

# 考虑负荷恢复过程的配电网用电可靠性评估指标与方法

欧阳森, 杨墨缘

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:**针对传统供电可靠性定义中未对停电后的负荷恢复过程(LRP)进行有效计及的问题,提出考虑LRP的配电网用电可靠性评估指标与方法。对配电网用电可靠性进行定义,对LRP责任区分进行阐明,并在此基础上从供电持续性、LRP影响、全局性和对比性4个维度建立配电网用电可靠性评估指标体系,其中重点从结果、过程及影响范围特征上对LRP影响进行描述,并提出全局性指标和对比性指标以满足实际工程中的单指标评估。对于供电持续性及LRP影响,考虑指标间相关性提出网络层次分析法、改进相关性权重法和改进逼近理想点排序法相结合的综合评估模型,以对用电可靠性进行综合评估。实例分析表明,所提指标与方法能对用户受到的停电影响进行精细化描述。

**关键词:**负荷恢复过程;配电网;用电可靠性;评估指标;评估方法

**中图分类号:**TM 732

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202102022

## 0 引言

随着我国供电可靠性水平的不断提高,传统以是否停电及停电过程特征作为统计范畴的供电可靠性评估逐渐难以适应配电网的精细化管理,难以为配电网升级改造等规划工作提供更加行之有效的指导。

用电可靠性是在传统供电可靠性的基础上提出的,目的是对用户用电感受进行进一步的精细化描述。目前围绕用电可靠性的研究还较少,文献[1]将供电可靠性统计范围向低压用户侧延伸以提高评估准确度。文献[2-3]对向低压用户侧延伸的供电可靠性统计方法进行研究。文献[4]对用电信息采集系统应用现状以及发展趋势进行阐述。文献[5]建立了考虑用电可靠性的客户用电信息管理系统。文献[6]提出配电网用电可靠性定义,计及了电能质量和低压线路带来的可靠性问题。文献[7]在文献[6]的基础上提出智能配电网用电可靠性提升对象选优。文献[8]提出等效停电次数指标及其量化方法,旨在反映电压暂降对用电可靠性的影响。文献[9]提出一种电压偏低型隐性缺供电量的计算方法,量化了持续供电下电能不可用对用电可靠性的影响。

以上对用电可靠性的研究主要为:将供电可靠性向低压侧延伸;将电能质量与供电可靠性一并考虑为用电可靠性。但上述研究存在以下问题:①行业标准已对低压用户统计单位进行明确定义<sup>[10]</sup>,向低压侧延伸仍属供电可靠性范畴;②电能质量与供电可靠性的综合考虑实则属于供电质量评估范畴<sup>[11]</sup>,将其一并考虑为用电可靠性虽有一定意义,但并未很

好地从定义上对供电可靠性进行进一步精细化描述。

另外,业界采用的用户停电损失指标<sup>[12-15]</sup>,虽然致力于从经济损失层面考虑停电对用户的影响,但其用于可靠性评估时存在以下问题:①指标获取过程多采用用户调查和估算的方式,未能很好地利用基于智能电表的海量电能数据,精细化水平较低;②侧重于用户的经济损失,实属供电可靠性在经济层面的延伸,未从定义上对供电可靠性进行进一步精细化描述,无法考虑停电影响过程特征对用户用电感受的影响。各类自动化生产线、化工企业、钢铁企业等从复电时刻到正常生产之间的负荷恢复过程(LRP)所经历的时间由十几分钟到几小时不等。对于用户而言,停电后的LRP严重影响用户的用电感受及其对高供电可靠性的理解;对于企业而言,配电网升级改造下的增容扩建、柔性直流化、多能配置等规划对象优选都必须对用户用电需求情况进行充分考虑。

对此,本文充分考虑LRP对用户用电体验的影响,提出考虑LRP的配电网用电可靠性评估指标与方法。首先对配电网用电可靠性进行定义,阐明LRP的责任区分,提出配电网用电可靠性评估指标体系,从时间、缺供电量、用户情况方面考虑LRP影响;然后考虑指标间相关性,结合主、客观权重模型,基于组合优化模型求解综合权重,利用改进逼近理想点排序法(TOPSIS)求解综合评估值,评估结果可为配电网升级改造等规划工作提供精细化指导;最后通过实例分析验证所提指标与方法的合理性。

## 1 用电可靠性概念及评估指标

### 1.1 用电可靠性定义及LRP责任区分

#### 1.1.1 用电可靠性定义

从供电可靠性和LRP影响引出本文适用的用电

收稿日期:2020-06-23;修回日期:2020-12-18

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(2016A030313476)

Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province(2016A030313476)

可靠性定义。①供电可靠性:配电网对用户持续供电的能力<sup>[10]</sup>,反映停电对用户从配电网持续获取所需电能的直接影响。②LRP影响:配电网从停电状态恢复到供电状态后,用户仍在一段时间内受到停电的影响,反映停电对用户从配电网持续获取所需电能的间接影响。③用电可靠性:用户能持续不间断地从配电网获得所需电能的能力,反映停电对用户从配电网持续获取所需电能的总影响。上述三者的时序关系见附录中图A1。

### 1.1.2 LRP责任区分

在本文使用的用电可靠性分析中LRP隶属于停电事件的后果,停电状态和LRP为一个整体过程。即LRP对用户获取所需电能的影响归咎于停电事件的发生是停电事件影响的延续。即因果层面LRP应由停电事件负责。

LRP属于用户用电设备的启动过程,在产权层面LRP由用户负责,但由于当今技术条件的限制,用电设备的启动过程固然存在,一定程度上很难消除或缩短。而对存在LRP的用户,减小其停电事件发生次数是消减LRP影响的有效途径。因此从可靠性层面将LRP影响归咎于停电事件的发生是合理的。

本文使用的用电可靠性评估能有效反映停电对电力用户的直接影响和间接影响,评估结果在提高可靠性辨识度同时,可有效筛选出受LRP影响严重的配电网并指导配电网升级改造等规划工作。

## 1.2 评估指标体系

根据配电网用电可靠性定义,建立考虑LRP的配电网用电可靠性评估指标体系,如图1所示。

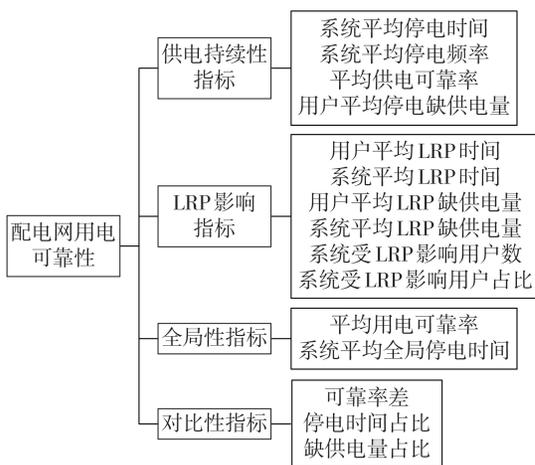


图1 考虑LRP的配电网用电可靠性指标体系

Fig.1 Reliability index system of distribution network for power consumer considering LRP

### 1.2.1 供电持续性指标

供电持续性指标用来反映用户受配电网停电的直接影响,反映了供电可靠性情况,是配电网对用户持续供电的能力表现。根据行业标准<sup>[10]</sup>,本文从时

间、频率、可靠率及缺供电量4个方面对供电持续性进行表征,包括系统平均停电时间 $t_{SAIDI}$ 、系统平均停电频率 $f_{SAIFI}$ 、平均供电可靠率 $r_{ASAI}$ 、用户平均停电缺供电量 $e_{AENS}$ <sup>[10]</sup>。

### 1.2.2 LRP影响指标

LRP影响指标用来反映停电对用户的间接影响,是用户对配电网停电复电后电能接纳能力的表现。本文从LRP时间、LRP缺供电量和LRP用户3个方面对LRP影响进行表征。

#### (1)LRP时间指标。

定义LRP时间为用户进线端电压恢复到额定值附近后,用户用电功率从0附近恢复到正常值附近所经历的时间。由于LRP隶属于停电事件的后果,因此,当停电事件发生后,无论是持续停电还是短时停电,对于某一时段的某一确定用户,其所经历的LRP将基本一致,如图2所示。利用附录中图A2所示流程图确定用户的LRP是否由停电产生并统计单位用户的LRP时间。LRP时间指标是反映LRP结果的量纲,用于衡量用户的复电能力。

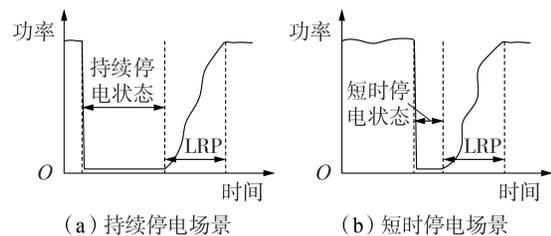


图2 LRP影响示意图

Fig.2 Schematic diagram of LRP influence

由于系统内并非所有用户都存在LRP,因此本文提出的LRP时间指标分为用户平均LRP时间 $t_{ARTC}$ 和系统平均LRP时间 $t_{ARTS}$ ,其表达式为:

$$t_{ARTC} = \sum_{j=1}^{N_E} \frac{t_{RTCj}}{N_E} \quad (1)$$

$$t_{RTCj} = \sum_{i=1}^{N_j} \frac{t_{RTCji}}{N_E}$$

$$t_{ARTS} = \sum_{j=1}^{N_E} \frac{t_{RTCj}}{N} \quad (2)$$

其中, $t_{RTCj}$ 为用户 $j$ 统计期间的LRP总时间; $N_E$ 为系统内存在LRP的用户数; $t_{RTCji}$ 为用户 $j$ 第 $i$ 次LRP时间; $N_j$ 为用户 $j$ 统计期间由停电造成的LRP次数; $N$ 为系统总用户数。

根据附录中图A2,统计单位用户LRP时间时,考虑到复电通知效率,LRP的有功负荷功率 $P_N$ 下限阈值可设为 $\alpha P_N(t_s)$ ( $t_s$ 为LRP的起始时刻, $\alpha=0.1$ );考虑到用户负荷特性随机性,LRP的有功负荷功率上限阈值可设为 $\beta P_N(t_e)$ ( $t_e$ 为LRP的终止时刻, $\beta=0.9$ )。另外,受智能电表采样间隔(通常为15 min)

的限制,本文主要考虑超过30 min的LRP。

上述 $P_N(t)$ 为正常运行时的有功负荷功率,为时间的函数。 $P_N(t)$ 的确定是本文获取LRP时间指标及下文LRP缺供电量指标的关键,由于本文主要以中压用户为统计单位,且考虑到具有明显LRP特征的用户通常为大用户,其用电需求稳定性高,负荷特性规律明显,故本文挖掘用户历史用电数据,基于最大隶属度原则获取所需时段的 $P_N(t)$ ,具体步骤如下。

a. 配电网数据采集与监控(SCADA)系统获取LRP用户停电时刻前的多时刻(取96个采样点)负荷数据向量 $P_S=[P_1, P_2, \dots, P_{48}, \dots, P_{96}]^T$ ,以对停电前的日负荷曲线形态进行精细刻画。

b. SCADA系统获取上述对应采样时刻的用户历史用电有功功率数据矩阵 $P$ ,其表达式为:

$$\begin{cases} P=[P'_1, P'_2, \dots, P'_d, \dots, P'_D] \\ P'_d=[P'_1, P'_2, \dots, P'_{48}, \dots, P'_{96}]^T \end{cases} \quad (3)$$

其中, $D$ 为对应时刻历史用电数据的条数; $P'_d$ 为第 $d$ 条对应时刻历史用电数据向量。

c. 基于最大隶属度原则确定 $P_S$ 的最大隶属历史样本数据向量 $P'_d^*$ ,拟通过 $P'_d^*$ 所属负荷曲线 $P'_d^*(t)$ 对所需 $P_N(t)$ 特征进行描述。

d. 考虑 $P'_d^*(t)$ 与 $P_N(t)$ 在幅值上的差异,引入幅值修正系数 $\xi$ 对 $P'_d^*(t)$ 幅值进行修正,得到所需时段 $P_N(t)$ ,其表达式为:

$$P_N(t)=\xi P'_d^*(t) \quad (4)$$

(2) LRP缺供电量指标。

LRP缺供电量指标从电量层面反映LRP对用户用电可靠性的影响程度,指用户进线端电压恢复到额定值附近后,由于功率不能瞬时恢复而产生的供电量缺额。统计期间用户 $j$ 的LRP缺供电量 $\Delta W_j$ 为:

$$\Delta W_j = \sum_{i=1}^{N_j} \int_{t_0}^{t_0+t_{RTCi}} (P_{Nji} - P_{Tji}) dt \quad (5)$$

其中, $t_0$ 为统计的LRP起始时刻; $P_{Nji}$ 为用户 $j$ 第 $i$ 次LRP对应时间段的正常运行有功负荷曲线; $P_{Tji}$ 为用户 $j$ 在第 $i$ 次LRP的实际用电有功负荷曲线。

以智能电表的电能量数据采样间隔 $\Delta t$ 对缺供电量进行离散计算,即配电网LRP缺供电量 $\Delta W$ 为:

$$\begin{cases} \Delta W = \sum_{j=1}^{N_E} \Delta W_j = \sum_{j=1}^{N_E} \sum_{i=1}^{N_j} \Delta W_{ji} = \\ \sum_{j=1}^{N_E} \sum_{i=1}^{N_j} \sum_{k=0}^{N_s^i-1} \frac{P_{Nji}(t_k) - P_{Tji}(t_k) + P_{Nji}(t_{k+1}) - P_{Tji}(t_{k+1})}{2} \Delta t \\ N_s^i = \lfloor t_{RTCi} / \Delta t \rfloor \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\Delta t$ 为智能电表采样间隔; $N_s^i$ 为用户 $j$ 第 $i$ 次LRP的采样次数; $P_{Nji}(t_k)$ 、 $P_{Tji}(t_k)$ 分别为用户 $j$ 第 $i$ 次LRP第 $k$ 个采样点对应时刻的正常运行有功负荷功

率和实际用电有功负荷功率; $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。

定义用户平均LRP缺供电量 $e_{ARSEC}$ 和系统平均LRP缺供电量 $e_{ARSES}$ 分别如式(7)和式(8)所示。

$$e_{ARSEC} = \Delta W / N_E \quad (7)$$

$$e_{ARSES} = \Delta W / N \quad (8)$$

由式(6)~(8)知,LRP缺供电量指标以每个终端中压用户为统计单位,通过用户负荷曲线上的采样点功率值计算电量积分值,将缺供电量计算归结为功率值的获取。LRP缺供电量指标较好地反映了LRP的特征,从电量层面反映用户停电的隐性代价。

(3) LRP用户指标。

LRP用户指标用来反映配电网中受LRP影响的用户情况,包括系统受LRP影响用户数 $m_{NR}$ 和系统受LRP影响用户占比 $d_{PR}$ 这2个指标。 $m_{NR}$ 在一定程度上反映了统计配电网中用电直观感受低于传统供电可靠性的用户数。 $d_{PR}$ 的表达式为:

$$d_{PR} = m_{NR} / N \quad (9)$$

LRP用户指标对配电网中存在LRP的用户情况进行描述,反映了LRP的影响范围特征。

1.2.3 全局性指标

(1) 平均用电可靠率。

实际工程中,平均供电可靠率 $r_{ASAI}$ 常用于供电可靠性的单指标评估。为在可靠率中有效计及LRP对电力用户持续获取所需电能的影响,本文提出计及LRP的平均用电可靠率指标 $r_{ASAI}^*$ ,表达式如下:

$$\begin{cases} r_{ASAI}^* = [1 - (t_{SAIDI}^* + t_{ARTS}^*) / 8760] \times 100\% \\ t_{ARTS}^* = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_E} \sum_{i=1}^{N_j} t_{ARTSji}^* \\ t_{ARTSji}^* = t_{RTCji} (1 - \bar{P}_{Tji} / \bar{P}_{Nji}) = \\ \frac{t_{RTCji} (\bar{P}_{Nji} - \bar{P}_{Tji})}{\bar{P}_{Nji} t_{RTCji}} = \frac{\Delta W_{ji}}{\bar{P}_{Nji}} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $t_{ARTS}^*$ 为系统平均LRP等效停电时间; $t_{ARTSji}^*$ 为用户 $j$ 第 $i$ 次LRP的等效停电时间; $\bar{P}_{Nji}$ 、 $\bar{P}_{Tji}$ 分别为 $P_{Nji}(t_k)$ 、 $P_{Tji}(t_k)$ 的均值。

由于LRP中用户用电容量不断变化且功率因数波动较大,若通过LRP用电容量与实际用电容量的比值计算LRP等效停电时间将存在一定难度且有较大误差,因此式(10)利用有功积分与有功均值的比值对LRP等效停电时间进行计算,如图3所示。

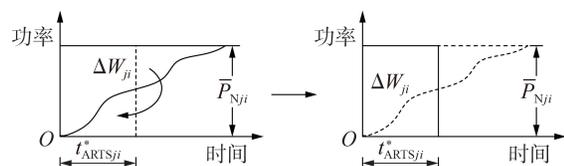


图3 等效停电时间

Fig.3 Equivalent interruption duration time

(2)系统平均全局停电时间。

将系统平均停电时间和系统平均LRP等效停电时间之和定义为系统平均全局停电时间 $t_{SAIDI}^*$ ,即:

$$t_{SAIDI}^* = t_{SAIDI} + t_{ARTS}^* \quad (11)$$

### 1.2.4 对比性指标

为了直接反映LRP对用户持续可靠用电的影响程度,以相应供电可靠性指标为基准引入反映LRP影响程度的对比性指标,包括可靠率差 $\Delta r_{ASAI}$ 、停电时间占比 $p_{RT}$ 和缺供电量占比 $p_{RSE}$ ,分别定义如下:

$$\begin{cases} \Delta r_{ASAI} = r_{ASAI} - r_{ASAI}^* \\ p_{RT} = \frac{t_{ARTS}}{t_{SAIDI}} \times 100\% \\ p_{RSE} = \frac{e_{ARSES}}{e_{AENS}} \times 100\% \end{cases} \quad (12)$$

## 2 综合评估模型

为了对考虑供电持续性和LRP影响的用电可靠性进行评估,设计了一套综合评估模型:①基于主、客观权重模型对综合权重进行求解;②基于改进TOPSIS对综合评估值进行求解;③根据综合评估结果得到配电网用电可靠性优劣排序。综合评估流程图见图4。

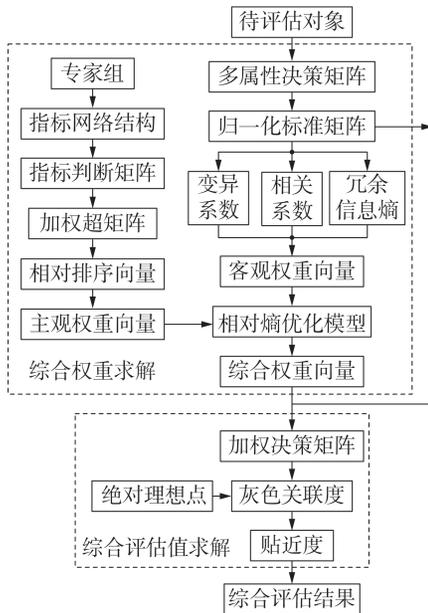


图4 综合评估流程图

Fig.4 Flowchart of comprehensive assessment

### 2.1 综合权重求解

在用电可靠性综合评估中,指标权重的合理性直接影响评估结果的可信度。单纯的主、客观模型均具片面性,评估结果可信度不大;且LRP隶属停电事件的后果,供电持续性和LRP影响间具有较强的关联关系。因此本文结合考虑指标间关联和反馈关系的网络层次分析法(ANP)和考虑指标间相关性的

改进相关性权重(CRITIC)法分别计算主、客观权重,并通过相对熵组合优化模型求解综合权重,在有效应对指标关联性的同时避免主、客观权重的缺陷。

#### 2.1.1 指标预处理

设 $m$ 个评估对象 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ 具有共同的 $n$ 个指标 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ ,且评估对象 $S_p$ 的指标 $I_q$ 对应的指标值为 $x_{pq}$  ( $p = 1, 2, \dots, m; q = 1, 2, \dots, n$ )。对由 $m$ 个对象 $n$ 个指标组成的多属性决策矩阵 $X = [x_{pq}]_{m \times n}$ 进行预处理,形成归一化标准矩阵 $C = [c_{pq}]_{m \times n}$ ,其中 $c_{pq}$ 的表达式为:

$$c_{pq} = \begin{cases} \frac{x_{pq} - \min\{X_q\}}{\max\{X_q\} - \min\{X_q\}} & I_q \in I_{\text{benefit}} \\ \frac{\max\{X_q\} - x_{pq}}{\max\{X_q\} - \min\{X_q\}} & I_q \in I_{\text{cost}} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $X_q$ 为 $X$ 中第 $q$ 列向量;函数 $\max\{X_q\}$ 、 $\min\{X_q\}$ 分别表示取 $X_q$ 中元素的最大值、最小值; $I_{\text{benefit}}$ 、 $I_{\text{cost}}$ 分别为效益型、成本型指标集。

#### 2.1.2 主观权重求解

由于不同地区的配电网可靠性要求及服务水平不同,评估中对不同评估指标的重视程度应充分考虑专家意见。为解决本文指标体系中不同指标间相互影响相互依存的问题,本文通过ANP确定指标主观权重<sup>[16]</sup>。根据指标间的关联和反馈关系构建指标网络结构,如图5所示。

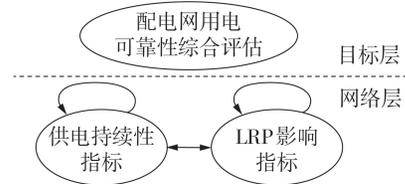


图5 用电可靠性综合评估网络拓扑

Fig.5 Network topology of power consumer reliability comprehensive assessment

网络结构中不设准则层,目标层为配电网用电可靠性综合评估值,网络层中各指标集存在自相关和互相关关系。假设网络层共有 $H$ 个指标集 $I'_1, I'_2, \dots, I'_H$ ,对于 $H$ 个指标集中任意2个指标集 $I'_h = \{I'_{h1}, I'_{h2}, \dots, I'_{ho}\}$ 、 $I'_{h'} = \{I'_{h'1}, I'_{h'2}, \dots, I'_{h'o'}\}$  ( $h, h' = 1, 2, \dots, H$ ),以 $I'_{h'}$ 中指标 $I'_{h'o'}$  ( $o' = 1, 2, \dots, O'$ )为次准则,将 $I'_h$ 中指标按其影响进行比较,得 $O \times O'$ 维矩阵 $G_{hh'}$ ,表达式为:

$$G_{hh'} = \begin{bmatrix} g_{h1}^{(h'1)} & \dots & g_{h1}^{(h'o')} \\ \vdots & & \vdots \\ g_{ho}^{(h'1)} & \dots & g_{ho}^{(h'o')} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中,各列向量为 $I'_h$ 中评估指标对 $I'_h$ 中各评估指标的重要程度排序向量。对 $h, h'=1, 2, \dots, H$ 重复上述步骤得到超矩阵 $\mathbf{G}$ ,由各指标集对应排序向量得到超矩阵 $\mathbf{G}$ 中各元素权重系数 $a_{hh'}$ ,进而得到加权超矩阵 $\bar{\mathbf{G}}$ ,表达式为:

$$\bar{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} a_{11}\mathbf{G}_{11} & \cdots & a_{1H}\mathbf{G}_{1H} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{H1}\mathbf{G}_{H1} & \cdots & a_{HH}\mathbf{G}_{HH} \end{bmatrix} \quad (15)$$

计算超矩阵 $\mathbf{G}$ 极限相对排序向量 $\mathbf{G}^\infty$ ,表达式为:

$$\mathbf{G}^\infty = \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H \bar{\mathbf{G}}^h \quad (16)$$

得到稳定矩阵后,各行非零值均相等,其行值即为各评估指标主观权重。将得到的主观权重向量记为 $\mathbf{U}=[u_q]_{1 \times n}$ 。

### 2.1.3 客观权重求解

鉴于用电可靠性指标间具有较强的相关性,本文通过可兼顾不同指标间相关性和同一指标不同对象间对比强度、离散性的改进CRITIC法确定客观权重,以解决相关性对指标数据价值信息的影响,获取更加合理准确的指标客观权重。改进CRITIC法客观权重计算模型为:

$$\begin{cases} v_q = M_q / \sum_{q=1}^n M_q \\ M_q = (s_q + \rho_q) \sum_{q=1}^n (1 - r_{qq'}) \\ s_q = \frac{1}{\bar{c}_q} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{p=1}^m (c_{pq} - \bar{c}_q)^2} \\ r_{qq'} = \frac{\text{cov}(\mathbf{C}_q, \mathbf{C}_{q'})}{s_q s_{q'}} \\ \rho_q = 1 + \frac{1}{\ln m} \sum_{p=1}^m z_{pq} \ln z_{pq} \\ z_{pq} = c_{pq} / \sum_{n=1}^m c_{pq} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $q, q'=1, 2, \dots, n$ ,且 $q \neq q'$ ;  $v_q$ 为评估指标 $I_q$ 的改进CRITIC法权重; $M_q$ 为评估指标 $I_q$ 所含信息量, $M_q$ 越大说明 $I_q$ 所含信息量越大,即 $I_q$ 越重要; $s_q, s_{q'}$ 分别为评估指标 $I_q$ 和 $I_{q'}$ 的变异系数; $\bar{c}_q$ 为评估指标 $I_q$ 的标准化指标值均值; $r_{qq'}$ 为评估指标 $I_q$ 和 $I_{q'}$ 的相关系数; $\text{cov}(\mathbf{C}_q, \mathbf{C}_{q'})$ 为标准矩阵 $\mathbf{C}$ 中第 $q$ 列和第 $q'$ 列的协方差; $\rho_q$ 为评估指标 $I_q$ 的冗余信息熵; $z_{pq}$ 为归一化指标值比重。则改进CRITIC法得到的客观权重向量为 $\mathbf{V}=[v_q]_{1 \times n}$ 。

### 2.1.4 综合权重求解

本文建立如式(18)所示的基于相对熵的综合权重优化模型,以求解与主、客观权重一致性最好的综合权重 $w_q$ 。

$$\begin{cases} \min Q(\boldsymbol{\lambda}) = \sum_{\eta=u,v} \sum_{q=1}^n w_q \ln \frac{w_q}{\eta_q} \\ \text{s.t.} \quad \sum_{\eta=u,v} \lambda_\eta = 1, w_q = \sum_{\eta=u,v} \lambda_\eta \eta_q \end{cases} \quad (18)$$

其中,决策变量为 $\boldsymbol{\lambda}=(\lambda_u, \lambda_v)^T$ ;  $Q(\boldsymbol{\lambda})$ 为最小化相对熵函数。经最小化相对熵函数获得最优解 $\boldsymbol{\lambda}^*$ ,进而求得综合权重向量 $\mathbf{W}=[w_q]_{1 \times n}$ 。

### 2.2 综合评估值求解

计算出指标综合权重后,直接通过加权求和获得的评估结果忽略了综合评估值与各指标间的非线性函数关系,难以确保评估结果的准确性和合理性。因此,本文引入改进TOPSIS,依据评估对象与理想点间的距离实现用电可靠性的优劣排序。

根据确定的综合权重向量和标准化属性决策矩阵,计算出加权决策矩阵 $\mathbf{Y}=[y_{pq}]_{m \times n}$ ,其中 $y_{pq}$ 的表达式为:

$$y_{pq} = w_q c_{pq} \quad (19)$$

为解决传统TOPSIS中评估对象数量变化引起的逆排序问题,本文引入绝对理想点向量,将加权决策矩阵的正理想点向量固定为 $\mathbf{Y}^+=[1, 1, \dots, 1]_{1 \times n}$ ,负理想点向量固定为 $\mathbf{Y}^-=[0, 0, \dots, 0]_{1 \times n}$ 。同时为提高评估结果灵敏度,通过灰色关联度法计算评估对象与理想对象的“距离”,表达式为:

$$d_p^{+(-)} = \sum_{q=1}^n \frac{\min_p \min_q \Delta y_{pq}^{+(-)} + \rho \max_p \max_q \Delta y_{pq}^{+(-)}}{\Delta y_{pq}^{+(-)} + \rho \max_p \max_q \Delta y_{pq}^{+(-)}} \quad (20)$$

其中, $\max_p \max_q \Delta y_{pq}^{+(-)}$ 、 $\min_p \min_q \Delta y_{pq}^{+(-)}$ 分别为不同 $p, q$ 对应的 $\Delta y_{pq}^{+(-)}$ 中的最大值、最小值; $d_p^{+(-)}$ 为评估对象 $S_p$ 与正(负)理想点的灰色关联度; $\Delta y_{pq}^+ = |y_{pq} - 1|$ ;  $\Delta y_{pq}^- = |y_{pq} - 0|$ ;  $\rho$ 为分辨系数,本文取0.2。

计算各评估对象相对理想点的贴近度 $f_p$ ,表达式为:

$$f_p = d_p^+ / (d_p^+ + d_p^-) \quad (21)$$

贴近度越大,表明评估对象越接近理想对象,说明评估对象用电可靠性越高。

## 3 实例分析

基于上述评估指标与方法,选取我国南方某省市6个10 kV配电网进行实例分析,记为 $S_1$ — $S_6$ 。统计计算得到6个配电网的评估指标数据,见附录中表A1。6个配电网基于不同评估指标体系的评估结果见附录中表A2。为避免部分评估指标间线性相关对综合评估结果准确性的影响,评估过程中采用Delphi法<sup>[17]</sup>在线性相关指标中选取代表性评估指标作为综合评估指标。

### 3.1 综合评估结果分析

在综合评估中应尽量保证评估指标间线性无关,以提高评估结果准确性。

例如供电持续性指标中平均供电可靠率和系统平均停电时间虽然都是描述供电可靠性的重要指标,但后者可通过前者线性变化直接获得,二者在标准化矩阵中具有一致的归一化值,故在综合评估中保留其一即可。基于Delphi法,本文通过供电持续性指标中的系统平均停电时间、系统平均停电频率和用户平均停电缺供电量指标对供电可靠性进行表征,并通过上述3个指标和LRP影响综合表征用电可靠性。

由附录中表A2可知,6个评估对象的供电可靠排序结果为 $S_1 > S_2 > S_3 > S_4 > S_5 > S_6$  (“>”表示优于,下文同);LRP影响排序结果为 $S_3 > S_1 > S_4 > S_2 > S_6 > S_5$ ;用电可靠性排序结果为 $S_2 > S_1 > S_4 > S_3 > S_5 > S_6$ 。可见,用电可靠性排序结果与传统供电可靠性的排序结果差异主要体现在 $S_1$ 、 $S_2$ 和 $S_3$ 、 $S_4$ 的位次上。

以 $S_1$ 、 $S_2$ 为例进行说明,由附录中表A1知, $S_1$ 的供电可靠率、用户平均停电缺供电量均优于 $S_2$ ,但在系统平均停电频率上劣于 $S_2$ ,但综合考虑3个指标及相应权重后 $S_1$ 的供电可靠性优于 $S_2$ 。然而用电可靠性评估结果却为 $S_2 > S_1$ ,与供电可靠性评估结果相反,这主要因为用电可靠性在传统供电可靠性的基础上考虑了LRP影响,由表A1知, $S_2$ 的6个LRP影响指标中,除用户平均LRP时间指标以外,其余5个评估指标均优于 $S_1$ ,根据表A1也可知, $S_2$ 的LRP影响评估结果为0.6888,优于 $S_1$ 的0.6427,即 $S_2$ 的LRP影响小于 $S_1$ ,综合考虑供电持续性和LRP影响2个方面的因素后,用电可靠性评估结果为 $S_2 > S_1$ 。对于 $S_3$ 、 $S_4$ 有类似分析,这里不再赘述。

总体而言,配电网用电可靠性评估综合考虑了供电持续性(传统供电可靠性反映的内容)和LRP影响2个方面的因素,对用户受到的停电影响进行精细化描述,以发现存在潜在可靠性问题的配电网,更加合理地指导配电网的升级改造。

### 3.2 评估方法比较分析

为进一步说明所提评估方法的合理性,分别采用ANP、改进CRITIC法、文献[18]方法(改进层析分析法-CRITIC法)和本文方法对上述6个配电网的用电可靠性进行评估,所得综合评估结果如图6所示,图中 $F$ 为用电可靠性综合评估值。

通过图6的直观对比可见,评估方法的选择对评估结果有着显著影响。其中,ANP的评估结果为 $S_2 > S_1 > S_3 > S_4 > S_5 > S_6$ ,这是因为ANP的指标权重仅由决策者主观确定,忽视了指标客观价值信息。改进CRITIC法评估结果为 $S_2 > S_1 > S_4 > S_3 > S_6 > S_5$ ,这是因为纯客观方法忽略了专家意见在决策中的重要性,导

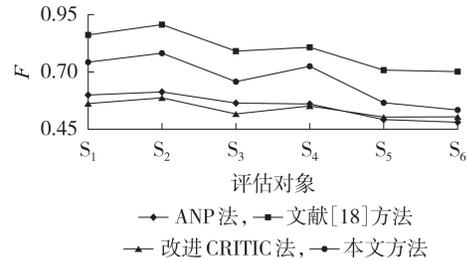


图6 不同评估方法下的综合评估结果比较

Fig.6 Comparison of comprehensive assessment results under different evaluation methods

致评估结果出现偏差。文献[18]方法得到的评估结果虽与本文一致,均为 $S_2 > S_1 > S_4 > S_3 > S_5 > S_6$ 。但相较于前者,本文方法在专家决策过程中考虑了评估指标间的关联和反馈关系,在客观价值信息处理过程中全面计及评估指标数据的对比强度、冲突程度和离散性,评估结果更加准确。另外本文方法得到的评估结果灵敏度为46.48%,也明显优于文献[18]方法的29.25%。

总体而言,本文方法得到的评估结果更加合理准确且辨识度更大,能很好地适用于配电网用电可靠性评估。

### 3.3 全局性指标及对比性指标

为更直观反映用电可靠性与传统供电可靠性在评估结果上的差异及LRP对用户用电体验的影响程度,通过全局性指标和对比性指标对其进行描述。

#### 3.3.1 全局性指标分析

供电可靠率和系统平均停电时间是传统供电可靠性评估的重要指标,实际工程中可通过上述指标直接反映供电可靠性情况。同样,利用单指标对用电可靠性情况进行直接反映,可有效简化评估过程。基于全局性指标的评估结果见图7。

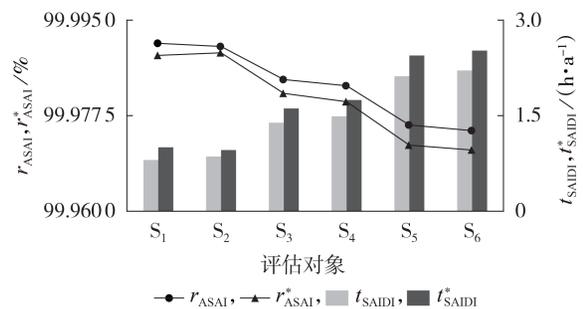


图7 全局性指标评估结果

Fig.7 Assessment results of global index

通过图7新旧指标的纵向对比可见,全局性指标中用电可靠率和系统平均全局停电时间评估值均低于传统供电可靠性中的供电可靠率和系统平均停电时间,这主要是由于前者考虑了LRP影响,对停电影响的描述更加精细化。

通过图7新旧指标的横向对比可见,对于 $S_1$ 、 $S_2$ ,

单指标评估结果由旧指标的  $S_1 > S_2$  变为新指标的  $S_2 > S_1$ , 这主要是由于  $S_1$  受到的 LRP 影响明显小于  $S_2$ , 综合考虑传统停电过程和 LRP 后有  $S_2 > S_1$ , 可见考虑 LRP 后的全局性指标对停电影响的评估结果更加准确。

总体而言,相较于传统的供电可靠率或系统平均停电时间,考虑 LRP 的全局性指标对停电影响的描述更加精细化,且评估结果更加准确。

### 3.3.2 对比性指标分析

通过对比性指标可较直观地反映 LRP 对用户用电体验的影响程度。基于对比性指标的评估结果见图 8。

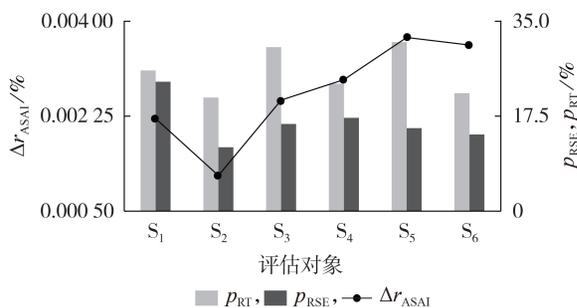


图8 对比性指标评估结果

Fig.8 Assessment results of comparison index

对比性指标以传统供电可靠性为基准,一定程度上反映了配电网存在的潜在可靠性问题。根据图 8 可知,  $S_1$  的缺供电量占比指标处于最高水平,为 23.83%, 即  $S_1$  停电造成的潜在缺供电量相对于传统停电过程缺供电量,在 6 个配电网中处于最严重情况,且  $S_1$  存在约为传统停电过程缺供电量 23.83% 的 LRP 缺供电量,该值是可观的,需引起一定注意。

简言之,对比性指标可较为直观地反映配电网存在的潜在可靠性问题,指导用户和电网规划部门及时采取相应可靠性提升措施。

## 4 结论

针对传统供电可靠性没有考虑 LRP 对用户用电体验影响的问题,本文围绕配电网用电可靠性展开研究。对配电网用电可靠性进行定义,对 LRP 责任区分进行阐明,构建了配电网用电可靠性评估指标体系,提出了 ANP、改进 CRITIC 法和改进 TOPSIS 相结合的综合评估模型。经实例验证,得到主要结论如下:

(1)相较于传统供电可靠性指标体系,本文用电可靠性指标体系全面计及了停电事件的直接影响和间接影响,考虑了 LRP 结果、过程及影响范围特征,使得评估指标体系更加精细化、合理化;

(2)ANP-改进 CRITIC 法的主、客观权重模型有效考虑了指标间相关性,并在计及专家意见的同时,

充分利用指标数据的对比强度、冲突程度和离散性,使获得的指标综合权重更加合理、准确;

(3)本文所提指标体系、评估方法能对用户受到的停电影响进行精细化描述,以发现存在潜在可靠性问题的配电网,更加合理地指导配电网的升级改造,具有科学性和有效性。

本文研究了停电状态和 LRP 共同影响下的配电网用电可靠性问题,并首次提出了配电网用电可靠性的 LRP 影响指标。然而,在 LRP 时间和 LRP 缺供电量的基础数据获取上,由于采样颗粒度较大,主要考虑了超过 30 min 的恢复过程,对 LRP 的描述较为粗略,这势必造成计算指标产生偏差,影响评估结果准确性。在后续的研究中需对 LRP 进一步精细化描述,更加深入全面地评估不同时间尺度下的 LRP 影响。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 吕春泉,贾伟. 供电可靠性统计向低压网络扩展的研究及其实现[J]. 电网技术,2000,24(3):53-54,65.  
LÜ Chunquan, JIA Wei. Extension of power supply reliability statistics through to low voltage networks and its implementation[J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 53-54, 65.
- [2] 张腾,张波. 基于概率统计的低压用户供电可靠性评估算法[J]. 电网技术,2004,28(17):81-84.  
ZHANG Teng, ZHANG Bo. Power supply reliability evaluation for consumers in low voltage distribution network based on probability statistics[J]. Power System Technology, 2004, 28(17): 81-84.
- [3] 贾春娟. 低压供电可靠性故障模拟算法研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(2):76-78.  
JIA Chunjuan. Research on fault simulation algorithm of low-voltage power supply reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 76-78.
- [4] 胡江溢,祝恩国,杜新纲,等. 用电信息采集系统应用现状及发展趋势[J]. 电力系统自动化,2014,38(2):131-135.  
HU Jiangyi, ZHU Enguo, DU Xingang, et al. Application status and development trend of power consumption information collection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 131-135.
- [5] 刘利平,蔡广林,陈旭,等. 考虑用电可靠性的客户用电信息管理系统[J]. 电力自动化设备,2018,38(4):204-209.  
LIU Liping, CAI Guanglin, CHEN Xu, et al. Electricity information management system considering power utilization reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 204-209.
- [6] 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.
- [7] 莫一夫,张勇军. 基于变权灰关联的智能配电网用电可靠性提升对象优选[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(5):26-34.  
MO Yifu, ZHANG Yongjun. Optimal object selection of power utilization reliability promotion for smart distribution grid based on weighted grey correlation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 26-34.
- [8] 刘丽媛. 兼顾用户用电体验和电能质量的配电网供电可靠性

- 评估研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- LIU Liyuan. Research on power supply reliability evaluation of distribution system considering user experience and power quality[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2018.
- [9] 陈丹伶. 基于电能数据的配电网用电可靠性评估分析[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- CHEN Danling. Evaluation and analysis of distribution network power consumption reliability based on electric energy data[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2019.
- [10] 国家能源局. 配电网供电可靠性评价规程:DL/T 836.1—2016[S]. 北京:中国电力出版社,2016.
- [11] 中国电力企业联合会. 新型城镇化配电网发展评估规范:T/CEC 103—2016[S]. 北京:中国电力出版社,2016.
- [12] 周莉梅,范明天. 城市电网用户停电损失估算及评价方法研究[J]. 中国电力,2006,39(7):70-73.
- ZHOU Limei, FAN Mingtian. Research on customer outage cost assessment and its evaluation method in urban electric power network[J]. Electric Power, 2006, 39(7): 70-73.
- [13] 李蕊,李跃,苏剑,等. 配电网重要电力用户停电损失及应急策略[J]. 电网技术,2011,35(10):170-176.
- LI Rui, LI Yue, SU Jian, et al. Power supply interruption cost of important power consumers in distribution network and its emergency management[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 170-176.
- [14] 韩畅,梁博森,林振智,等. 防灾应急电源优化调度的机会约束规划方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):147-154.
- HAN Chang, LIANG Bomiao, LIN Zhenzhi, et al. Chance-constrained programming method for optimal scheduling of emergency power source[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 147-154.
- [15] 郑益,朱俊澎,袁越. 基于条件风险价值的风柴储孤岛微网经济风险评估[J]. 电力自动化设备,2019,39(11):57-63.
- ZHENG Yi, ZHU Junpeng, YUAN Yue. Economic risk assessment of wind-diesel-storage islanded microgrid based on conditional value at risk[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 57-63.
- [16] 禹明刚,余晓辉,权冀川,等. 面向任务与基于ANP的网络信息体系能力需求满足度分析方法[J]. 系统工程理论与实践,2020,40(3):795-806.
- YU Minggang, YU Xiaohui, QUAN Jichuan, et al. Task-oriented and ANP-based requirement satisfactory degree analysis method for net-centric information system-of-systems[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2020, 40(3): 795-806.
- [17] 冯超,周步祥,林楠,等. Delphi和GAHP集成的综合评价方法在电动汽车充电站选址最优决策中的应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):25-29.
- FENG Chao, ZHOU Buxiang, LIN Nan, et al. Application of comprehensive evaluation method integrating Delphi and GAHP in optimal siting of electric vehicle charging station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 25-29.
- [18] 赵书强,汤善发. 基于改进层次分析法、CRITIC法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):143-148,162.
- ZHAO Shuqiang, TANG Shanfa. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 143-148, 162.

#### 作者简介:



欧阳森

欧阳森(1974—),男,广西钦州人,副研究员,博士,主要从事电能质量、节能技术与智能电气等方面的研究工作(E-mail: ouyangs@scut.edu.cn);

杨墨缘(1997—),男,河南漯河人,硕士研究生,研究方向为配电网规划与评估(E-mail: 1243341584@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

## Reliability assessment indexes and methods of distribution network for power consumer considering load recovery process

OUYANG Sen, YANG Moyuan

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the LRP (Load Recovery Process) is not taken into account effectively in the traditional definition of power supply reliability, the reliability assessment indexes and methods of distribution network for power consumer considering LRP are proposed. The definition of distribution network reliability for power consumer is given, and the LRP responsibility distinction is clarified. On this basis, the comprehensive assessment index system of distribution network reliability for power consumer is established from the four dimensions of power supply continuity, LRP impact, global performance and comparability. The LRP impact is described from the results, process and impact range characteristics, and the global and comparative indexes are proposed to meet the requirements of single index evaluation in practical engineering. Considering the influence of power supply continuity and LRP, considering the correlation between indexes, a comprehensive assessment model combining analytic network process, improved criteria importance through intercriteria correlation and improved technique for order preference by similarity to an ideal solution is proposed to comprehensively assess the reliability for power consumer. The case analysis shows that the proposed indexes and methods can describe the impact of power outage on users in detail.

**Key words:** load recovery process; distribution network; reliability for power consumer; assessment indexes; assessment methods

## 附录

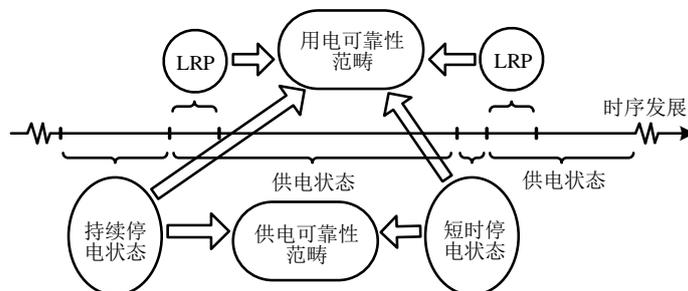


图 A1 供、用电可靠性时序关系

Fig.A1 Time series relationship of power supply and consumption reliability

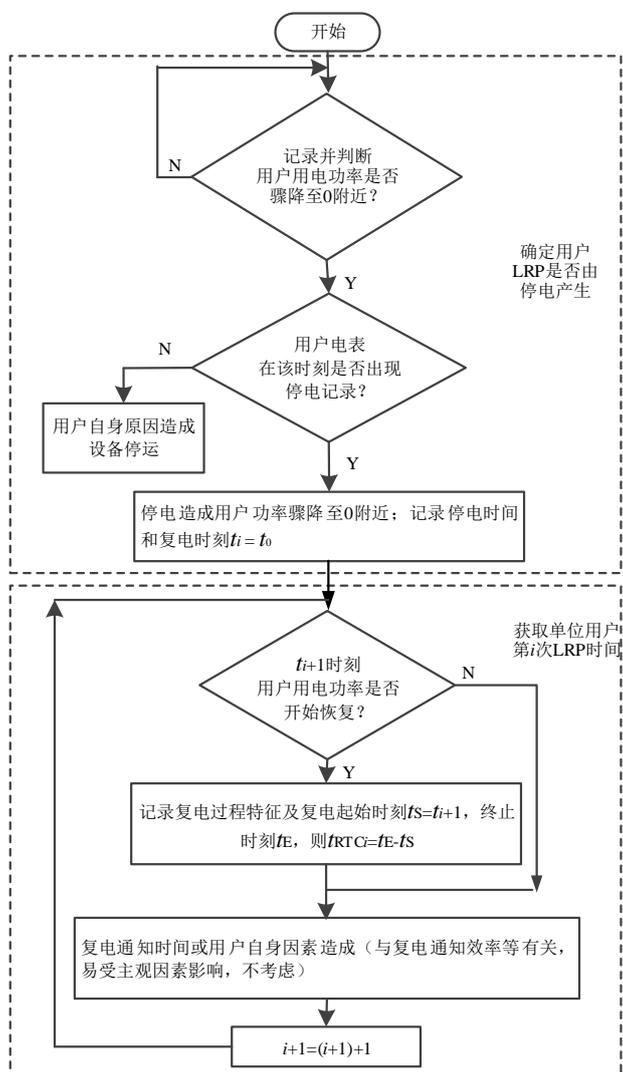


图 A2 LRP 时间基础数据获取

Fig.A2 Obtaining of LRP time basic data

表 A1 各评估配网的指标数据

Table A1 Index data of each distribution network

对象	$r_{ASAI}/\%$	$t_{SAIDI}/h$	$f_{SAIFI}/(\text{次 a}^{-1})$	$e_{AENS}/(\text{kW h})$	$t_{ARTC}/h$	$t_{ARTS}/h$	$e_{ARSEC}/(\text{kW h})$	$e_{ARSES}/(\text{kW h})$
S <sub>1</sub>	99.990 8	0.81	0.36	5 183.19	0.44	0.21	2 612.51	1 235.01
S <sub>2</sub>	99.990 2	0.86	0.33	5 522.06	0.48	0.18	1 739.22	648.52
S <sub>3</sub>	99.984 1	1.39	0.79	9 389.45	0.83	0.42	2 965.66	1 506.37
S <sub>4</sub>	99.983 0	1.49	0.84	10 190.11	1.13	0.35	5 669.21	1 750.78
S <sub>5</sub>	99.975 8	2.12	1.21	14 863.32	2.64	0.66	9 086.26	2 271.56
S <sub>6</sub>	99.974 8	2.21	1.26	16 272.23	2.71	0.48	12 963.09	2 297.26

对象	$m_{NR}/\text{户}$	$d_{PR}/\%$	$r_{ASAI}^*/\%$	$t_{SAIDI}^*/h$	$\Delta r_{ASAI}/\%$	$p_{RT}/\%$	$p_{RSE}/\%$
S <sub>1</sub>	26	47.27	99.988 6	1.003	0.002 2	25.93	23.83
S <sub>2</sub>	22	37.29	99.989 0	0.961	0.001 2	20.93	11.74
S <sub>3</sub>	32	50.79	99.981 6	1.613	0.002 5	30.22	16.04
S <sub>4</sub>	21	30.88	99.980 1	1.746	0.002 9	23.49	17.18
S <sub>5</sub>	19	25.00	99.972 1	2.444	0.003 7	31.13	15.28
S <sub>6</sub>	14	17.72	99.971 2	2.522	0.003 6	21.72	14.12

表 A2 不同对象综合评估结果

Table A2 Overall evaluation results of different objects

对象	供电可靠性		LRP 影响		用电可靠性	
	综合评估值	排序	综合评估值	排序	综合评估值	排序
S <sub>1</sub>	0.729 3	1	0.642 7	3	0.742 6	2
S <sub>2</sub>	0.727 1	2	0.688 8	1	0.782 0	1
S <sub>3</sub>	0.636 7	3	0.583 1	4	0.657 6	4
S <sub>4</sub>	0.618 9	4	0.647 5	2	0.724 7	3
S <sub>5</sub>	0.468 8	5	0.550 0	6	0.565 4	5
S <sub>6</sub>	0.430 0	6	0.557 3	5	0.533 9	6