

DOI: 10.7667/PSPC180374

基于变权灰关联的智能配电网用电可靠性提升对象优选

莫一夫, 张勇军

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510000)

摘要: 用电可靠性提升工程是电网企业新时代提升服务质量的重要手段。基于智能配电网的“用电可靠性”新概念构建了用电可靠性提升需求评估指标体系。由此建立了智能配电网用电可靠性提升对象优选模型,并在模型中利用一种结合层次分析法和改进熵权法的综合赋权方法对各指标进行变权处理,使得赋权更加合理。同时引入绝对理想点理论和灰色关联度对传统逼近理想法进行改进,有效地避免了逆排序问题带来的评估误差,准确地优选出急需进行用电可靠性改造的配电网,实现可靠性提升工程的效益最大化。最后通过实例分析,验证了该模型的有效性和实用性。

关键词: 对象优选; 智能配电网; 改进逼近理想法; 灰色关联度; 用电可靠性

Optimal object selection of power utilization reliability promotion for smart distribution grid based on weighted grey correlation

MO Yifu, ZHANG Yongjun

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Power utilization reliability advancement engineering for smart distribution grid is an important means for power grid enterprises to improve their management and service quality. Considering the new concept of power utilization reliability for smart distribution grid, this paper establishes an index system to evaluate demands of power utilization reliability promotion. Hence an optimal object selection model of power utilization reliability promotion is set up, and a comprehensive weight method combined with analytic hierarchy process and improved entropy method is used to vary the index weight. Meanwhile, the traditional technique for order preference by similarity to ideal solution is improved based on absolute ideal solution theory and grey correlation degree, which can avoid the error caused by the reverse order problem. According to the result, the smart distribution grids needed to be improved most are selected out, which is better to maximize social and economic benefits. Finally, the effectiveness of index system and model is verified with an example.

This work is supported by Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 51777077).

Key words: optimal object selection; smart distribution grid; improved technique for order preference by similarity to ideal solution (improved TOPSIS); grey correlation degree; power utilization reliability

0 引言

作为提高供电企业运行管理水平和服务能力的重要途径,可靠性改造和提升工作一直备受供电企业的重视。随着智能配电网的发展,分布式发电(Distributed Generation, DG)、储能等获取电能的方式不断丰富,配电网电能质量问题日渐突出^[1],国内长期以中压用户为统计口径所得到的供电可靠性评价体系的局限性愈发明显:1)仅粗略考虑了供电

持续性的问题,无法全面反映用户真实用电体验;2)不考虑电能可用度,不能满足电力市场深度开发的新要求;3)DG及储能等新因素对用电的影响难以体现。

针对以上问题,文献[2]提出了用电可靠性的概念并建立了一套评价指标反映用户的真实用电体验,但所用改进熵权法亦过于依赖原始数据,没有考虑决策者经验;在指标设置上也未充分考虑DG以及储能等智能配电网新要素的影响,对于电网可靠性提升工程的指导意义不大。

除此之外,现阶段配电网可靠性提升工程仅以

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51777077)

供电可靠率为首要依据, 以改造方案优选为主^[3-6], 并未考虑可靠性提升实施对象的优选。在可靠性改造工程投资有限的情况下, 优选急需提升用电可靠性的配电网, 无疑能将可靠性提升效果最大化。

智能配电网用电可靠性提升需求评估属于多目标分析决策问题。其中, 逼近理想法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)是解决这类型问题的常用方法。现有研究在使用 TOPSIS 法时, 多利用欧氏距离来计算贴合度^[7-9]。但是, 文献[10]的研究表明: 在 TOPSIS 应用过程中容易因为待选方案数量变化而出现逆排序的现象; 而以欧氏距离计算贴合度也容易出现结果不准确, 无法充分挖掘数据相似性的问题, 进而影响优选结果。

灰色关联分析在挖掘数据序列相似性和计算贴合度方面具有明显优势, 但在计算过程中多采用平权处理。在变权处理方面, 目前主要有主观赋权法^[11-12]、客观赋权法^[13-14]以及主客观权重组合赋权法^[15-17]。客观赋权法受原始数据影响, 存在计算结果不符合实际经验的问题^[15]。主观赋权法容易受到主观偏差影响^[18]。组合赋权法能同时发挥主、客观赋权法的优点, 但过程中常用的熵权法在所有指标的熵值都比较接近 1 的时候, 亦会过度放大差距而导致赋权不合理^[19]。

为解决上述问题, 本文从可靠性提升对象优选的新思路出发, 建立了一套智能配电网用电可靠性提升需求评估指标体系, 结合智能配电网的特点和“用电可靠性”概念, 从电网供电可靠性、用户用电体验性、改造工程经济性三个方面去评估各个配电网改造的必要性。引入绝对理想解改进传统 TOPSIS 法以解决逆排序的问题, 利用灰色关联度来计算贴合度, 并利用一种结合了层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)和改进熵权法^[20]的综合赋权方法对各指标进行变权处理, 建立了智能配电网用电可靠性提升对象优选模型, 优选出急需进行用电可靠性改造的配电网, 为进一步的改造方案优选做铺垫, 为配电网改造工程提供更为细化的指导。

1 智能配电网用电可靠性提升需求评价指标

1.1 智能配电网用电可靠性的概念

随着智能配电网的发展, 分布式储能和分布式电源等获取电能的方式不断丰富, 用户的真实用电体验并不完全依赖于电网的供电水平。另一方面, 短时停电和由电能质量问题引起的停电或设备停运事故越来越常见, 这对电网安全稳定并没有多大影

响, 但对于用户而言这些问题的危害不亚于持续停电事件, 甚至损失更严重。因此, 从用户的角度出发, 用电可靠性的考察内容不仅要全面反映停电事故, 更要考虑用户用电体验, 具体包括: 1) 结合智能配电网的特点评估用户侧电能供给的持续性; 2) 用户获得的电能可用度, 主要包括电能质量问题(尤其是电压不合格)引起的系统不停电但用户停电或部分设备停运的情况。

综上所述, 本文把智能配电网用电可靠性定义为: 在某一时期内, 用户能够从电网或分布式电源、储能设备等方面持续获得满足自身电能质量要求的电能的能力^[2]。

1.2 智能配电网用电可靠性提升需求评估指标体系

现阶段广泛使用的供电可靠性指标经过多年的研究已经十分成熟, 能够较为完整地反映出电网侧的可靠性情况, 因而成为电网企业的主要考核和评价指标。针对供电可靠性指标难以反映用户侧可靠性情况的缺陷, 本文结合智能配电网的特点和用电可靠性的要求, 从电网供电可靠性、用户用电体验性、改造工程经济性三个方面来评估智能配电网的用电可靠性提升需求。具体指标如图 1 所示。

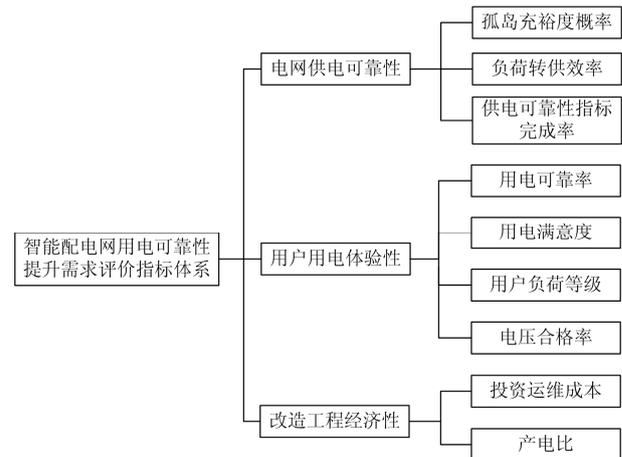


图 1 用电可靠性提升需求评估指标体系

Fig. 1 Index system to evaluate demands of power utilization reliability promotion

1) 电网供电可靠性评估指标

有别于传统辐射型配电网的单一电源供电方式, 在智能配电网中, DG 和储能等分布式电源大规模并网。故障发生后, 智能配电网可以通过快速隔离故障、负荷转供甚至形成孤岛的形式来保障供电, 极大地提升了用户的用电可靠性。智能配电网的这种新特点在传统配电网的供电可靠性评估中并没有得到体现。本文定义了孤岛充裕度概率和负荷转供效率两个指标, 从孤岛供电能力以及负荷转供

能力两个方面来评估智能配电网用电可靠性提升的需求。同时,本文以供电可靠性指标完成率来反映配电网在传统供电可靠性考核中的现状以及改造的必要性。

(1) 孤岛充裕度概率

孤岛运行过程中的不同时刻,孤岛内分布式电源的输出功率并不一定能满足负荷的需求,负荷、分布式电源的功率大小可以是其各自概率模型中的其中一种。在考虑两者所有可能的组合方式的情况下,孤岛 i 内分布式电源满足负荷点用电需求的概率可用孤岛充裕度概率 ρ_i 表示,其计算公式如式(1)所示。

$$\rho_i = \sum_{j=1}^{N_{di}} \frac{\min(P_{i,j}^L, P_{i,j}^G)}{P_{i,j}^L} \cdot \rho_{i,j} \quad (1)$$

式中: $P_{i,j}^L$ 和 $P_{i,j}^G$ 分别代表孤岛 i 的第 j 种运行状态下的负荷大小以及分布式电源总出力的大小; N_{di} 为孤岛 i 的所有可能运行状态数量(孤岛内负荷与分布式电源功率的所有可能组合方式); $\rho_{i,j}$ 表示孤岛 i 处于第 j 种运行状态下的概率。

为反映这种整体影响,定义系统孤岛运行充裕度概率,计算公式如式(2)所示。

$$\rho = \sum_{i=1}^{N_d} \omega_i^d \cdot \rho_i \quad (2)$$

式中: ω_i^d 为系统发生故障后形成孤岛 i 运行的概率; N_d 为所有可能形成孤岛的情景数量。

(2) 负荷转供效率

$N-1$ 故障是配电网最为常见的故障,故障发生后,配电网若能够提供更多的负荷转供线路通道,则意味着配电网网络结构更强。实际上,配电网在发生 $N-1$ 故障后所提供的用于负荷转供的线路容量只能满足部分负荷的安全转移,为了评估智能配电网负荷转供效率,同时考虑故障导致负荷损失的情况,定义负荷转供效率指标,其计算公式如式(3)所示。

$$\eta_i = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N_i^{N-1}} \left| \min(0, P_j^{\text{lim}} - P_{i,j}^{N-1}) \right|}{P_L} \quad (3)$$

式中: P_j^{lim} 表示线路 j 的极限传输功率; $P_{i,j}^{N-1}$ 表示第 i 种 $N-1$ 故障情况下,系统为保证没有负荷被切除而需要线路 j 传输的功率; P_L 是故障发生前负荷总量; N_i^{N-1} 为第 i 种 $N-1$ 故障情况下,配电网中剩余的能够正常运行的线路数量。当 η_i 低于 100% 时,表示该故障下配网有负荷损失,且 η_i 越小,表示负荷损失量越大,用电可靠性提升需求越大。

为反映这种整体影响,定义系统负荷转供效率,计算公式如式(4)所示。

$$\eta = \sum_{i=1}^{M^{N-1}} \omega_i^{N-1} \cdot \eta_i \quad (4)$$

式中: ω_i^{N-1} 为系统发生第 i 种 $N-1$ 故障的概率; M^{N-1} 为所有可能的 $N-1$ 故障种类的数量。

(3) 供电可靠性指标完成率

根据南方电网《110 kV 及以下配电网规划指导原则》,配电网在规划时必须按照负荷密度和规划发展定位对供电区域划分等级,对不同等级的供电区域制定不同的供电可靠率考核目标,具体可见表 1。

表 1 各类供电区的供电可靠率考核目标 (%)

Table 1 Power supply reliability checking targets for different power supply area (%)

	A 类	B 类	C 类	D 类	E 类	F 类
考核目标	>99.999	>99.99	>99.97	>99.93	>99.79	>99.50

本文根据供电区的供电可靠率考核目标和实际统计的供电可靠率,定义供电可靠性指标完成率,计算公式如式(5)所示。

$$CR = \frac{R_{S-1}}{R_{Sa}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: R_{Sa} 表示供电可靠率考核目标值; R_{S-1} 表示实际统计的供电可靠率。

2) 用户用电体验性评估指标

有别于供电可靠性以中压用户作为统计口径的做法,用电可靠性要求供电企业更加注重计费用户的用电体验,从用户用电体验的角度去评估用电可靠性提升需求,优选最有必要的提升对象。

因用电可靠率能够综合计费用户的停电时间和停电次数等方面的信息,全面反映可靠性水平,所以本文为了简化评估指标体系和评估流程,以用电可靠率来取代停电时间以及停电次数这两项指标。此外,为更全面地考虑计费用户的用电体验性以及用电需求,本文采用用户用电满意度、电压合格率、用户负荷等级等指标对用电可靠性提升对象进行优选。

(1) 用电可靠率^[2]: 统计时间内,所有计费用户获得可用电力供应的小时数与统计时间的比值,记作 R_{RSL} 。

$$R_{RSL} = \left(1 - \frac{\sum t_m}{M \times T}\right) \times 100\% \quad (6)$$

式中: t_m 代表该配电网中第 m 个计费用户在统计时

间内的总停电时间; M 代表该配电网中计费用户总数; T 代表统计时长。

(2) 用户用电满意度: 根据待评估配电网一年中被用户投诉的次数与该配网下计费用户总数, 按照式(7)计算得到。

$$S_c = (1 - \frac{N_{uc}}{M}) \times 100\% \quad (7)$$

式中: N_{uc} 代表该配电网一年中收到的用户投诉总次数; M 代表该配电网中计费用户总数。

(3) 用户负荷等级: 根据标准文献[21], 用户负荷按其负荷性质和重要程度分为特级负荷、一级负荷、二级负荷和三级负荷。当一个待评估对象中存在多个等级不同的负荷时, 以其中最高的负荷等级作为该对象的负荷等级。

由于用户负荷等级为非量化指标, 本文对各级负荷从高等级到低等级分别采用 1、0.75、0.5、0.25 进行量化, 即特级负荷该指标值赋值为 1, 三级负荷幅值为 0.25。

(4) 电压合格率^[2]: 统计时间内, 计费用户进线单元的电压合格时长与统计时间的比值, 记作 $VER(\%)$ 。

$$VER = \frac{\sum t_{vm}}{M \times T} \times 100\% \quad (8)$$

式中, t_{vm} 代表配电网内第 m 个计费用户在统计时间内的电压合格小时数。

3) 可靠性提升工程经济性评估指标

经济性是可靠性提升对象优选的重大影响因素, 是工程决策过程的重要环节。

(1) 投资运维成本

$$C_a = \frac{C_i - C_e + C_m}{P_L} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} C_i &= \frac{k(1+k)^y}{(1+k)^y - 1} \cdot C_o \\ C_e &= \frac{k}{(1+k)^y - 1} \cdot C_r \end{aligned} \quad (10)$$

式中: C_i 为初始投资费用的等年值; C_e 为设备残值的等年值; C_m 为运行维护成本以及网络损耗等费用; P_L 是配网规划周期的负荷预测值; C_o 是初始投资费用; k 是贴现率; y 是设备运行年限; C_r 是设备寿命期末的残值。

(2) 产电比: 在统计期间内, 被评估对象中所有用户的国民生产总值与总用电量之比^[22], 记作 $VOC(\text{元}/\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

$$VOC = \frac{GDP}{Q} \quad (11)$$

式中: GDP 代表某一配电网或地区在统计期间内的国内(地区)生产总值; Q 代表该某一配电网或地区在统计期间内的总用电量。

2 用电可靠性提升对象优选模型

TOPSIS 法是通过计算待选对象分别与最优对象和最差对象之间的距离, 然后得到待选对象与理想对象之间的相对贴近度来进行对象优选的一种方法。

而灰色关联度适用于分析数据序列特征和相似程度。应用灰色关联度进行对象优选的思想是根据某个待解决难题的情况, 确定理想对象的各项指标的数据序列, 然后通过判断各待选对象的数据序列与理想对象数据序列在序列特征上的相似程度来判断两者之间的关联程度。一般而言, 在序列数据曲线的几何形状上, 待选对象序列与理想对象越接近则说明其关联度越大, 该待选对象越符合优选条件, 反之亦然。

根据智能配电网用电可靠性提升需求评价指标体系的特点, 本文采用变权灰色关联度来计算待选对象和理想对象的贴近度, 能够在引入绝对理想解的同时进一步改进 TOPSIS 法, 建立用电可靠性提升对象优选模型, 为优选对象提供依据。

2.1 指标数值规范化与变权处理

(1) 建立规范化指标矩阵

对于一个单层次的对象优选问题, 存在着 m 个待选对象和 n 个评估指标, 第 i 个评估对象的第 j 个评估指标值记作 x_{ij} 。对所有待选对象的原始数据进行预处理, 处理公式如式(12)、式(13)所示。

对于指标值越大, 提升用电可靠性需求越大的指标, 有

$$r_{ij} = x_{ij} / \max_i x_{ij} \quad (12)$$

对于指标值越小, 提升用电可靠性需求越大的指标, 有

$$r_{ij} = \min_i x_{ij} / x_{ij} \quad (13)$$

化为无量纲的指标数据后, 得到各待选对象的

规范化指标矩阵如式(14)所示。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1(n-1)} & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2(n-1)} & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i1} & \cdots & r_{ij} & \cdots & r_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{m(n-1)} & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, r_{ij} 是第 i 个待选对象的第 j 个指标的无量纲化处理后的数值, 其大小介于 0~1 之间, 越接近 1, 说明该对象的该项指标表现越差, 越有提升可靠性的需求。

(2) AHP 法确定主观权重

层次分析法(Analytical Hierarchy Process, AHP)是由美国运筹学专家 T. L. Saaty 20 世纪 70 年代中期提出并使用的决策方法。本文利用 AHP 法将一般评估目标按照目标层、指标层和因子层进行结构划分, 再将每个评估指标细分为多个评价因子, 构造以目标层作为行, 以指标层作为列的标准化评估矩阵, 具体步骤可见文献[12]。

AHP 法经过改进熵权法变权后, 可确定各指标的主观权重向量 $\omega_A = [\omega_{A1}, \omega_{A2}, \dots, \omega_{Aj}, \dots, \omega_{An}]$ 。

(3) 改进熵权法确定客观权重

本文所构建的指标体系中, 对于用电可靠率、电压合格率等指标, 现有的大部分电网的指标值都在 99% 以上, 差别细微且接近于 1。因此, 本文采用文献[20]中的改进熵权法对经典灰色关联度计算过程中的各指标进行变权处理, 具体计算过程可参考文献[20]。

经过改进熵权法变权后, 可确定各指标的客观权重向量 $\omega_E = [\omega_{E1}, \omega_{E2}, \dots, \omega_{Ej}, \dots, \omega_{En}]$ 。

(4) 计算综合权重

在通过 AHP 法得到主观权重和通过改进熵权法得到客观权重之后, 本文引入权重系数 ϕ 来计算各指标的综合权重。

$$\omega = \phi\omega_E + (1 - \phi)\omega_A \quad (15)$$

式中, 权重系数 ϕ 可依据 ω_A 和 ω_E 的 Kender 和谐系数 K 的大小来选取^[23], 将相关度划分成 20 个置信区间, 权重系数 ϕ 对应的取值可见表 2。

表 2 权重系数 ϕ 取值列表

Table 2 List of weight coefficient ϕ

K	0~0.05	...	0.45~0.5	...	0.95~1
ϕ	0.95	...	0.5	...	0

将权重向量 ω 进行归一化, 其中

$$\bar{\omega}_j = \frac{\omega_j}{\sum_{j=1}^n \omega_j} \quad (16)$$

(5) 建立加权规范化指标矩阵

通过规范化矩阵和标准综合权重向量, 可求得加权规范化矩阵 $B = [b_{ij}]_{m \times n}$, 其中

$$b_{ij} = \bar{\omega}_j \cdot r_{ij} \quad (17)$$

2.2 改进 TOPSIS-灰色关联分析

(1) 确定绝对理想解

为解决传统 TOPSIS 法中理想点随待选对象数量变化而变化的缺陷, 本文引入绝对理想点^[24]的概念, 将理想对象的正、负理想解数据序列分别定义为

$$\begin{aligned} b^+ &= [1, \dots, 1, \dots, 1]_n^T \\ b^- &= [0, \dots, 0, \dots, 0]_n^T \end{aligned} \quad (18)$$

经过前面的规范化处理后, 式(18)中“1”为某个指标绝对正理想解, 表示某个待选对象在该项指标上表现出最大的可靠性提升需求; “0”则为某个指标绝对负理想解, 表示某个待选对象在该项指标上表现出最小的可靠性提升需求。

(2) 计算灰色关联度

灰色关联度的计算方法如下:

$$\begin{aligned} P_i^+ &= \sum_{j=1}^n \left(\frac{\min_i \min_j \Delta b_{ij}^+ + \rho \max_i \max_j \Delta b_{ij}^+}{\Delta b_{ij}^+ + \rho \max_i \max_j \Delta b_{ij}^+} \right) \\ P_i^- &= \sum_{j=1}^n \left(\frac{\min_i \min_j \Delta b_{ij}^- + \rho \max_i \max_j \Delta b_{ij}^-}{\Delta b_{ij}^- + \rho \max_i \max_j \Delta b_{ij}^-} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

式中, $\Delta b_{ij}^+ = |b_{ij} - 1|$, $\Delta b_{ij}^- = |b_{ij} - 0|$; ρ 为分辨系数, 一般取 0.5。

(3) 计算相对贴近度

在得到各待选对象分别与正、负理想解的变权灰色关联度之后, 可计算各待选对象相对于正理想解的相对贴近度 $R(i)$ 。

$$R(i) = \frac{P_i^+}{(P_i^+ + P_i^-)} \quad (20)$$

相对贴近度反映了待选对象与正理想对象或负理想对象在态势变化上的接近程度。根据 $R(i)$ 的大小, 对各待选对象进行排序, 优选对象。

2.3 用电可靠性提升对象优选流程

本文基于变权灰色关联度建立用电可靠性提升对象优选模型, 其优选流程如图 2 所示。

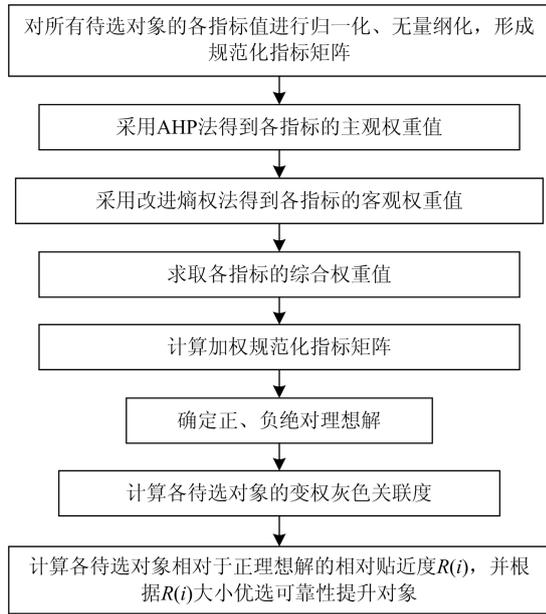


图 2 用电可靠性提升对象优选流程图

Fig. 2 Flow chart of optimal object selection of power utilization reliability promotion

3 实例分析

3.1 统计数据与计算结果

为验证上述优选模型的有效性, 本文以某地区的 5 个新型智能配电网为实例进行分析, 由调研所得的统计数据可见表 3。表 4 给出了各评价指标的权重计算结果。

3.2 结果分析

从表 3、表 4 可见, 在供电可靠指标完成率、用电可靠率、用电满意度、电压合格率等 4 个指标上, 各评估对象的数据差距较小, 经过归一化处理数值都接近于 1。传统熵权法完全根据原始数据分布状况来确定各个指标的权重, 容易放大指标间的权重差距, 赋予这 4 个指标的权重偏小, 而孤岛充裕度和用户负荷等级两项指标所占权重过大, 与 AHP 法的赋权结果相比差异明显, 偏离了实际经验。而改进熵权法能够更好地弥补这个缺陷, 在数值上均衡各指标的权重值, 在保持各指标权重之间差距的同时不至于使其过大。

表 3 各配电网统计数据

Table 3 Statistics of distribution networks

配网编号	供电可靠率/%	孤岛充裕度概率/%	负荷转供效率/%	供电可靠性指标完成率/%	用电可靠率/%	用电满意度/%	用户负荷等级	电压合格率/%	投资运维成本/(万元/MW)	产电比/(元/kWh)
1	99.925	62	76	99.926 0	99.910 1	98.3	一级	97.34	19.8	18.2
2	99.874	58	79	99.884 0	99.870 0	97.7	特级	94.28	14	22.5
3	99.791	79	91	99.820 9	99.750 0	97.9	二级	95.72	14.5	15.5
4	99.706	85	72	99.775 8	99.672 0	96.1	二级	96.49	17.9	14.6
5	99.460	38	66	99.669 3	99.517 0	95.2	二级	94.61	11.2	16.1

表 4 不同赋权方法之间的对比

Table 4 Comparison of several weighting methods

方法	孤岛充裕度概率	负荷转供效率	供电可靠性指标完成率	用电可靠率	用电满意度	用户负荷等级	电压合格率	投资运维成本/万元	产电比/(元/kWh)
传统熵权法	0.348 4	0.043 5	0.000 003 2	0.000 007 9	0.000 594 9	0.350 7	0.000 6	0.156 7	0.099 6
改进熵权法	0.176 0	0.092 6	0.080 7	0.080 7	0.080 9	0.176 7	0.080 9	0.123 6	0.108 0
AHP 法	0.081	0.127	0.162	0.135	0.118	0.093	0.058	0.149	0.077
综合赋权法	0.128 5	0.109 8	0.121 4	0.107 9	0.099 4	0.134 8	0.069 4	0.136 3	0.092 5

本文所用的综合赋权法结合了 AHP 法和改进熵权法的优点, 既考虑了原始数据的分布情况, 也考虑了专家的实际运行经验, 给实际工程中的重要因素——投资运维成本, 以及用户负荷等级、供电可靠性指标完成率、孤岛充裕度概率等能够反映用户用电体验和用电可靠性的指标赋予较高的权重。

在现阶段普遍以供电可靠率为主要依据的配电网可靠性提升工程中, 各配电网进行可靠性提升的

优选顺序是⑤>④>③>②>①。但是, 类似④的配电网, 用户负荷等级不高, 产电比较低, 投资运维成本却很高, 从电网的实际出发, 将其优先等级提到较高的位置显然是不合理的。

如图 3 所示, 本文综合考虑了电网供电可靠性、用户用电体验性、改造工程经济性三个方面的因素, 对待改造配电网进行了优选, 将配电网②这类可靠性提升需求度较高的对象放到优先改造的位置, 能

够更好地满足用户的用电要求，保证服务质量，将社会效益和经济效益最大化。

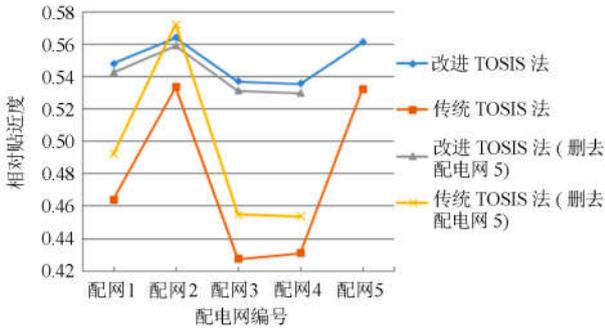


图 3 传统 TOPSIS 法与改进 TOPSIS 法对比

Fig. 3 Contrast between TOPSIS and improved TOPSIS method

由图 3 知，在删去配电网⑤之前，由传统 TOPSIS 法得到的各配电网进行用电可靠性提升的优选顺序是②>⑤>①>④>③，在删去配电网⑤之后，优先顺序则变为②>①>③>④。调整前后，配电网③和配电网④两者的优选顺序发生了逆转，产生了逆排序的现象，直接影响到了评估结果的准确性。而本文所用改进 TOPSIS 法引入了绝对理想解，在删去配电网⑤之前，各配电网的优选顺序是②>⑤>①>③>④；删去配电网⑤之后，各配电网的优选顺序是②>①>③>④，说明改进 TOPSIS 法可有效避免待选对象数量变化引起的逆排序问题，在调整待选对象数量的前后，其余待选对象的优选顺序没有发生变化，说明了所用改进 TOPSIS 法的准确性和合理性。

相对贴近度的方差可体现不同贴近度计算方法下各评估对象之间的差距，反映贴近度计算方法的灵敏度。下面计算变权灰色关联度法、投影法和欧式距离法的灵敏度，如表 5 所示。

表 5 灵敏度对比

Table 5 Sensitivity contrast of different methods

方法	变权灰色关联法	投影法	欧式距离法
灵敏度	0.24%	0.053%	0.053%

如图 4 所示，在引入绝对理想解的情况下，利用欧式距离法计算所得的贴近度大小排序为⑤>②>①>③>④，而变权灰色关联度法和投影法^[25]计算所得的贴近度大小排序一致，均为②>⑤>①>③>④，评估结果相同。而在灵敏度上，变权灰色关联法明显大于投影法和欧式距离法，说明了变权灰色关联法对各评估对象有着更高的区分度和准确性。

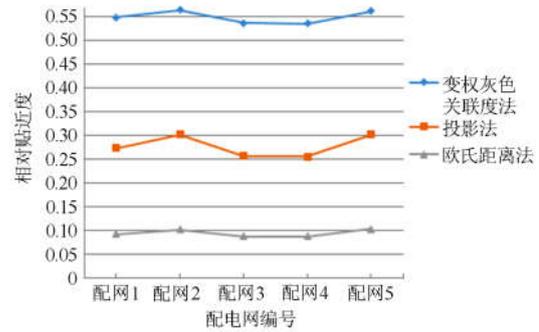


图 4 不同方法的贴近度计算结果对比

Fig. 4 Contrast of calculation results of approach degree between different methods

4 结论

(1) 相比于目前惯用供电可靠率来优选可靠性提升对象的方法，本文建立的智能配电网用电可靠性提升对象优选模型结合现阶段智能配电网的特点，考虑了智能配电网的孤岛充裕度和负荷转供效率，更全面地考虑了用户的用电体验，从用电可靠性的角度对各待选配电网进行了可靠性提升的对象优选，将可靠性提升工程的社会和经济效益最大化。

(2) 本文所用改进熵权法能够解决传统熵权法容易过度放大指标权重差距的问题，结合 AHP 法实现综合赋权，既考虑了原始数据的分布情况，也考虑了专家的主观经验，合理地给各个指标进行了赋权，避免了传统灰色关联度计算过程中对各指标进行简单且主观的平权处理所带来的误差。

(3) 灰色关联分析对于小样本无规律指标的评价问题决策准确性较高，在计算贴近度方面具有比欧式距离法更明显优势。

(4) 本文所用改进 TOPSIS 法引入了绝对理想解，能够有效地避免传统 TOPSIS 法因待选对象数量变化而产生的逆排序现象，提高了评估结果的准确性。

参考文献

[1] 叶琳浩, 黄伟, 张勇军. 分布式光伏发电接入对配电网谐波特性的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 84-90.
 YE Linhao, HUANG Wei, ZHANG Yongjun. Influence of distributed photovoltaic power generation on harmonic characteristics of power distribution network[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 84-90.

[2] 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.
- [3] 吴涵, 陈彬, 管霖, 等. 供电可靠性提升措施优选的量化评价方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 126-130.
WU Han, CHEN Bin, GUAN Lin, et al. Quantitative evaluation and optimized selection of power supply reliability enhancement measures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 126-130.
- [4] 荆朝霞, 曾丽. 基于改进层次分析法的配电网中压改造项目迫切度分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 92-95.
JING Zhaoxia, ZENG Li. Analysis on urgency degrees of distribution network reconstruction scheme based on advanced AHP[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 92-95.
- [5] 苏韵掣, 刘俊勇, 刘友波, 等. 大规模中压配电网可靠性建设改造措施优选模型及求解方法[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 201-209.
SU Yunche, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Optimization model of selecting power supply reliability reconstruction measures in large-scale MV distribution network and its solution method[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 201-209.
- [6] MARTINS V F, BORGES C L T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2164-2172.
- [7] 杨家莉, 徐永海. 基于组合赋权与 TOPSIS 模型的节点电压暂降严重程度综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 88-95.
YANG Jiali, XU Yonghai. Comprehensive evaluation method of node voltage sag severity based on TOPSIS model and combination weights[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 88-95.
- [8] 胡元潮, 阮羚, 阮江军, 等. 基于改进 TOPSIS 法的变电站智能化改造评估研究[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 42-48.
HU Yuanchao, RUAN Ling, RUAN Jiangjun, et al. Evaluation on intelligent renovation of substations based on improved TOPSIS[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 42-48.
- [9] 肖白, 王思莹, 谷禹. 计及最大供电能力和最小联络建设费用的主变联络结构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 9-16.
XIAO Bai, WANG Siying, GU Yu. Optimization for contact structure among main transformers between substations considering total supply capacity and minimum contact construction cost[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 9-16.
- [10] 胡永宏. 对 TOPSIS 法用于综合评价的改进[J]. 数学的实践与认识, 2002, 32(4): 572-575.
HU Yonghong. The improved method for TOPSIS in comprehensive evaluation[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2002, 32(4): 572-575.
- [11] 李国庆, 翟晓娟. 基于层次分析法的孤立微电网多目标优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 17-23.
LI Guoqing, ZHAI Xiaojuan. Multi-objective optimal operation of island micro-grid based on analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 17-23.
- [12] 王月月, 陈民铀, 姜振超, 等. 基于云理论的智能变电站二次设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 71-77.
WANG Yueyue, CHEN Minyou, JIANG Zhenchao, et al. A state assessment method for secondary equipment in intelligent substation based on cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 71-77.
- [13] 李凯, 李少岩, 顾雪平, 等. 考虑重要负荷恢复的机组分层协调恢复优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 54-61.
LI Kai, LI Shaoyan, GU Xueping, et al. Coordinated two-layer unit restarting considering important load recovery after blackout[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 54-61.
- [14] 商立群, 王守鹏. 改进主成分分析法在火电机组综合评价中的应用[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1928-1933.
SHANG Liqun, WANG Shoupeng. Application of improved principal component analysis in comprehensive assessment thermal power generation units[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1928-1933.
- [15] 沈阳武, 彭晓涛, 施通勤, 等. 基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 67-73.
SHEN Yangwu, PENG Xiaotao, SHI Tongqin, et al. A grey comprehensive evaluation method of power quality based on optimal combination weight[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 67-73.
- [16] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 28-34.
DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 28-34.

- [17] 马纪, 刘希喆. 基于序关系-熵权法的低压配网台区健康状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 87-93.
MA Ji, LIU Xizhe. Evaluation of health status of low-voltage distribution network based on order relation-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 87-93.
- [18] 罗毅, 李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 77-81.
LUO Yi, LI Yulong. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on entropy weight and grey relational analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 77-81.
- [19] 周惠成, 张改红, 王国利. 基于熵权的水库防洪调度多目标决策方法及应用[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 100-106.
ZHOU Huicheng, ZHANG Gaihong, WANG Guoli. Multi-objective decision making approach based on entropy weights for reservoir flood control operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1): 100-106.
- [20] 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.
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.
- [21] 中华人民共和国标准. 供配电系统设计规范: GB 50052—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [22] 孟庆海, 朱金猛, 程林, 等. 基于可靠性及经济性的配电自动化差异性规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 156-162.
MENG Qinghai, ZHU Jinmeng, CHENG Lin, et al. Differentiated planning of distribution automation based on the reliability and economy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 156-162.
- [23] 刘艳锋. 利用肯德尔和谐系数检验测量结果的可信度[J]. 新乡教育学院学报, 2006, 19(2): 95-96.
LIU Yanfeng. Practical application of Kender's harmonious coefficient in faithfulness in measurement and test results[J]. Journal of Xinxiang Education College, 2006, 19(2): 95-96.
- [24] 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): 117-127.
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): 117-127.
- [25] 王深哲, 高山, 李海峰, 等. 含高渗透率间歇性电源的电网规划方案优选方法[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2129-2135.
WANG Shenzhe, GAO Shan, LI Haifeng, et al. Optimal selection of planning schemes for power grid with high penetration of intermittent generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2129-2135.

收稿日期: 2018-04-03; 修回日期: 2018-07-20

作者简介:

莫一夫(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网规划与评估; E-mail: moyifu@126.com

张勇军(1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行分析与控制。

(编辑 张爱琴)