

DOI: 10.7667/PSPC170345

基于敏感过程运行状态的事件型电能质量扰动损失评估

谭秀美¹, 肖先勇¹, 张逸², 马愿谦¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 国网福建电科院, 福建 福州 350003)

摘要: 电压暂降和短时电压中断等事件型电能质量扰动导致的敏感生产过程经济损失评估, 是电能质量解决方案投资决策的关键。从事件型电能质量扰动水平、设备运行状态和过程参数免疫时间(Parameter Immunity Time, PIT)出发, 研究发生电压暂降时生产过程的运行状态特性, 并将 PIT 作为用户遭受的事件型电能质量扰动与所导致损失的桥梁。详细研究了遭受电压暂降时生产过程运行状态的诊断和识别方法, 利用质量损失函数计算生产过程非正常非中断状态的中断隶属度, 提出一种改进的敏感过程事件型电能质量经济损失评估方法。最后, 以所在团队实际调查的某半导体制造企业为例, 证明了提出方法的正确性和可行性。

关键词: 事件型电能质量扰动; 敏感设备; 经济损失; 过程参数免疫时间; 非正常非中断状态

Assessment of economic loss caused by event power quality disturbances based on sensitive process running states

TAN Xiumei¹, XIAO Xianyong¹, ZHANG Yi², MA Yuanqian¹

(1. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Fujian Electrical Power Research Institute, Fuzhou 350003, China)

Abstract: The evaluation of the sensitive process economic loss caused by event power quality disturbances such as voltage sag and short supply interruption is the key to make the power quality solution investment decisions. This paper, embarking from the event power quality disturbance level, the running states of the equipment and the parameter immunity time (PIT), studies the characteristics of the process running states when happened voltage sag and makes PIT as the bridge of the event power quality disturbances suffered by the user and the resulting economic losses. The process running state diagnosis and identification method are studied in detail when voltage sags occur. The quality loss function is used to calculate the interruption membership of the non normal non interrupted process state to quantify losses, an improved sensitive process economic loss assessment method is proposed. Finally, a semiconductor manufacturing enterprise which the author's team has investigated in the past is taken as an example to prove the correctness and feasibility of the proposed method.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGRI-DL-71-15-006).

Key words: event power quality disturbances; sensitive equipment; economic loss; process parameter immunity time; non normal non interrupted state

0 引言

随着高新技术产业的快速发展, 越来越多对事件型电能质量扰动非常敏感的用户接入电网, 如: 高端制造业、军工、航空航天、金融、通信、数据中心等行业用户。用户常用的敏感设备有: 过程控

制器、变速传动装置、静止逆变器、分布控制系统、自动数据处理设备等。电网故障等引起的电压暂降、短时电压中断等事件型扰动是这类用户面临的最严重电能质量问题^[1-3], 可能导致试验失败、数据丢失、设备损坏、产品报废等, 给用户造成的损失巨大。欧洲 25 国调查表明, 事件型扰动损失约占电能质量总损失的 60%^[4], 实际中, 为了解决电压暂降损失问题需要进行投资, 而投资决策很大程度上依赖于

基金项目: 国家电网公司科技项目 (SGRI-DL-71-15-006)

对成本-效益的准确分析^[5-7], 其中经济损失评估是关键, 依赖于用户感知。因此, 深入研究科学准确的电压暂降损失评估方法具有重要理论价值和现实意义。

国内外对电压暂降等事件型扰动导致的生产过程经济损失评估方法开展了大量研究^[8-12], 主要有调查统计法^[8-9]和解析法^[10-12]。调查统计法虽然结果可靠性高, 但耗时费力, 且样本依赖性强, 难得到统计规律, 可移植性差, 对于给定新场景无意义。解析法大多以电压耐受曲线(VTC)或 CBEMA、ITI、SEMI F47 曲线为参考^[13-20], 计算设备故障率, 并认为生产过程仅会出现正常和失效两种状态, 以设备是否故障和单次故障损失为依据, 评估生产过程中断损失。这种思路面临两大困惑: 第一, 实际中, 过程工程师更多能直接感知生产过程中物理参数(如温度、转速、风速等)的变化, 对设备电气状态的理解属于设备和电气工程师, 过程工程师与设备、电气工程师之间需要密切沟通和交流, 对于复杂生产过程, 这样的沟通难度大; 且由于生产环节中的关键设备, 多数配置了自动重启装置, 设备故障不会立即使过程中断^[21]; 第二, 生产过程状态除了正常和中断状态外, 还存在中间状态, 即: 非正常非中断状态^[9]。2010年, CIGRE/CIRED 联合工作组 C4.110 的报告中提出了过程参数免疫时间(Parameter Immunity Time, PIT)概念, 对 PIT 测试方法提出了建议, 为评估事件型扰动导致的经济损失提供了新途径。遗憾的是, 该工作组对生产过程状态及其诊断方法、不同状态下的损失程度的确定方法研究不足。

本文考虑了用户可直接感知的物理参数及其可接受程度, 以用户设备是否故障和过程参数是否越过可接受限值作为生产过程状态诊断判据, 将发生事件型扰动时生产过程的状态分为: 正常、中断、非正常非中断状态; 通过识别生产过程实际所处状态, 利用质量损失函数量化过程非正常非中断状态时的损失, 提出一种改进的敏感生产过程事件型电能质量扰动经济损失评估方法, 并用实际案例证明本文方法的正确性和可行性。

1 过程后果状态分类

2010年 CIGRE/CIRED 联合工作组 C4.110 的报告中将过程参数免疫时间(Parameter Immunity Time, PIT)定义为: 设备受一定幅值的电压暂降后, 过程

参数越限的时间, 如图 1。

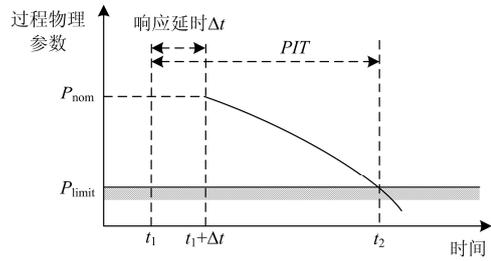


图 1 过程参数免疫时间 PIT

Fig. 1 Process parameter immunity time PIT

图 1 中, P_{nom} 为过程参数额定值, P_{limit} 为可接受限值, t_1 为电压暂降发生时刻, $[(t_1 + \Delta t) - t_1] = \Delta t$ 为过程响应延时, 过程免疫时间 $PIT = t_2 - t_1$ 。PIT 曲线考虑了过程参数及其变化规律, 适用于不同过程。 $t_1 \sim (t_1 + \Delta t)$ 时间段内, 物理参数没有发生任何偏移, 过程完全不受任何影响, 定义该段时间过程处于正常状态; $t_1 + \Delta t \sim t_2$ 为从过程响应到过程参数达到最小允许值的时间, 过程物理参数已偏离理想值 P_{nom} , 但尚未超过可接受限值 P_{limit} , 过程未中断, 但可能已造成产品质量、产量、原材料成本等损失, 且情况随物理参数偏离越大而变得越严重, 可将该段时间过程状态定义为非正常非中断状态; 如果 t_2 时刻之后, 物理参数越过 P_{limit} , 生产过程中断且不能自动恢复, 定义这种过程状态为中断状态。

根据遭受事件型电能质量扰动后过程参数的变化情况, 可将过程状态分为正常 I_1 、非正常非中断 I_2 和中断 I_3 三种状态, 如图 2, 其中, t_{res} 为设备重新启动恢复时间, t_D 为电压暂降持续时间。

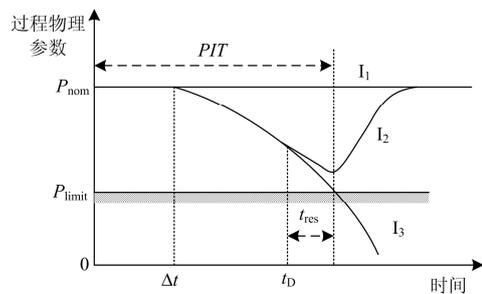


图 2 过程状态分类

Fig. 2 Process states classification

2 过程状态诊断及其损失

本节研究事件型扰动水平、设备敏感度、设备重新启动恢复时间、PIT 与三种过程运行状态之间的映射关系。通过计算过程处于非正常非中断状态的中断隶属度, 对过程未中断损失进行量化。

2.1 过程状态诊断

在事件型电能质量扰动作用下,敏感过程受影响后的状态取决于事件型扰动(主要指电压暂降,短时中断可看作特殊的电压暂降)的水平、设备电压耐受能力、设备重新启动恢复时间和过程免疫时间。在单次扰动作用下,诊断过程是否中断,首先判断设备是否故障,如果扰动发生在设备 VTC 曲线或其他标准曲线故障区域内,可直接判断设备处于故障状态;如果设备故障,进一步判断过程物理参数是否超限,如图 2,当 $t_D < (PIT - t_{res})$ 时,设备在电能质量扰动消失后能自动恢复,过程物理参数没有超过限值,此时,可判定处于非正常非中断状态;如果过程物理参数超限,判断处于中断且不能自动恢复状态。图 3 给出了过程状态诊断的流程。

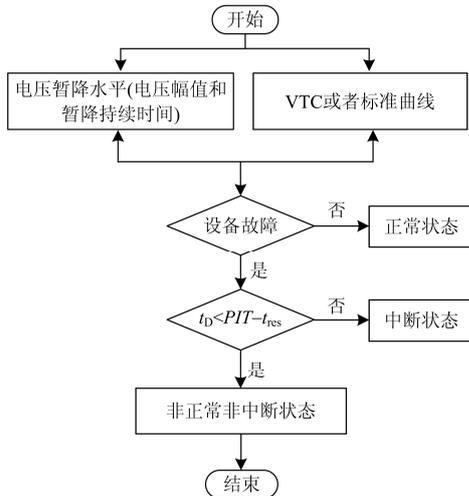


图 3 过程状态诊断流程图

Fig. 3 Flow chart of process states diagnosis

2.2 过程非正常非中断状态损失量化

质量工程理论中的质量损失原理认为:产品质量特性的波动无论超出界限与否,均会给用户和社会带来损失^[22]。质量工程领域中,逆正态质量损失函数的一般形式为

$$L(x) = K \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{(x-T)^2}{2\sigma^2} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: x 为产品的质量特性; T 为目标值; σ^2 为敏感性参数; $x-T$ 为质量特性与目标值的偏离; K 为质量特性偏离目标值的最大损失值。质量特性 x 围绕目标值 T 波动,希望波动越小越好,当 $T=0$ 时,则称 $L(x)$ 为望小特性质量损失函数,即是希望质量特性 x 越小越好,但不取负值。

电能质量作为一种产品,可以将经济损失函数引入电能质量领域。文献^[23]已经将质量工程理论中质量损失函数引入电压暂降经济损失的评估中,

提出用逆正态质量损失函数描述暂降损失,仅仅以电压暂降幅值作为质量特性,未考虑设备对电压暂降的免疫力大小,在评估损失的过程中难免出现偏差,本文提出利用电压暂降严重度作为电能质量特性,评估暂降经济损失。

把 IEEE Std.1564^[24]中推荐的电压暂降严重度指标 S_e 作为质量特性 x ,相同暂降水平下,其值越大,设备对电压暂降的免疫力越差。定义式为

$$x = S_e = \frac{1-V}{1-V_{curve}(t_D)} \quad (2)$$

式中: V 是电压暂降幅值; t_D 是暂降持续时间; V_{curve} 是设备 VTC 曲线或者标准曲线在持续时间为 t_D 时的电压暂降幅值。

事件型扰动对生产过程带来的损失大小随着暂降的严重度增加而增加。利用质量损失函数,把过程非正常非中断状态损失占过程中断损失 K 的比值作为其单次暂降下的中断隶属度函数 $h(x)$ 。构造逆正态过程中断隶属度函数,刻画过程非正常非中断状态时的过程中断隶属度为

$$h(x) = \frac{L(x)}{\sup L(x)} = 1 - \exp \left[-\frac{(x-T)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3)$$

取目标值 $T=0$ 时,式(3)可写为

$$h(x) = 1 - \exp \left(-\frac{x^2}{2\sigma^2} \right) \quad (4)$$

由于 $h(x)$ 的取值为 $[0,1)$,故在暂降最严重的情况下,其值也不可能达到 1,考虑 0.1% 的误差,即取 $h(x_{max}) = 0.999$, σ^2 可通过式(5)得到。

$$1 - \exp \left(-\frac{x_{max}^2}{2\sigma^2} \right) = 0.999 \Rightarrow \sigma^2 = x_{max}^2 / 13.815 \quad (5)$$

值得注意的是,当电压幅值降到 $V=0$ 时,电压暂降严重度 x 取值达到最大,结合设备 VTC 曲线或者标准曲线,即可求出 x_{max} 。

3 敏感过程暂降损失综合评估

本节采用第 2 节提出的方法,修正文献^[20]中的生产过程中断次数(the Annual Number of Production Process Halts, PPHs)^[25],对敏感过程暂降损失进行评估。

根据记录到的给定敏感设备接入点的暂降数据,拟合得到电压暂降特征的概率密度函数,利用本文方法计算过程非正常非中断状态的过程中断隶属度,即电压暂降导致生产过程中断次数 PPHs 为

$$PPHs = p(E) \cdot p(S|E) \cdot N_{sag-year} \quad (6)$$

式中: $p(E)$ 为暂降作用下设备的故障率(式(7));

$p(S|E)$ 为暂降导致设备故障后, 过程发生中断的条件概率; $N_{\text{sag-year}}$ 为年暂降发生次数。

$$p(E) = \iint_{\Omega} p(t_D)p(V)dTdt_D \quad (7)$$

式中: V 、 t_D 分别为电压暂降幅值和持续时间; $p(V)$ 、 $p(t_D)$ 分别为电压暂降幅值和持续时间的概率密度函数, 由历史数据监测拟合得到; Ω 为设备 VTC 曲线或者标准曲线的设备故障区域。在设备故障区域内, 过程中断的隶属度函数为

$$p(S|E) = \begin{cases} 1 & t_D + t_{\text{res}} > PIT \\ h(x) & t_D + t_{\text{res}} < PIT \end{cases} \quad (8)$$

根据式(4)一式(8), 得到敏感过程中断次数:

$$PPHS = \begin{cases} \iint_{\Omega} p(t_D)p(V) dTdt_D N_{\text{sag-year}}, & t_D > PIT - t_{\text{res}} \\ \iint_{\Omega} p(t_D)p(V) h(x) dTdt_D N_{\text{sag-year}}, & t_D < PIT - t_{\text{res}} \end{cases} \quad (9)$$

敏感过程暂降损失 C_{tot} 为

$$C_{\text{tot}} = PPHS \cdot CIC^C \quad (10)$$

式中: C 为用户类型; CIC^C 为特定用户过程中断单次平均损失。

4 案例分析

4.1 数据计算

半导体厂对生产工艺、环境(如温度、空气清洁度等)等要求很高, 以作者所在团队调查的该厂的一条连续生产线为例, 该生产线上冷却机(chiller)所在的温控过程对电压暂降十分敏感, 而如果设备因电压暂降停下来, 温度达不到生产要求, 会导致正在加工的产品(如晶圆等)报废, 甚至生产过程发生中断。已知冷却机的过程免疫时间为 150 ms, 其中暂降敏感元件的重新启动恢复时间为 30 ms。

该半导体厂 2013 年的实测暂降如图 4。

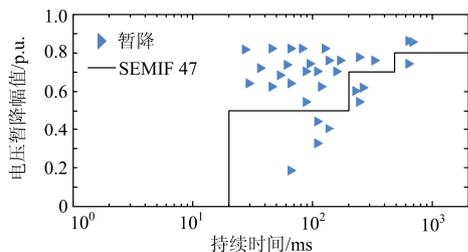


图 4 某半导体厂 2013 年实测暂降

Fig. 4 Recorded sags of a semiconductor factory in 2013

根据该厂 2013 年电压暂降的实测数据, 用 Matlab 分别拟合出电压暂降幅值和持续时间的概率密度函数 $p(V)$ 、 $p(t_D)$, 如图 5 所示。

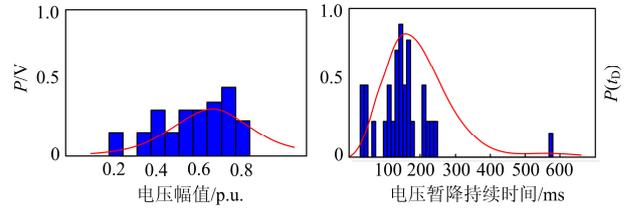


图 5 电压暂降特征概率密度函数

Fig. 5 Voltage sag characteristics probability density function

根据图 5 所示结果, 结合式(4)、式(9), 可以计算出该晶圆厂每年由暂降导致该过程发生中断 5.6 次。

该半导体厂历史损失数据表明, 该过程每次中断导致用户平均损失 210 万元, 由式(10)评估该过程年暂降损失为 1 176 万元。

4.2 结果分析

如果仅仅依据暂降设备故障率来计算该过程暂降损失, 即发生在 F47 曲线下的暂降均会导致过程中断, 则每年过程平均发生 8 次中断, 暂降损失约为 1 680 万元。本文方法所得结果与之相比, 评估出的该过程暂降损失数值要小, 且更接近真实值(该过程 2013 年统计的暂降损失为 1 080 万元), 这主要是因为判断过程是否中断时, 加入了 PIT, 即计及了设备故障后由过程物理参数反映出来的过程对暂降的免疫力, 因此过程由暂降导致的中断次数相对减少, 评估出的暂降损失也就小一些, 这与曼彻斯顿大学教授 Milanovic J. V. 所在团队得出的结论一致^[26]。本文引入 PIT 判断过程运行状态, 并将非正常非中断状态损失折算到中断状态损失, 避免了暂降导致敏感过程损失的过估计, 方法更加合理。

对电压暂降非常敏感的用户, 统计电压暂降损失是一个繁琐、复杂的过程。本文提出了一种事件型电能质量扰动下基于生产过程后果状态的损失评估方法, 计及了过程未中断的暂降损失, 简单且易于操作。比起现有方法仅仅以设备 VTC 曲线或者标准曲线判断过程是否发生中断, 改善了暂降损失的过估计。

5 结论与展望

1) 本文研究了事件型电能质量扰动水平, 设备敏感度, 设备重新启动恢复时间、PIT 与三种过程运行状态的映射关系, 对过程未中断进行了暂降损失量化, 文中实际案例结果证明了所提方法的合理性和可行性, 具有一定的工程实用价值。

2) 暂降敏感过程从非正常非中断状态演变成中断状态, 不同阶段各物理参数的特点、规律存在

很多变化的可能, 这些规律有待认识透彻, 用于防止过程从非正常非中断状态朝中断状态演化;

3) 本文仅考虑了在事件型电能质量扰动下, 带有自动恢复装置设备的单一过程物理参数, 实际中可能存在单个设备多物理参数或多个设备多物理参数的情况, 还应继续深入研究。

参考文献

- [1] CHAN J Y, MILANOVIĆ J V. Methodology for assessment of financial losses due to voltage sags and short interruptions[C] // 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, Barcelona, 2007: 1-6.
- [2] 程志友, 王雪菲, 徐佳. 一种基于复阻抗的电压暂降定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 149-154.
CHENG Zhiyou, WANG Xuefei, XU Jia. A voltage sag detection method based on complex impedance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 149-154.
- [3] 章海静, 梁振锋, 彭书涛, 等. 线路故障引起电压暂降影响因素的研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(5): 7-11.
ZHANG Haijing, LIANG Zhenfeng, PENG Shutao, et al. Study on the influencing factors of voltage sag induced by transmission line faults[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(5): 7-11.
- [4] ROMAN T, JONATHAN M. Pan European LPQI power quality survey[C] // 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 2007.
- [5] 田梁玉, 唐忠, 焦婷, 等. 基于多目标评判法的微电网经济性指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 122-127.
TIAN Liangyu, TANG Zhong, JIAO Ting, et al. Economic indicators research of microgrid based on multi-objective evaluation method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 122-127.
- [6] 李正明, 李文文, 张国松, 等. 一种补偿电网电压凹陷的 DVR 优化补偿策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 139-145.
LI Zhengming, LI Wenwen, ZHANG Guosong, et al. An optimized compensation strategy of DVR for grid voltage sag compensation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 139-145.
- [7] 李国栋, 严宇, 皮俊波, 等. 基于区间数逼近的微电网电压暂降风险评估[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(6): 13-18.
LI Guodong, YAN Yu, PI Junbo, et al. Risk assessment of micro-grid voltage sag based on an approximation method of interval numbers[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(6): 13-18.
- [8] QUAIA S, TOSATO F. A method for the computation of the interruption costs caused by supply voltage dips and outages in small industrial plants[C] // Proceedings of IEEE EUROCON, Ljubljana (Slovenia), 2003.
- [9] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量经济性评估 第1部分: 电力用户的经济性评估方法: GB/Z 32880.1—2016[S].
National Standardization Technical Committees of voltage, current ratings and frequencies. Economic evaluation of power quality—part 1: economic evaluation method for the end-users: GB/Z 32880.1—2016[S].
- [10] 甄晓晨, 陶顺, 肖湘宁, 等. 电压暂降的工厂级经济损失评估模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 104-111.
ZHEN Xiaochen, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. An evaluation model of plant-level economic loss due to voltage dips[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 104-111.
- [11] Milanović J V, Gupta C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags—part I: the methodology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 918-924.
- [12] 赵会茹, 欧大昌, 李天友, 等. 基于模糊隶属函数的电压骤降损失估算[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 51-55.
ZHAO Huiru, OU Dachang, LI Tianyou, et al. Voltage sag loss estimation based on fuzzy membership function[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 51-55.
- [13] 肖先勇, 杨洪耕, 陈武, 等. 敏感设备电压暂降敏感度的模糊随机评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 90-95.
XIAO Xianyong, YANG Honggeng, CHEN Wu, et al. Fuzzy-random assessment method of equipment sensitivity to voltage sags[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 90-95.
- [14] 肖先勇, 陈武, 杨洪耕. 敏感设备电压暂降故障水平的多不确定性评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 36-42.
XIAO Xianyong, CHEN Wu, YANG Honggeng, et al. Multi-uncertainty assessment for failure level of sensitive equipment caused by voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 36-42.
- [15] 赵泓, 肖先勇, 李政光, 等. 敏感设备电压暂降失效率区间最大混合熵评估[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 70-75.

- ZHAO Hong, XIAO Xianyong, LI Zhengguang, et al. Estimation of maximum interval hybrid entropy of sensitive equipment failure rate due to voltage sag[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 70-75.
- [16] 汪颖, 肖先勇, 杨达. 敏感设备电压暂降失效事件不确定性的最大混合熵评估[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 159-164.
- WANG Ying, XIAO Xianyong, YANG Da. Uncertainty assessment on failure accident of voltage-sensitive equipment due to voltage sag by maximum hybrid entropy[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 159-164.
- [17] Technical Committee 3 (TC3), Information Technology Industry Council. ITI (CBEMA) curve application note[S]. 2000.
- [18] Specification for semiconductor processing equipment voltage sag immunity: SEMI F47-0706[S]. 2006.
- [19] 孙晓璐, 马静, 李渊博, 等. 基于云模型的电压暂降设备敏感度评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 100-104.
- SUN Xiaolu, MA Jing, LI Yuanbo, et al. Equipment sensitivity evaluation based on cloud model due to voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 100-104.
- [20] 刘旭娜, 肖先勇, 徐方维, 等. 敏感设备电压暂降严重程度可信性评价测度与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 190-196.
- LIU Xuna, XIAO Xianyong, XU Fangwei, et al. Credibility measure and assessment method of sensitive equipment voltage sag severity[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 190-196.
- [21] CIGRE/CIREU/UIE Joint Working Group C4.110. Voltage dip immunity of equipment and installations[R]. Paris, France: CIGRE, 2010.
- [22] 张月义. 质量损失函数与测量系统校准研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [23] DING Z J, ZHU Y Q, XU Y. Economic loss evaluation and selective treatment of power quality[C] // Beijing: 5th International Conference on, Critical Infrastructure (CRIS), 2010.
- [24] IEEE-SA Standards Board. IEEE guide for voltage sag indices: IEEE Std 1564TM—2014[S]. New York: Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power and Energy Society, 2014.
- [25] Delfantia M, Quaiab S. Analysis and comparison of premium power park performances[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 83(1): 176-184.
- [26] Cebrian J C, Milanovic J V, Kagan N. Probabilistic assessment of financial losses in distribution network due to fault-induced process interruptions considering process immunity time[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1478-1486.

收稿日期: 2017-03-10; 修回日期: 2017-05-21

作者简介:

谭秀美(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电压暂降及其经济性评估;

肖先勇(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 长期从事电能质量与智能电网研究;

张逸(1984—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 兼职副教授, 研究方向为电能质量分析与控制系统开发。
E-mail: zhangyiscu@163.com

(编辑 周金梅)