

基于用户责任的重要电力用户用电安全风险评估

赵建立¹, 周雯娟², 郑庆荣¹, 潘明明³, 李亚⁴

(1. 国网上海市电力公司客户服务中心, 上海 200030; 2. 国网上海市电力公司青浦供电公司, 上海 201700;
3. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 4. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 为加强重要电力用户用电安全水平, 开展了基于用户责任的重要电力用户用电安全风险评估研究。分析了已投运电力用户在运行管理中的用电风险因素, 按照从萌芽发展到事故的逻辑顺序将风险隐患归纳为基础配置性风险、组织制度性风险、运营执行性风险和事故控制性风险等4种风险, 进而建立了基于物元可拓理论的安全评价指标体系。通过实例, 验证了评价体系的科学性和合理性。通过研究, 为量化评估重要电力用户的用电安全风险提供了一种新的思路和方法。

关键词: 重要电力用户; 风险评估; 物元可拓理论; 量化评估

Electrical safety assessment for important power users based on user's responsibility

ZHAO Jianli¹, ZHOU Wenjuan², ZHENG Qingrong¹, PAN Mingming³, LI Ya⁴

(1. Customer Service Center of SMEPC, Shanghai 200030, China; 2. Qingpu Power Supply Company of SMEPC, Shanghai 201700, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
4. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper puts forward the electrical safety assessment for important power users (IPUs) based on user's responsibility, in order to strengthen their electrical safety level. Analyses are made on the risk factors existing in operation and management. According to their progressions, the risk factors are divided into 4 categories, i.e. base-configuration risk, organization-institution risk, operation-execution risk and accident-controlling risk. Moreover, this paper establishes the index system for safety assessment based on the matter-element theory. Finally, an example is given to prove the feasibility and effectiveness of the assessment index system, which provides a new method to quantitatively assess the electrical safety for IPUs.

This work is supported by Science & Technology Foundation of SGCC (No. 521820140017).

Key words: important power users; risk assessment; matter-element extension theory; quantitative assessment

中图分类号: TM73

文章编号: 1674-3415(2015)23-0071-07

0 引言

重要电力用户在国家或者一个地区(城市)的社会、政治、经济生活中占有重要地位, 对其中断供电将可能造成人身伤亡、较大环境污染、较大政治影响、较大经济损失、社会公共秩序严重混乱。政府、供电企业一直高度重视重要电力用户的供电安全, 在重要电力用户的范围和管理职能、供电电源和自备应急电源配置、运行要求等方面做出明确规定^[1-2]。但是目前大量重要电力用户的用电安全情况

仍不容乐观, 用户对发生电网大面积停电的风险认识不够, 用电侧的运行管理相对比较薄弱, 部分用电设施存在安全隐患。

国内外学者在加强重要电力用户电力供应与使用安全和风险评估方面做了大量研究。国内学者在风险定性分析、电源切换装置研制和预警系统设计方面取得一定成果。巢民、陈理、秦萱等定性的分析了重要电力用户用电安全存在的风险, 并提出风险防范与服务策略^[3-5]。文献[6-7]针对重要电力用户供电电源切换和外部电源接入的装置设备研制方面取得一定成果。文献[8]在定性分析基础上, 根据数字化供电系统理论, 完成了重要电力用户供电风险

预警系统的框架建设及安全系统设计。文献[9]从用户运行管理角度初步建立了重要电力用户安全风险评估指标体系和计算模型,但是评价指标不够健全。国外学者的研究更偏重于将重要电力用户安全风险与社会问题结合,探究社会上的风险因素引起用户供电风险或者连锁反应,研究的层面更为宏观。如:文献[10]针对日本的重要用户不间断电力供应需求,设计了可靠性备份系统,在框架设计和数值模型可靠性评估基础上提高供电可靠性。文献[11-12]在IDA的基础上开发了基于HRA的ADCA方法,模拟供电安全风险,研究用户的行为影响。文献[13]基于电力系统可靠性风险对客户进行了多维度的划分。

现有研究成果往往将供电侧与用电侧作为一个整体考虑用户在电力供用中面临的风险,但是供电侧的风险并不是用户责任范围内的事项,不利于用户聚焦自身存在的风险。本文从用电安全角度出发,基于风险从隐患发展到事故的内在逻辑,对用户责任范围内重要电力用户用电安全风险评估指标体系进一步完善,并建立计算模型使之量化,最后通过实证验证了评价体系的科学性和合理性。

1 重要电力用户用电安全风险因素分析

1.1 研究范围

(1) 从空间范畴考虑,重要电力用户供用电安全包括供电侧安全和用户侧安全两个方面,本文主要研究属于用户出资范围内的电力安全问题,涵盖从用户外部电源通道至末端负荷范围的电力安全问题,即用电安全问题。其中,由于外电源通道运行管理一般由供电企业负责,本文只考虑用户外部电源通道的配置安全。

(2) 从时间维度考虑,本文所指的重要电力用户用电安全评估主要从已投运用户在运行管理阶段的运行状态角度进行安全风险评价,不涉及业扩报装等其他业务阶段。

(3) 本文所指的“安全”,是指用户的狭义安全性需求,不包括优质性需求和效能性需求^[14]。

1.2 风险因素分析

重要电力用户用电安全涉及电源配置、设备状态、客户运行管理和事故应急管理等方面因素。

1.2.1 电源配置

按照工作时段和所起作用的不同,重要电力用户的电源可以分为常态工作电源和应急电源,其中应急电源又分为自备应急电源和外部应急电源。据此将用户电源配置风险归为以下三类。

(1) 供电电源配置。供电电源配置包括多电源属性、线路性质(共通道比例,线路形式如专线、环网公网、辐射公网等)、电源切换、主备运行方式等。

(2) 自备应急电源配置。自备应急电源配置包括电源容量、电源性质、电源切换(切换方式和切换点)与闭锁、持续供电时间、启动方式、应急母线配置、电能质量等。

(3) 外部应急电源配置。包括外部应急电源接入(接口)方式、行驶通道、接入地点、应急发电车的接地点等。

1.2.2 设备设施状态

影响用户用电安全的设备设施主要包括用户配用电设备和非电保安设施。决定该类设备设施状态的因素主要包括受电工程建设时的装备水平和投运后的运行水平,由此将设备设施状态风险因素分为装备水平和运行水平。

(1) 装备水平包括系统的自动化程度、设备的规格型号和负荷能力、运行年限等。

(2) 运行水平包括设备设施投运及定值设置情况、负载率、缺陷与故障、运行时间等。

1.2.3 客户运行管理

客户的运行管理水平主要体现在是否具备健全的运行管理体系和制度体系,具体管理制度在实施过程中能否有效执行。据此将客户运行风险因素分为管理制度体系健全性和操作运行规范性。

(1) 管理制度体系的健全性

管理体系健全性包括安全生产组织结构和安全生产网络的完备性。

制度体系健全性包括安全生产责任制、安全生产培训、职业健康安全管理、外部协调机制等的完备性。如变(配)电室运行管理、防小动物及消防措施、防误操作措施、安全工器具管理、电工管理、工作记录管理等完备性。

(2) 操作运行的规范性

可以分为两票三制执行规范性和外部协调规范性。两票三制执行规范性包括工作票、操作票,交接班制度,设备定期试验制度,设施巡检制度执行情况;外部协调规范性主要指与政府电力主管部门、能源监管机构、行业协会、供电企业等外部单位的沟通机制的有效性,如供电企业电网运行方式调整、停送电计划、有序用电安排等信息告知。

1.2.4 事故应急管理

安全风险失控导致事故发生后,需要启动应急处理,防止事故范围扩大。决定应急处理是否有效

及时的因素包括以下三项。

(1) 应急预案完备性

应急预案应包括应急组织机构及岗位职责、预防措施、应急处置程序、应急保障措施、非电保安措施等。

(2) 应急演练充分性

包括应急预案培训、演练范围、演练频次、演练逼真程度等。

(3) 备品备件符合性

主要指非演练期间保持备品备件的完备、可用、能用。

2 用电安全风险评指标体系

基于上述风险因素分析, 按照风险隐患萌芽->隐患扩大->事故发生->事故控制的逻辑顺序, 把重要电力用户用电安全风险分为四类: 基础配置性风险、组织制度性风险、运营执行性风险和事故控制性风险。其中基础配置性风险导致隐患的存在, 组织制度性风险、运营执行性风险导致风险不能及时发现、消除或控制, 事故控制性风险导致事故发生后危害范围扩大。

(1) 基础配置性风险

是指由基础配置性因素缺陷导致的风险, 决定了重要电力用户供电安全的基本水平, 难以通过其他补救手段予以实质性地提高供电安全, 主要包括供电电源配置、自备应急电源配置、外部应急电源接入配置、配用电设备及非电性质保安措施配置。

(2) 组织制度性风险

是指由重要电力用户安全组织体系或安全管理制度缺陷引起的风险, 决定了运营执行性风险和事故控制性风险能否消除、降低或控制, 主要包括管理体系完备性风险和管理制度完备性风险。

(3) 运营执行性风险

是指由于运维作业人员的作业质量缺陷引起的风险, 决定了重要电力用户的基础配置和组织管理体系能否运行在良好的状态区间, 能否有效降低供电安全事故发生的概率, 主要包括两票三制和外部协调。

(4) 事故控制性风险

是指事故应急处置不及时、不到位引起的风险, 决定了事故范围能否得到控制、次生灾害能否得以避免, 主要指事故应急管理风险。包括应急预案的完备性、应急演练的充分性、备品备件的符合性。

在此基础上建立基于用户责任界面的重要电力用户用电安全风险评价指标体系(如图 1)。

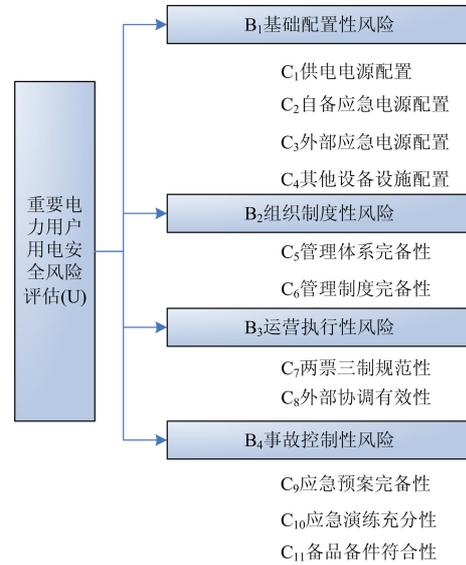


图 1 基于用户责任的重要电力用户用电安全风险评指标体系
Fig. 1 Safety evaluation indexes system of power usage for IPU based on user's responsibility

3 基于物元可拓理论的风险评模型

风险评估^[15-20]理论在电力系统中有广泛的应用, 主要包括各项指标量化取值、权重计算、综合风险值计算和风险等级划分等四个环节。本文综合计算模型采用物元可拓分析法^[21], 并基于 AHP^[22]计算各分项指标权重。

3.1 物元可拓理论原理

物元可拓理论以可拓集合和物元评价作为理论基础, 通过建立经典域、节域和评价等级, 根据实测数据计算待评物元关于评级等级的关联度以此来确定评价对象的等级^[21]。

(1) 可拓集合

可拓集合是描述不具有某种性质的事物向具有某种性质的事物转化的集合, 用实数来表示事物具有某种性质的程度, 正数表示具有该性质的程度, 负数表示不具有该性质的程度。

(2) 物元评价

物元评价的基本原理: 首先根据已有数据将评价对象的水平分成若干等级, 由数据库或专家意见给出各级别的数据范围; 再将评价对象的指标代入各等级的集合中进行多指标评定, 评定结果与各等级集合的关联度大小进行比较, 关联度越大, 与各等级集合的符合度越大。

3.2 风险评估算法

(1) 确定经典域 R_j 、节域 R_p 和待识别对象形成的物元 R_0 。

$$R_j = (N_j, C_i, V_{ji}) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{j1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_n & v_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & \left\langle \frac{a_{j1}}{b_{p1}}, \frac{b_{j1}}{b_{pn}} \right\rangle \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_n & \left\langle \frac{a_{jn}}{b_{pn}}, \frac{b_{jn}}{b_{pn}} \right\rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中: N_j 表示所划分的 j 个等级; c_n 是 N_j 的 n 个不同特征; v_{jn} 是关于所取值的范围,即经典域。 a 、 b 分别为各等级区间左端点及右端点的值, b_p 为全节域右端点数值。

$$R_p = (p, C_i, V_{pi}) = \begin{bmatrix} p & c_1 & v_{p1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_n & v_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p & c_1 & \left\langle \frac{a_{p1}}{b_{p1}}, 1 \right\rangle \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_n & \left\langle \frac{a_{pn}}{b_{pn}}, 1 \right\rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中: p 表示待评对象等级的全体; v_{pn} 是 p 关于 c_n 所取值的范围,即 p 的节域。

$$R_0 = (p_0, C_i, V_{pi}) = \begin{bmatrix} p & c_1 & v_{p_01} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_n & v_{p_0n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中, R_0 即待评物元实际值。

(2) 确定权重 ω 。

(3) 计算关联度 K 。

$$D(v, V_{ji}) = \left| v - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{b-a}{2} \quad (4)$$

$$K_j(p_0) = 1 - \sum_{i=1}^n \omega_i D_{ij} \quad (5)$$

式中: D 为待评物元与经典域的距离; v 为待评点值; a 、 b 为区间左端点及右端点值。

(4) 评定等级。

若 $K_j(p_0) = \max \{K_j(p_0)\} (j=1, 2, \dots, m)$, 则待评物元 p_0 属于 j 等级。

4 算例分析

4.1 待评用户基本情况

西北地区某煤矿, 属于一级重要电力用户, 经调查具备以下条件。

(1) 用户 35 kV 变电站由三路电源供电, 其中两

路 35 kV 电源(简称 A、B 线)来自同一 35 kV 供电变电站的两段母线(可追溯至不同上级电源), 一主一备, 采用电气与机械切换方式(可采用短时停电或短时并列方式切换); 第三路来自另一 35 kV 供电变电站(简称 C 线), 系该矿建设时用电电源, 建成后已切断, 紧急情况下可重新连接作为临时救援电源。A、B 线采用同塔双回供电方式。该用户未配置自备应急电源, 未配置非电性质保安措施。

(2) 初步建立起安全管理体系, 具备基本的安全生产管理制度。

(3) 电力设施运行管理比较规范, 外部协调渠道畅通。

(4) 在供电企业帮助下建立了常规的供电安全应急预案, 并按照相关安全管理部门要求开展定期演练。

4.2 物元可拓模型的应用

(1) 建立指标评价体系

基于上文分析, 重要电力用户安全风险分为基础配置性风险、组织制度性风险、运营执行性风险和事故控制性风险四类, 整个指标体系如图 1 所示。

(2) 设定风险等级

将重要电力用户用电安全风险划分为 5 个等级: I 级可忽略风险、II 级可容许风险、III 级中度风险、IV 级重大风险、V 级不容许风险。

对于 I 级风险不采取措施; 对 II 级风险不需要额外的控制措施, 但需要监视确保控制措施得以维持; 对 III 级风险应努力降低风险; 对 IV 级风险需至风险降低后才能开始工作; 对 V 级风险只有风险已经降低时才能开始工作。

(3) 建立物元可拓模型, 计算待评物元实值。

上述评价指标体系中定量指标的经典域通过专家经验给出, 设为 $[0, 1]$, 各等级的经典域等分这一范围。其中 0 表示风险极小, 1 表示风险极大。设定评分细则表, 由专家打分确定待评物元特征值。以供电电源配置为例(见表 1), 可得该用户供电电源配置得分为 0.50。依次确定其他特征值。

表 1 供电电源配置评分细则表

评分细项	满分	实际得分	风险值	归一化值
多电源属性	10	10	0	0.00
线路性质	10	2	8	0.20
电源切换	10	3	7	0.18
主备运行方式	10	5	5	0.13
合计	40	20	20	0.50

得出经典域及待评物元的取值如下所示。其

中: R_1 表示可忽略风险, R_2 表示可容许风险, R_3 表示中度风险, R_4 表示重大风险, R_5 表示不容许风险, R_0 为待评物元。

$$R_1 = \begin{bmatrix} N_1 & C_1 & (0,0,2) \\ & C_2 & (0,0,2) \\ & C_3 & (0,0,2) \\ & C_4 & (0,0,2) \\ & C_5 & (0,0,2) \\ & C_6 & (0,0,2) \\ & C_7 & (0,0,2) \\ & C_8 & (0,0,2) \\ & C_9 & (0,0,2) \\ & C_{10} & (0,0,2) \\ & C_{11} & (0,0,2) \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} N_2 & C_1 & (0,2,0.4) \\ & C_2 & (0,2,0.4) \\ & C_3 & (0,2,0.4) \\ & C_4 & (0,2,0.4) \\ & C_5 & (0,2,0.4) \\ & C_6 & (0,2,0.4) \\ & C_7 & (0,2,0.4) \\ & C_8 & (0,2,0.4) \\ & C_9 & (0,2,0.4) \\ & C_{10} & (0,2,0.4) \\ & C_{11} & (0,2,0.4) \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} N_3 & C_1 & (0.4,0.6) \\ & C_2 & (0.4,0.6) \\ & C_3 & (0.4,0.6) \\ & C_4 & (0.4,0.6) \\ & C_5 & (0.4,0.6) \\ & C_6 & (0.4,0.6) \\ & C_7 & (0.4,0.6) \\ & C_8 & (0.4,0.6) \\ & C_9 & (0.4,0.6) \\ & C_{10} & (0.4,0.6) \\ & C_{11} & (0.4,0.6) \end{bmatrix} \quad R_4 = \begin{bmatrix} N_4 & C_1 & (0.6,0.8) \\ & C_2 & (0.6,0.8) \\ & C_3 & (0.6,0.8) \\ & C_4 & (0.6,0.8) \\ & C_5 & (0.6,0.8) \\ & C_6 & (0.6,0.8) \\ & C_7 & (0.6,0.8) \\ & C_8 & (0.6,0.8) \\ & C_9 & (0.6,0.8) \\ & C_{10} & (0.6,0.8) \\ & C_{11} & (0.6,0.8) \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} N_5 & C_1 & (0.8,1) \\ & C_2 & (0.8,1) \\ & C_3 & (0.8,1) \\ & C_4 & (0.8,1) \\ & C_5 & (0.8,1) \\ & C_6 & (0.8,1) \\ & C_7 & (0.8,1) \\ & C_8 & (0.8,1) \\ & C_9 & (0.8,1) \\ & C_{10} & (0.8,1) \\ & C_{11} & (0.8,1) \end{bmatrix} \quad R_0 = \begin{bmatrix} P_0 & C_1 & 0.50 \\ & C_2 & 1.00 \\ & C_3 & 0.25 \\ & C_4 & 1.00 \\ & C_5 & 0.30 \\ & C_6 & 0.20 \\ & C_7 & 0.15 \\ & C_8 & 0.15 \\ & C_9 & 0.20 \\ & C_{10} & 0.10 \\ & C_{11} & 0.20 \end{bmatrix}$$

(4) 确定权重系数

基于 AHP 原理^[22]确定 B、C 层对目标层 U 的权重系数。

首先, 建立构造矩阵。以 B 层(各元素为 B_i)对

U 的构造矩阵 A_1 (矩阵元素为 a_{ij})为例。 $a_{ij}=\{1: B_i, B_j$ 同样重要; $3: B_i$ 比 B_j 稍微重要; $5: B_i$ 比 B_j 明显重要; $7: B_i$ 比 B_j 强烈重要; $9: B_i$ 比 B_j 极端重要; $2,4,6,8$: 上述两相邻判断的中值}, $a_{ji}=1/a_{ij}$ 。根据专家经验 $B_1>B_3=B_4>>B_2$, 得

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 5 & 5 \\ 1/7 & 1 & 1/5 & 1/5 \\ 1/5 & 5 & 1 & 1 \\ 1/5 & 5 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

同理得 C 层对 B 层的构造矩阵 $A_{21}-A_{24}$ 如下:

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 5 & 1 \\ 1 & 1 & 5 & 1 \\ 1/5 & 1/5 & 1 & 1/5 \\ 1 & 1 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad A_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad A_{24} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 5 \\ 1 & 1 & 5 \\ 1/5 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

其次, 完成层次排序(即确定权重)及一致性判断。经计算^[22], 第 C 层指标相对于总目标层的权重为 $\omega = (0.1940, 0.1940, 0.0388, 0.1940, 0.0241, 0.0241, 0.1241, 0.0414, 0.0752, 0.0752, 0.0150)$ 。

一致性指标 $CR=0.0774<0.1$, 通过一致性判断。

(5) 计算待评指标与经典域的距离 D , 计算结果见表 2。

表 2 待评物元与经典域的距离

Table 2 Distance between matter-element in evaluation and classical domain

指标	可忽略风险	可容许风险	中度风险	重大风险	不容许风险
C_1	0.30	0.10	-0.10	0.10	0.30
C_2	0.80	0.60	0.40	0.20	0.00
C_3	0.05	-0.05	0.15	0.35	0.55
C_4	0.80	0.60	0.40	0.20	0.00
C_5	0.10	-0.10	0.10	0.30	0.50
C_6	0.00	0.00	0.20	0.40	0.60
C_7	-0.05	0.05	0.25	0.45	0.65
C_8	-0.05	0.05	0.25	0.45	0.65
C_9	0.00	0.00	0.20	0.40	0.60
C_{10}	-0.10	0.10	0.30	0.50	0.70
C_{11}	0.00	0.00	0.20	0.40	0.60

(6) 确定重要电力用户用电安全风险等级

通过计算得到该煤矿用户用电安全风险等级的关联度为

$$K_j(P_0)=1-\sum_{i=1}^{11}\omega_i D_{ij} \quad (j=1,2,\dots,5) \quad (6)$$

得 $K_{(P_0)}=(0.6519, 0.7417, 0.7691, 0.7207, 0.6723)^T$ ，待评物元与 N_3 关联度最大(0.7691)，表明该煤矿用户用电安全风险为 III 级中度风险。

(7) 制定风险控制策略

根据评价结果，该用户应仔细测定并限定预防成本，在规定的时间内实施降低风险的措施，同时进一步评价，确定是否需要改进控制措施。其中， C_2 自备应急电源、 C_4 非电保安措施、 C_1 供电电源配置是该用户依次需要优先考虑完善的三个方面。

以改进 C_2 自备应急电源为例，假设按照参考文献[2]要求对应急照明、消防用电、通风设备、制氮设备、立井提升设备、矿井监测监控系统、排水设备、井下消防洒水给水系统等煤矿保安负荷配置比较完善的自备应急电源配置，使 C_2 取值 0.2，则 $K_{(P_0)}=(0.8035, 0.8554, 0.8070, 0.6828, 0.5586)^T$ ，待评物元与 N_2 关联度最大(0.8554)，表明该煤矿用户用电安全风险等级为 II 级可容许风险。此时，不需要额外的控制措施，但需要监视确保控制措施得以维持。

5 结论

分析用户用电薄弱环节，确定风险水平，是加强重要电力用户的供用电安全的基础工作之一。本文从以下几个方面对此进行了探索研究，并取得初步成果。

(1) 首次按照风险发展的内在逻辑提出了基于用户责任界面的重要电力用户用电风险评价指标体系，将用户运行阶段的风险归纳为为基础配置性风险、组织制度性风险、运营执行性风险和事故控制性风险等四类。

(2) 以物元可拓理论为基础确定评估算法，通过实例证明了这种安全风险评估计算模型的科学性与合理性，为评估重要电力用户用电安全风险提供了一种新的思路和方法。

参考文献

[1] 国家电力监管委员会. 关于加强重要电力用户供电电源及自备应急电源配置监督管理意见的通知[Z]. 2008. State Electricity Regulatory Commission of China. Supervision & management advice on strengthening the important power users' configuration on power supply and self-emergency power supply[Z]. 2008.

[2] 国家标准化管理委员会. GB/Z 29328-2012 重要电力用户供电电源及自备应急电源配置技术规范[S]. 北京:

中国标准出版社, 2012.

State Standardization Management Committee of China. GB/Z 29328-2012 specific configuration of power supply and self-emergency power supply for important power users[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.

[3] 巢民. 高危及重要客户用电风险防范及服务策略思考[J]. 电力需求侧管理, 2013, 15(1): 50-53.

CHAO Min. Risk prevention and strategic thinking of high-risk and important electricity customer[J]. Power Demand Side Management, 2013, 15(1): 50-53.

[4] 陈理, 洪健山. 重要电力用户安全用电管理探析[J]. 电力需求侧管理, 2011, 13(5): 58-60.

CHEN Li, HONG Jianshan. Analysis of safe use management of electricity for important users[J]. Power Demand Side Management, 2011, 13(5): 58-60.

[5] 秦莹, 王建辉. 关于建立重要客户用电安全健康等级评价体系的探讨[J]. 供电企业管理, 2012(6): 15-17.

QIN Xuan, WANG Jianhui. Study on electricity safety and health assessment system for important power users [J]. Power Supply Enterprise Management, 2012(6): 15-17.

[6] 王松岑, 于坤山, 汤广福. 10 kV 固态电源切换开关的研制[J]. 电力电子技术, 2008, 42(3): 37-38, 56.

WANG Songcen, YU Kunshan, TANG Guangfu. Development of 10 kV solid state transfer switch[J]. Power Electronics, 2008, 42(3): 37-38, 56.

[7] 陈华霖, 吴爱军, 陈宇, 等. 基于应急发电车的移动式低压开关连接装置[J]. 电力与能源, 2013, 34(1): 56-61.

CHEN Hualin, WU Aijun, CHEN Yu, et al. A low voltage switchgear link device based on the emergency mobile power station[J]. Distribution & Utilization, 2013, 34(1): 56-61.

[8] 赵蔚, 张鹏, 孙白, 等. 重要客户供电风险预控系统的设计和应用[J]. 华北电力技术, 2009(11): 27-30.

ZHAO Wei, ZHANG Peng, SUN Bai, et al. Design and application of important customer power supply risk pre-control system[J]. North China Electric Power, 2009(11): 27-30.

[9] 甘海庆, 陈红转. 电力客户安全性评价模型研究[J]. 电力需求侧管理, 2006, 8(5): 20-22.

GAN Haiqing, CHEN Hongzhan. Study on customer safety evaluation model[J]. Power Demand Side Management, 2006, 8(5): 20-22.

[10] BOSE R K, SHUKLA M, SRIVASTAVA L, et al. Cost of unserved power in Karnataka, India[J]. Energy Policy, 2006, 34(12): 1434-1447.

- [11] CHOWDHURY AA, MIELNIK T C, LAWTON L E, et al. System reliability worth assessment at a midwest utility-survey results for residential customers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2005, 27(9): 669-673.
- [12] SULLIVAN M J, VARDELL T, JOHNSON M. Power interruption costs to industrial and commercial consumers of electricity[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(6): 1448-1558
- [13] DZOBO O, ALVEHAG K, GAUNT C T, et al. Multi-dimensional customer segmentation model for power system reliability-worth analysis[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 62: 532-539.
- [14] 王彬, 何光宇, 蒋颖, 等. 智能电网评估指标体系中电力用户需求指标集的构建[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 21-26.
WANG Bin, HE Guangyu, JIANG Ying, et al. Construction of power consumers' demand index set in assessment index system of smart grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 21-26.
- [15] 张勇军, 许亮, 吴成文. 计及多因素的电网冰灾风险评估模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 12-17.
ZHANG Yong, XU Liang, WU Chengwen. Research on ice disaster risk evaluation model of power system considering multi-factors[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 12-17.
- [16] 张毅明, 张忠会, 姚峰, 等. 基于风险理论的电力系统元件风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 73-78.
ZHANG Yiming, ZHANG Zhonghui, YAO Feng, et al. Risk assessment of power system components based on the risk theory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 73-78.
- [17] 刘若溪, 张建华, 吴迪. 基于风险理论的配电网静态安全性评估指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 89-95.
- [18] 安天瑜, 王震宇, 金学洙, 等. 电力系统风险研究现状[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(9): 4-10.
AN Tianyu, WANG Zhenyu, KIM Haksu, et al. Research status on power system risk[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(9): 4-10.
- [19] 葛少云, 朱振环, 刘洪, 等. 配电网故障风险综合评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(7): 40-45.
GE Shaoyun, ZHU Zhenhuan, LIU Hong, et al. Comprehensive evaluation method for distribution network fault risk[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(7): 40-45.
- [20] 陈立, 郭丽娟, 邓雨荣. 基于状态和风险评估的老旧变压器安全经济性管理分析[J]. 高压电器, 2012, 48(2): 81-85.
CHEN Li, GUO Lijuan, DENG Yurong. Safety and economics analysis of the aged transformer based on the condition evaluation and risk assessment[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2): 81-85.
- [21] 何永秀. 电力综合评价方法及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [22] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.

收稿日期: 2015-02-03; 修回日期: 2015-04-24

作者简介:

赵建立(1983-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要从事智能用电新技术、售电市场分析等方面的研究工作;
E-mail:zhao_1883@163.com

周雯娟(1982-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事复杂网络计算、电气试验、人力资源管理等方面的研究工作。

(编辑 姜新丽)