

有源配电网设备利用率影响因子体系及其价值计算方法

周 来¹, 叶琳浩², 杨雄平², 张勇军¹, 张 尧¹

(1. 华南理工大学 电力学院 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中国南方电网有限责任公司计划发展部, 广东 广州 510000)

摘要:针对我国配电网设备利用率低的问题, 计及分布式电源的影响构建了一套有源配电网设备利用率影响因子体系, 设计了一种基于 Pignistic 概率距离的影响因子价值计算方法。首先, 从直接反映配电网设备利用率的指标容量因子和负载率展开影响因子分析, 对比了有/无源配电网中影响因子的差异, 进一步基于设备负载特性、设备运行时间及设备参数 3 个方面, 构建了一套有源配电网设备利用率影响因子体系; 然后, 基于 Pignistic 概率距离最优证据合成法, 提出了一种具有“偏离折扣”特征的层次分析法-熵权法组合赋权法, 用于计算影响因子价值; 最后, 通过实例分析验证了所提影响因子体系和价值计算方法的有效性。

关键词:有源配电网; 分布式电源; 设备利用率; 影响因子体系; 组合赋权; 价值计算; Pignistic 概率距离; 层次分析法-熵权法

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.025

0 引言

近年来, 我国大力推进配电网建设, 2015 年 8 月, 国家能源局发布了《配电网建设改造行动计划(2015—2020 年)》, 明确提出五年间配电网建设改造投资不低于 2×10^{12} 元^[1]。电网设备利用率是反映电网建设经济性的重要指标^[2]。若能在保证电网供电可靠性、运行安全性的前提下, 有效提高配电网设备利用率 EUEDN (Equipment Utilization Efficiency of Distribution Network), 则可从多方面提高资金的利用效率。而 EUEDN 影响因子分析是提高设备利用率的基础。影响因子的价值代表其对 EUEDN 的影响程度, 且价值大小与影响程度成正比。因此, 开展 EUEDN 影响因子及其价值研究可为我国配电网技术改造资金的合理配置提供指导, 具有重要的意义。值得注意的是, 本文提及的配电网设备仅涉及配电变压器和线路。

目前国内外关于 EUEDN 方面的研究大多集中在传统 EUEDN 的综合评估和评价标准^[2-5], 涉及有源 EUEDN 影响因子分析的研究鲜见报道。文献[2]给出了 EUEDN 的定义, 基于“ $N-x$ ”准则、网络结构、负荷特性及其发展裕度等方面给出了 EUEDN 的评价标准。文献[3-4]从供电可靠性、网架结构、负荷特性、经济建设发展、负荷供应能力等方面构建了 EUEDN 的评价体系。文献[5-6]提出了用设备全寿命周期利用效率评价指标来评价电网设备利用率。上述文献在构建评价标准和评价体系的过程中, 均从不同的角度分析了 EUEDN 的影响因素, 但

都没有计及分布式电源 DG (Distributed Generation) 并网的影响, 也缺乏对影响因子进行价值分析。在有源配电网中, DG 的大规模接入将从多个方面影响设备利用率。一方面, DG 并网分担电网负荷^[7-8], 降低了部分设备的负载率; 另一方面, DG 并网运行提高了系统的可靠性, 减少了系统的平均停电持续时间 (SAIDI), 提高了设备的平均负载率^[9]。随着 DG 在配电网中的渗透比例逐渐增大, 其对 EUEDN 的影响将持续上升。因此, 在设备利用率影响因子研究中计及 DG 并网的影响是十分必要的。

本文采用赋权法计算影响因子对 EUEDN 的价值。目前常采用的赋权法有主观赋权法 (如专家意见法^[10] 和层次分析法^[11] AHP (Analytic Hierarchy Process))、客观赋权法 (如熵权法^[12] 和主成分分析法^[13]) 和主客观权重组合赋权法^[14-16]。主观赋权法的主观性较强^[17], 客观赋权法没有考虑决策者经验的影响^[14], 当两者偏离较大时, 单独使用其中的一种方法均缺乏信服度。主客观权重组合赋权法则有利于发挥主观赋权法和客观赋权法的长处, 目前有关组合赋权法的研究涉及乘法合成归一法^[14]、线性加权法^[15]、证据融合^[16]等方面。但是, 乘法合成可能会导致缺陷倍增; 线性加权存在如何确定最优加权系数的问题^[14]; 证据融合能降低信息不确定性的影响, 但当证据之间存在较大冲突时, 证据融合会给出反直观的结果, 导致融合结果的可信度降低^[18]。为了改进冲突证据融合的效果, 相关学者提出了多种改进方法。其中, 以识别框架 Θ 下各子集的最大距离为证据距离的 Pignistic 概率距离 PPD (Pignistic Probability Distance) 是一种有效的改进方法^[19]。

针对以上问题, 本文计及 DG 的影响, 从设备负载特性、设备运行时间及设备参数 3 个方面, 对比了有/无源配电网中影响因子的差异, 给出了一套有源

收稿日期: 2018-09-28; 修回日期: 2019-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51777077)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51777077)

EUEDN 的影响因子体系;然后,基于 PPD 最优证据合成法,提出了一种具有“偏离折扣”特征的 AHP-熵权法组合赋权法,用于定量计算影响因子的价值;最后,以广东某市 10 kV 配电网中的 5 条主干线路为例,利用本文所提影响因子体系和组合赋权法,计算并分析了影响因子价值和可供改变灵活性,进而提出了提升设备利用率的措施。

1 EUEDN 影响因子体系

1.1 影响因子分析

负载率反映设备在一个时间断面内的设备利用情况,是在固定时间周期内设备的最大负载值与额定容量的比值,记作 R ,如式(1)所示。

$$R = P_{\max} / S_N \quad (1)$$

其中, P_{\max} 为在固定时间周期内设备的最大负载; S_N 为设备的额定容量。

容量因子是国内外通用的计算电力设备利用率的指标,其反映了设备在固定时间周期内的利用情况,记作 C ,如式(2)所示。

$$C = E / (S_N T) \quad (2)$$

其中, E 为在固定时间周期内设备的总负载量; T 为固定的时间周期。式(2)可转换成式(3)。

$$\begin{cases} E = \sum_{i=1}^{T_{\text{run}}} P_i \\ P_i = \frac{P_i}{P_{\max}} \frac{P_{\max}}{P_{\text{ave}}} \frac{P_{\text{ave}}}{S_N} S_N = \alpha_i \mu \beta S_N \\ C = \frac{E}{S_N T} = \frac{\mu \beta S_N \sum_{i=1}^{T_{\text{run}}} \alpha_i}{S_N T} = \frac{\mu \beta \alpha}{T} \end{cases} \quad (3)$$

其中, P_i 为设备在时刻 i 的负载; T_{run} 为固定时间周期内设备的运行时间; P_{ave} 为设备在固定时间周期内的平均负载; α_i 为设备在时刻 i 的负载波动率,定义为设备在时刻 i 的负载与设备最大负载的比值; μ 为负载比,定义为在固定时间周期内设备的最大负载与平均负载的比值; β 为设备的平均负载率,定义为设备在固定时间周期内的平均负载与额定容量的比值; α 为设备负载总波动率,定义为固定时间周期内设备的负载波动率之和。

由式(1)可知,负载率受 S_N 和 P_{\max} 直接影响: P_{\max} 反映设备的最大负载对负载率的影响, S_N 反映设备的额定容量对负载率的影响。由式(3)可知,在固定时间周期 T 保持不变的条件下,容量因子受设备负载比 μ 、平均负载率 β 和负载波动率 α_i 及设备运行时间 T_{run} 直接影响。其中, μ 在时间断面上反映设备的最大负载与平均负载的比值对容量因子的影响,亦可从侧面反映 P_{\max} 对负载率的影响; β 在固

定时间周期上反映设备平均负载与设备额定容量的比值对容量因子的影响; α_i 在时间断面上反映设备负载波动率对容量因子的影响; T_{run} 反映设备运行时间对容量因子的影响。其中,设备负载波动率对容量因子的影响需从整个时间周期考虑,因此采用设备负载总波动率 α 替代 α_i 。

综上所述,以容量因子和负载率表征的设备利用率受 μ 、 β 、 α 、 T_{run} 及 S_N 的影响。其中, μ 、 β 、 α 表征设备的负载特性, T_{run} 为设备的负载运行时间, S_N 为设备的固定参数。基于上述三方面,本文对比了无源配电网和有源配电网中影响因子的差异,具体分析如下。

(1) 无源配电网。

a. 设备的负载特性。在无源配电网中,潮流为由电源流向负荷的单向潮流,此时设备负载为其所带用户的总用电需求。为了简便表达,设备所带用户的总用电需求记为用户负荷特性。因此在无源配电网中设备的负载特性由用户负荷特性决定,即由用户负荷总波动率、用户负荷比、用户平均负载率决定。

b. 设备负载运行时间。设备负载运行时间受设备自身故障和上级系统故障两方面影响,其中,设备自身故障时间由设备故障率和设备平均修复时间决定;上级系统故障时间由上级系统的可用度决定。

c. 设备额定容量由设备的固定参数决定。

(2) 有源配电网。

a. 设备的负载特性。南方区域风电、光伏等 DG 往往接入 110 kV 及以下电压等级的电网,导致已投运的上级系统的下送电量减少。此时设备负载为所带用户总的负载减去 DG 出力功率。因此有源配电网中的负载特性由用户负荷特性和 DG 出力特性共同决定,即由用户负荷总波动率、用户负荷比、用户平均负载率、DG 出力总波动率、DG 出力比、DG 平均出力率共同决定。其中表征用户负荷特性的 3 个指标可基于用户负荷曲线计算得到。用户负荷曲线可由设备负载曲线与 DG 出力曲线求和得到。

b. 设备负载运行时间。由文献[8]可知, DG 并网将提高系统的可靠性,其中减少系统的 SAIDI 是提高系统可靠性的一个方面。而 SAIDI 的改善效果与 DG 的类型和容量直接相关。因此,在有源配电网中,设备负载运行时间的影响因素除了需考虑设备故障和上级系统故障外,还需考虑 DG 类型及其并网容量。本文用可控 DG 渗透率和间歇性 DG 渗透率表示 DG 类型及其并网容量的影响。

c. 设备额定容量由设备的固定参数决定,不受 DG 影响。

1.2 影响因子体系

基于 1.1 节对设备利用率影响因子的机理分

析,本节提出了有源 EUEDN 的影响因子体系,如表 1 所示。

表 1 有源 EUEDN 的影响因子体系

Table 1 Influence indicator system for equipment utilization efficiency of active distribution network

一级指标	二级指标	指标意义
设备负载特性	用户负荷总波动率	反映设备所带用户总负载的负荷特性对设备利用率的影响
	用户负荷比	
	用户平均负载率	
	DG 出力总波动率	反映设备所接入 DG 的出力特性对其设备利用率的影响
	DG 出力比	
DG 平均出力率		
设备运行时间	设备故障率	反映设备故障对设备利用率的影响
	设备平均修复时间	
	设备上级系统可用度	反映设备上级系统正常运行对设备利用率的影响
	可控 DG 渗透比	反映可控 DG 并网改善系统平均停电时间对设备利用率的影响
间歇性 DG 渗透比	反映间歇性 DG 并网改善系统平均停电时间对设备利用率的影响	
设备参数	设备额定容量	反映设备固定参数对设备利用率的影响

由表 1 可知,本文提出的影响因子体系包含 12 个指标,涵盖了设备负载特性、设备运行时间以及设备参数 3 个方面,全面反映了用户、DG 及设备对 EUEDN 的影响。各指标的含义和计算公式具体如下。

a. 用户负荷总波动率,定义为固定时间周期 T 内设备所带用户的总负荷曲线波动率之和,记作 α_{load} ,如式(4)所示。

$$\alpha_{\text{load}} = \sum_{i=1}^T \frac{P_i^{\text{load}}}{P_{\text{max}}^{\text{load}}} \quad (4)$$

其中, P_i^{load} 为时刻 i 设备所带用户的总负荷; $P_{\text{max}}^{\text{load}}$ 为固定时间周期内设备所带用户总负荷的最大值。

b. 用户负荷比,定义为固定时间周期内设备所带用户总负荷的最大值与平均值的比值,记作 μ_{load} ,如式(5)所示。

$$\mu_{\text{load}} = P_{\text{max}}^{\text{load}} / P_{\text{ave}}^{\text{load}} \quad (5)$$

其中, $P_{\text{ave}}^{\text{load}}$ 为固定时间周期 T 内设备所带用户总负荷的平均值。

c. 用户平均负载率,定义为固定时间周期 T 内设备所带用户总负荷的平均值与设备额定容量 S_N 的比值,记作 β_{load} ,如式(6)所示。

$$\beta_{\text{load}} = P_{\text{ave}}^{\text{load}} / S_N \quad (6)$$

d. DG 出力总波动率,定义为固定时间周期 T 内 DG 出力曲线波动率之和,记作 α_{DG} ,如式(7)所示。

$$\alpha_{\text{DG}} = \sum_{i=1}^T \frac{P_i^{\text{DG}}}{P_{\text{ave}}^{\text{DG}}} \quad (7)$$

其中, P_i^{DG} 为 DG 在时刻 i 的有功出力; $P_{\text{ave}}^{\text{DG}}$ 为固定时间周期 T 内 DG 的平均有功出力。

e. DG 出力比,定义为固定时间周期 T 内 DG 的最大有功出力与平均有功出力的比值,记作 μ_{DG} ,如式(8)所示。

$$\mu_{\text{DG}} = P_{\text{max}}^{\text{DG}} / P_{\text{ave}}^{\text{DG}} \quad (8)$$

其中, $P_{\text{max}}^{\text{DG}}$ 为固定时间周期 T 内 DG 的最大有功出力。

f. DG 平均出力率,定义为固定时间周期 T 内 DG 的平均有功出力与额定容量的比值,记作 β_{DG} ,如式(9)所示。

$$\beta_{\text{DG}} = P_{\text{ave}}^{\text{DG}} / S_N^{\text{DG}} \quad (9)$$

其中, S_N^{DG} 为 DG 的额定容量。

g. 设备故障率,定义为设备从起始时刻直至时刻 t_0 完好的条件下,在时刻 t_0 之后的单位时间内发生故障的次数,记作 g_{equ} (单位为次/a),其可根据同类型设备的长期运行数据,运用数理统计的方法得到,为已知数据。

h. 设备平均修复时间,定义为固定时间周期 T 内设备故障停运总时间与故障总次数的比值,记作 r_{equ} (单位为 h/次),如式(10)所示。

$$r_{\text{equ}} = \frac{\sum T_{\text{equ}}^i}{F_{\text{equ}}} \quad (10)$$

其中, T_{equ}^i 为第 i 次设备故障停运时间; F_{equ} 为设备在固定时间周期 T 内的故障总次数。

i. 设备上级系统可用度,定义为上级系统在稳态下处于正常运行状态的概率,记作 A_{sys} 。对于辐射式串联系统而言,上级系统可用度为上级系统内各设备可用度的乘积,如式(11)所示。

$$A_{\text{sys}} = \prod_{i=1}^n A_i = \prod_{i=1}^n \frac{r_{\text{equ}}^i}{g_{\text{equ}}^i + r_{\text{equ}}^i} \quad (11)$$

其中, A_i 为第 i 台设备的可用度; n 为系统内包含的设备总数; g_{equ}^i 为第 i 台设备的故障率; r_{equ}^i 为第 i 台设备的修复率。

j. 可控 DG 渗透比,定义为燃气轮机、柴油机等可控 DG 的装机容量与并网线路额定容量的比值,记作 η_{C} ,如式(12)所示。

$$\eta_{\text{C}} = S_{\text{C}} / S_{\text{line}} \quad (12)$$

其中, S_{C} 为可控 DG 的装机容量; S_{line} 为线路的额定容量。

k. 间歇性 DG 渗透比,定义为风力发电、光伏发电等不可控 DG 的装机容量与并网线路额定容量的比值,记作 η_{UC} ,如式(13)所示。

$$\eta_{\text{UC}} = S_{\text{UC}} / S_{\text{line}} \quad (13)$$

其中, S_{UC} 为间歇性 DG 的装机容量。

1. 设备额定容量,即设备名牌上标识的额定运行容量数据,记为 S_N 。

2 影响因子价值计算方法

影响因子的价值大小反映了其对 EUEDN 的影响程度。本文设计的影响因子价值计算方法的步骤如下:①对各影响因子的初始数据进行去量纲、归一化处理;②利用本文所提基于 PPD 最优证据合成的组合赋权法计算影响因子的权重,即其对 EUEDN 的价值。

2.1 指标归一化处理

不同的评价指标具有不同的量纲,为了消除指标之间量纲的影响,使指标之间具有可比性,需先进行去量纲、归一化处理。本文采用 min-max 标准化方法对评价指标的初始数据进行归一化处理。假设有 b 台设备(设备集合为 $E_i = \{E_1, E_2, \dots, E_b\}$),每台设备的影响因子指标集合为 $C_i = \{C_1, C_2, \dots, C_{12}\}$,则第 i 台设备 E_i 的第 j 个指标 C_j 的值记为 c_{ij} ,进行归一化处理得到矩阵 $G = (g_{ij})_{b \times 12}$ 。处理方式具体如下。

若指标为效益型指标,即指标值越大越好,则有:

$$g_{ij} = \frac{c_{ij} - \min\{c_{ij}\}}{\max\{c_{ij}\} - \min\{c_{ij}\}} \quad (14)$$

若指标为成本型指标,即指标值越小越好,则有:

$$g_{ij} = \frac{\max\{c_{ij}\} - c_{ij}}{\max\{c_{ij}\} - \min\{c_{ij}\}} \quad (15)$$

其中, g_{ij} 为第 i 台设备的第 j 个指标经去量纲、归一化处理后的指标值; c_{ij} 为第 i 台设备的第 j 个指标的初始数值。

本文所提的影响因子体系中,用户负荷总波动率、DG 出力总波动率、DG 出力比、DG 平均出力率、

设备故障率及设备额定容量为成本型指标,其余指标均为效益型指标。所有指标经处理后的 g_{ij} 值越接近 1,说明第 i 台设备的第 j 个指标表现得越好。

2.2 基于 PPD 最优证据合成的组合赋权法

PPD 最优证据合成法先以最小化修正后的证据与期望证据间的 PPD^[20] 作为目标函数,确定各个证据间的最优相对权重,然后基于最优相对权重的分布结果对证据源进行折扣处理,最后对进行折扣处理后的证据源进行证据合成^[21]。该方法能有效地降低不利证据对融合结果的影响。本文根据这一特性,将 PPD 最优证据合成法分别应用于组合赋权法中的剔除偏离专家权重以及主、客观权重相融合 2 个方面,提出一种新的组合赋权法。所提方法能有效地降低偏离权重对权重合成结果的影响,计算流程如图 1 所示。

图 1 中,实线箭头为组合赋权法的第一步,对多位专家的权重进行合成得到主观权重;虚线箭头为组合赋权法的第二步,利用最优证据合成实现专家主观权重与熵权法客观权重相融合,得到最终的组合赋权结果。具体的计算过程如下。

(1) 主观权重合成。

由于掌握的信息存在差异,不同专家确定的影响因子权重不一致。为了避免偏离专家权重的影响,本文在主观权重合成过程中,根据 PPD 优化模型计算各专家权重的相对权重,剔除其中相对权重最小的专家权重,并对剩余专家权重求取均值,得到最终的主观权重。具体的计算过程如下。

步骤 1-1:邀请 N 位专家对影响因子体系进行打分。利用 AHP^[22],基于打分结果,计算得到 N 位专家的主观权重。

步骤 1-2:基于 PPD^[20](式(16)、(17))计算 N 位专家权重对应的单命题焦元 Pignistic 概率函数向量 $\alpha_i = [B_{etPmi}(\omega_1), \dots, B_{etPmi}(\omega_k), \dots, B_{etPmi}(\omega_\theta)]$ 。

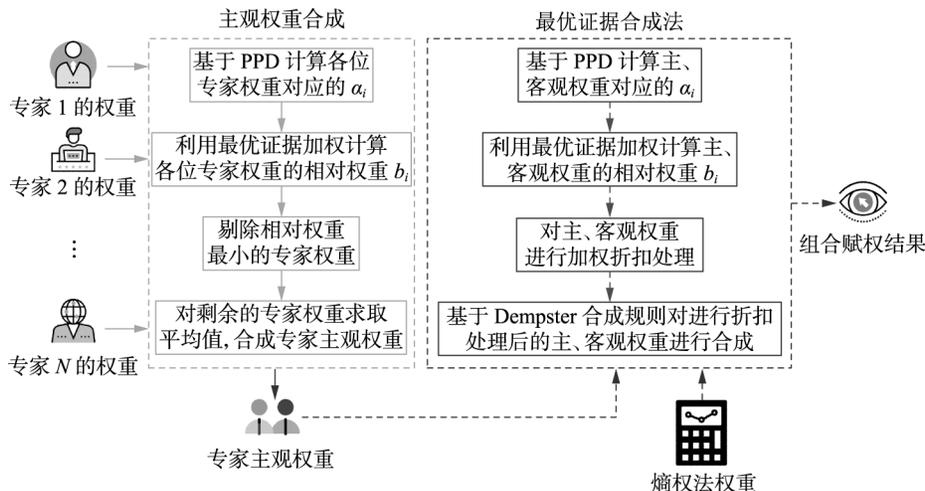


图 1 AHP-熵权法组合赋权法

Fig.1 Combined weight method based on AHP and entropy weight method

$$B_{\text{etPm}}(\omega) = \sum_{\omega \in A, A \subseteq \Theta} \frac{1}{|A|} \frac{m(A)}{1 - m(\emptyset)} \quad (16)$$

$$B_{\text{etPm}}(A) = \sum_{\omega \in A} B_{\text{etPm}}(\omega) \quad (17)$$

其中, Θ 为辨识框架, 2^Θ 为 Θ 的幂集; m 为 Θ 上的信度分布函数; A 为 Θ 中的一个子集; ω 为 A 中的元素; B_{etPm} 为 m 的 Pignistic 函数; $|A|$ 为 A 的势; \emptyset 为空集。

步骤 1-3: 基于 PPD 最优证据合成方法^[21] (式 (18)) 求得各专家权重对应的权重分布 b_i 。

$$\begin{cases} D = \min \sum_{i=1}^N \|b_i \alpha_i - \alpha'\|^2 = \min \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \mathbf{b} \mathbf{H} \mathbf{b}^T \\ \text{s.t. } b_1 + b_2 + \dots + b_N = 1 \quad b_i \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\|b_i \alpha_i - \alpha'\|^2 = \sum_{\omega \in \Theta} (b_i B_{\text{etPm}\alpha}(\omega) - B_{\text{etPm}\alpha'}(\omega))^2 \quad (19)$$

其中, D 为进行最小化修正后的证据与期望证据间的 PPD; α' 为 α_i 与其权重的加权平均值; b_i 为 α_i 内元素对应的权重值, $\mathbf{b} = [b_1, \dots, b_i, \dots, b_N]$; $\|b_i \alpha_i - \alpha'\|^2$ 为向量坐标之差的平方和; \mathbf{H} 为 $N \times N$ 阶实对称矩阵, 其对角元素 $h_{ii} = [2(N-1)/N] \alpha_i \alpha_i^T$, 非对角元素 $h_{ij} = (-2/N) \alpha_i \alpha_j^T (i \neq j)$ 。

步骤 1-4: 根据步骤 1-3 计算得到的相对权重, 剔除相对权重最小的专家权重, 并对剩余的 $N-1$ 位专家的权重求取平均值得到主观权重。

(2) 客观权重计算。

利用熵权法^[23] 并基于影响因子进行归一化后的数据, 计算得得影响因子的客观权重。熵权法的计算公式为:

$$\begin{cases} H_j = -\frac{1}{\ln b} \left(\sum_{i=1}^b h_{ij} \ln h_{ij} \right), \quad h_{ij} = g_{ij} / \sum_{i=1}^b g_{ij} \\ \omega_j = (1 - H_j) / \left(12 - \sum_{j=1}^{12} H_j \right) \end{cases} \quad (20)$$

其中, H_j 为第 j 个指标的熵值; ω_j 为第 j 个指标的熵权, 即客观权重。规定当 $h_{ij} = 0$ 时, $h_{ij} \ln h_{ij} = 0$ 。

(3) 主、客观权重融合。

计算得到主、客观权重后, 根据 PPD 最优证据合成融合主、客观权重, 具体步骤如下。

步骤 3-1: 将主、客观权重代入式 (16)、(17), 计算主、客观权重对应的单命题焦点 Pignistic 概率函数向量。

步骤 3-2: 基于步骤 3-1 的结果, 利用最优化模型式 (18), 计算主、客观权重之间的相对权重分布 $\mathbf{d} = [d_1, d_2]$, 其中 d_1 为主观权重法的相对权重值, d_2 为客观权重法的相对权重值。

步骤 3-3: 将步骤 3-2 的计算结果代入式 (21)^[24], 对主、客观权重进行折扣处理。

$$\begin{cases} m_{\beta_\xi, \xi}(A) = \beta_\xi m_\xi(A) \quad \forall A \subseteq \Theta \\ m_{\beta_\xi, \xi}(\Theta) = 1 - \beta_\xi + \beta_\xi m_\xi(\Theta) \end{cases} \quad \xi = 1, 2 \quad (21)$$

其中, $\xi = 1$ 表示主观权重法, $\xi = 2$ 表示客观权重法; $m_{\beta_\xi, \xi}(A)$ 为 ξ 权重法经折扣处理之后的权重值; $\beta_\xi = d_\xi / \max(\mathbf{d})$ 为 ξ 权重法的折扣系数; $m_{\beta_\xi, \xi}(\Theta)$ 为 ξ 权重法的不确定度。

步骤 3-4: 利用式 (22)、(23) 对经折扣处理后的主、客观权重进行证据合成^[25-26], 得到组合赋权结果。

$$m(B) = \begin{cases} 0 & B = \emptyset \\ \frac{\sum_{X_i \cap Y_j = B} M_1(X_i) M_2(Y_j)}{1 - K} & B \neq \emptyset \end{cases} \quad (22)$$

$$K = \sum_{X_i \cap Y_j = \emptyset} M_1(X_i) M_2(Y_j) \quad (23)$$

其中, M_1 和 M_2 分别为 Θ 内需要融合的 2 个相互独立的证据 k_1 和 k_2 的基本信度分配 (mass) 函数, 即分别为本文中的主、客观权重分布; $X_i (i = 1, 2, \dots, s)$ 和 $Y_j (j = 1, 2, \dots, t)$ 为焦点, 即本文中的各项影响因子; K 为冲突系数, 反映了证据间的冲突程度, 其值与冲突程度呈正相关, $0 \leq K \leq 1$; B 为证据合成后的焦点元素, 即各项影响因子; $m(B)$ 为证据合成后的影响因子权重。

3 算例分析

3.1 算例数据和计算结果分析

本文算例中邀请 5 位专家对影响因子进行评分, 并利用 AHP 计算专家权重, 结果如附录中的表 A1 所示。通过计算广东某地区 10 kV 配电网的 5 条 10 kV 主干线路的调研数据得到计算影响因子客观权重所需的数据。附录中的表 A2、表 A3 分别给出了 5 条线路的原始数据和经去量纲、归一化处理后的数据。

根据式 (18)、(19) 计算得到 5 位专家权重的相对权重分别为 0.197、0.201、0.204、0.194、0.203。专家 4 的相对权重值最小, 因此剔除专家 4 的意见, 并求取剩余专家权重的均值, 得到专家主观权重。然后基于附录中表 A1 的数据, 利用熵权法计算得到影响因子的客观权重。最后应用本文所提组合赋权法融合主、客观权重, 得到影响因子的价值分布, 结果如表 2 所示。

表 2 影响因子的价值分布

Table 2 Value distribution of influence indicators

影响因子	价值	影响因子	价值
用户负荷总波动率	0.112	设备故障率	0.087
用户负荷比	0.080	设备平均修复时间	0.068
用户平均负载率	0.091	设备上级系统可用度	0.074
DG 出力总波动率	0.065	可控 DG 渗透比	0.077
DG 出力比	0.068	间歇性 DG 渗透比	0.077
DG 平均出力率	0.085	设备额定容量	0.118

由表 2 可知,本文算例中价值大于等于 0.08 的设备利用率影响因子有 6 个。其中设备额定容量的价值最大,其次依次为用户负荷总波动率、用户平均负载率、设备故障率、DG 平均出力率及用户负荷比。因为 5 条线路的 DG 渗透率均较低,所以与 DG 相关的影响因子中除了 DG 平均出力率外,其余影响因子的价值均相对偏低。

改善设备利用率需从影响因子价值及其可供改变灵活程度两方面考虑。价值较大的 6 个影响因子的可供改变灵活性分析如下:设备额定容量取决于配电网的规划结果,一旦设备投入运行,其额定容量难以改变,因此设备额定容量的可供改变灵活性差;需求侧响应、储能装置等智能调控手段能有效地降低负荷波动率,所以用户负荷总波动率的可供改变灵活性高;用户平均负载率由区域的产业结构决定,短时间内难以大幅度提升,所以其可供改变灵活性差;设备故障率取决于设备的制造工艺和工作状况,其可供改变灵活性差;DG 平均出力率与其送出线路的设备利用率成正比,但对已投运的上级系统的设备利用率具有反作用,所以 DG 平均出力率的可供改变灵活性一般;用户负荷比与用户的最大负荷有关,电价激励和需求侧响应能降低负荷峰值,所以其可供改变灵活性较好。

综上所述,提高设备利用率可从以下几个方面考虑:

a. 在配电网建设规划初期,提高对负荷发展预测的准确性,合理选择设备容量;

b. 利用需求侧管理、储能等智能用电技术调峰调谷,降低用户负荷波动率和用户负荷比,延缓电网升级,提高设备利用率;

c. 为间歇性 DG 配备储能装置,增加 DG-储能联合系统的平均出力率,提高 DG 送出线路的设备利用率;

d. 对于下级接入大容量 DG 的已投运上级设备而言,为了避免新增电网产能过剩,推进电网去产能工作,推迟原“十三五”输配电网规划项目的建设时序。

3.2 赋权法对比分析

为了对比分析多种赋权法,基于 AHP、熵权法、本文所提方法及文献[14]提出的线性加权组合赋权法的计算结果,绘制如图 2 所示的雷达图。其中,文献[14]提出的组合赋权法先剔除主观权重中偏离度最大的专家意见,然后根据指标熵值对主、客观权重进行线性加权合成。

由图 2 可知,根据 AHP 和熵权法确定的主、客观权重存在明显的偏离。主观权重的分布呈“飞机”形状,在机翼两端和机头处存在设备额定容量、用户平均负载率及 DG 平均出力率 3 个权重尖峰。

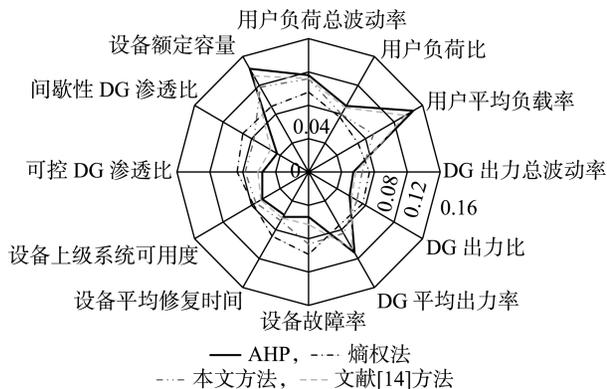


图 2 多种赋权法的权重结果对比

Fig.2 Comparison of weight result among multiple weight methods

而客观权重的分布近似呈“椭圆”形,用户负荷总波动率和设备故障率这 2 个权重峰值分布在“椭圆”长轴的两端,其余影响因子的权重相对均匀地分布在长轴两侧。进一步地,基于数值计算影响因子主、客观权重的差值,其中差值最大值达到 0.08,已高于部分影响因子的权重值。在这样的差异下,单独使用主、客观权重方法中的任一种,信服度均较低。而由图 2 可看出,文献[14]提出的组合赋权法的结果与主观权重结果分布相近,未能体现客观权重的作用。究其原因,在本文算例中与主观权重加权的指标熵值较大,分布在 0.795~0.856 之间,所以合成结果依赖于主观权重,客观权重对结果的影响很小。

本文所提方法确定的权重分布近似呈一个不规则的“六边形”,分布在顶点处的影响因子权重较大。其中设备额定容量、用户平均负载率及 DG 平均出力率的权重较大,反映了主观权重的峰值特性,但受客观权重影响,数值均减少;用户负荷总波动率和设备故障率权重较大反映了客观权重的峰值特性,但受主观权重的影响,前者的权重增大,后者的权重减小。究其原因,在本文算例中计算得到的主、客观权重的折扣系数分别为 0.882 和 1,即各影响因子的主观权重调整为原来的 0.882,主观权重的不确定度从 0 增大至 0.118,客观权重不做调整。折扣处理缩小了主、客观权重间的差距,降低了主观权重对融合结果的影响,使得权重分布兼具主、客观权重的峰值特性,但峰值权重因主、客观权重同时作用而趋于两者之间。

综上所述,本文所提组合赋权法结合了主、客观权重的优势,同时与其他赋权法相比,其在融合偏离较大的主、客观权重时具有较大的优势。

4 结论

EUEDN 反映了配电网的建设经济性。为了给提升设备利用率提供科学的决策依据,本文开展了如下工作。

a. 从设备负载特性、设备负载运行时间及设备参数3个方面,构建了涵盖12个指标的EUEDN影响因子体系,该体系可全面反映DG、设备及用户对EUEDN的影响。

b. 结合算例结果,综合考虑影响因子价值及其可供改变灵活程度两方面,给出了提升设备利用率的措施,为配电网技术改造的资金合理配置提供指导。

c. 基于PPD最优证据合成提出了一种具有“偏离权重折扣处理”特征的AHP-熵权法组合赋权法,用于计算影响因子的价值。算例结果表明,本文所提组合赋权法结合了主、客观权重的优势,与其他赋权法相比,其在融合偏离较大的主、客观权重时具有较大的优势。

目前本文工作完成了对EUEDN影响因素的定性分析,下一步将在此基础上开展配电网设备最佳利用率研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 配电网建设改造行动计划(2015 设改造行动计划年)[R]. 北京:国家能源局,2015.
- [2] 刘洪,杨卫红,王成山,等. 配电网设备利用率评价标准与提升措施[J]. 电网技术,2014,38(2):419-423.
LIU Hong, YANG Weihong, WANG Chengshan, et al. Assessment criteria and improvement measures of equipment utilization on distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 419-423.
- [3] 别少勇. 配电网设备利用率综合评价体系与方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
BIE Shaoyong. Research on comprehensive evaluation system and method of distribution network equipment utilization[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [4] 曹磊. 中压配电网设备利用率综合评价体系研究[D]. 天津:天津大学,2012.
CAO Lei. Research on comprehensive evaluation system of medium voltage equipment utilization[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [5] HU Z L, ZHANG Y J, LI C B, et al. Utilization efficiency of electrical equipment within life cycle assessment; indexes, analysis and a case[J]. Energy, 2015, 88: 885-896.
- [6] YE L H, HU Z L, LI C B, et al. The reasonable range of life cycle utilization rate of distribution network equipment[J]. IEEE Access, 2018, 6(99): 23948-23959.
- [7] FANG X, MA S, YANG Q, et al. Cooperative energy dispatch for multiple autonomous microgrids with distributed renewable sources and storages[J]. Energy, 2016, 99: 48-57.
- [8] 柳睿,杨镜非,程浩忠,等. 分布式电源并网的综合评价[J]. 电力系统及其自动化学报,2013, 25(1): 34-39.
LIU Rui, YANG Jingfei, CHENG Haozhong, et al. Comprehensive evaluation of grid-connected distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(1): 34-39.
- [9] 王昌照,汪隆君,王钢,等. 分布式电源出力与负荷相关性对配电网可靠性的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 99-105.
WANG Changzhao, WANG Longjun, WANG Gang, et al. Impact of distributed generation output and load correlation on distribution network reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 99-105.
- [10] 杨小彬,李和明,尹忠东,等. 基于层次分析法的配电网能效指标体系[J]. 电力系统自动化,2013, 37(21): 146-150, 195.
YANG Xiaobin, LI Heming, YIN Zhongdong, et al. Energy efficiency index system for distribution network based on analytic hierarchy process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 146-150, 195.
- [11] 刘自发,韦涛,李梦渔,等. 基于改进层次分析法的交、直流微电网综合评估[J]. 电力自动化设备,2016, 36(3): 60-66, 78.
LIU Zifa, WEI Tao, LI Mengyu, et al. Comprehensive evaluation based on improved analytic hierarchy process for AC/DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 60-66, 78.
- [12] 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): 215-222.
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): 215-222.
- [13] 杨廷方,张航,黄立滨,等. 基于改进型主成分分析的电力变压器潜伏性故障诊断[J]. 电力自动化设备,2015, 35(6): 149-153, 165.
YANG Tingfang, ZHANG Hang, HUANG Libin, et al. Incipient fault diagnosis based on improved principal component analysis for power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 149-153, 165.
- [14] 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.
- [15] 董福贵,张也,尚美美. 分布式能源系统多指标综合评价研究[J]. 中国电机工程学报,2016, 36(12): 3214-3222.
DONG Fugui, ZHANG Ye, SHANG Meimei. Multi-criteria comprehensive evaluation of distributed energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3214-3222.
- [16] 马丽叶,卢志刚,朱连波. 基于证据融合理论的配电网经济运行指标权重的闭环计算方法[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 110-116.
MA Liye, LU Zhigang, ZHU Lianbo. A closed-loop approach to calculate economical operation indices of distribution network based on Dempster-Shafer evidence theory[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 110-116.
- [17] 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.
- [18] WALLEY P. Measures of uncertainty in expert systems[J]. Artificial Intelligence, 1996, 83(1): 1-58.
- [19] TESSEM B. Approximations for efficient computation in the theory of evidence[J]. Artificial Intelligence, 1993, 61(2): 315-329.
- [20] LIU W R. Analyzing the degree of conflict among belief functions[J]. Artificial Intelligence, 2006, 170(11): 909-924.
- [21] 陈圣群,王应明. 基于 Pignistic 概率距离的最优证据合成法[J]. 信息与控制,2013, 42(2): 213-217, 228.
CHEN Shengqun, WANG Yingming. Optimal combination of evidence based on pignistic probability distance[J]. Information and Control, 2013, 42(2): 213-217, 228.

- [22] 罗志坤,刘潇潇,陈星莺,等. 变电站能效评估指标体系及建模方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(3):132-138.
LUO Zhikun, LIU Xiaoxiao, CHEN Xingying, et al. Energy efficiency evaluation index system and modeling method for substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 132-138.
- [23] 杨志超,张成龙,葛乐,等. 基于熵权法的绝缘子污闪状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):90-94.
YANG Zhichao, ZHANG Chenglong, GE Le, et al. Comprehensive fuzzy evaluation based on entropy weight method for insulator flash-over pollution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 90-94.
- [24] LEFEVRE E, COLOT O, VANNOORENBERGHE P. Belief function combination and conflict management [J]. Information Fusion, 2002, 3(2): 149-162.
- [25] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38(2): 325-339.
- [26] SHAFER G A. Mathematical theory of evidence [M]. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 1976: 19-63.

作者简介:



周 来

周 来(1995—),女,湖南湘潭人,博士研究生,主要研究方向为电力系统可靠性与规划、配电网设备利用率综合评价等 (E-mail: 291666680@qq.com);

叶琳浩(1983—),男,广东清远人,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行与可靠性分析 (E-mail: yelh@csg.cn);

杨雄平(1978—),男,广东广州人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统运行方式分析计算、电网规划运行管理 (E-mail: hustyp@163.com)。

Influence indicator system for equipment utilization efficiency of active distribution network and its value calculation method

ZHOU Lai¹, YE Linhao², YANG Xiongping², ZHANG Yongjun¹, ZHANG Yao¹

(1. Guangdong Key Laboratory of Green Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Planning and Development Department, China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Aiming at the problem of low EUEDN (Equipment Utilization Efficiency of Distribution Network) in China, taking the influence of distributed generation into account, a set of influence indicator system for equipment utilization efficiency of active distribution network is established and a value calculation method based on Pignistic probability distance is designed. Firstly, the influence indicators of capacity factor and load rate, which are the indexes reflecting the EUEDN directly, are analyzed, the differences between the influence indicator of active distribution network and passive distribution network are compared, and a set of influence indicator system for equipment utilization efficiency of active distribution network is established from three aspects of load characteristics of equipment, operation time of equipment and equipment parameters. Then, based on the Pignistic probability distance optimal evidence synthesis method, a combined weighting method based on AHP (Analytic Hierarchy Process) and entropy weight method with "deviation discount" feature is proposed, which is used to calculate the values of influence indicators. Finally, the effectiveness of the proposed influence indicator system and value calculation method is verified by case analysis.

Key words: active distribution network; distributed generation; equipment utilization efficiency; influence indicator system; combination weighting; value calculation; Pignistic probability distance; AHP and entropy weight method

(上接第148页 continued from page 148)

Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS

ZHAO Shuqiang, TANG Shanfa

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to quantify the subjective and objective weights of each index in transmission network planning, an evaluation method of transmission network planning scheme which combines improved analytic hierarchy process, CRITIC (CRITERIA Importance Through Intercriteria Correlation) method and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) is proposed. Firstly, the subjective and objective weights of each index are calculated by the improved analytic hierarchy process and CRITIC method respectively and the comprehensive weights are obtained by combining the two weights. Then, the relative closeness coefficient between each planning scheme and the ideal solution is calculated by using TOPSIS, which is taken as the measurement standard to realize the sorting of planning schemes. This method that comprehensively considers the subjective and objective weights effectively utilizes the objective information of index data and takes full account of the important role of subjective evaluation and decision in the actual network planning. The effectiveness of the proposed evaluation method is verified by the typical IEEE Garver-6-bus system, which is commonly used in the transmission network planning.

Key words: transmission network planning; comprehensive evaluation; analytic hierarchy process; CRITIC method; TOPSIS; weights

附 录

表 A1 5 位专家的主观权重

Table A1 Subjective weights of five experts

影响因子	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
用户负荷总波动率	0.105	0.165	0.107	0.081	0.088
用户负荷比	0.092	0.091	0.093	0.087	0.090
用户平均负载率	0.164	0.108	0.156	0.109	0.161
DG 出力总波动率	0.049	0.054	0.050	0.065	0.065
DG 出力比	0.053	0.065	0.059	0.089	0.054
DG 平均出力率	0.114	0.106	0.115	0.185	0.113
设备故障率	0.052	0.053	0.051	0.059	0.060
设备平均修复时间	0.058	0.058	0.061	0.067	0.061
设备上级系统可用度	0.062	0.066	0.068	0.080	0.065
可控 DG 渗透比	0.053	0.057	0.060	0.059	0.054
间歇性 DG 渗透比	0.043	0.047	0.043	0.069	0.045
设备额定容量	0.156	0.132	0.139	0.050	0.146

表 A2 影响因子的原始数据

Table A2 Initial data of influence indicators

影响因子	线路				
	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
用户负荷总波动率	6750.825	6910.791	6801.321	6564.525	6744.583
用户负荷比	1.298	1.242	1.271	1.281	1.293
用户平均负载率	0.771	0.789	0.787	0.710	0.770
DG 出力总波动率	1915.434	1603.947	2734.422	1916.605	1379.435
DG 出力比	4.573	3.622	3.204	3.514	3.897
DG 平均出力率	0.219	0.183	0.312	0.219	0.157
设备故障率/(次·a ⁻¹)	0.030	0.024	0.039	0.063	0.054
设备平均修复时间/(h·次 ⁻¹)	3.800	3.500	4.000	4.500	3.000
设备上级系统可用度	0.992	0.993	0.990	0.973	0.982
可控 DG 渗透比	0.040	0.015	0.020	0.030	0.000
间歇性 DG 渗透比	0.120	0.100	0.150	0.130	0.080
设备额定容量/kW	9439.677	7707.626	10565.510	6581.793	7707.626

表 A3 影响因子归一化后的数据

Table A3 Normalized data of influence indicators

影响因子	线路				
	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
用户负荷总波动率	0.462	0	0.316	1.000	0.480
用户负荷比	1.000	0	0.517	0.708	0.923
用户平均负载率	0.769	1.000	0.974	0	0.760
DG 出力总波动率	0.604	0.834	0	0.604	1.000
DG 出力比	0	0.695	1.000	0.773	0.493
DG 平均出力率	0.604	0.834	0	0.604	1.000
设备故障率	0.846	1.000	0.615	0	0.231
设备平均修复时间	0.533	0.333	0.667	1.000	0
设备上级系统可用度	0.950	1.000	0.862	0	0.473
可控 DG 渗透比	1.000	0.375	0.500	0.750	0
间歇性 DG 渗透比	0.571	0.286	1.000	0.714	0
设备额定容量	0.283	0.717	0	1.000	0.717