第46卷第6期	电网技术	Vol. 46 No. 6
2022年6月	Power System Technology	Jun. 2022

文章编号: 1000-3673 (2022) 06-2249-10 中图分类号: TM 721 文献标志码: A 学科代码: 470·40

世界一流城市配电网典型接线模式的 评估及选型方法

石方迪¹,侯四维²,唐琪¹,陈云辉³,王森²

(1. 国网上海市电力公司,上海市 浦东新区 200122;2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院,上海市 闵行区 200240;

3. 上海电力设计院有限公司,上海市 黄浦区 200025)

Evaluation and Selection of Typical Connection Modes for World -class Urban Distribution Network

SHI Fangdi¹, HOU Siwei², TANG Qi¹, CHEN Yunhui³, WANG Sen²

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Pudong New Area, Shanghai 200122, China;
2. School of Electronic Information and Electric Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China;
3. Shanghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Huangpu District, Shanghai 200025, China)

ABSTRACT: In order to build a world-class urban distribution network, it has become a trend to explore the methods of the evaluation and selection of the typical wiring modes. First, based on the reliability, economy, adaptability and other goals of the distribution network, a two-layer evaluation index system is established, and a membership formula is constructed to standardize the forward and the reverse indicators. Then, the \overline{E} -entropy weight method is proposed to improve the weight of the underlying indicators, which effectively avoids the differentiation. A percentile evaluation of the target indicators for the six typical connection modes like the Shanghai "Diamond" mode is conducted. Finally, the target index is weighted by the AHP method, and the efficiency conversion of the index system is constructed through the SE-CCR model, further discretizing the comprehensive score of each connection mode. The recommendation coefficient is used to provide the decisive support for the selection.

KEY WORDS: connection mode; index membership degree; \overline{E} -entropy weight method; SE-CCR

摘要:为打造更高水平的城市配电网,探索典型接线模式 的评估及选型方法成为必然。首先基于配电网可靠性、经 济性、适应性等发展目标,建立典型接线的双层评估指标 体系,并构造隶属度公式对正、反向指标进行标准化处理; 然后提出 *E*-熵权法改进底层指标赋权,有效避免了权值极 端"分化",由此对上海"钻石型"接线等6类典型接线 模式的目标指标进行了百分制评估;最后由层次分析法对 目标指标赋权,并结合数据包络分析法的超效 CCR 模型 (supper effectiveness Charnes-Cooper-Rhodes model, SE-CCR)构建指标体系的效率转化指数,进一步离散各接线 模式的综合评分,最终通过推荐系数为选型提供决策支持。

关键词: 接线模式; 指标隶属度; *Ē*-熵权法; SE-CCR DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0734

0 引言

配电网直接与用户相连,是提升电力系统综合 水平的关键环节。与发达国家比较,我国配电网发 展滞后^[1],为建成具有"安全可靠、优质高效、绿 色低碳、智能互动"特征的世界一流城市配电网^[2], 针对各典型接线模式,并对其可靠性、供电质量、 适应性等多方面性能进行评估成为必然需求。不仅 能对比分析出各个典型接线的性能差异,还能结合 建设实际和发展需求为接线模式的选型提供决策 支持,助力我国城市配电网建设。

城市配电网的典型接线模式,比如新加坡"花 瓣"^[3]、巴黎"手拉手"、东京"T型"、纽约 "4×6"和深圳的"3供1备"等,都具有较高的可 靠性水平,也被视为城市配电网建设的标杆。此外, 上海市正积极探索配电网的"钻石型"^[4]接线,在 提升供电质量和适应性的同时,兼顾了建设和改造 的经济性,已在西虹桥地区成功投入运行,并在浦 东临港新片区积极推广和建设。针对典型接线模式 的评估包含可靠性、经济性等众多方面因素,本质 是一个客观评价问题;而典型接线模式的选型还要

基金项目:国网上海市电力公司研究开发项目(520900190074)。 Project Supported by State Grid Shanghai Electric Power Company R&D Program(520900190074).

考虑除接线自身特性外的其他因素,比如现有网架 的改造难度、是否符合地区发展需求、以及各性能 的重要性排序等,是一个主、客观综合问题。

对于配电网接线模式评估的研究,目前主要 集中在指标体系的建立、评估方法的创新等方面。 比如, 文献[5]结合供电能力相关指标和供电能力 曲线构建了接线模式的综合效率坐标系, 对国内 联络接线和柔性"N供1备"接线按照效率进行 了排序,并结合算例给出了合理的规划建议;文 献[6]引入了指标微增率的概念,将其与熵权法结 合后为底层指标赋权,并基于标准化数据对配电 网整体性能进行了客观评价; 文献[7]将灰色关联 度方法与熵权法组合来确定评价指标的权值,并 对"花瓣"接线,国内单、双环网,以及柔直结 合的接线模式进行了评估; 文献[8]总结了国外新 加坡等城市配电网的优良结构与高供电可靠性之 间的联系,并分别进行了可靠性仿真分析;文献[9] 建立了一种适用于配电网接线模式分析的经济性 和可靠性综合评价方法,对不同连接方式的架空 线和电缆线进行了比较。以上研究均取得了一定 的效果,但存在以下问题:对接线模式的评价多 是基于可靠性或供电能力进行,评价因素较为单 一:综合评估结果和接线模式选型方案联系不够 紧密,没能进一步挖掘评估的内在价值。

文中以6类典型城市配电网接线为研究对象, 首先建立了包含 17 个底层指标的接线模式评估指 标体系;然后提出了基于指标隶属度和 *Ē*-熵权法的 接线模式多目标评估方法,从可靠性、经济性、适 应性、供电质量和供电能力等 5 个方面对各类典型 接线进行客观评估与分析;接着在选型过程中应用 层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)对目标 指标进行赋权,利用数据包络分析法的超效 CCR 模型(supper effectiveness Charnes-Cooper-Rhodes, SE-CCR)模型衡量正、反向指标的效率转化率,离 散各接线模式综合评分,并通过构造推荐系数得到 可选方案推荐序列;最后通过算例,检验了*Ē*-熵权 法和 SE-CCR 模型的有效性,实现了6类典型接线 模式的评分及选型结果,使得上海"钻石型"接线 的综合水平得到了验证。

1 配电网的典型接线模式与评估流程

1.1 城市配电网的典型接线模式

现阶段,国外典型城市配电网接线模式主要有 新加坡"花瓣"、巴黎"手拉手"、东京"T型" 和纽约"4×6"等;国内城市以电缆单、双环网为 主,典型接线模式有深圳"3供1备"和上海"钻石型"等。以上接线模式都具有较高的供电可靠性和扩展性^[10],结构分别如下:

1) 新加坡"花瓣"接线。

新加坡 22kV 配电网采用花瓣式接线方式,如 图 1 所示。每 2 条来自同一变电站的馈线形成一个 环状网络,闭环运行;且不同变电站的花瓣间设置 联络开关,正常运行时打开,任一"花瓣"发生故 障将自动闭合。电源点和线路负载率均控制在 50% 以内,采用纵差保护和断路器;联络开关通常处于 开路状态,发生故障时可恢复满负荷供电,主变压 器和线路均满足"*N*-1"校验,在"*N*-2"条件下 的可实现部分负荷转移,具有良好的可扩展性。



巴黎三环网"手拉手"接线模式如图 2 所示, 20kV 中压配电网采用三环网纺锤形架构,每个配 电室π接在三环网的任意 2 回线路,开关站之间"手 拉手"供电,闭环设计,开环运行,实现 1 回主供 和 1 回热备用,最大负载率为 50%;发生故障时备 用线路的断路器闭合,有足够的备用容量来满足负 荷转移的需要。同时,当负荷水平增加时,容易在 分区的中间新建变电站,具有良好的可扩展性。



东京"T型"接线模式如图 3 所示,20kV 配电 网的每个用户均具有 3 回"T 接"主干网的供电线 路,且 3 条线路并列运行供电,正常运行时负载率 不超过 67%。单一线路故障时,通过网络重构,由

并列2回线路转供,增加线路间负荷转移的容量, 用户基本不存在瞬时停电,但多线停电时负荷的转 移能力不足。



Fig. 3 Tokyo "T" type wiring

4) 纽约"4×6"接线。

纽约 "4×6" 连接方式如图 4 所示,系统中每 2 个电源点都通过联络开关连接。正常运行时分段开 关闭合,联络开关打开,负载率最高为 75%;任何 单电源点故障时,对应支路的联络开关闭合,初始 的 25%载荷转移到其他 3 个无故障电源上。



5) 深圳"3供1备"接线。

深圳"3供1备"接线模式如图5所示,3 回线路构成电缆环网,1回线路作为公共备用;1 回线路故障时末端断路器闭合,可以切换备用线 路投入使用,正常运行状态下负载率不超过75%。 与单环网和双环比较,该种接线模式具有更高的 设备利用率,但是容易受负荷分布及地理位置的 影响。



全断路器,全互连,全自愈"^[4]的典型特征。其中, 主干网以开关站和变电站为核心,由双侧电源四回 路供电,且开关站出线均配备断路器,站间配备联 络开关,形成"闭环设计、开环运行"的自愈环网 结构,故障发生后能够秒级恢复;次级网络以环网 站为核心节点,进出线皆配备环网开关,并依托上 级电源形成单环网结构。该模式凭借灵活可控的负 荷转供性能,主干网满足检修方式下"*N*-1"安全 校核,可以灵活调节运行方式,站间负荷转移能力 和平衡能力强。



1.2 典型接线模式的评估及选型流程

对城市配电网的典型接线模式进行评估及选型时,首先要根据评估目标建立对应的指标体系, 一般包括可靠性、经济性等多个目标,同时需采 用科学的量化方法和客观赋权法来避免评估过程 中的主观因素干扰^[11],是一个多目标评估的客观 方法;然后基于多目标评估结果,得到各种典型 接线模式的各方面特性,并结合发展阶段、投资 倾向等因素,在选型过程中引入主观因素,实现 跟随实际需求进行灵活调整的功能;最后依据城 市配电网典型接线模式的综合评分和推荐系数, 对各种模式进行排序,得到对应情境下的最优接 线模式方案。

文中典型接线模式的评估及选型流程如图 7 所示。





2 基于 *E*-熵权法的接线模式评估方法

2.1 针对典型接线模式的评估指标体系

建立典型接线模式的评估指标体系首先需要明 确多维评估的准则,即目标指标;然后理清各个目 标指标与底层指标之间的联系,实现二者的对应。

根据文献[12-14]研究内容,以及配电网发展评 估现状, 文中建立包含可靠性、经济性、适应性、 供电质量和供电能力 5 个目标指标的综合指标体 系,如图8所示。



图 8 典型接线模式的评估指标体系 Fig. 8 Evaluation index system of typical wiring mode

如上图, 配电网典型接线模式的评估指标体系 包含 5 个目标指标(A—E), 以及 17 个底层指标 (A1—E4),以上指标计算公式参见附录 A。

2.2 基于隶属度函数的指标量化方法

由于评估指标体系中存在不同的量纲,对于数 值化底层指标而言,依据评价目标趋向,通常分为 正向指标和反向指标,可以直接进行处理;对于非 数值化指标,在进行评估之前需要量化处理^[15],且 各指标的属性如表1所示。

表1 典型接线模式的评估指标属性								
Table 1	Evalu	ation ir	ıdex attrib	utes of t	ypical v	viring modes		
评估目	标	А	В	С	D	Е		
粉店北仁	正向	Al	В3	C3	_	E1, E2, E3, E4		
剱但1日1小	反向	A2, A3	B1, B2, B4	C4	D1, D2	_		
非数值	指标	_	_	C1, C2	_	_		

结合表 1,由于可扩展性(C1)和操作灵活性(C2) 为非数值指标,目前并无通用的量化标准,因此文 中通过"多位排序法"进行数值转换后参与计算。 该方法依据专家经验,按照多种典型供电模式的相 对"强弱"表现进行排序并打分,实现指标数值 化,将二者转化为正向指标(附录 A)。

常见的数值指标标准化方法有:最大-最小值 法、离差标准化法等,均通过指标取值范围线性缩 放来实现归一化;实际上指标取值变化存在惰性, 比如,对正向指标而言:指标处在高位时比低位时 更容易降低回落,即高位值比低位值的惰性小。因 此,文中考虑指标惰性变化特性,依据隶属度^[16] 函数对原始数值指标进行非线性处理,实现[0,1] 范围的标准化。

假设原始指标值为 x, 基于隶属度的正、反向 指标的标准化公式分别如下:

1)正向指标标准化。

$$p = \begin{cases} 0 & x \le x_{\lim 1} \\ \sin(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{x - x_{\lim 1}}{x_{\max} - x_{\lim 1}}) & x_{\lim 1} < x \le x_{\max} \end{cases}$$
(1)

式中: xlim1 为正向指标 x 的下限; xmax 为对应指标 的最大值。

2) 反向指标标准化。

$$p = \begin{cases} \cos(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{x - x_{\min}}{x_{\lim 2} - x_{\min}}) & x_{\min} \le x \le x_{\lim 2} \\ 0 & x > x_{\lim 2} \end{cases}$$
(2)

式中: xlim2 为反向指标 x 的上限; xmin 为对应指标 的最小值。

2.3 基于 *Ē*-熵权法的接线模式评估方法

熵权法是一种客观赋权法,依据信息熵来衡量 数据中有用信息的混乱程度,从而确定信息的权 重,能有效规避主观因素影响^[17],满足典型接线模 式的多目标评估要求。

同时,如果存在多个指标的熵值趋于1,采用 传统的熵权法计算其权重时,其较小变化会导致熵 权突变,分配与重要性不匹配的权重,最终使得评 估结果出现严重的分化现象。

因此,可以过滤非理想熵值,借助理想熵值的 均值对原始权值分配过程进行改进,即Ē-熵权法, 计算过程如下。

1) 选定某个目标指标, 假如有 n 类典型接线 模式,且该评估目标对应 m 个底层指标,则组成一 个 $n \times m$ 维度的评价矩阵 $P_{n \times m}$, 单个指标熵值 E_i 的 计算方法如下:

$$e_{ij} = \frac{p_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} p_{ij}}$$
 (3)

$$E_{j} = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^{n} e_{ij} \cdot \ln e_{ij}$$
 (4)

式中: pii 为隶属度函数标准化处理后的指标; eii 为 指标信息熵 E_i的中间参量。

2) 基于指标熵值集合 $\{E_j\}$,设置熵值阈度 ε , 筛选出非理想熵值集 W,并计算其补集均值 \overline{E} 。

$$\begin{cases} W = \{E_j | \text{ if } |1 - E_j| \le \varepsilon\} \\ \overline{E} = \sum_{E_j \not\subset \Omega} E_j / k \end{cases}$$
(5)

式中:阈值*ε*一般取较小的值; *k*为理想熵值集合中 元素数量,且 *k≤m*。

3)利用均值 Ē 改进熵权分配计算。

$$w_j = \frac{1 - E_j + \lambda \cdot \overline{E}}{m \cdot (1 + \lambda \cdot \overline{E}) - \sum_{j=1}^m E_j}$$
(6)

式中 λ 为均熵系数,一般取 0.01 左右即可显著改善权值分配效果,得到底层指标的权重集合 $\{w_j\}$,满足 $0 < w_j < 1, w_1 + w_2 + ... + w_m = 1$ 。

4)依据指标的隶属度标准化结果 *p*_{ij}和熵权 *w*_j 对选定目标指标的第 *i* 种接线模式进行评估计算。

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot p_{ij} \tag{7}$$

式中: *S_i*为对应接线模式该选定目标的评估结果,取值范围为[0,1],数值越大表示评估结果越好。

为了将评估结果转化为百分制评分,可以采用 最大值百分比缩放方法进行处理,公式如下:

$$S_{i, \%} = 100 \cdot S_i / S_{i, \max} \times 100\%$$
 (8)

S_{i,%}为对应接线模式目标指标的百分制评分,范围为[0,100],数值越接近100表示评估结果越好。

3 基于 AHP-DEA 的接线模式选型方法

3.1 基于 AHP 的目标指标权重确定方法

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP) 是 1970年代由美国匹兹堡大学的 T.L.Saaty 教授提 出的一种多目标决策分析方法^[18]。AHP 将与决策相 关的要素分解为目标、准则和方案 3 个层次,引入 量度理论中相对标度来量化主观判断尺度,并逐层 建立判断矩阵,在此基础上得到准则层指标对应各 方案的优先权重。

结合多目标指标评价结果和可选的典型接线模式方案,构架如下的3层选型架构,见图9。



依据图 9, 基于 AHP 的目标指标权重确定方法 计算过程如下。

1)构造目标指标的判断矩阵。

对于 5 个目标指标 A—E, 首先要基于实际选 型要求进行专家打分,利用"9 位标度法"(附录 B)计算相邻指标的权值对比 *a*, 由此构建目标指标 的判断矩阵 *A*:

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{n1} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$
(9)

式中 *n* 为目标指标数量,原则上判断矩阵 *A* 满足如下关系:

$$\begin{cases} a_{ij} > 0 & 1 \le i, j \le n \\ a_{ij} = 1 & i = j \\ a_{ij} = 1/a_{ji} & i \ne j \end{cases}$$
(10)

2) 单排序的权值求解。

① 判断矩阵 A 按列进行归一化处理:

$$a_{ij} = a_{ij} / \sum_{k=1}^{n} a_{kj}$$
 (*i*, *j* = 1, 2, ..., *n*) (11)

② 归一化矩阵 A 按行求和:

$$\overline{\omega}_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (i, j = 1, 2, ..., n)$$
 (12)

③ 由特征向量 $\vec{\boldsymbol{\omega}} = (\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, ..., \bar{\omega}_n)$ 求权值:

$$\omega_i = \overline{\omega}_i / \sum_{j=1}^n \overline{\omega}_j \tag{13}$$

由式(13)知, $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, ..., \omega_n)$ 即为单排序的权值 向量。

3) 一致性检验。

由于无法构造出绝对完美的判断矩阵,有必要依 据一致性验证,以确保判断结果在可接受的范围内。

其中,一致性衡量指标 C_I的公式如下:

$$C_{\rm I} = \frac{\lambda_{\rm max} - n}{n - 1} \tag{14}$$

式中 λ_{max} 为判断矩阵的最大特征值, C_1 越小,说明 λ_{max} 越接近 n,状态越理想。

然后通过 C₁计算随机一致性比率 C_R来判断, 公式如下:

$$C_{\rm R} = C_{\rm I} / R_{\rm I} \tag{15}$$

式中: *R*_I为平均随机一致性指标,其取值规则参照 附录 C。一般而言, *C*_R<0.1 即可检验通过,认为结 果比较满意。

3.2 基于 DEA 的接线模式转化效率计算

数据包络分析(data envelopment analysis, DEA) 是一种非参数技术,基于构建有效边界的概念,用 于测量和评估具有公共输入和输出条件的决策单 石方迪等:世界一流城市配电网典型接线模式的评估及选型方法

Vol. 46 No. 6

元(decision making unit, DMU)的相对效率^[19]。其 中,效率定义为加权输出与加权输入之比,因此当 模型的输入值较小,输出值较大时,会导致更高的 效率,模型也具有更好的表达效果。

对于某个典型接线模式而言,将其视为 MDU, 输入可以定义为指标体系的反向指标,输出为正向 指标,则可以构建基于指标体系的接线模式转化效 率模型,是不涉及人为因素的客观过程,如图 10 所示。



图 10 基丁 DEA 的双平转化模型 Fig. 10 DEA-based efficiency conversion model

该模型基于指标间的内在联系,致力于衡量对 应接线模式的正、反向指标"分化"能力,用以量 化各接线模式在评估过程中的最大转化效率。

假设对 *n* 种典型接线模式, 都有 *m* 个反向指标 作为输入, *s* 个正向指标作为输出。记第 *j* 种接线 模式的反向指标输入为 $x_j = [x_{1j}, x_{2j}, ..., x_{mj}]^T$, 正向指 标输出为 $y_j = [y_{1j}, y_{2j}, ..., y_{sj}]^T$; 且二者权重分别对应 为: $v = [v_1, v_2, ..., v_m]^T$ 和 $u = [u_1, u_2, ..., u_s]^T$, 则效率评 价指数为

$$\alpha_j = \frac{\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{y}_j}{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_j} \tag{16}$$

如果以最大化第*j*₀种接线模式的效率评价指数 *h_i*为目标,则 CCR 模型的目标函数和约束如下:

obj.
$$\max \alpha_{j_0} = \frac{\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{y}_{j_0}}{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_{j_0}}$$
 (17)

s.t.
$$\begin{cases} \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{y}_{j} \leq \boldsymbol{v}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_{j}, j = 1, 2, ..., n\\ \boldsymbol{u} \geq 0, \boldsymbol{v} \geq 0 \end{cases}$$
(18)

由于原始 CCR 模型可获得的最大效率值为 1, 也就意味着多个有效 MDU 很可能接近上限,难以 对接线模式的差异程度实现有效区分^[20]。

文中采用由 CCR 改进后的 SE-CCR 模型,不 对目标 DMU_{*j*0}的效率值设限,增加 DMU 区分能力, 并由 Charnes-Cooper 变换,令:

$$\begin{cases} t = 1 / \boldsymbol{v}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_{j_0} \\ \boldsymbol{w} = t \boldsymbol{v} \\ \boldsymbol{\mu} = t \boldsymbol{u} \end{cases}$$
(19)

变换后可得目标函数和约束条件分别如下: obj. max $\alpha_{j_0} = \mu^T y_{j_0}$ (20)

s.t.
$$\begin{cases} \boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{y}_{j} - \boldsymbol{w}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_{j} \leq 0 \quad \forall j, j \neq j_{0} \\ \boldsymbol{w}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_{j_{0}} = 1 \qquad j = j_{0} \\ \boldsymbol{\mu} \geq 0, \ \boldsymbol{w} \geq 0 \end{cases}$$
(21)

通过建立原问题的对偶模型,且引入松弛变量 s^{+} 和 s^{-} ,可得:

obj. min
$$\theta$$
 (22)
s.t.
$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} \lambda_{j} \mathbf{x}_{j} + \mathbf{s}^{+} = \theta \mathbf{x}_{j_{0}} \\ \sum_{j=1}^{n} \lambda_{j} \mathbf{x}_{j} - \mathbf{s}^{-} = \theta \mathbf{y}_{j_{0}} \\ \lambda_{j} \ge 0, j = 1, 2, ..., n \\ \mathbf{s}^{+} \ge 0, \mathbf{s}^{-} \ge 0 \end{cases}$$

以上转化为线性规划问题,当原问题和对偶问题的最优值分别为 α_i 和 θ_i 时,则满足 $\alpha_i = \theta_i$;因此通过求解式(22)、(23),可以得到n种典型接线模式的效率指数集合 $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n\}$ 。

3.3 考虑评分和转化效率的模式选型方法

典型接线模式的选型主要由可靠性、经济性、 适应性、供电质量和供电能力5个评估目标的综合 推荐系数确定,其依据包括目标指标的评估值 *s*、 目标指标的权值ω和评估效率指数α,流程如图 11。



图 11 典型接线模式的选型流程

Fig. 11 Selection process of typical wiring mode

在不同的选型需求下,其侧重点不同,各方面 的对应权值不同,其计算得出的推荐系数也不同。

综合推荐系数的计算公式如下:

$$\tau_i = \alpha_i \cdot (s_1 \omega_1 + s_2 \omega_2 + \dots + s_n \omega_n) \tag{24}$$

式中: *τ_i*为第 *i* 种接线模式的推荐系数; *n*为目标指标的数量。*τ_i*越大,说明在判断矩阵 *A*的情境下,该种接线模式越符合实际需求,即对应典型接线模式为最优方案。

4 算例分析

算例选取国外新加坡、巴黎、东京、纽约,以

及国内深圳和上海等6个城市配电网的6类典型接 线模式,每个模型内包含12个5MW负荷节点,且 每条电缆线和设备的故障率相同,遵循"闭环设 计,开环运行",继保装置之间的配合依照各接线 模式的特性进行。编译环境为Anaconda,编程语言 为Python,优化模块为gurobi,计算模块为numpy、 pandas、scipy等。

4.1 基于 E-熵权法的典型接线模式评估结果

4.1.1 基于隶属度的底层指标标准化

对于图 8 评估指标体系中的 17 个底层指标, 按照隶属度式(1)、(2)对正、反向指标分别进行标准 化处理。

4.1.2 基于 *Ē*-熵权法的底层指标权值计算

依托 A1—E4 等底层指标的标准化结果,分别 应用传统熵权法和改进的 \overline{E} -熵权法对 A—E 各自 包含的底层指标进行权值计算,二者权值结果,以 及权值均方差如表 2。

表 2 底层指标的权值及比较结果 Table 2 Comparison and weights of the underlying indicators

目标指标	底层指标	熵权法	Ē-熵权法	均方差
	A1	0.000000	0.034984	
А	A2	0.749782	0.706075	0.001070
	A3	0.250218	0.258941	
	B1	0.053664	0.062457	
п	B2	0.157303	0.161454	0.000100
В	В3	0.648846	0.630984	0.000109
	B4	0.140186	0.145104	
С	C1	0.233890	0.220435	
	C2	0.285231	0.282375	0.000064
	C3	0.119956	0.121057	0.000064
	C4	0.360923	0.352797	
D	D1	0.306395	0.304949	0.005028
D	D2	0.693604	0.793980	0.005038
	E1	0.102470	0.148287	
	E2	0.201483	0.216550	0.002202
E	E3	0.186589	0.206282	0.002302
	E4	0.509458	0.428880	

由表 2 分析知, 原始熵权法计算得到 A1 指标 (平均供电可靠率 ASAI)的权值为 0, 明显与实际不 符: 经分析知, 主要因为 6 个典型接线模式的 ASIA 均达到了"5 个 9"水平, 相互差值较小, 导致熵 权分配时较为敏感。

在式(6)中,均熵系数λ取值为 0.01 时, *Ē*-熵权 法的计算结果有效避免了以上问题,且二者权值的 方差维持在极小的范围。因此,文中提出的*Ē*-熵权 法能够对熵权法的不合理权值进行修正,降低指标 分配权值时的极端"分化"现象。

4.1.3 典型接线模式的多目标评分

基于底层指标的标准化数据和权值计算结果,

利用式(7)、(8)对 A—E 共 5 个目标指标进行百分制 打分,打分结果如表 3。

电网技术

表 3 典型接线模式目标指标的评分结果 Table 3 Scores of target indicators for typical wiring modes

城市曲刑控供	可靠性	经济性	适应性	供电质量	供电能力
城市典望按线	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
新加坡 "花瓣"	84.30	70.70	84.62	93.83	94.68
巴黎"三环网"	100.00	89.89	85.36	84.58	94.35
东京"T型"	98.15	78.22	94.5	98.61	100.00
纽约"4×6"	77.92	94.33	78.73	85.24	97.70
深圳"3供1备"	64.21	70.70	82.94	82.48	89.55
上海"钻石型"	83.65	100.00	100.00	100.00	94.30

为了更加直观表示各类典型接线的多目标指标性能,百分制评分雷达如图 12 所示。



图 12 典型接线模式多目标评分雷达图

Fig. 12 Multi-target scores radar chart of typical wiring

如图 12 所示,6 种典型接线模式的多目标性能存在差异,各有优劣。如果以阴影面积大小作为整体性能的模糊估计,巴黎"三环网"、东京"T型"、上海"钻石型"的性能要好于新加坡"花瓣"、纽约"4×6"和深圳"3 供 1 备"。

结合表 3 评分结果, 6 种典型接线模式的各项 评分均超 70 分,说明城市配电网的典型接线模式 均具有相对较高的综合性能,具有以下特点:

 新加坡"花瓣"接线在供电质量(D)和供电 能力(E)2个方面表现优秀,与其单花瓣间存在联络 开关的特性相符合;同样,"T型"和"钻石型" 评分均达到了 90 分以上,说明以上接线模式的网 架结构保证了较高的供电质量和供电能力。

2)巴黎"三环网"和东京"T型"接线在可靠

性(A)方面比较突出,前者与每个负荷节点可由四电 源供电,以及环网"手拉手"结构密切相关;后者 主要依靠3条"T"接的线路并列运行实现。

3)东京"T型"还具有极高的供电能力(E),因为任一线路故障均可将负荷转移至另外两回路。同样,除深圳"3供1备"外,新加坡"花瓣"、巴黎"三环网"、纽约"4×6"和上海"钻石型"接线的供电能力也都有不错的表现。

4)上海"钻石型"配电网在经济性(B)、适应性(C)和供电质量(D)3 个方面都表现优异,主要由于"钻石型"接线属于近年来积极探索的新型模式,应用了较为先进的"自愈"装置,具有更强的故障鲁棒性,且主、次级电网差异化投资和维护成本的减少都提升了整体的经济性。

5)从整体分析,新加坡"花瓣"、纽约"4×6" 和深圳"3供1备"接线的综合水平明显低于巴黎 "三环网"、东京"T型"和上海"钻石型"3类 接线模式,但仍旧无法根据实际情境和建设需求对 以上6类接线模式进行准确地排序,以便后续选型。 4.2 基于 AHP-DEA 的接线模式选型方案

选型决策过程中,在考虑各种接线模式客观水 平的基础上,结合不同地区实际发展需求等主观因 素进行,不能一概而论,是一个主、客观综合问题。 4.2.1 基于 AHP 的多目标权值计算

以我国当前城市配电网建设需求为例,优先保 障供电质量,适当放弃经济性的情境下,选型需求 总体上满足以下重要性排序:供电质量>供电能力> 可靠性>适应性>经济性。结合专家评分,应用"9 位标度法"构造如下判断矩阵 *A*:

	1	3	2	1/5	1/2	
	1/3	1	1/2	1/7	1/6	
1 =	1/2	2	1	1/3	1/2	
	5	7	3	1	4	
	2	6	2	1/4	1	

以上判断矩阵并不唯一,要与实际选型需求相匹配,还需要满足一致性检验。经检验,判断矩阵A的随机一致性比率 *C*_R为 0.05,满足 *C*_R<0.1 要求,且计算得到目标指标的权值如表 4。

表 4 基于 AHP 的目标指标权值								
1	Table 4 Ta	arget index	weights ba	ased on AI	ŧΡ			
目标	可靠性	经济性	适应性	供电质量	供电能力			
指标	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)			
权重	0.1383	0.0501	0.1067	0.4910	0.2139			

如表4所示,各目标指标的权值大小顺序与重要 性排序相匹配,供电质量权重最大,经济性权重最小。 4.2.2 基于 SE-CCR 的指标效率转化指数计算

基于正、反向指标数据,以图 10 中 9 个反向 个指标为输入,9 个正向指标为输出,计算每个典 型供电模式 DMU 的指标效率转化率; CCR 方法和 SE-CCR 方法得到的结果如表 5 所示。

表 5 指标体系的转化率结果 Table 5 Conversion rate results of the indicator system

接线	新加坡	巴黎	东京	纽约	深圳	上海
模式	"花瓣"	"三环网"	"Т"	"4×6"	"3供1备"	"钻石"
CCR	0.7972	1	0.9703	1	0.7985	1
SE-CCR	0.8835	1.0102	0.9857	1.0124	0.9108	1.0017

由表 5 分析知,由于原始 CCR 方法的最大效率 转化率α为 1,巴黎"三环网"、纽约"4×6"和上 海"钻石型"接线都达到了上限,无法有效区分; 同时,SE-CCR 方法不对目标 MDU 的转化率设限, 因此,以上 3 类典型接线的α值可以在大于 1 的范 围内继续比较,显著提升了转化率的差异化水平。 4.2.3 典型接线模式的综合评分及选型方案

传统综合评分方法多基于目标指标的分数和 对应权重的乘积进行求和,在此基础上,式(24)利 用指标的转化率对各典型接线模式的评分进行差 异化离散,方便选型决策的确定;2种方法的评分 结果如表6所示。

表 6	综合评约	了及选型推荐	字结果	
Table 6 Com	prehensiv	e score and	selection r	esults
城市配电网	综合评	分对比	选型推动	荐结果
典型接线模式	AHP	AHP-DEA	推荐系数	推荐次序
新加坡"花瓣"	90.5529	80.0035	0.6842	5
巴黎"三环网"	89.1509	90.0602	0.7743	3
东京"T型"	97.384	95.9914	0.8438	2
纽约"4×6"	86.6534	87.7279	0.7411	4
深圳"3供1备"	80.9254	73.7068	0.6613	6
上海"钻石型"	96.5202	96.6843	0.8996	1

表6中,推荐系数为指标标准化后的AHP-DEA 评估结果;经评估指标的效率转化率α修正后,典型接线模式的评分进一步"分化",如图13所示。



图 13 典型接线模式的综合评分比较

Fig. 13 Comprehensive score comparison of typical wiring

由图 13 分析知,经转化率α差异化作用后,新 加坡、深圳和其它接线模式的评分差距变大,更加 不适宜选取;巴黎、纽约和上海典型接线的评分有 所提升,趋向于成为优质选项;东京接线模式的评 分比较稳定。

结合表 6 的推荐次序可知,在 4.2.1 的判断矩 阵 A 的情境下,接线模式的优先选型方案依次为: "钻石型">"T 型">"三环网">"4×6">"花 瓣">"3 供 1 备"。由此分析知,上海电网近年来 探索的"钻石型"接线模式,除供电质量、适应性 和经济性较好外,其整体水平也较为优异。

5 结论

文中构建了配电网接线模式的评估指标体系, 从可靠性-供电能力5个方面对新加坡"花瓣"-上 海"钻石型"等6类典型接线模式进行了评估,给 出了最终选型推荐结果,并通过算例验证了方法的 有效性,得出以下结论:

1)指标的隶属度标准化方法和 *Ē*- 熵权法有效 改善了指标的"惰性"和权值分配的极端"分化" 现象,保证了目标指标评估的科学性。

2) SE-CCR 模型改善了原始 CCR 模型效率值 的上限约束,进一步差异化各 DMU 的最大效率转 化能力,实现对优、次对象的深度强化和弱化。

3)由于上海"钻石型"接线具有较高的供电 质量和经济性水平,即使在优先保障供电质量,忽 视部分经济性的情境下,其整体表现依旧优秀,在 城市配电网建设过程中可将其纳入考虑范围。

4) 在探索未来新型接线模式过程中,不同继 电保护装置相互配合的可靠性,以及故障处理资源 配置的方便性都会对提升供电可靠性和供电能力产 生更加显著的作用,也是今后可以参考的研究方向。

附录见本刊网络版(http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml)。

参考文献

- 张心洁,葛少云,刘洪,等.智能配电网综合评估体系与方法[J].电 网技术, 2014, 38(1): 40-46.
 ZHANG Xinjie, GE Shaoyun, LIU Hong, et al. Comprehensive assessment system and method of smart distribution grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 40-46(in Chinese).
- [2] 奚珣. 世界一流城市配电网建设探索实践[J]. 供用电, 2017, 34(2):
 5-10.
 XI Xun. Exploration and practice of power distribution network construction in world-class cities[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(2): 5-10(in Chinese).
- [3] 蔡燕春,张少凡,杨咏梅. 20kV 花瓣型配电网若干技术问题分析
 [J].供用电,2016,33(1):51-55,60.
 CAI Yanchun, ZHANG Shaofan, YANG Yongmei. Analysis of some technical problems for 20kV petals distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(1):51-55,60(in

```
Chinese).
```

- [4] 阮前途,谢伟,张征,等.钻石型配电网升级改造研究与实践[J].中国电力,2020,53(6):1-7,63.
 RUAN Qiantu, XIE Wei, ZHANG Zheng, et al. Research and practice on the upgrading for diamond distribution network[J]. Electric Power, 2020, 53(6):1-7,63(in Chinese).
- [5] 肖峻, 佘步鑫. 配电网接线模式的综合效率评价[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3769-3777.
 XIAO Jun, SHE Buxin. Comprehensive efficiency evaluation on connection modes in distribution networks[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3769-3777(in Chinese).
- [6] 王森,王蕾,陈飞,等.大数据环境下基于影子价格的配电网综 合评价方法[J].电力自动化设备,2019,39(10):94-101.
 WANG Sen, WANG Lei, CHEN Fei, et al. Comprehensive evaluation method of distribution network based on shadow price under big data environment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10):94-101(in Chinese).
- [7] 韩俊,谢珍建,耿路,等.中压配电网的高可靠性接线模式综合 评估方法[J].中国电力,2020,53(3):91-100.
 HAN Jun, XIE Zhenjian, GENG Lu, et al. Research on comprehensive evaluation method of high reliability wiring mode for medium voltage distribution network[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 91-100(in Chinese).
- [8] ZHENG Bowen, YANG Jun, Yang Chenchen, et al. Analysis of connection modes characteristics for typical distribution networks with high reliability[C]//2016 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). Shanghai: IEEE, 2016: 276-280.
- [9] CHEN Xinglei, LI Wenchen, SUN Lu, et al. An economy and reliability comprehensive assessment method of distribution network connection modes[C]//2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Xi'an: IEEE, 2016: 1-4.
- [10] 林锐涛,林哲昊,周勤兴,等.电力用户停电影响指标体系及综合评估方法[J].电网技术,2020,44(6):2350-2360.
 LIN Ruitao, LIN Zhehao, ZHOU Qinxing, et al. Impact Index System and Comprehensive Assessment for the Power Outage of Power Users [J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 350-2360 (in Chinese).
- [11] 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(in Chinese).
- [12] 穆永强,王荣茂,王春生,等.配电网目标接线模式和网架构建 方法及其应用[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(8):85-90. MU Yongqiang,WANG Rongmao,WANG Chunsheng, et al. Method and application of target connection mode and frame construction for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(8): 85-90(in Chinese).
- [13] 羌丁建,寿挺,朱铁铭,等.高压配电网规划评价指标体系与综 合评价模型[J].电力系统保护与控制,2013,41(21):52-57. QIANG Dingjian, SHOU Ting, ZHU Tieming, et al. An evaluation index system and comprehensive evaluation model on high-voltage distribution network planning[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 52-57(in Chinese).
- [14] 李宁. 城市中压配电网供电模式评价体系与方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2009.
- [15] 彭寒梅,李才宝,刘健锋,等.基于异质依存网络的电-气区域综合能源系统弹性评估[J].电网技术,2021,45(7):2811-2821.

石方迪等:世界一流城市配电网典型接线模式的评估及选型方法

Vol. 46 No. 6

PENG Hanmei, LI Caibao, LIU Jianfeng, et al. Resilience Assessment of Electricity-gas Regional Integrated Energy System Based on Heterogeneous Interdependent Network [J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2811-2821(in Chinese).

- [16] 赵嘉玉,韩肖清,梁琛,等.隶属函数与欧氏距离相结合的配电 网优化重构[J].电网技术,2017,41(11):3624-3631. ZHAO Jiayu, HAN Xiaoqing, LIANG Chen, et al. Optimal distribution network reconfiguration combining fuzzy membership with Euclidean distance[J]. Power System Technology,2017,41(11): 3624-3631(in Chinese).
- [17] 曹清山,郑梦莲,丁一,等.新电改背景下基于多属性决策的电力客户评估和选择研究[J].电网技术,2018,42(1):117-125.
 CAO Qingshan, ZHENG Menglian, DING Yi, et al. Multi-attribute decision making model for customer evaluation and selection in electricity market[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 117-125(in Chinese).
- [18] 卢锦玲,张津,丁茂生. 含风电的电力系统调度经济性评价[J]. 电 网技术, 2016, 40(8): 2258-2264.
 LU Jinling, ZHANG Jin, DING Maosheng. Economic evaluation of power system dispatch integrated with wind power[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2258-2264(in Chinese).
- [19] LIM J J, ZHANG A N. A DEA approach for supplier selection with

AHP and risk consideration[C]//2016 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). Washington, DC: IEEE, 2016: 3749-3758.

[20] 权杉杉.DEA 中规模收益分析方法的若干讨论和改进[D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.



在线出版日期: 2022-05-05。 收稿日期: 2021-04-27。

作者简介:

石方迪(1977),男,硕士研究生,高级工程师, 研究方向为电力市场与电网规划,E-mail:shifd@sh. sgcc.com.cn;

侯四维(1984), 女, 工程师, 研究方向为新型 电网与配电网规划, E-mail: housiwei@live.cn;

唐琪(1970), 女, 高级工程师, 研究方向为电 网规划, E-mail: tangq@sh.sgcc.com.cn;

陈云辉(1991),男,硕士研究生,工程师,研 究方向为电网规划、综合能源系统规划,E-mail: chenyunhui@sepd.com.cn;

王森(1993),男,通信作者,硕士研究生,研 究方向为智能电网大数据与配电网综合评估, E-mail: wangsenhit@163.com。

(实习编辑 李健一)

附录 A

A: 可靠性

A1: 平均供电可靠率 I_{ASAI}

A1: 十均供电可靠率
$$I_{ASAI}$$

$$I_{ASAI} = \frac{N_{total} \times 8760 - \sum U_i N_i}{N_{total} \times 8760}$$
A2: 系统平均停电频率 I_{SAIFI}

$$I_{SAIFI} = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_{\text{total}}}$$
A3:系统平均停电时间 I_{SAIDI}

$$I_{SAIDI} = \frac{\sum O_i N_i}{\sum N_{\text{total}}}$$

式中: Ntotal 为用户总数, Ui 为年均停电时间, Ni 为 受停电影响的用户数, λ_i为电气元件的平均故障率。 B: 经济性

B1: 建设费用 F_n

$$F_n = Z_{re} \cdot \frac{k(1+k)^n}{(1+k)^n - 1}$$
B2: 运行费用 F_l
 $F_l = Z_{op} + Z_{fault} + Z_{los}$

B3: 报废残值 F_r

$$F_r = Z_{\text{rem}} \cdot \frac{k(1+k)^n}{(1+k)^n - 1}$$

B4: 单位负荷年费用 F_c $F_c = (F_n + F_l - F_r) / P_L$

式中: k 为电力行业的贴现率, n 为设备经济运行 年限; Zre 为初始建设投资总费用, Zop 为年运行维 护费用,Z_{fault}为年故障成本,Z_{loss}为年系统网损费 用,Z_{rem}为报废寿命的残值,P_L为规划水平年负荷。 C: 适应性

C1: 可扩展性 fi

	• • •	$/n = j_1$							
典型	新加坡	巴黎	东京	纽约	深圳	上海			
供电模式	"花瓣"	"三环网"	"T型"	"4×6"	"3供1备"	钻石型			
可扩展性	8	5	7	4	6	9			
C2	: 操作	灵活性f2							
典型	新加坡	巴黎	东京	纽约	深圳	上海			
供电模式	"花瓣"	"三环网"	"T型"	"4×6"	"3供1备"	钻石型			
操作 灵活性	4	8	7	5	6	9			
C3	: 负荷	供应匹配	l度 h						
		h —	C						
$m^{-}\sum m_{i}T_{i}S_{0}\cos\varphi$									
C4	: 负载	最大不平	衝度 d						
	d = (_{i=}	$\max_{1, 2, \dots, n} \frac{P_i}{R_i}$	$-\min_{i=1, 2,}$	$(n \frac{P_i}{R_i})$	×100%				

式中: C 为模型中负荷供应能力, m_i为第 i 种接线

模式的出线数量,T_i为线路的最大负载率,S₀为线 路容量, $\cos \phi$ 为功率因数; n 为变电站数量, P_i 和 R_i分别为第 i 座变电站的实际负荷和额定容量。 D: 供电质量

D1: 最大支路压降
$$\Delta U_{max}$$

$$\Delta U_{\max} = \max_{i=1, 2, ..., n} \frac{U_N - U_i}{U_N} \times 100\%$$

D2: 电压偏移率 a%

$$a\% = \left|\frac{U_i - \overline{U}}{\overline{U}}\right| \times 100\%$$

式中: P_N 为模型的额定功率, U_N 为额定电压, $Z_{req,i}$ 为第 i 条支路末端短路时的等效阻抗, n 为系统支 路数量; U_i 为正常运行时支路末端电压, \overline{U} 为电压 均值。

E: 供电能力

E1: 线路最大负载率
$$T_{l-max}$$

 $T_{l-max} = \max_{i=l, 2, ..., n} \frac{P_{l,i}}{R_{l,i}} \times 100\%$
E2: 主变最大负载率 T_{p-max}
 $T_{p-max} = \max_{i=l, 2, ..., n} \frac{P_{p,i}}{R_{p,i}} \times 100\%$
E3: 线路 $N-1$ 最大负载率 $T_{l-1-max}$
 $T_{l-1-max} = \max_{i=l, 2, ..., n} \frac{P_{l-1,i}}{R_{l-1,i}} \times 100\%$
E4: 主变 $N-1$ 最大负载率 $T_{p-1-max}$

$$T_{p-1-\max} = \max_{i=1, 2, ..., n} \frac{P_{p-1, i}}{R_{p-1, i}} \times 100\%$$

式中: n 为变电站(线路)数量, P 代表变电站(线路) 负荷, R 为变电站(线路)额定容量。

附录 B

|--|

杤	度	含义							
	1		表示	两指标	示相比,	具有椎	同的重	要性	
	3		表示	两指标	相比,ī	前者比	后者稍去	記重要	
	5		表示	两指标	相比,ī	前者比	后者明	記重要	
	7		表示	两指标	相比,ī	前者比	后者强烈	烈重要	
	9		表示	两指标	相比,ī	前者比	后者极述	耑重要	
2,4	,6,8		表示上述相邻判断的中间值						
倒	数		若指标 $i = j$ 的重要性之比为 a_{ij} , 则指标 $i = j$ 的重要性之比为 $a_{i=1}/a_{ij}$						
附录	С							<u>y</u>	
平均	随机-	一致忙	生指标	R_I					
п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_I	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45