

基于对象选优的配电网可靠性提升投资方法

叶琳浩¹, 杨雄平¹, 刘丽媛², 张诗建², 江浩侠²

(1. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510000; 2. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510640)

摘要:目前配电网可靠性改造实施对象的选择仅以供电可靠率为依据,难以切实提升用电体验,对此提出一种基于对象选优的配电网可靠性提升投资方法。首先,从供电可靠性水平、供电区域特点、用户期望和经济效益4个角度建立一套配电网可靠性提升需求度评价指标体系。然后,以可靠性提升需求度评价指标为基础,通过改进序关系法对配电网进行可靠性提升必要性评估排序。根据提升必要性评估结果,考虑总规划投资金额和各配电网的技改成本决定最终的可靠性提升方案。最后,以应用实例验证该文所提的可靠性提升选优方法具有较好的实际应用价值。

关键词:配电网;可靠性;对象选优;改进序关系法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.011 中图分类号:TM715 文章编号:1673-9140(2020)04-0084-07

A reliability promotion investment method for distribution network based on optimized selection of executive object

YE Linhao¹, YANG Xiongping¹, LIU Liyuan², ZHANG Shijian², JIANG Haoxia²

(1. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

2. Guangzhou Power Electric Technology Co., Ltd., Guangzhou 510670, China)

Abstract: At present, whether a distribution network needs to be improve is solely determined by its power supply reliability, which will make it difficult to enhance power consumption experience effectively. This paper proposes a reliability promotion investment method for distribution network based on object selection for the first time. Firstly, an index system to evaluate demands of distribution network reliability promotion is established including power supply reliability index, region characteristic index, customers' expect index and economic effect index. Based on the index system, the reliability promotion necessity of distribution network is evaluated and ranked by improved order relation method. According to evaluation results, final reliability promotion planning is determined by total investment and technical transformation cost of each distribution network. Finally, an application example proves that the planning method proposed in this paper shows effectiveness and practical application value.

Key words: distribution network; reliability; selection of executive object; improved order relation method

供电可靠性(reliability of power supply, RPS)是电网企业管理工作的重中之重,是智能电网发展的驱动力之一。基于供电可靠性评估的电网规划建设 and 运行调度越来越精益化^[1-4]。当前的研究多数是从可靠性评估的算法^[5-7]或者针对性建模^[8-9]方面来开展的,对推动电网企业的管理水平和服务质量起到了重要的指导作用。

应该看到,可靠性的提升都是有经济代价的,RPS 的提升与投资的回报率之间不可避免地存在冲突,如何在投资有限的情况下合理选择更有可靠性提升效果的项目进行投资决策,或者合理评估项目的必要性和优先级,成为工程界关注的焦点^[10-11]。文献[10]通过分析配电网的 RPS 成本与效益的影响因素,获得不同的 RPS 提升手段相应的边际成本曲线,提出了一种 RPS 成本与效益精益化评估方法,进而确定满足 RPS 目标的最经济提升策略。文献[11]建立了 RPS 提升策略与可靠性降低因素的关联矩阵,针对可靠性提升措施的选择,提出 RPS 提升策略的影响度指标和模型。总的来说,当前对可靠性规划最优方案的研究侧重于考虑提升策略的优选,少有考虑 RPS 改善实施对象的优选。

显然,RPS 提升项目选择仅仅依据单一指标来考虑是不够的,难以切实提升客户的用电体验^[12]。地区属性和发展进程不一样,主体用户的类型不一样,对 RPS 的要求也是不一样是的,并不能简单以供电可靠率的高低来决定 RPS 提升的必要性程度。同样的 RPS 指标,工业园区用户和小区居民用户的用电感受和停电损失可能相去甚远;在不同配电网实施相同的供电可靠率提升投资,能够给电网企业和用户带来的经济社会效益和价值^[13]也是有所不同的。RPS 的提升规划投资应要更好地为提高电网企业服务水平和客户满意度服务,优先改造可靠性提升需求较迫切且提升意义较大的配电网,切实提升客户用电体验,从提升对象角度实现规划投资的效益最大化。

针对上述问题,该文首次提出一种基于对象选优的配电网可靠性提升投资方法。首先,从 RPS 水平、供电区域特点、用户期望和经济效益 4 个维度建立可靠性提升需求度评价指标体系,并提出一种既能保证专家对指标的重要性排序不变,又能兼顾指

标数据特征的改进序关系法,通过改进序关系法对配电网进行可靠性提升必要性评估排序,确定改造的投资对象。最后,通过实际案例分析验证所提的评价指标和 RPS 对象选优方法的有效性。

1 可靠性提升的需求度评价

1.1 配电网可靠性提升需求度的内涵

虽然近年来在 RPS 方面的研究成果颇丰,但现阶段电网的发展水平决定了可靠性提升工作难以做到全覆盖的优化,需要一个逐个分析改造的循序渐进过程。可靠性提升工作的实施对象选择既要关注具体指标数据,也要兼顾不同区域的配电网的差异性。

配电网可靠性提升需求度的评估应该包括 RPS 水平、供电区域特点、用户期望和经济效益四个维度。通过需求度评估可以为 RPS 管理工作选出需求迫切、预期效益高的改造对象,从而用有限的投资发挥出更大的价值。

1.2 评价指标体系

可靠性提升需求度评价指标体系如表 1 所示。现有标准和研究通常通过可靠率、停电时间、停电次数 3 类指标来统计分析电力系统的 RPS 水平。由于供电可靠率由用户平均停电时间换算得出,2 个指标相关性较高,所以为了保证评估结果的合理性,该指标体系仅采用供电可靠率 RS_{-1} 和用户平均停电次数 $AITC_{-1}$ ^[14] 2 个指标来反映配电网 RPS 水平。

在 RPS 管理工作中,通常会考虑对供电区域分类,并制定差异化的控制目标。为了反映当前水平与该区域的期望值之间的差距,该文提出基于供电区分类的 RPS 差的指标 $\Delta RS(\%)$,即某区域配电网

表 1 评价指标体系

Table 1 Evaluation index system

属性	名称	符号	单位	记号
RPS 水平	供电可靠率	RS_{-1}	%	X_1
	用户平均停电次数	$AITC_{-1}$	次/户	X_2
区域特点	供电可靠性差	ΔRS	%	X_3
用户期望	负荷等级	L_u	—	X_4
	投诉频次	N_{uc}	次/年	X_5
经济效益	产电比	r_{ep}	元/(kW·h)	X_6

网的供电可靠率控制目标值与其实际统计值的百分比之差:

$$\Delta RS = RS_i - RS_{-1} \quad (1)$$

式中 RS_i 代表该评估对象的 RPS 控制目标值。

该文的供电区分类及 RPS 控制目标依据为南方电网《110 kV 及以下配电网规划指导原则》。不过,由于它并没有给出 F 类供电区的控制目标,为此该文补充 F 类 RS_i 为 99.50%。具体各类供电区分类的 RPS 控制目标参见文献[15]。

负荷等级 L_u :按用户负荷性质和重要程度分为特级、一级、二级和三级负荷[16]。由于 L_u 为非量化指标,可按等间隔原理量化赋值,即特级为 1,一级为 2/3,二级为 1/3,三级为 0。

投诉频次 N_{uc} :被评估对象每年收到的用户投诉总次数(次/年)。

此外,不同负荷的重要性程度也有差异,因此,不同用户对 RPS 的关心程度和期望也不一样。为此,该文采用 L_u 和 N_{uc} 来反映不同用户对 RPS 的重视和要求。

当然,评估对象的经济效益也应该成为 RPS 提升需求度评估的关键指标。该文选取产电比 r_{ep} (元/(kW·h))[17-18] 指标来评价区域配电网 RPS 提升工作对社会经济的效益体现。

2 提升需求评估和投资顺序确定

该文设计的基于对象选优的可靠性提升需求评估方法实施流程如图 1 所示。

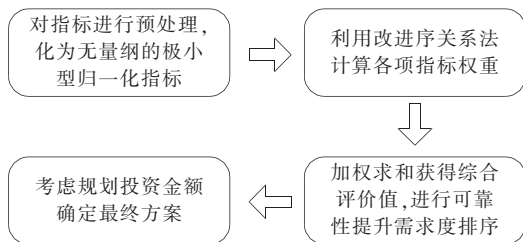


图 1 评估流程

Figure 1 Flowchart of evaluation

2.1 改进序关系法确定指标权重

传统的序关系分析法在指标权重计算的应用中简单灵活[19],不足之处在于对数据本身的客观规律利用不足、权重选取主观性太强。故该文对序关系

法进行了改进。

1)对 n 个配电网评价对象,考虑 m 项评估指标。首先利用极值处理法对原始数据进行预处理,将评估对象 i 指标值 j 记为 $x_{ij}, i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$,进行极小型归一化。若指标为极大型时,计算公式为

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i \{x_{ij}\}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}} \quad (2)$$

若指标为极小型时,计算公式为

$$x'_{ij} = \frac{\max_i \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}} \quad (3)$$

处理后的指标值越大,就意味着该配电网可靠性提升的需求度越高。

2)根据专家意见确定各指标的序关系排序。例如, $X_1 > X_2 > \dots > X_m$,先选择相邻评估指标间的重要程度之比:

$$r_j = w_{j-1} / w_j \quad (4)$$

式中 w_j 为采用传统序关系法(步骤见文献[15])求得的指标 j 权重; r_j 的赋值为

$$r_j = \{1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8\} \quad (5)$$

其赋值由小到大依次表示指标 X_{j-1} 相比 X_j 同等、稍微、明显、强烈和极端的重要[15]。

传统序关系法获得的指标权重属于主观赋权,容易发生非相邻指标权重之比超出 r_j 取值范围的情况,比如:当出现 $w_1/w_2=1.8$ 且 $w_2/w_3=1.6$ 的情况时,将有 $w_1/w_3=2.88 > 1.8$,这不仅超出了最大的重要性比值,不符合思维习惯,而且往往会过度放大个别指标,影响综合评估结果的可信度。因此,需要结合数据特点和 r_j 取值范围约束进行二次客观赋权。

3)为了客观描述某指标对总体评价结果的影响程度,基于传统序关系法的计算结果求解指标 j 的贡献度 c_j ,定义为由第 j 指标贡献的评价值之和占所有对象的总体评价价值中的比例,即

$$c_j = \frac{w_j \sum_{i=1}^n x_{ij}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_j x_{ij}}, \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式中 x_{ij} 为预处理后的第 i 个评估对象的第 j 项指标值。

进而定义比值 $\alpha_j = c_{j-1}/c_j (j = m, m-1, \dots, 2)$, 重新选择相邻评估指标的重要程度比 r_j , 从式 (5) 中选择与 α_j 最接近的值作为新的赋值 r'_j 。

由于 c_j 的计算中既有反映专家主观评判的指标权重 w_j , 又有体现客观数据特征的 x_{ij} , 可见采用 c_j 相比 r_j 进行赋权更能体现主客观相结合的赋权。

4) 根据重要程度的递进性质重新求解各指标的贡献度 c'_j 。为了尽量拉开不同指标的贡献度和评价结果的差距, 以相邻 2 个指标的贡献度之差最大为目标函数:

$$\begin{cases} \max f = \sum_{j=2}^m (c'_{j-1} - c'_j) = c'_1 - c'_m \\ \text{s. t. } c'_{j-1} - c'_j r'_j \leq 0, j = m, m-1, \dots, 3, 2 \\ \quad \quad \quad c'_j - c'_{j-1} \leq 0, j = m, m-1, \dots, 3, 2 \\ \quad \quad \quad c'_1 - 1.8c'_m \leq 0 \\ \quad \quad \quad \sum_{j=1}^m c'_j = 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中, 前 2 个不等式约束用于消除规划求解中的强一致性(求解出的新贡献度不应改变原有的贡献度排序), 第 3 个约束条件用于避免出现权重之比不符合思维习惯和过度放大部分指标权重的情况, 避免相邻指标的贡献度之比大于 1.8。

5) 对模型 (7) 求解, 可得到 $c'_j, j = m, m-1, \dots, 3, 2$; 再求解各指标的最终权重:

$$\omega'_m = \left(1 + \frac{l_m}{c'_m} \sum_{j=2}^m \frac{c'_{j-1}}{l_{j-1}} \right)^{-1} \quad (8)$$

$$\omega'_{j-1} = \omega'_j \frac{l_j c'_{j-1}}{c'_j l_{j-1}} \quad (9)$$

其中, $l_j = \sum_{i=1}^n x_{ij}$ 。

2.2 实施对象提升需求度排序

采用线性加权法计算各配电网 i 的可靠性提升需求度综合评价值:

$$T_i = \sum_{j=1}^m \omega'_j x_{ij} \quad (10)$$

由于预处理中已将各指标化为极小型, 故评估对象

的综合评价价值越大, 其可靠性提升需求度就越高。为此, 按 T_i 从低到高排列便可获得各配电网的可靠性改造需求排序, T_i 大的评估对象优先改造。

2.3 方案确定

结合可靠性提升策略库和各配电网停电的主要致因, 选定各配电网的可靠性改造方案, 进而估算其技改成本 f 。设规划预计总投资金额为 F , 需求度第 k 高的评估对象技改成本为 f_k , 可靠性提升对象的挑选原则为

$$F \geq \sum_{i=1}^{\phi} f_i, \phi \in (1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

当技改成本超出投资总额后, 则舍弃其余的评估对象。

3 实例分析

该文以南方电网某地区的 8 个 10 kV 配电网为例, 进行实例应用和方法有效性验证。各配电网的供电区域分类如表 2 所示。

表 2 供电区域分类

Table 2 Power supply area classification

配电网序号	供电区域分类	配电网序号	供电区域分类
D1	A	D5	E
D2	B	D6	D
D3	D	D7	E
D4	E	D8	F

根据实际电网管理需求确定的指标序关系排序为 $X_3 > X_1 > X_6 > X_5 > X_2 > X_4$, 由专家意见主观确定 r_j 依次为 1.6, 1.4, 1.2, 1.0, 1.4。传统和改进序关系法确定的指标权重如表 3 所示, 对比后可以看出: 在传统序关系法中, 重要程度最高和最低的指标之间的权重之比为 3.76, 超出了 r_j 的最大取值 1.8, 2 个指标的重要性之比比极端重要还要重要, 不符合思维习惯, 而且指标 X_3 的权重被过度放大, 指标 X_4 的影响被过度削弱。为了消除上述 2 个传统序关系法的缺陷, 改进序关系法中引入贡献度指标进行约束优化, 其确定的指标权重既能保留主观选定的指标重要性排序, 又可避免过度放大部分指标权重的问題, 将 6 个指标的权重差距控制在合理范围内。

各配电网的原始指标数据、提升需求度评价结果以及预估的技改成本如表 4 所示, 可以看出, 若仅

表 3 指标权重 w_j 对比Table 3 Comparison of index weight w_j

方法	$\Delta RS/$ %	$RS_{-1}/$ %	$r_{ep}/(\text{元}/$ $(\text{kW} \cdot \text{h}))$	$N_{uc}/$ (次/年)	$AITC_{-1}/$ (次/户)	L_u
传统序关系法	0.324 5	0.202 8	0.144 9	0.120 7	0.120 7	0.086 2
改进序关系法	0.208 6	0.190 9	0.160 7	0.151 8	0.149 0	0.139 0

表 4 评估结果

Table 4 Evaluation results

配电网	$RS_{-1}/$ %	$AITC_{-1}/$ (次/户)	$\Delta RS/$ %	L_u	$N_{uc}/$ (次/年)	$r_{ep}/(\text{元}/$ $(\text{kW} \cdot \text{h}))$	T_i	$f/$ 万元
D1	99.970 1	0.85	-0.028 9	—	3	18.2	0.374 3	25
D2	99.967 5	1.11	-0.022 5	特	8	22.5	0.590 0	25
D3	99.937 2	1.61	0.007 2	—	4	15.5	0.391 6	25
D4	99.870 0	3.43	0.080 0	三	5	14.6	0.379 4	25
D5	99.866 1	2.88	0.076 1	二	10	13.3	0.504 5	25
D6	99.850 1	3.09	-0.079 9	—	8	16.9	0.676 0	25
D7	99.753 7	4.67	-0.036 3	三	9	13.8	0.670 9	25
D8	99.736 1	5.13	0.236 1	三	5	9.7	0.383 3	25

按 RPS 的高低来安排可靠性治理方案,迫切程度依次为 D8 到 D1;而按照该文提出的可靠性提升需求度评估排序则是 $D6 > D7 > D2 > D5 > D3 > D8 > D4 > D1$ 。

从单个配电网的评估结果来看,D6、D7 的 T_i 最大,意味着可靠性改造的动力最为强烈。实际上,配电网 D6、D7 存在供电可靠率低、与可靠性控制目标差距大、用户投诉多等问题,可见评估结果与实际情况是相匹配的。

配电网 D2 具有较高的供电可靠率,在仅采用 RPS 指标作为判断标准的传统方法中将其提升需求度排在倒数第二位。而事实上该配电网的用户投诉频次偏高,说明其用户对可靠性的要求较高,现有可靠性水平仍无法满足客户需求,依然存在进一步提升的必要;而且配电网中存在特级负荷,区域产电比最高,RPS 提升的社会和经济效益很高,因此,在新方法的评估结果中认为配电网 D2 的提升需求度较为靠前。

相反,配电网 D8 虽然供电可靠率最低,但已经优于供电企业的控制目标,而且用户投诉频次和单位缺电成本不高,因此,提升需求度和改造投资优先

级都较低。

可见,该文提出的可靠性提升需求度评价指标和评估方法综合考虑了 RPS 水平、供电区域特点、用户期望和经济效益 4 个方面,能够更贴近用户的实际可靠性体验,更全面有效地反映配电网可靠性提升需求和价值,便于从改造对象筛选的层面指导实现可靠性规划投资的效益最大化,具有合理性和实用性。

若规划总投资金额为 100 万元,传统思路下应该对 D8 至 D5 这 4 个供电可靠率较低的配电网进行改造,而根据该文的综合评估结果则应对配电网 D6、D7、D2、D5 进行投资改造。2 种方案都是对 4 个配电网实施改造提升,但采用该文的对象选优方法可以实现更高的投资效益。根据新方案改造后可以新增 3 个达到供电企业可靠性控制目标的台区,预计减少用户投诉 35 次;而传统方案改造后只能新增 2 个达标台区,减少用户投诉 32 次。另外,新方案一定程度上优先提升负荷重要性等级较高和经济效益较高的配电网,符合供电企业精细化管理的需求。

与简单根据 RPS 进行改造对象筛选的做法相

比,新方法确定的改造投资方案并不是单纯追求 RPS 指标提升的最大化,而是实现可靠性改造的综合效益的最优。除了供电可靠率的提升,该文所提的方法还能兼顾实现 3 个方面的效益:①使可靠性改造投资更具针对性,让更多配电网达到供电企业的可靠性控制目标;②实现 RPS 和客户满意度的协同提升;③使 RPS 的提升转化为更大的国民经济效益,更好地履行供电企业的社会责任。

4 结语

针对配电网可靠性提升工作的实施对象挑选原则不够科学的情况,该文开展了以下工作。

1)分析了可靠性提升需求度评估的内涵,并从供电可靠性水平、供电区域特点、用户期望和经济效益 4 个方向建立了涵括 6 个指标的可靠性提升需求度评价指标体系。该指标体系能够从电网角度、用户角度和社会经济效益 3 个维度全面描述可靠性提升需求度,有效地将供电可靠性与客户满意度、客户价值等因素关联起来。

2)采用同时兼顾专家意见和数据特征的改进序关系法,提出的决策方法按照配电网可靠性提升需求度的排序合理安排规划投资的优先实施对象,综合考虑并最大限度地满足了电网可靠性控制目标、用户价值和需求,达到可靠性改造投资综合效益最优。

通过在南方电网的应用实例证明了该文提出的指标体系和规划方法可有效指导供电企业的可靠性提升规划工作,使配电网可靠性与供电企业控制目标、用户期望值更加贴近,实现有限投资下的可靠性提升效益最大化。

参考文献:

[1] 郑洁云,胡梦月,胡志坚,等.考虑可靠性及需求响应的配电网规划模型[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):173-182.
ZHENG Jieyun, HU Mengyue, HU Zhijian, et al. Distribution network planning model considering reliability and demand response[J]. Journal of Electric Power Sci-

ence and Technology, 2019, 34(3): 173-182.

- [2] Chen J, Chen X, Ye L, et al. Reliability analysis of micro grid based on load control of electric vehicle[C]// International Conference on Environment Sciences and Renewable Energy, Bali, Indonesia, 2019.
- [3] 邱生敏,管霖.规划配电网简化方法及其可靠性评估算法[J].电力自动化设备,2013,33(1):85-90.
QIU Shengmin, GUAN Lin. Approximate evaluation algorithm for reliability indices of cosmically distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1):85-90.
- [4] 邓鋈芃,郑洁云,陈旷,等.考虑可靠性及电压稳定性的主动配电网多目标分层规划[J].电力科学与技术学报,2018,33(4):3-12.
DENG Junpeng, ZHENG Jieyun, CHEN Kuang, et al. Multi-objective two-layer planning for ADN by considering economics, reliability and voltage stability [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018,33(4):3-12.
- [5] 黄廷城,叶琳浩,张勇军.基于 AHP-熵权法的配电网用电可靠性综合评估[J].广东电力,2018,31(1):44-50.
HUANG Tingcheng, YE Linhao, ZHANG Yongjun. Comprehensive evaluation of distribution network reliability for power consumer based on ahp and entropy combination method [J]. Guangdong Electric Power, 2018,31(1):44-50.
- [6] Li G, Huang Y, Bie Z, et al. Machine-learning-based reliability evaluation framework for power distribution networks[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(12): 2282-2291.
- [7] 黄道珊.基于设备全寿命周期的配电系统可靠性评估方法[J].电力科学与技术学报,2016,31(2):72-78.
HUANG Daoshan. Reliability evaluation method of distribution system based on electrical equipment life-cycle theory[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016,31(2):72-78.
- [8] 尹超雄,唐武勤,温灵锋,等.台风天气下配电网可靠性的新型评估算法[J].电力系统保护与控制,2018,46(4):138-143.
YIN Chaoxiong, TANG Wuqin, WEN Lingfeng, et al. A new method for reliability evaluation of distribution

- network considering the influence of typhoon[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 138-143.
- [9] 黄伟, 陈伯达, 羿应棋, 等. 考虑光储可持续带载能力的配电网可靠性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1510-1520.
- HUANG Wei, CHEN Boda, YI Yingqi, et al. Distribution system reliability evaluation considering sustainable on-load capacity of photovoltaic/energy-storage hybrid system[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1510-1520.
- [10] 李子韵, 陈楷, 龙禹, 等. 可靠性成本/效益精益化方法在配电网规划中的应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 97-101.
- LI Ziyun, CHEN Kai, LONG Yu, et al. A precision method for reliability cost and benefit analysis and its application in distribution network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 97-101.
- [11] 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.
- [12] 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. Optimization of reliability improvement objects of intelligent distribution network based on grey relation of variable weight[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 26-34.
- [13] 蔡政权, 刘至锋, 管霖, 等. 基于可靠性需求的电力客户细分和可靠性价值评估方法[J]. 广东电力, 2015, 28(5): 44-50.
- CAI Zhengquan, LIU Zhifeng, GUAN Lin, et al. Assessment method for subdivision of electric power customers and reliability value based on reliability demand[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(5): 44-50.
- [14] DL/T 836—2012. 供电系统用户供电可靠性评价规程[S].
- [15] 叶琳浩. 有源配电网关键运行特性的评价理论与优化提升研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [16] GB 50052—2009. 供配电系统设计规范[S].
- [17] 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.
- [18] 梁钟晖, 周渝慧, 顾洪凤, 等. 基于模糊理论的输电中断成本估算方法[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 71-74.
- LIANG Zhonghui, ZHOU Yuhui, GU Hongfeng, et al. An approach to estimate power transmission interruption cost based on fuzzy theory[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 71-74.
- [19] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用(下册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.