c$  和  $N_c$ 。为强化较多方案数的类中专家方案所占比重, 首先得出未归一化的权重为  $[\bar{\eta}_1, \bar{\eta}_2, \dots, \bar{\eta}_m]$ 。假设专家  $l$  所提需求方案属于类别  $c$ , 则该方案的权重  $\eta_l$  为:

$$\bar{\eta}_l = N_c / m \quad (8)$$

对其进行归一化处理:

$$\eta_l = \bar{\eta}_l / \sum_{i=1}^m \bar{\eta}_i \quad (9)$$

则最终聚类后所得的统一方案  $w$  为:

$$w = \sum_{i=1}^m S^{d,i} \eta_i \quad (10)$$

不同的聚类数  $k$  会导致不同的聚类结果, 因此, 本文基于轮廓系数法, 对聚类结果进行评价, 并选出最优的  $k$  值。假设需求方案  $S^{d,l}$  属于类别  $c$ , 则该方案与同类别其他方案间的平均距离  $\delta_s(S^{d,l})$ 、与其他类别方案间的最小平均距离  $\delta_d(S^{d,l})$  分别为:

$$\delta_s(S^{d,l}) = \frac{\sum_{l \neq \beta} s(S^{d,l}, S^{d,\beta})}{N_c - 1} \quad S^{d,\beta} \text{ 属于类别 } c \quad (11)$$

$$\delta_d(S^{d,l}) = \min_{\substack{r=1,2,\dots,k \\ r \neq c}} \left( \frac{\sum s(S^{d,l}, S^{d,\beta})}{N_r} \right) \quad S^{d,\beta} \text{ 不属于类别 } c \quad (12)$$

其中,  $s(S^{d,l}, S^{d,\beta})$  为  $S^{d,l}$  与  $S^{d,\beta}$  之间的欧氏距离。则  $S^{d,l}$  的轮廓系数为:

$$\chi(S^{d,l}) = \frac{\delta_s(S^{d,l}) - \delta_d(S^{d,l})}{\max\{\delta_s(S^{d,l}), \delta_d(S^{d,l})\}} \quad (13)$$

在获得每个方案的轮廓系数后, 将各方案轮廓系数相加取平均, 得到聚类的平均轮廓系数。轮廓系数既能反映同类别内部各样本点的聚合程度, 又能反映不同类别间各样本点的疏远程度。轮廓系数位于区间  $[-1, 1]$ , 其值越大表示聚类效果越好。

#### 1.4 基于模糊熵的关联分析

本文将由主客观权重所得的综合权重与由指标属性权重表征的需求方案及备选网架方案相结合, 构造不同方案中各指标的隶属度函数, 将备选网架方案及需求方案看作模糊集, 进而基于模糊熵计算需求方案与备选方案之间的关联度, 基本过程如下。

假设存在 2 个模糊集  $U$  和  $B$ ,  $U$  的模糊熵  $E(U)$  以及  $B$  关于  $U$  偏熵  $E_U(B)$  的计算公式分别为:

$$E(U) = -\frac{1}{n \ln 2} \sum_{i=1}^n \left[ \gamma_U(u_i) \ln \gamma_U(u_i) + (1 - \gamma_U(u_i)) \ln (1 - \gamma_U(u_i)) \right] \quad (14)$$

$$E_U(B) = -\sum_{i=1}^n \left[ \gamma_U(u_i) \ln \gamma_B(b_i) + (1 - \gamma_U(u_i)) \ln (1 - \gamma_B(b_i)) \right] \quad (15)$$

其中,  $\gamma_U(u_i)$  为模糊集  $U$  中第  $i$  个元素  $u_i$  的隶属度函数。同理可得  $B$  的模糊熵  $E(B)$  及  $U$  关于  $B$  的偏熵  $E_B(U)$ 。则  $U$  和  $B$  之间的关联系数为:

$$\rho(B, U) = \frac{n \ln 2 (E(B) + E(U))}{E_U(B) + E_B(U)} \quad (16)$$

## 2 配电网网架结构混合多属性评价优选模型

本文提出一种考虑负荷不确定性与差异化需求的配电网网架结构混合多属性评价优选模型, 量化负荷不确定性以及差异化需求下的各备选网架与需求方案关联度, 基于关联度排序选择最优网架。利用基于 SPA 的混合多属性评价方法在多指标属性上显式表达规划过程中面临的负荷不确定性, 进而利用熵权法将由各指标计算结果表征的备选网架性能转化为由各项指标属性权重表征的备选网架性能; 另一方面, 针对多位专家给出的不同需求方案, 利用 FAHP 将其转化为用各指标权重表征的需求方案, 基于多属性聚类, 形成差异化加权需求方案; 在此基础上分析各备选网架与需求方案之间的多属性关联度, 进而实现网架优选。

### 2.1 基于关联度的网架优选

为了显式表达不同地区不同网架方案建设的适应性, 本文基于多指标属性表征的需求方案与各备选方案之间的关联度, 显式表达各方案与规划地区的适应性, 实现网架优选的定量化决策。模型的目标函数如式 (17) 所示:

$$\max_{S^T \in C_T} \rho(S^T, S^D) \quad (17)$$

$$\begin{cases} S^T = [s_1^T, s_2^T, \dots, s_n^T] \\ S^D = [s_1^D, s_2^D, \dots, s_n^D] \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $C_T$  为所有备选方案的集合;  $S^T$  为备选方案,  $s_i^T$  为该集合中第  $i$  项指标;  $S^D$  为差异化需求方案,  $s_i^D$  为该集合中第  $i$  项指标。

备选方案和需求方案包含可靠性、经济性、拓扑结构等多方面的信息, 通过包含各个指标隶属度的模糊集实现了各方案属性的显式表达, 模糊集中各元素为备选方案或需求方案的指标属性隶属度; 计算各备选方案与需求方案之间的关联系数, 比较各备选方案与需求方案之间的关联度, 选择最优方案。

### 2.2 考虑负荷不确定性的备选网架多属性评价

为了精确表达各备选方案的性能, 同时体现负荷不确定性导致的备选网架在各指标属性方面的变化, 根据负荷波动区间, 以用区间数表示的负荷量为

输入,以各指标为输出,基于评价指标体系得到以区间数表示的各个指标。

考虑配电网的带载能力、坚强程度、供电效益、经济环境、资源利用及网架的稳定性和可靠性,以 $\lambda_{TC}$ 、 $\lambda_{NC}$ 、 $\lambda_{ENS}$ 、 $\lambda_{ASAI}$ 、 $\lambda_{SAIFI}$ 、 $\lambda_{SAIDI}$ 、 $F_{IC}$ 、 $F_{SC}$ 、 $C_{UC}$ 作为反映配电网属性的评价指标,利用基于SPA的混合多属性评价方法对以区间数作为负荷量的各备选方案进行评价。可得各备选方案多属性矩阵 $C$ 为:

$$C = \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{TC} & \dot{\lambda}_{NC} & \dot{\lambda}_{ASAI} \\ \dot{F}_{IC} & \dot{C}_{UC} & \dot{\lambda}_{SAIFI} \\ \dot{F}_{SC} & \dot{\lambda}_{ENS} & \dot{\lambda}_{SAIDI} \end{bmatrix} \quad (19)$$

将矩阵 $C$ 中的元素代入式(5)~(7),则以区间数表示的多属性矩阵可转化为以联系数表示的备选方案混合多属性矩阵 $C_R$ ,即:

$$C_R = \begin{bmatrix} \lambda_{TC}^{DE} + g\lambda_{TC}^{UD} & \lambda_{NC}^{DE} + g\lambda_{NC}^{UD} & \lambda_{ASAI}^{DE} + g\lambda_{ASAI}^{UD} \\ F_{IC}^{DE} + gF_{IC}^{UD} & C_{UC}^{DE} + gC_{UC}^{UD} & \lambda_{SAIFI}^{DE} + g\lambda_{SAIFI}^{UD} \\ F_{SC}^{DE} + gF_{SC}^{UD} & \lambda_{ENS}^{DE} + g\lambda_{ENS}^{UD} & \lambda_{SAIDI}^{DE} + g\lambda_{SAIDI}^{UD} \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中,上标DE为某项指标的同一度即确定性度量;上标UD为某项指标的差异度即不确定性度量。利用基于SPA的混合多属性评价方法将规划过程中的负荷不确定性通过联系数实现数学显式表达,便于量化分析不同备选网架方案在多属性上所面临的不确定性以及不确定性的引入对各方案性能的影响。

### 2.3 差异化需求方案获取

本文通过包含各指标隶属度的模糊集量化表达差异化需求方案,当指标属性数量较多时,差异化需求方案的直接获取比较困难,因此采用FAHP获取模糊集表征的需求方案,将计算所得的各指标权重作为模糊集关于各指标的隶属度,该方法能够避免权重的直接计算,而采用两两比较的多层赋权方法,有利于给出较为合理的需求方案。本文所建层次结构如图1所示,包括目标层、准则层及次准则层。

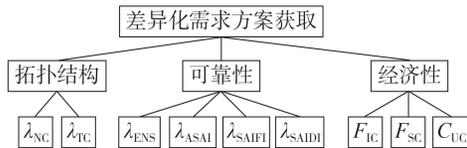


图1 层次结构模型

Fig.1 Hierarchy structure model

在实际中多属性需求方案通常由多位专家共同决定,因此有必要对方案进行聚类,从而凝练出一个统一的方案。本文考虑利用加权聚合的方法得出差异化综合加权需求方案,通过赋予不同类别间的差异化权重以反映不同方案的合理程度,对于所含方案较多的类别,赋予方案较高的权重,而所含方案较少的类别,赋予方案较低的权重,提高综合需求方案的合理性,降低极端方案对综合需求方案的影响。

首先通过分析规划地区的人文、地理及经济等因素现状及未来发展情况,由多位专家通过模糊互补判别矩阵给出各自的方案,通过FAHP将用模糊互补判别矩阵表征的多专家需求方案集转化为用指标权重表征的多专家需求方案矩阵 $C_D$ :

$$C_D = \begin{bmatrix} s_1^{d,1} & s_2^{d,1} & \cdots & s_n^{d,1} \\ s_1^{d,2} & s_2^{d,2} & \cdots & s_n^{d,2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_1^{d,m} & s_2^{d,m} & \cdots & s_n^{d,m} \end{bmatrix} \quad (21)$$

将每位专家的需求方案(对应式(21)所示矩阵行向量)映射到维度为指标数 $n$ 的多维空间上,为该多维空间的数据点,利用K-means算法对多维空间上的 $m$ 个点进行聚类,并根据每簇所含数据点数量以及每个数据点的所属类别,对每个数据点赋予权重,利用式(8)~(10)加权得到差异化需求方案,同时作为各项指标的主观权重 $W^{subj}$ :

$$W^{subj} = S^D = [s_1^d, s_2^d, \dots, s_n^d] \quad (22)$$

### 2.4 备选方案与差异化需求方案多属性关联分析

为量化分析各备选网架与差异化需求方案的关联性,需将二者的数学表达转化为相同的形式,首先利用式(3)对各指标进行无量纲化处理,然后基于熵权法将由各指标计算结果表征的备选网架性能转化为由各项指标属性权重表征的备选网架性能,得到多属性备选网架矩阵 $C_T$ 及各指标的客观权重 $W^{obj}$ :

$$C_T = \begin{bmatrix} s_{11}^t & s_{12}^t & \cdots & s_{1n}^t \\ s_{21}^t & s_{22}^t & \cdots & s_{2n}^t \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{o1}^t & s_{o2}^t & \cdots & s_{on}^t \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$W^{obj} = [w_1^{obj}, w_2^{obj}, \dots, w_n^{obj}] \quad (24)$$

其中, $o$ 为备选网架数量; $s_{ji}^t$ 为第 $j$ 个备选网架方案的第 $i$ 项指标; $w_i^{obj}$ 为第 $i$ 项指标的客观权重。

基于主客观权重,利用式(25)计算综合权重,然后将综合权重与多属性权重表征的备选网架方案相结合,构造备选方案中各指标的隶属度函数 $\gamma_T$ ;将综合权重与多属性权重表征的差异化需求方案结合,构造差异化需求方案指标的隶属度函数 $\gamma_D$ :

$$w_i^{com} = w_i^{subj} w_i^{obj} / \sum_{i=1}^n w_i^{subj} w_i^{obj} \quad (25)$$

$$\gamma_T(s_{ji}^t) = w_i^{com} s_{ji}^t \quad (26)$$

$$\gamma_D(s_i^d) = w_i^{com} s_i^d \quad (27)$$

其中, $w_i^{com}$ 、 $w_i^{subj}$ 分别为指标 $i$ 的综合权重、主观权重。

利用式(14)和式(15)计算备选方案和差异化需求方案的模糊熵 $E(S^T)$ 和 $E(S^D)$ 以及两者之间的偏熵 $E_{S^D}(S^T)$ 和 $E_{S^T}(S^D)$ ,则各网架方案 $S^T$ 与差异化需求方案 $S^D$ 之间的关联度为:

$$\rho(S^T, S^D) = \frac{n \ln 2 (E(S^T) + E(S^D))}{E_{S^D}(S^T) + E_{S^T}(S^D)} \quad (28)$$

综上,利用所建立的混合多属性评价优选模型,定量比较各个方案与需求方案的关联度,并实现配电网网架结构优选。

## 2.5 网架优选流程

网架优选流程见图2,可分为4个阶段:①评价指标构建阶段;②考虑负荷不确定性的网架评估阶段;③差异化需求方案获取阶段;④网架优选阶段。

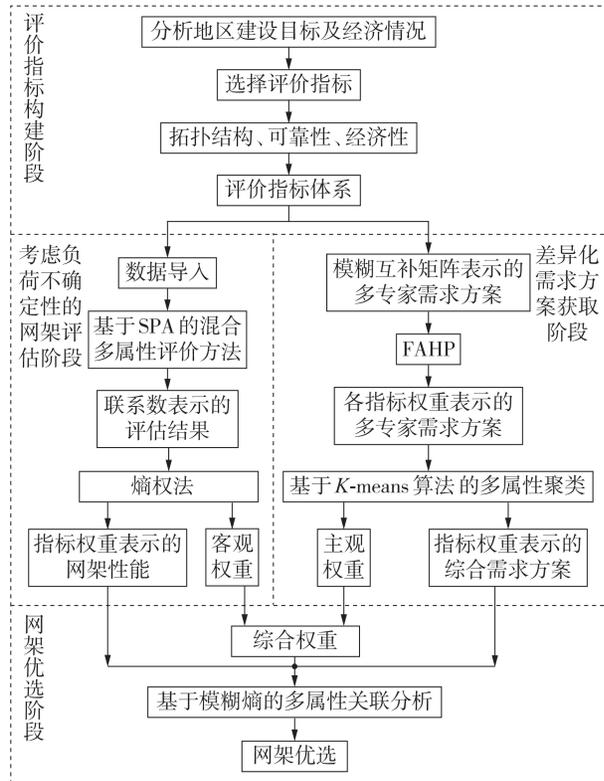


图2 网架优选流程

Fig.2 Flowchart of network optimization

## 3 算例分析

### 3.1 算例描述

算例的大部分参数取自文献[19-20],具体参数如附录D中表D1所示。线路及开关投资成本如附录D中表D2所示。备选典型网架方案如附录D中图D1所示,主要包括单辐射网、多联络多分段网、2-1式单环网、3-1式单环网、双环网以及花瓣网。环网和花瓣网线路为电缆,其余网架为架空线;单辐射网线路负载率为100%,其余网架负载率为50%。

### 3.2 基于联系系数的各项指标计算结果

以联系系数表示的各项指标计算结果如附录D中表D3所示。联系系数的第一项表示各方案中指标的同一度,即确定性度量;而联系系数的第二项表示各方案中指标的差异化,即不确定性度量。

#### 3.2.1 拓扑结构

由各指标的同一度可知,双环和花瓣网的TC最强,均为100%,表示二者均能实现对N-1故障下受

影响的全部负荷进行转供,其次是多联络多分段网和单环网,而单辐射网不具有TC。从差异性即不确定性来看,当考虑负荷不确定性时多联络多分段网及单环网的TC会发生变化,而单辐射网、双环网及花瓣网的TC没有变化,这是由于多联络多分段网及单环网的线路负载率在正常情况下为50%。当负荷量为50%线路容量时,发生N-1故障时2种网架均能实现受影响负荷全转供;当负荷量增大时,就会发生丢负荷情况。对于双环网而言,其供电方式为双回线路两端供电,当发生故障时,受影响负荷可以通过同一变电站的不同线路以及不同变电站进行转供。对于花瓣网而言,正常情况下花瓣内部闭环运行,花瓣间开环联络,发生故障时一方面可由同一花瓣内的不同线路转供,另一方面通过花瓣间联络线由其他变电站转供。单辐射网没有联络线,其负荷无论如何变化均无TC。

#### 3.2.2 可靠性

由评价结果可知,花瓣网和双环网的可靠性最高,其ASAI分别为99.999965%和99.999898%,其次是单环网和多联络多分段网,而单辐射网的可靠性最低,为99.975304%。这一方面是由于单辐射网和多联络多分段网多为架空线路,而环网和花瓣网多为地下电缆,架空线路的故障率远高于地下电缆;另一方面是由于多联络多分段网及环网在发生N-1故障时,能够通过短时间的倒闸操作对受影响的负荷进行转供,花瓣网在正常情况下为花瓣内部闭环运行,当发生N-1故障时,不需要进行倒闸操作,仅需将故障线路隔离就能对所有负荷正常供电,而单辐射网不具有TC,故障发生后,受影响的负荷将全部丢失。根据负荷不确定性对可靠性的影响,可靠性越高的网架受负荷不确定性的影响越小,这是由于可靠性指标综合表征了网架的供电能力、过负荷能力等。对于如环网及花瓣网等可靠性水平较高的网架,当负荷在一定范围内波动时,其均能够实现对于负荷的正常供电以及故障情况下的快速转供。

#### 3.2.3 经济性

由经济性分析结果可知,单辐射网、多联络多分段网的单位负荷费用较低,分别为0.0075、0.00591万元/kW,而双环网和花瓣网的单位负荷费用较高,分别为0.02596、0.02669万元/kW,符合网架可靠性与经济性相互制约的关系。环网及花瓣网的高可靠性来源于比单辐射网及多联络多分段网多的线路和开关,多联络多分段网的单位负荷费用之所以比单辐射网低,是因为单位负荷费用是投资成本及停电损失共同作用的结果,虽然单辐射网的投资成本较低,但其较高的停电损失使其单位负荷费用较高。就负荷不确定性对经济性的影响而言,单辐射网及多联络多分段网的单位负荷费用受负荷不确定性影

响较小,而环网和花瓣网受负荷不确定性影响较大。

### 3.3 网架优选

假设有 10 位专家参与差异化需求方案的确定,各指标权重表征的每位专家给出的需求方案见附录 D 中表 D4,基于轮廓系数确定最优  $k$  值的选择。结果见附录 D 中表 D5,当  $k=2$  时,聚类效果最好,此时对应的轮廓系数为 0.4797。将多位专家给出的差异化需求方案进行聚类并计算其权重,需求方案被聚类为 2 类:类 I 包含 4 个方案(方案 2、3、6、9),每个方案权重为 0.0769;类 II 包含 6 个方案(方案 1、4、5、7、8、10),每个方案权重为 0.1154。2 类中方案权重之比约等于每类中所含方案数之比,即  $0.0769/0.1154 \approx 4/6$ 。因此,通过聚类方法对多种需求方案进行综合赋权,能够有效反映各个方案的合理程度,对方案数较多的类能够赋予较大的权重,能较好地减小个别极端方案对整体决策的影响。

根据表 D3 所示的评价结果,分别计算各指标的主、客观权重,进而基于式(25)计算综合权重,计算结果见附录 D 中表 D6。由表 D6 可知,由多位专家聚类得出的差异化需求方案中,单位负荷费用的权重最高,为 0.23616,而平均停电持续时间权重最低,为 0.05893。将多指标属性结合分析可知,经济性所占权重最高,为 0.47853,其次是可靠性,为 0.29797,而拓扑结构所占权重较低,为 0.22349。上述结果意味着加权过后的差异化需求方案中,对经济性需求较高,其次是可靠性,对拓扑结构需求最低,对应于用指标权重表征的需求方案中,经济指标权重最高,其次是可靠性指标,最后是拓扑结构指标。就客观权重而言,NC 的权重最高,为 0.16995,而 ASAI 的权重最低,为 0.08242,表示各网架方案在 NC 上差异度较高,在 ASAI 方面差异度较低。总体而言,可靠性和经济性客观权重相差不大,分别为 0.36006 和 0.36165,而拓扑结构的客观权重较低,为 0.27829,反映了各备选网架在可靠性和经济性方面的差异度较高,而在拓扑结构方面的差异度较低。因此相较于拓扑结构,可靠性和经济性更能定量决定网架性能。

最后利用式(14)~(16)计算各方案与需求方案的关联系数,结果如表 1 所示。多联络多分段网架与预期网架的关联系数最高,关联系数为 1.138,其次是单环网和单辐射网,双环网与预期方案关联度最低,关联系数为 0.835。这表明在多专家聚类所得需求方案的情况下,多联络多分段网为最优方案。这是由于需求方案中对经济性的重视度较高,其次是可靠性,而对拓扑结构的重视度最低。根据差异化需求方案聚类结果可知:多联络多分段网的可靠性水平较低,经济性水平较高,与需求方案最为契合;花瓣网的可靠性较高,但经济性较差,与需求方

案的关联度较低,这也验证了所提模型的可行性。

表 1 各方案与需求方案的关联系数

Table 1 Correlation coefficient of schemes and demand schemes

方案	关联系数	方案	关联系数
单辐射网	1.002	3-1 式单环网	0.981
多联络多分段网	1.138	双环网	0.835
2-1 式单环网	1.045	花瓣网	0.845

### 3.4 差异化需求下的最优网架

为了分析在不同地区差异化需求的情况下所提出模型的可行性,评价不同需求下的适配网架,利用所提出的模型对 15 个地区进行评价,具体如附录 D 中表 D7 所示,各地区对可靠性的需求依次增加,对经济性和拓扑结构的需求依次降低。

各地区方案与需求方案的关联系数如图 3 所示。图中颜色越深,表示备选网架与差异化需求方案的关联程度越高;备选网架方案 a—f 分别表示单辐射网、多联络多分段网、2-1 式单环网、3-1 式单环网、双环网和花瓣网,后同。由图可知,随着对可靠性的需求程度增加,对经济性和拓扑结构的需求降低,各网架与差异化需求方案的关联系数由最低的 1.08168 增加到 1.62964。花瓣网和环网与差异化需求方案的关联度的坡度最陡,意味着关联系数的增加量相对较高。同理单辐射网和多联络多分段网与需求方案的关联系数的增加量相对较低;而单辐射网与差异化需求方案的关联系数位于区间  $[1.08169, 1.09309]$ ,变化较小,且始终为所有方案中最低。这是由于相较于其他方案,单辐射网的经济性很高,而可靠性很低,属于较为极端的方案,而由多指标属性表示的不同地区差异化需求方案中,可靠性所占权重较大,因此在这些地区,单辐射网是最不适合建设的结构。

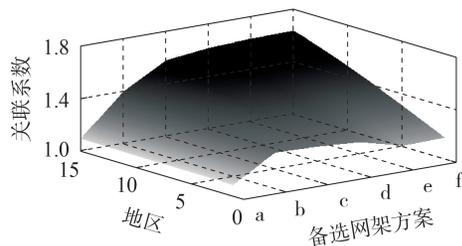


图 3 不同地区各方案与需求方案的关联系数

Fig.3 Correlation coefficient of schemes and demand scheme in different regions

为了便于比较不同地区的最优网架变化趋势,对每个地区需求方案与各个网架的关联系数进行归一化处理。图 4 为经归一化处理后的各地区需求方案与各个网架的关联系数。由图可知,当对可靠性需求较低而对经济性和拓扑结构需求较高时,多联

络多分段网为模型选择的最优网架。例如地区1中经归一化后的多联络多分段网与差异化需求方案之间的关联系数为0.1779,为所有网架方案中最高;随着对可靠性的需求程度增加,对经济性和拓扑结构的需求程度降低,最优网架从多联络多分段网过渡为2-1式单环网以及3-1式单环网,分别对应于地区2—5及地区6—11;随着对可靠性需求的进一步增加,最优网架向双环网以及花瓣网过渡,最终对于地区15而言,最优网架为花瓣网,其归一化后与差异化需求方案之间的关联系数为0.182。图形呈现“山脊”状,反映了模型所得最优网架呈现如下变化趋势:随着对拓扑结构以及经济性需求的降低,对可靠性需求的增加,最优网架从多联络多分段网向单环网过渡,进而过渡为双环网和花瓣网,符合拓扑结构、可靠性及经济性多属性计算的结果,验证了模型的可行性。

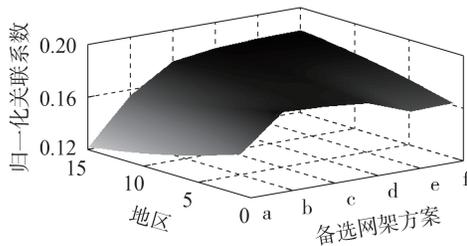


图4 归一化后不同地区各方案与需求方案的关联系数

Fig.4 Correlation coefficient of schemes and demand scheme in different regions after normalization

## 4 结论

本文提出了一种考虑负荷不确定性与差异化需求的配电网网架结构混合多属性评价优选模型,实现了规划问题中网架的初步定量优选。算例验证了所提模型方法的有效性,算例结果表明:

(1)基于SPA的混合多属性指标评价方法能够直观地得到规划过程中各个指标的不确定程度;

(2)对多位专家提出的需求方案进行聚类分析,能够有效地反映各个方案的合理程度,对较为合理的方案赋予更大权重的同时减少个别极端方案对整体需求方案的影响;

(3)基于SPA及主客观权重相结合的混合型多属性决策方法,从拓扑结构、可靠性和经济性3个方面建立指标体系进行综合评价,能够根据所建设地区的地理、经济等情况,考虑规划时所面临的不确定性以及不同地区对网架属性的差异化需求,得到最优的备选网架方案。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

[1] 赵洪山,赵航宇,侯杰群,等. 需求响应对配电网供电可靠性影

响分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):8-14.

ZHAO Hongshan, ZHAO Hangyu, HOU Jiequn, et al. Effect of demand response on supply reliability of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 8-14.

[2] 涂炼,刘涤尘,廖清芬,等. 计及储能容量优化的含风光储配电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):40-46.

TU Lian, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Reliability evaluation considering storage capacity optimization for distribution system with wind-PV-storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12):40-46.

[3] 肖白,刘亚伟,施永刚,等. 基于主成分分析的中压配电网供电可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):7-12.

XIAO Bai, LIU Yawei, SHI Yonggang, et al. Power supply reliability assessment of mid-voltage distribution network based on principal component analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10):7-12.

[4] HEYDT G T, GRAF T J. Distribution system reliability evaluation using enhanced samples in a Monte Carlo approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4):2006-2008.

[5] ZOU K, AGALGAONKAR A P, MUTTAQI K M, et al. An analytical approach for reliability evaluation of distribution systems containing dispatchable and nondispatchable renewable DG units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6):2657-2665.

[6] 蒋卓臻,刘俊勇,向月. 配电网信息物理系统可靠性评估关键技术探讨[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):30-42.

JIANG Zhuozhen, LIU Junyong, XIANG Yue. Key technologies for reliability assessment of distribution network cyber physical system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12):30-42.

[7] 蔡佳铭,张涛,王承民,等. 计及源荷不确定性的主动配电网网架扩展柔性规划[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):109-115.

CAI Jiaming, ZHANG Tao, WANG Chengmin, et al. Flexible planning of active distribution network expansion considering source and load uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10):109-115.

[8] 李蕊,李跃,徐浩,等. 基于层次分析法和专家经验的重要电力用户典型供电模式评估[J]. 电网技术,2014,38(9):2336-2341.

LI Rui, LI Yue, XU Hao, et al. Assessment on typical power supply mode for important power consumers based on analytical hierarchy process and expert experience [J]. Power System Technology, 2014, 38(9):2336-2341.

[9] 欧阳森,刘丽媛. 配电网用电可靠性指标体系及综合评估方法[J]. 电网技术,2017,41(1):215-221.

OUYANG Sen, LIU Liyuan. Reliability index system of distribution network for power consumer and its comprehensive assessment method[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 215-221.

[10] 陈柏森,廖清芬,刘涤尘,等. 区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):174-182.

CHEN Baisen, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Comprehensive evaluation indices and methods for regional integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 42(4):174-182.

[11] 周末,叶琳浩,杨雄平,等. 有源配电网设备利用率影响因子体系及其价值计算方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):155-162.

ZHOU Lai, YE Linhao, YANG Xiongping, et al. Influence indicator system for equipment utilization efficiency of active dis-

- tribution network and its value calculation method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 155-162.
- [12] 付学谦, 陈皓勇, 刘国特, 等. 分布式电源电能质量综合评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4270-4276.  
FU Xueqian, CHEN Haoyong, LIU Guote, et al. Power quality comprehensive evaluation method for distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4270-4276.
- [13] 蔡晓宇. 考虑分布式电源和新型负荷的配电网综合评估[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.  
CAI Xiaoyu. Comprehensive evaluation of distribution network considering distributed generation and new load[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [14] 李阳, 刘俊勇, 刘友波, 等. 省地一体化电力信息监控平台信息化的动态标尺评价模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 134-141.  
LI Yang, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Dynamic yardstick evaluation model for informatization assessment of provincially and locally integrated electricity utility information monitoring platform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 134-141.
- [15] 兰继斌, 徐扬, 霍良安, 等. 模糊层次分析法权重研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(9): 107-112.  
LAN Jibin, XU Yang, HUO Liang'an, et al. Research on the priorities of fuzzy analytical hierarchy process[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2006, 26(9): 107-112.
- [16] 欧阳森, 石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 156-159, 164.  
OUYANG Sen, SHI Yili. A new improved entropy method and its application in power quality evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 156-159, 164.
- [17] 王涛, 杨越, 顾雪平, 等. 基于小波模糊熵GG聚类的同调机群识别[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 140-147.  
WANG Tao, YANG Yue, GU Xueping, et al. Identification of coherent generators based on wavelet fuzzy entropy and GG clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 140-147.
- [18] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
- [19] 国家能源局, 中国电力企业联合会. 2017年全国电力可靠性年度报告[R]. 北京: 中国市场出版社, 2018.
- [20] 王乐. 厦门配电网可靠性提升措施的研究与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
WANG Le. Research and application of reliability improvement measures of distribution network in Xiamen[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.

#### 作者简介:



陈诗杰

陈诗杰(1996—),男,云南昭通人,硕士研究生,主要研究方向为配电网规划(E-mail: shijiecw@foxmail.com);

向月(1987—),男,重庆人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为配电系统规划与优化运行等(E-mail: xiang@scu.edu.cn);

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统分析及电力市场等(E-mail: liujy@scu.edu.cn);

沈晓东(1975—),男,四川成都人,副教授,博士,研究方向为园区多能源系统优化(E-mail: shengxd@scu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

## Mixed multi-attribute evaluation and optimization model for distribution network configuration considering load uncertainty and different demands

CHEN Shijie, XIANG Yue, LIU Junyong, SHEN Xiaodong

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Traditional configuration selection of the distribution network is mainly based on qualitative decision making, which is greatly affected by human factors, and the decision-making process is complicated. A mixed multi-attribute evaluation optimization model considering load uncertainty and different demands is presented. A multi-attribute evaluation index system from three aspects of topology, reliability and economy is established. The mixed multi-attribute evaluation method based on set pair analysis is used to quantify the load uncertainty in the evaluation process, the entropy weight method is further used to obtain the objective weight of each index and the performance of each network represented by the index weights. Then, the  $K$ -means clustering algorithm and the fuzzy analytic hierarchy process are used to establish multi-expert decision-weighted static acquisition model of demand scheme to obtain different demand schemes and index subjective weights. The multi-attribute correlation analysis model based on subjective and objective weights and fuzzy entropy is used to analyze the correlation between the different demand schemes and each alternative network, and finally a mixed multi-attribute evaluation optimization model that considers load uncertainty and different demands is established. Taking the distribution network planning in multiple regions as the research object, the proposed mixed multi-attribute evaluation and optimization model is used to analyze the optimal network suitable for construction in different regions, and the effectiveness of the proposed method is verified.

**Key words:** distribution network; network configuration; load uncertainty; different demands; mixed multi-attribute evaluation; optimization model

## 附录 A

### (1) ENS。

当配电网线路或设备发生故障时，在低可靠性网架结构中会造成线路所带负荷的丢失，直到倒闸操作过后由其他线路或设备进行转供或进行故障修复。故而在评价可靠性时，ENS 是一个比较有参考价值的指标，其指标值为：

$$\lambda_{\text{ENS}} = \sum_{x \in N_{\text{LP}}} \lambda_{\text{ENS},x} = \sum_{x \in N_{\text{LP}}} U_x P_x \quad (\text{A1})$$

其中， $U_x$  为节点  $x$  的年平均停电时间； $P_x$  为节点  $x$  的负荷； $\lambda_{\text{ENS},x}$  为节点  $x$  的年失负荷量； $N_{\text{LP}}$  为所有节点的集合。

### (2) SAIFI。

根据每种网架结构的不同，各种故障的发生概率不同，发生故障时，每种网架结构的停电用户数不同，利用 SAIFI 和 SAIDI 来综合衡量系统的故障率及故障持续时间对可靠性的影响。SAIFI 反映的是每年系统中用户因为配电网网架故障而发生停电次数的平均水平。

$$\lambda_{\text{SAIFI}} = \frac{\sum_{x \in N_{\text{LP}}} \alpha_x N_x}{\sum_{x \in N_{\text{LP}}} N_x} \quad (\text{A2})$$

其中， $\alpha_x$  为负荷点  $x$  的年平均停电频率； $N_x$  为节点  $x$  的用户数。

### (3) SAIDI。

SAIDI 反映的是每年系统中用户因为配电网网架故障而停电时间的平均水平。

$$\lambda_{\text{SAIDI}} = \frac{\sum_{x \in N_{\text{LP}}} U_x N_x}{\sum_{x \in N_{\text{LP}}} N_x} \quad (\text{A3})$$

### (4) ASAI。

不同的网架结构对用户的供电模式不同（单幅射网为单端电源供电，环网为双端电源供电），这就导致了当发生故障时，不同网架结构下的用户受到的影响不同，因此，ASAI 作为衡量各种网架结构每年对用户的可靠供电水平的计算指标，是衡量配电网可靠性的一个重要标准。

$$\lambda_{\text{ASAI}} = \frac{\sum_{x \in N_{\text{LP}}} 8760 N_x - \sum_{x \in N_{\text{LP}}} U_x N_x}{\sum_{x \in N_{\text{LP}}} 8760 N_x} = 1 - \frac{\sum_{x \in N_{\text{LP}}} U_x N_x}{\sum_{x \in N_{\text{LP}}} 8760 N_x} \quad (\text{A4})$$

## 附录 B

经济性指标除了需要能够反映配网建设初期所需的设备及人工成本等，还需要考虑投入使用后的运行经济性及报废时进行回收产生的费用。

### (1) 总投资成本。

配电网的总投资成本综合考虑了网架运行前、运行中及运行后所产生的各项费用，对经济性的评估比较全面。主要包括初始投资成本、运行和维护成本以及成本回收。

#### a. 初始投资成本。

初始投资成本反映的是在配网建设中投资的材料成本等，主要包括线路成本和设备成本：

$$Z = \sum_{I \in L} Z^{\text{line}} l_I + \sum_{J \in E_s} Z_J^c \quad (\text{B1})$$

其中， $L$  为所有线路的集合； $E_s$  为所有设备的集合； $Z^{\text{line}}$  为线路的单位投资费用； $l_I$  为线路  $I$  的长度； $Z_J^c$  为设备  $J$  的投资成本。为了便于比较，将初始投资成本转化为等年值：

$$F_T = \frac{x_s(1+x_s)^T}{(1+x_s)^T - 1} Z \quad (\text{B2})$$

其中,  $x_s$  为配电网设备投资回收率;  $T$  为配电网设备使用年限。

**b. 运行维护成本。**

运行维护成本主要分为 2 类: 线路运维成本及设备运维成本。线路运维成本主要包括运行期间的网络损耗; 设备运维成本考虑由设备维修中的材料成本、人力成本构成。

$$F_{OC} = F_{line} + F_{equ} = F_{line} + (F_{e1} + F_{e2}) \quad (B3)$$

其中,  $F_{OC}$  为总的运营维护成本;  $F_{line}$  为线路运营维护成本, 主要是网损成本;  $F_{e1}$  为检修的材料成本;  $F_{e2}$  为人力成本。由于本文的目的是为网架初选提供依据, 因此简便起见, 运行维护成本可根据实际经验取为  $Z$  的一定比例。

**c. 成本回收。**

成本回收是指网络中的各种设备及线路在报废及回收时所产生的各项费用。

$$F_{DC} = F_{DC1} - F_{DC2} - F_{DC3} \quad (B4)$$

其中,  $F_{DC1}$  为设备的残值;  $F_{DC2}$  为报废的处置费用;  $F_{DC3}$  为因设备未使用到预期年限报废所产生的损失。回收成本首先转化为现值, 然后转化为等年值, 由于本文的目的是对网架进行初选, 故而为了简单起见, 回收成本可看作是  $F_T$  的一定比例进行计算。初始投资成本、运行维护成本以及成本回收的和便是投资成本, 即:

$$F_{IC} = Z + F_{OC} - F_{DC} \quad (B5)$$

(2) 停电损失。

停电损失反映的是配网中每年因停电所造成的损失, 停电损失的定量处理比较复杂, 并与许多因素有关。由于本文是评估配电网的网架结构, 停电损失是指由于线路或设备故障引起的损失, 不包括上级部门计划停电所造成的损失, 即:

$$F_{SC} = \sum_{x=1}^{N_{IP}} \lambda_{ENSx} C_x^L \quad (B6)$$

$$\lambda_{ENSx} = U_i P_i \quad (B7)$$

$$C_x^L = \rho^D K_p \quad (B8)$$

其中,  $F_{SC}$  为年停电损失;  $C_x^L$  为节点  $x$  的单位停电损失, 可将其看作与当地电价成一定比例;  $\rho^D$  为当地电价;  $K_p$  为停电损失与电价的比例。

(3) 单位负荷费用。

总投资成本会随着网架规模地增大而增大, 能够作为经济性的一个参考指标, 但不能很好地反映网架结构的经济性水平, 单位负荷费用表示的是平均每单位负荷产生的费用, 很好地反映了配电网的经济性水平。

$$C_{UC} = \frac{F_{IC} + F_{SC}}{P_L} \quad (B9)$$

其中,  $P_L$  为系统总负荷。

## 附录 C

聚类算法步骤如下。

(1) 在  $m$  个方案中随机选取  $k$  个方案作为聚类中心, 聚类中心分别为  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\dots$ 、 $\omega_k$ 。

(2) 对于专家方案  $S^{D,1}$ 、 $S^{D,2}$ 、 $\dots$ 、 $S^{D,m}$ , 基于如式 (C1) 所示的欧氏距离, 分别计算其与各个聚类中心之间的距离, 并选择距离最小的聚类中心, 将  $S^{D,l}$  归入其内。

$$\zeta(S^{D,l}, \omega) = \sqrt{(s_1^{d,l} - \omega_1)^2 + (s_2^{d,l} - \omega_2)^2 + \dots + (s_n^{d,l} - \omega_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (s_i^{d,l} - \omega_i)^2} \quad (C1)$$

(3) 在所有方案被分类后, 计算各类方案总数  $N_k$ , 并对归入该类的所有方案取平均值, 得到新的聚类中心:

$$\omega^c = \frac{1}{N_c} \sum S^{D,l} \quad S^{D,l} \text{ 属于类别 } c \quad (C2)$$

(4) 计算收敛准则:

$$E(\alpha) = \sum_{c=1}^k \sum \zeta(S^{D,l}, \omega^c) \quad S^{D,l} \text{属于类别 } c \quad (C3)$$

其中， $\alpha$  为迭代次数。

(5) 判断迭代是否收敛，若  $|E(\alpha) - E(\alpha - 1)| \leq \xi$  ( $\xi$  为收敛精度)，则停止迭代，输出迭代结果；若  $|E(\alpha) - E(\alpha - 1)| > \xi$ ，则表示不收敛，转到步骤 (2)。

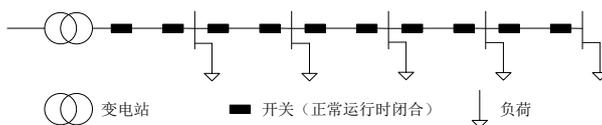
## 附录 D

表 D1 算例参数  
Table D1 Parameters of case

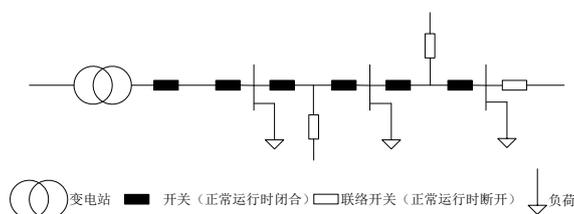
参数	数值	参数	数值
电缆故障率/[次 (km a) <sup>-1</sup> ]	0.024	网架标准载荷量/MW	8
架空线路故障率/[次 (km a) <sup>-1</sup> ]	0.102 3	当地电价/[元 (kW h) <sup>-1</sup> ]	0.98
故障修复时间/h	3	停电损失与电价的比例	20
倒闸操作转供时间/h	0.2	平均线路长度/km	5.98
负荷不确定区间/MW	[4,12]	设备计划运行年限/a	20

表 D2 线路及开关的投资成本  
Table D2 Investment of lines and switches

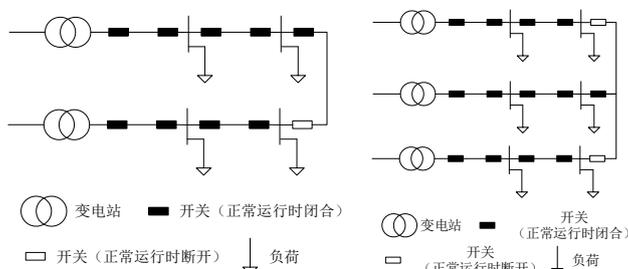
网架方案	线路/(万元 km <sup>-1</sup> )	每台分段开关成本/万元	每台联络开关成本/万元
单辐射网	17	8	8
多联络多分段网	17	8	8
单环网 2-1	81	8	8
单环网 3-1	81	8	8
双环网	81	8	8
花瓣网	81	8	8



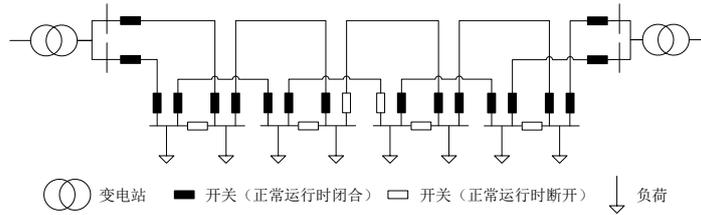
(a) 单辐射



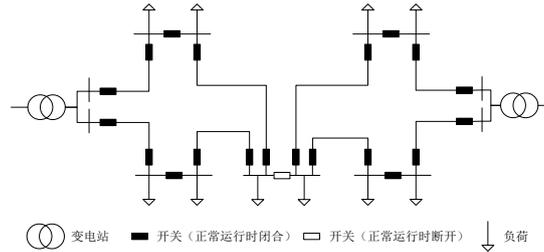
(b) 多联络多分段



(c) 单环网(2-1 式及 3-1 式)



(d) 双环网



(e) 花瓣网

图 D1 网架方案

Fig.D1 Network schemes

表 D3 评估结果

Table D3 Evaluation result

网架方案	$\lambda_{NC}$	$\lambda_{TC}/\%$	$\lambda_{ENS}/[(kW \cdot h) \cdot a^{-1}]$	$\lambda_{ASAI}/\%$	$\lambda_{SAIFI}/[次(户 \cdot a)^{-1}]$	$\lambda_{SAIDI}/[h(户 \cdot a)^{-1}]$	$F_{IC}/$ 万元	$F_{SC}/$ 万元	$C_{UC}/($ 万元 $kW^{-1})$
单辐射网	0.833	0	21 795.37+ g513 4.2	99.975 304+ g0.009 22	0.721 13+ g0.026 91	2.163 39+ g0.080 74	31.282	42.718 9+ g10.063	0.007 5+ g0.000 49
多联络多分段网	1.5	83.33+ g16.67	8 422.12+ g4 442.98	99.991 042+ g0.003 28	0.740 5	0.784 74+ g0.287 35	41.927	16.507 4+ g8.7082	0.005 91+ g0.000 31
单环网 2-1	0.833	75+g25	983.47+g606.24	99.998 975+ g0.000 487	0.067 55	0.089 1+ g0.042 66	123.546	1.927 6+ g1.188 2	0.013 05+ g0.002 49
单环网 3-1	0.889	75+g25	603.83+g410.2	99.999 38+ g0.000 344	0.044 12	0.054 35+ g0.030 15	186.057	1.183 5+ g0.804	0.019 49+ g0.003 82
双环网	1.25	100	93.25+g38.42	99.999 898+ g0.000 024	0.034 27	0.008 91+ g0.002 06	249.059	0.182 8+ g0.075 3	0.025 96+ g0.005 18
花瓣网	1.143	100	33.55+g19.03	99.999 965+ g0.000 015	0.005 19+ g0.002 98	0.003 1+ g0.001 28	246.6	0.065 8+ g0.037 3	0.026 69+ g0.005 13

表 D4 各专家决策（指标权重表征）

Table D4 Expert decisions (represented by index weights)

专家方案	指标权重								
	$\lambda_{NC}$	$\lambda_{TC}$	$\lambda_{ENS}$	$\lambda_{ASAI}$	$\lambda_{SAFI}$	$\lambda_{SADI}$	$F_{IC}$	$F_{SC}$	$C_{UC}$
1	0.074 29	0.158 08	0.077 42	0.068 10	0.061 19	0.077 81	0.085 41	0.148 31	0.249 38
2	0.113 98	0.139 91	0.101 81	0.117 77	0.057 41	0.026 46	0.089 27	0.119 66	0.233 73
3	0.072 22	0.125 55	0.108 56	0.087 36	0.075 49	0.048 08	0.140 98	0.076 14	0.265 62
4	0.059 37	0.129 37	0.113 11	0.053 99	0.110 97	0.068 00	0.061 72	0.156 94	0.246 54
5	0.027 26	0.164 09	0.056 07	0.099 10	0.087 34	0.074 48	0.096 71	0.175 86	0.219 09
6	0.072 66	0.122 27	0.110 36	0.099 71	0.058 57	0.059 98	0.105 88	0.144 20	0.226 38
7	0.108 14	0.146 56	0.116 68	0.056 92	0.034 84	0.075 95	0.087 33	0.142 50	0.231 07
8	0.096 46	0.133 31	0.040 46	0.103 39	0.042 46	0.031 50	0.092 92	0.210 19	0.249 30
9	0.084 25	0.162 64	0.047 29	0.123 42	0.080 12	0.064 33	0.114 83	0.115 39	0.207 72
10	0.072 34	0.172 05	0.074 09	0.075 22	0.088 44	0.050 42	0.090 05	0.148 36	0.229 04

表 D5 轮廓系数决定最优  $k$  值Table D5 Contour coefficient determines optimal  $k$  value

聚类数 $k$	轮廓系数	聚类数 $k$	轮廓系数
2	0.479 7	4	0.195 4
3	0.133 3	5	0.399 4

表 D6 权重计算结果

Table D6 Result of weight calculation

权重类型	指标权重								
	$\lambda_{NC}$	$\lambda_{TC}$	$\lambda_{ENS}$	$\lambda_{ASAI}$	$\lambda_{SAIFI}$	$\lambda_{SAIDI}$	$F_{IC}$	$F_{SC}$	$C_{UC}$
主观	0.076 91	0.146 58	0.083 44	0.085 64	0.069 96	0.058 93	0.094 01	0.148 36	0.236 16
客观	0.169 95	0.108 34	0.083 30	0.082 42	0.111 91	0.082 43	0.141 76	0.083 30	0.136 59
综合	0.115 08	0.139 80	0.061 19	0.062 14	0.068 92	0.042 76	0.117 32	0.108 80	0.283 98

表 D7 15 个地区的需求方案 (指标权重表征)

Table D7 Demand schemes in 15 regions (represented by index weights)

地区	指标权重								
	$\lambda_{NC}$	$\lambda_{TC}$	$\lambda_{ENS}$	$\lambda_{ASAI}$	$\lambda_{SAF}$	$\lambda_{SADI}$	$F_{IC}$	$F_{SC}$	$C_{UC}$
1	0.085 41	0.115 29	0.122 40	0.178 09	0.109 37	0.069 74	0.073 82	0.081 59	0.164 29
2	0.084 93	0.114 64	0.126 85	0.184 56	0.113 35	0.072 28	0.070 06	0.077 43	0.155 92
3	0.084 45	0.113 99	0.131 30	0.191 03	0.117 33	0.074 81	0.066 29	0.073 27	0.147 54
4	0.083 97	0.113 34	0.135 74	0.197 51	0.121 30	0.077 34	0.062 53	0.069 11	0.139 16
5	0.083 49	0.112 69	0.140 19	0.203 98	0.125 28	0.079 88	0.058 76	0.064 94	0.130 78
6	0.083 01	0.112 05	0.144 64	0.210 45	0.129 25	0.082 41	0.055 00	0.060 78	0.122 41
7	0.082 52	0.111 40	0.149 09	0.216 92	0.133 23	0.084 95	0.051 24	0.056 63	0.114 03
8	0.082 04	0.110 75	0.153 54	0.223 40	0.137 20	0.087 48	0.047 47	0.052 47	0.105 65
9	0.081 56	0.110 10	0.157 99	0.229 87	0.141 18	0.090 02	0.043 71	0.048 31	0.097 28
10	0.081 08	0.109 45	0.162 43	0.236 34	0.145 15	0.092 55	0.039 94	0.044 15	0.088 90
11	0.080 60	0.108 80	0.166 88	0.242 81	0.149 13	0.095 09	0.036 18	0.039 99	0.080 52
12	0.080 12	0.108 15	0.171 33	0.249 29	0.153 10	0.097 62	0.032 42	0.035 83	0.072 15
13	0.079 64	0.107 50	0.175 78	0.255 76	0.157 08	0.100 16	0.028 65	0.031 67	0.063 77
14	0.079 16	0.106 85	0.180 23	0.262 23	0.161 05	0.102 69	0.024 89	0.027 51	0.055 39
15	0.078 68	0.106 20	0.184 68	0.268 70	0.165 03	0.105 22	0.021 13	0.023 35	0.047 02