

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.016

基于组合赋权的非介入式终端辨识能力灰色 TOPSIS 评价

范浩¹, 杨世海^{2,3}, 武文广⁴, 曹晓冬^{2,3}, 陈浩⁵

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 国网江苏省电力有限公司营销服务中心, 江苏 南京 211103; 3. 国网电力需求侧管理技术实验室, 江苏 南京 211103; 4. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 5. 国家电网有限公司华东分部, 上海 200120)

摘要:非介入式负荷辨识终端克服了传统侵入式终端成本高、安装复杂和维护不便的问题,得以广泛应用。但目前仅通过电量指标对非介入式终端负荷辨识能力进行评价,评价体系单一。为此,文中选取多维指标综合衡量终端对电器负荷的辨识能力,并据此构建了非介入式终端分层多组评价模型;利用熵权-层次分析法(AHP)组合评价技术得到指标的组权值;在此基础上,利用灰色逼近理想解排序(TOPSIS)评价对电器组合案例的电器辨识能力进行分类、灰色排序,从而客观地得到终端整体辨识能力水平及不同案例下终端辨识能力好坏。最后,在非介入式终端实证平台选取4种典型电器,验证了文中方案可解决评估指标数据不完全的问题,结合实际工程的终端辨识能力校验,提高了非侵入负荷辨识终端辨识能力评价的科学性和有效性。

关键词:非介入式终端;辨识能力;分层多组评价模型;熵权-层次分析法(AHP);灰色逼近理想解排序(TOPSIS)评价

中图分类号:TM933

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)06-0110-07

0 引言

随着信息技术的发展,一种不影响或者尽可能小地影响作用对象的非介入式负荷监测(non-intrusive load monitoring, NILM)技术得到了快速发展,可以为电力公司提供住宅用户等各种电力设备电能消耗数据^[1-2]。与传统侵入式终端相比,非介入式负荷辨识终端(简称非介入式终端)最大的不同之处在于只需要在电力进线处安装信号采集装置,据此采集电能信号并进一步分析出设备的用电信息,解决了传统侵入式终端成本高、安装复杂和维护不便的问题。

负荷辨识作为非介入式终端最具代表的内容,主要通过对采集到的电能信号进行特征提取,并与已有负荷特征库中的负荷特征进行比较,当两者达到一定相似度时,即可辨识出相应的用电设备^[3]。目前,非介入式终端负荷辨识能力主要经由专业人员根据参数范围是否超限进行粗略判断,效率较低。对非介入式终端辨识能力的综合分析评价能够让相关技术人员准确掌握终端辨识能力及其变化趋势。

要实现非介入式终端负荷辨识能力的评价,首要任务是构建合适的评价模型,当前终端辨识能

力仅以电量为指标,辨识方法过于简单;其次,以指标在整体评价中对负荷辨识能力的贡献为主线,确定评价指标的权重。当前,权值的确定方法主要包括主观赋权和客观赋权两类^[4-6],前者以层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)为代表,后者以熵权法为代表,各有优缺点,基于兼顾两方案优势的考量,常组合应用,称之为组合赋权法。

文中基于灰色关联法^[7]建立了非介入式负荷辨识终端能力的灰色逼近理想解排序(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)^[8-10]评估模型,在熵权-AHP组合权重基础上进一步得到准则层不同案例组合的相对贴程度,通过对灰色序列的排序分析终端辨识能力。设计非介入式终端评价体系,修正了熵权法和AHP的不足,从而建立了非介入式终端评价模型,为非介入式终端负荷辨识能力评价提供了合理的考量手段。

1 非介入式终端辨识能力评价模型

1.1 分层多组评价模型

以非介入式终端的应用场景、辨识能力实现难点为基本依据构建测试方法及评价体系,设计一种分层多组的测试方法,将运行场景由简到繁划分为4个等级,整体测试方案如图1所示。

图1中,目标层为非介入式终端辨识能力辨别;准则层分为Level1—Level4四个等级组合评价情形;方案层为指标层。其中,Level1等级为单台电器

收稿日期:2020-06-20;修回日期:2020-07-16

基金项目:国家重点研发计划资助项目“城区用户与电网友好互动系统”(2016YFB0901100)

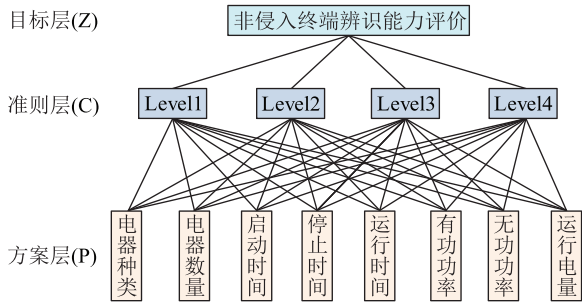


图1 非介入式终端辨识能力分层多组评价模型

Fig.1 Hierarchical multi-group evaluation model of non-intrusive terminals identification ability

单模式运行(叠加背景电器),是电器运行的最小组成单元;Level2 等级为 2 台电器 2 种运行模式,电器错开启动(叠加背景电器),叠加方式符合常规用户电器使用习惯;Level3 等级为 3 台电器 3 种运行模式,电器错开启动(叠加背景电器),叠加方式符合常规用户电器使用习惯;Level4 等级为全电器组合场景,实际家庭 24 h 真实用电场景的模拟。

终端辨识能力总体评价模型可写为:

$$f(x) = \sum_{k=1}^4 v_{Lk} \left[\sum_{s=1}^{m_k} v_s (v_N N_e + v_M M_e + v_{Tb} T_b + v_{Te} T_e + v_T T + v_P P_{ide} + v_Q Q_{ide} + v_W W_{ide}) \right] \quad (1)$$

式中: N_e 为电器种类辨识指标; M_e 为电器数量辨识指标; T_b 为启动时间辨识指标; T_e 为停止时间辨识指标; T 为运行时长; P_{ide} 为有功功率辨识指标; Q_{ide} 为无功功率辨识指标; W_{ide} 为运行电量辨识指标; v_{Lk} ($k=1,2,3,4$) 为准则层 4 种分类下各自权重; $v_N, v_M, v_{Tb}, v_{Te}, v_T, v_P, v_Q, v_W$ 为各指标权重; v_s ($s=1, 2, \dots, m_k$) 为各 Level 下电器组合案例的权重; m_k 为四类准则下电器组合案例数。用 m 表示准则下所有电器组合案例的总数,表达式可写为:

$$m = \sum_{k=1}^4 m_k = \sum_{k=1}^4 C_4^k \quad (2)$$

式(2)说明,在单电器包含 m_1 个电器的 Level1 测试场景基础上,电器两两组合、三三组合测试个数分别为 m_2, m_3 ,特别地,全电器场景其组合测试个数总为 1。

1.2 评价指标构建

对非介入式终端负荷辨识能力的评价以辨识精度为主,各项指标精度具体计算方法如下:

(1) 令 $X=M$ 或 N , M 为电器数量, N 为电器类型,其辨识误差 E_X 和辨识精度 C_X 为:

$$\begin{cases} C_X = 1 - E_X \\ E_X = \frac{|X_{iden} - X_{rea}|}{X_{rea}} \times 100\% \end{cases} \quad (3)$$

式中: X_{iden} 为电器辨识出的数量或辨识出的电器种类数目; X_{rea} 为所选电器实际的数量或实际的电器种类数目。

(2) 令 $Y = T_b$ 或 T_e , T_b 为启动时间, T_e 为停止时间,其辨识误差 E_Y 和辨识精度 C_Y 为:

$$\begin{cases} C_Y = \frac{1 - E_Y}{Y_{bas}} \times 100\% \\ E_Y = |Y_{iden} - Y_{rea}| \end{cases} \quad (4)$$

辨识运行时长用 T 表示,计算误差 E_T 和 C_T 辨识运行时长精度为:

$$\begin{cases} C_T = 1 - E_T \\ E_T = \frac{|T_{iden} - T_{rea}|}{T_{rea}} \times 100\% \end{cases} \quad (5)$$

式中: Y_{iden} 为辨识出的启动(或停止)时间; Y_{rea} 为实际的启动(或停止)时间; Y_{bas} 为定义的启动(或停止)时间精度基准值,一般取 5 s; T_{iden} 为辨识出的运行时长; T_{rea} 为实际的运行时长。

(3) 令 Z_x 为运行有功或无功功率, $x = p$ 或 q , p, q 分别为有功、无功测量值,则运行功率计算误差 E_{Z_x} 和辨识精度 C_{Z_x} 分别为:

$$\begin{cases} C_{Z_x} = 1 - E_{Z_x} \\ E_{Z_x} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: x_i 为有功(或无功)功率测量值, $i=1, 2, \dots, l$, l 为电器个数; \bar{x} 为有功(或无功)的平均值。

运行电量辨识误差 E_{Wide} 和辨识运行电量精度 C_{Wide} 分别为:

$$\begin{cases} C_{Wide} = 1 - E_{Wide} \\ E_{Wide} = \frac{|W_{Ts} - W_{Ms}|}{W_{Ms}} \times 100\% \end{cases} \quad (7)$$

式中: W_{Ts} 为终端的分项测量电量; W_{Ms} 为民用单相电能表的分项测量电量。

2 组合赋权灰色 TOPSIS 评价技术

图 2 为组合赋权灰色 TOPSIS 评价流程。结合式(1),文中利用熵权-AHP 求取各指标的组合适重,使评价结果兼具主客观的优点,实现非介入式终端负荷辨识能力的量化评估。对于终端辨识能力的评价指标一般设定在正常工作范围,没有明确的等级划分,故文中针对各准则下各案例组合的权重采用灰色 TOPSIS 分析法客观地给出不同案例下终端的负荷辨识能力。

2.1 熵权-AHP 赋权流程

图 2 所示组合赋权具体包含以下流程。

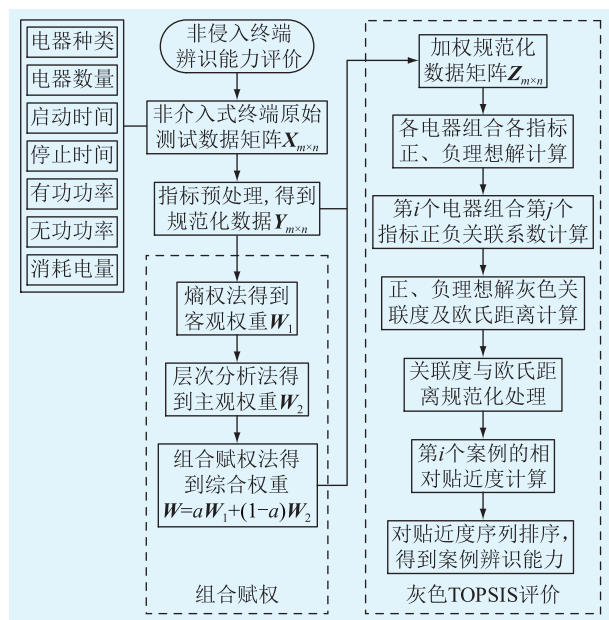


图2 综合评价流程

Fig.2 Comprehensive evaluation process

(1) 指标预处理。图1中, 准则层有4种电器组合评价情形, 各Level包含n个评价指标, 文中n取8。据此可建立决策矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$), 为指标权重。为便于各指标在同一标准下处理, 需要对原始数据预处理^[11], 处理后得到规范化决策矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$, 文中以精度作为非介入式终端识别能力的主要评估度量, 属于越大越优型指标。

(2) 熵权法确定指标客观权重。熵权法^[12]是一种客观赋权法, 主要根据各指标所包含的信息量的多少进行赋值。若有n个评价指标, 指标值经标准化后组成评价矩阵 $R = [r_{ij}]$, 其中 r_{ij} 为第i个对象的第j个指标标准化值, 第j个指标的熵 W_j 为:

$$W_j = \frac{1 - s_j}{n - \sum_{j=1}^n s_j} \quad (8)$$

式中: s_j 为第j个指标的信息熵; $\sum_{j=1}^n W_j = 1$, $0 \leq W_j \leq 1$ 。

(3) AHP确定指标主观权重。AHP将定量与定性分析相结合, 通过专家经验判断各指标间的相对重要度, 构造模糊判断矩阵^[13-15], 求得各指标的相对权重, 具体可表示为:

$$W_j = \frac{W_j^*}{\sum_{j=1}^n W_j^*} \quad (9)$$

$$W_j^* = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^m a_{ij}} \quad t = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

其中, 元素 a_{ij} 为判断矩阵中指标两两对比的重要程度标度。

该方法在求取指标权重之前, 需要判断模糊判断矩阵的一致性, 随机一致性比例CR可表达为:

$$CR = CI/RI \quad (11)$$

式中: CI为一致性指标, 可由矩阵特征根计算而来; RI为判断矩阵的平均随机一致性指标, 可查表得到。

(4) 组合赋权法确定指标综合权重。基于熵权法和层次分析法的组合赋权法, 综合考虑主客观因素的影响, 能得到更接近实际的权重结果。则组合权重可表示为^[16]:

$$W = \alpha W_1 + (1 - \alpha) W_2 \quad (12)$$

式中: W_1 为熵权法计算得到的各指标权重; W_2 为层次分析法计算得到的个指标权重; α 为熵权法得到的权值在组合权重中所占的比例, 一般取0.4。

2.2 灰色TOPSIS评价流程

图2所示灰色TOPSIS分析法的基本步骤为:

(1) 将熵权-AHP组合权重模型求得的评价指标集向量 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 乘以规范化决策矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$ 的每一列, 得到加权的规范化决策矩阵。

$$Z = (z_{ij})_{m \times n} = (\omega_j y_{ij})_{m \times n} \quad (13)$$

(2) 确定待评价各级准则下电器组合案例各个指标的正理想解 z_0^+ 和负理想解 z_0^- , 其计算公式为:

$$\begin{cases} z_0^+ = \max_{1 \leq i \leq m} z_i(j) = [z_0^+(1), z_0^+(2), \dots, z_0^+(n)] \\ z_0^- = \min_{1 \leq i \leq m} z_i(j) = [z_0^-(1), z_0^-(2), \dots, z_0^-(n)] \end{cases} \quad (14)$$

式中: $z_i(j)$ 为各级准则下电器组合案例的 z_{ij} 值。

(3) 分别计算第i个电器组合案例第j个指标同正理想解和负理想解的灰色关联系数^[17]:

$$\begin{cases} s_{ij}^+ = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} f^+(j) + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} f^+(j)}{f^+(j) + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} f^+(j)} \\ s_{ij}^- = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} f^-(j) + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} f^-(j)}{f^-(j) + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} f^-(j)} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $f^+(j) = |z_0^+(j) - z_i(j)|$; $f^-(j) = |z_0^-(j) - z_i(j)|$; ρ 为分辨系数^[18], $\rho \in [0, 1]$, 一般取0.5。

(4) 求解第i个电器组合案例第j个指标与正理想解和负理想解的加权灰色关联度为:

$$\begin{cases} \gamma_i^+ = \sum_{j=1}^n \omega_j s_{ij}^+ \\ \gamma_i^- = \sum_{j=1}^n \omega_j s_{ij}^- \end{cases} \quad (16)$$

(5) 计算第 i 个测试案例第 j 个指标同正、负理想解的欧氏距离 d_i^+ , d_i^- , 计算公式为:

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [z_i(j) - z_0^+(j)]^2} \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [z_i(j) - z_0^-(j)]^2} \end{cases} \quad (17)$$

(6) 将 γ_i^+ , γ_i^- 及 d_i^+ , d_i^- 进行规范化处理后得到 R_i^+ , R_i^- 及 D_i^+ , D_i^- , R_i^+ 与 D_i^- 数值大小都和评价方案正理想解 γ_i^+ 成正相关, R_i^- 与 D_i^+ 数值大小都和评价方案负理想解 γ_i^- 成正相关;

(7) 第 i 个案例的相对贴近度, 计算公式为:

$$C_i = \frac{\beta D_i^- + (1 - \beta) R_i^+}{\beta (D_i^+ + D_i^-) + (1 - \beta) (R_i^+ + R_i^-)} \quad (18)$$

式中: $\beta \in (0, 1]$, 是评价者对位置、形状的偏好程度, 可按评价者个人偏好设定, 文中对位置和形状均无偏好, 故取 0.5。

最后, 按相对贴近度的大小对各准则下电器组合案例的电器辨识能力进行分类、排序, 相对贴近度越大说明该评价方案与正理想解越接近, 电器组合案例的负荷辨识能力越好; 反之越差。

3 非介入式终端检测评价平台

在某非介入式终端负荷辨识能力实证平台上进行终端辨识能力验证。选取四级辨识能力评价体系, 通过实证平台获取测试数据, 参与测试验证电器类型及数量可自行配置, 在选定电器测试验证过程中, 其他电器不接通电源。由测试平台进行评估并出具评价结果。

非介入式终端模拟检测评价系统架构如图 3 所示。

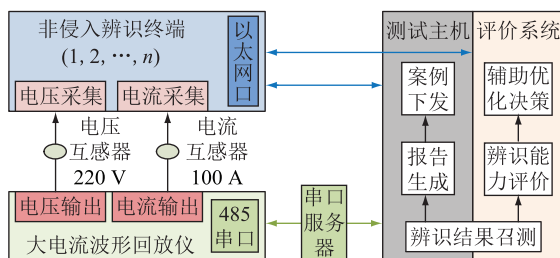


图3 非介入式终端模拟检测评价系统架构

Fig.3 The architecture of non-intrusive terminal simulation test and evaluation system

系统架构主要有以下几个部分:

(1) 核心组件为大电流波形回放仪, 是一个可控的电压源及电流源, 具有高度可控且低功耗的特点, 满足模拟真实居民用户电压电流波形;

(2) 测试评价主站是控制中心, 管理整个测试

环境的硬件、案例库及执行全过程, 主站的案例库是家庭用电场景的浓缩, 支持持续扩展;

(3) 评价方案作为辅助决策支持模块, 为负荷识别算法的优化、参数范围的选取等提供理论依据和决策信息, 形成实时监测-辨识能力评价-辅助优化决策的管理体系;

(4) 串口服务器, 实现多台非介入式终端同时测试的接口管理, 提升测试效率。

4 测试验证

4.1 组合权重确定

在实证平台上, 选取变频空调 A、电水壶 B、电热水器 C、电磁炉 D 四种电器进行验证。对单一电器组合、三三组合情形均进行了 6 组测试, 对两两组合情形、全电器组合情形进行了 4 组测试。由式 (2) 可知电器组合数量 $m = 15$, 指标数 $n = 8$ 。形成原始数据矩阵 $X = [x_{ij}]_{15 \times 8}$, 经过 3.1 节指标预处理后得到规范化数据 $Y = [y_{ij}]_{15 \times 8}$, 如表 1 所示。以 Level2 下电器 AB 的电器种类辨识指标 $N_e = 0.5$ 为例, 表示 AB 组合情形在 4 组测试下 2 次辨识成功, 2 次辨识失败。

(1) 熵权法确定权重。表 1 通过查阅相关资料及专家问卷调查, 对四级评价指标进行赋值, 并进行指标无量纲化预处理, 即可求出熵权法客观权重。对表 1 数据求熵得:

$$E = [0.930 \ 1 \ 0.930 \ 1 \ 0.996 \ 9 \ 0.970 \ 1 \ 0.982 \ 3 \ 0.999 \ 3 \ 0.999 \ 5 \ 0.995 \ 7]^T \quad (19)$$

结合式 (8) 求得熵权法权重:

$$W_1 = [0.356 \ 7 \ 0.356 \ 7 \ 0.015 \ 6 \ 0.152 \ 4 \ 0.090 \ 3 \ 0.003 \ 5 \ 0.002 \ 6 \ 0.022 \ 1]^T \quad (20)$$

熵权法由指标数值的变化程度决定其占权重大小, 避免了人为仅凭经验确定权重造成的误差, 但不能反映终端辨识能力评价体系中指标本身的重要性, 需结合 AHP 弥补熵权法的不足。

(2) AHP 确定权重。在求 AHP 权重时, 具体步骤如下。

步骤一: Z-C 判断矩阵及其一致性判断, 由专家根据经验依据表 1 对 Level1—Level4 进行两两重要度比较, 得到判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 7 \\ 1/2 & 1 & 2 & 5 \\ 1/4 & 1/2 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

查表得阶数为 4 的随机一致性指标为 0.884 5, 计算出矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max} = 4.028 \ 3$, 根据表 1

表 1 终端负荷辨识能力评价指标规范化数据

Table 1 Standardized data of evaluation index for terminal load identification capability

评价等级	序号	电器组合	指标							
			N_e	M_e	T_b	T_e	T	P_{ide}	Q_{ide}	W_{ide}
Level1	1	A	1	1	0.734	0.455	0.535	0.785	0.865	0.678
	2	B	1	1	0.674	0.465	0.486	0.876	0.766	0.545
	3	C	1	1	0.543	0.543	0.453	0.877	0.932	0.456
	4	D	0	0	0.873	0.527	0.677	0.897	0.798	0.645
Level2	5	AB	0.5	0.5	0.786	0.234	0.243	0.965	0.875	0.765
	6	AC	0	0	0.675	0.254	0.344	0.765	0.825	0.744
	7	AD	1	1	0.877	0.302	0.335	0.876	0.832	0.634
	8	BC	1	1	0.674	0.109	0.231	0.789	0.801	0.654
	9	BD	0.5	0.5	0.856	0.231	0.248	0.845	0.845	0.578
	10	CD	1	1	0.784	0.234	0.324	0.876	0.901	0.522
Level3	11	ABC	1	1	0.678	0.253	0.267	0.887	0.867	0.534
	12	ABD	0.333	0.333	0.876	0.487	0.467	0.897	0.823	0.523
	13	ACD	1	1	0.784	0.187	0.342	0.854	0.794	0.765
	14	BCD	0.667	0.667	0.766	0.287	0.453	0.789	0.798	0.733
Level4	15	ABCD	0.75	0.75	0.876	0.302	0.456	0.868	0.877	0.678

与式(11)求得 $CR = 0.0107 < 0.1$, 即矩阵一致性符合要求。求得 Z-C 层的特征向量为:

$$W_{Z-C} = [0.5148 \quad 0.2793 \quad 0.1470 \quad 0.0589] \quad (22)$$

步骤二: C-P 判断矩阵及一致性判断, 求取 4 个 Level 关于 8 个指标的判断矩阵, 以 Level1 为例:

$$B^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 6 & 9 & 4 & 6 & 2 & 4 \\ 1 & 1 & 6 & 9 & 4 & 6 & 2 & 4 \\ 1/6 & 1/6 & 1 & 3 & 1/2 & 1 & 1/4 & 1/2 \\ 1/9 & 1/9 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1/3 & 1/7 & 1/5 \\ 1/4 & 1/4 & 2 & 5 & 1 & 2 & 1/2 & 1 \\ 1/6 & 1/6 & 1 & 3 & 1/2 & 1 & 1/4 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 4 & 7 & 2 & 4 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/4 & 2 & 5 & 1 & 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

经查表, 阶数为 8 阶的随机一致性指标为 1.4022, 据此可计算出矩阵的最大特征根见表 1, 求得 $CR = 0.011 < 0.1$, 即矩阵一致性符合要求。由此可求得 Level1 的特征向量如下:

$$W_{C-P}^{(1)} = [0.2814, 0.2814, 0.0457, 0.0209, 0.0831, 0.0457, 0.1585, 0.0831] \quad (24)$$

同理根据 Level2、3、4 下的判断矩阵得到其各自的特征根及特征向量。进一步得到 C-P 层的特征向量 W_{C-P} , 该矩阵每一行代表一个 Level 在 8 个指标下的权重大小。

$$W_{C-P} = [W_{C-P}^{(1)}, W_{C-P}^{(2)}, W_{C-P}^{(3)}, W_{C-P}^{(4)}]^T \quad (25)$$

据此由式(9)得到层次分析法的权重如下:

$$W_2 = W_{Z-C} W_{C-P} =$$

$$[0.2840 \quad 0.2787 \quad 0.0459 \quad 0.0211 \quad 0.0828 \quad 0.0454 \quad 0.1583 \quad 0.0836]^T \quad (26)$$

(3) 熵权-AHP 组合权重。综合上面的熵权法权重 W_1 和层次分析法权重 W_2 , 取 α 为 0.4, 由式(12)求得组合权重。

$$W = [0.3131 \quad 0.3099 \quad 0.0338 \quad 0.0736 \quad 0.0858 \quad 0.0286 \quad 0.0960 \quad 0.0502]^T \quad (27)$$

4.2 灰色 TOPSIS 决策

依据式(13)可确定每个 Level 下各个评价指标的正理想解和负理想解, 可表示为:

$$Z_0^+ = [0.3131 \quad 0.3099 \quad 0.0296 \quad 0.0400 \quad 0.0581 \quad 0.0276 \quad 0.0895 \quad 0.0384]^T \quad (28)$$

$$Z_0^- = [0 \quad 0.0183 \quad 0.0080 \quad 0.0198 \quad 0.0219 \quad 0.0736 \quad 0.0229]^T \quad (29)$$

依据式(15)计算每个 Level 各个评价指标通正、负理想解的灰色关联系数, 再根据式(16)得到每个 Level 各个评价指标同正、负理想解的灰色关联度。由式(17)计算第 i 个测试案例第 j 个指标同正、负理想解的欧氏距离, 将其与正负理想解一并进行规范化处理后, 由式(18)计算每个组合案例的相对贴近度, 所求正、负理想解及相对贴近度的值如表 2 所示。

将案例相对贴近度分别按相对贴近度降序、案例数升序进行分析, 排序结果分别见图 4 和图 5。

由图 4 可以看出, 对相对贴近度从大到小排序, 发现 1、3、7、2、10、13、11 辨识能力均较好, 4、6 较

表 2 正负理想解加权灰色关联度与案例相对贴近度

Table 2 Positive and negative ideal solution weighted gray correlation and relative closeness of case

关联度	Level1				Level2				Level3				Level4		
	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
γ_i^+	0.841 4	0.806 5	0.878 6	0.477 0	0.528 6	0.384 6	0.811 4	0.768 2	0.483 6	0.812 8	0.790 2	0.481 3	0.806 6	0.559 5	0.631 3
γ_i^-	0.376 3	0.435 9	0.404 7	0.792 3	0.521 2	0.845 2	0.406 8	0.498 6	0.543 2	0.414 0	0.434 0	0.558 0	0.436 6	0.475 2	0.417 9
C_i	0.807 2	0.774 8	0.793 0	0.257 8	0.500 3	0.198 8	0.779 0	0.731 7	0.482 4	0.773 8	0.761 8	0.406 0	0.764 4	0.597 2	0.667 4

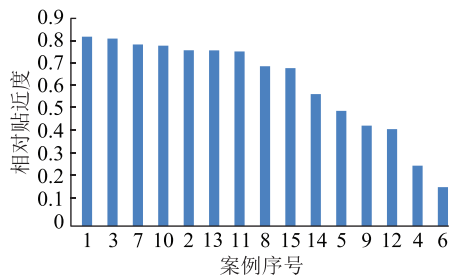


图 4 相对贴近度降序排列

Fig.4 Descending order of relative closeness

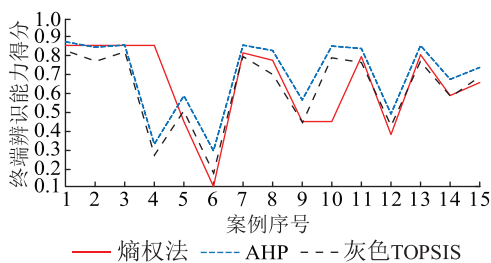


图 5 不同方案下终端识别能力对比

Fig.5 Comparison of terminal identification capability under different schemes

弱。对在江苏常州武进区投运的非侵入式负荷辨识终端随机抽样 50 台进行终端辨识能力评价,发现除个别异常状况终端外,终端评价结果均大于 0.8,并以 0.9 为中心成正态分布,评价占比达 97%。并且,不同电器组合辨识情况与实证情况下一致性达到 98%,验证了方案的有效性。

由图 5 可看出,单电器组合的负荷辨识能力以 A、B、C 电器为代表,辨识能力较优,但 D 电器相对较弱;两两组合电器 7、8、10 电器组合较优,5、6、9 相对较弱;三三电器组合 11、13、14 组合较优,12 较弱;全电器组合辨识能力处于较优水平。从第 4 个案例对电器 D 的打分来看,以及从第 10 个案例的打分来看,熵权法、AHP 判断两两组合电器 CD 由于受到单电器 D 辨识能力弱的问题而受到辨识能力连带影响,但灰色 TOPSIS 介于 2 种方案之间,考虑了偶然性导致电器 D 辨识能力弱的因素,结果更具客观性和科学性。该方法解决了评估指标数据不完全的问题,提高了非侵入负荷辨识终端辨识能力评价的正确性和有效性。

5 结语

文中选取了代表性的 8 类非介入式终端负荷辨识能力指标,并给出了各指标的定义,据此建立了分层多组评价模型;熵权-AHP 综合主客观重要程度,构建了规范化判断矩阵,一定程度上解决了多指标权重难以量化的问题,并通过判断矩阵的一致性判断鉴别构造的判断矩阵的有效性,使指标权重更贴近实际;针对传统评分方法的缺陷,利用灰色关联理论对 TOPSIS 法进行了改进,采用灰色关联分析方法挖掘了待评样本数据的内在关联,并将各待评样本与最优方案和最劣方案的灰色关联度作为新的评价矩阵,运用 TOPSIS 法对各待评样本进行了综合排序,确定了终端整体辨识能力处于较优水平,解决了偶然性导致的辨识能力较弱问题,分析了不同电器组合案例下的电器辨识能力,验证了方案的科学性和客观性。最后,应用该评价体系对在常州投运的辨识终端的测试数据进行评价,并应用于现场实施前终端的评价校验,提升了终端现场运行质量,验证了所提评价方法的可行性和实用性,具有一定的工程实用意义。

参考文献:

- [1] DRENKER S, KADER A. Nonintrusive monitoring of electric loads[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1999, 12(4):47-51.
- [2] 徐彤,李永超,杨宇全,等. 非介入式负荷监测装置及其工程应用研究[J]. 电子测量技术,2018,41(3):93-97.
XU Tong, LI Yongchao, YANG Yuquan, et al. Research on non-intrusive load monitoring device and engineering application [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(3):93-97.
- [3] LIN Y, TSAI M. Development of an improved time-frequency analysis-based nonintrusive load monitor for load demand identification[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(6):1470-1483.
- [4] 李晨,殷自力,王晓辉,等. 基于层次分析法和熵权法的配电网调度评价[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(7):81-87.
LI Chen, YIN Zili, WANG Xiaohui, et al. Assessment on distribution network dispatching based on analytic hierarchy process and entropy weight method[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2019, 31(7):81-87.

- [5] 张军,浦天宇. 多层次电压暂降评价方法研究[J]. 电力工程技术,2018,37(6):49-54.
ZHANG Jun,PU Tianyu. Multi-level evaluation method of voltage sag[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(6):49-54.
- [6] 丁少倩,林涛,徐遐龄. 基于改进的熵权-AHP 的电网综合脆弱性评估方法研究[J]. 电测与仪表,2017,54(4):28-33,68.
DING Shaoqian,LIN Tao,XU Xialing. Research on comprehensive vulnerability assessment method of power grid based on improved AHP-entropy method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2017,54(4):28-33,68.
- [7] 徐镇凯,温勇兵,魏博文,等. 基于组合赋权和灰色 TOPSIS 方法的岩体质量评价[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(S2):493-497.
XU Zhenkai,WEN Yongbing,WEI Bowen, et al. Quality evaluation of rock mass based on combined weights and gray TOPSIS method[J]. Chinese Journal of Underground Space & Engineering,2016,12(S2):493-497.
- [8] 王义保,杨婷惠,王世达. 基于组合赋权和灰色关联的城市公共安全感评价[J]. 统计与决策,2019,35(18):45-50.
WANG Yibao,YANG Tinghui,WANG Shida. Evaluation on urban public security sense based on combined weighting and grey correlation[J]. Statistics & Decision,2019,35(18):45-50.
- [9] 翟海保,李兆伟,黄慧,等. 特高压直流分层接入电网的落点选择研究[J]. 电力工程技术,2018,37(1):65-71.
ZHAI Haibao,LI Zhaowei,HUANG Hui, et al. Terminal location selection study for uhvdc hierarchical connection to power grid [J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(1):65-71.
- [10] SAHOO S,DHAR A,KAR A. Environmental vulnerability assessment using grey analytic hierarchy process based model [J]. Environmental Impact Assessment Review,2016,56:145-154.
- [11] 刘仕兵,朱雪龙,张艳伟,等. 基于灰色聚类和组合赋权法的高速铁路终端健康状态评估研究[J]. 铁道学报,2016,38(7):57-63.
LIU Shibing,ZHU Xuelong,ZHANG Yanwei, et al. Research on health status assessment of high-speed railway catenaries based on gray clustering and combination assigning method [J]. Journal of the China Railway Society,2016,38(7):57-63.
- [12] 闫威,陈长怀,陈燕. 层次分析法一致性指标的临界值研究[J]. 数理统计与管理,2011,30(3):414-423.
YAN Wei,CHEN Changhuai,CHEN Yan. The threshold value of consistency index for analytic hierarchy process[J]. Journal of Applied Statistics & Management,2011,30(3):414-423.
- [13] 徐斌,马骏,陈青,等. 基于改进 AHP-TOPSIS 法的经济开发区配电网综合评价指标体系和投资策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(22):35-44.
XU Bin,MA Jun,CHEN Qing, et al. Research on comprehensive evaluation index system and investment strategy of economic development zone distribution network based on improved AHP-TOPSIS method[J]. Power System Protection and Control,2019,47(22):35-44.
- [14] 朱天,丁坚勇,郑旭. 基于改进 TOPSIS 法和德尔菲-熵权综合权重法的电网规划方案综合决策方法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(12):91-99.
ZHU Tiantong,DING Jianyong,ZHENG Xu. A comprehensive decision-making method for power network planning schemes based on the combination of the improved TOPSIS method with Delphi-entropy weight method [J]. Power System Protection and Control,2018,46(12):91-99.
- [15] 闫欣欣,袁振洲,毛思捷,等. 基于熵权-TOPSIS 模型的慢行交通与城市设计协调评价方法[J]. 公路交通科技,2018,35(9):107-114.
YAN Xinxin,YUAN Zhenzhou,MAO Sijie, et al. Coordination evaluation of non-motorized traffic and urban design based on entropy weight-TOPSIS model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2018,35(9):107-114.
- [16] ZHANG Zhicai,CHEN Li. Analysis on decision-making model of plan evaluation based on grey relation projection and combination weight algorithm [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2018,29(4):789-796.
- [17] 陕振沛,宁宝权,郭亚丹. 基于组合赋权灰色关联 TOPSIS 的节水灌溉效益评价[J]. 节水灌溉,2018,277(9):107-112.
SHAN Zhenpei,NING Baoquan,GUO Yadan. Benefit evaluation of water saving irrigation based on combination weight grey relation TOPSIS method [J]. Water Saving Irrigation,2018,277(9):107-112.
- [18] 钱单驰,仇蕾. 灰色关联分析中分辨系数取值的定量研究[J]. 统计与决策,2019,35(10):10-14.
QIAN Sunchi,QIU Lei. Quantitative study on value of distinguishing coefficient in grey correlation analysis [J]. Statistics & Decision,2019,35(10):10-14.

作者简介:



范洁

范洁(1977),女,学士,研究员级高级工程师,从事电磁测量与检测技术相关工作(E-mail:fanjie121@tom.com);

杨世海(1976),男,博士,研究员级高级工程师,从事智能配用电技术相关工作;

武文广(1981),男,硕士,高级工程师,从事大数据分析、用电信息采集技术相关工作。

(下转第 131 页)

Motion characteristic of metal particles in GIL under DC voltage

JIA Yunfei, JI Shengchang, LYU Liang

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: Gas insulated metal enclosed transmission line (GIL) is alternative to cable and overhead line because of its large transmission capacity, small floor space and low transmission loss. Metal particles of GIL will take off under electric field, which threatens the insulation performance of GIL. To better collecting metal particles, it is necessary to investigate the force analysis and motion characteristic of metal particles of GIL. Firstly, the force and motion characteristic of metal particles between coaxial cylinder electrodes is analyzed, under the condition that the influence of the basin-type insulators on the axial electric field strength is ignored. The resonant frequency of metal particles is used to characterize the activity of metal particles under DC voltage, and the influences of voltage and particle radius on the resonant frequency of metal particles are analyzed. Then, considering the influence of the basin-type insulator on the axial electric field intensity of GIL, several typical motion trajectories of metal particles are obtained. Finally, some suggestions for the layout of particle traps are given. The results show that it is necessary to arrange metal particle traps under the convex side of basin-type insulator.

Keywords: gas insulated metal enclosed transmission line (GIL); metal particle; force analysis; motion characteristic; resonant frequency of metal particles

(编辑 钱悦)

(上接第 116 页)

Grey TOPSIS evaluation of non intrusive terminal identification ability based on combination weighting

FAN Jie¹, YANG Shihai^{2,3}, WU Wenguang⁴, CAO Xiaodong^{2,3}, CHEN Hao⁵

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Marketing Service Center, Nanjing 211103, China; 3. State Grid Power Demand Side Management Technology Laboratory, Nanjing 211103, China; 4. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 5. East China Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China)

Abstract: Non-intrusive terminal overcomes the problems of high cost, complex installation and inconvenient maintenance of the traditional intrusive terminal, and is widely used. However, the non intrusive terminal load identification ability is only evaluated by electricity index, and the evaluation system is single presently. Therefore, multi-dimensional indicators are selected to comprehensively measure the terminal's ability to identify electrical loads, and a hierarchical multi group evaluation model of non-intrusive terminals is construct based on it. Entropy weight and analytic hierarchy process (AHP) combination evaluation technology is used to get the combination weight of indicators. On this basis, by using the grey technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) evaluation method, the electric appliance identification ability of the electric appliance combination cases are classified and sorted, so as to objectively obtain the overall identification ability level of the terminal and the quality of the terminal identification ability in different cases. Finally, four typical electrical appliances are selected from the non intrusive terminal demonstration platform of Jiangsu Electric Power Research Institute to verify that the scheme solves the problem of incomplete evaluation index data. Combined with the terminal identification ability verification of practical projects, the scientificity and effectiveness of the non-invasive load identification terminal identification ability evaluation are improved.

Keywords: non-intrusive terminals; identification capability; hierarchical multi-group evaluation model; entropy weight and analytic hierarchy process (AHP) method; grey technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) evaluation

(编辑 钱悦)