

# 基于过程性能指数的电压暂降严重程度评估新方法

肖艳辉, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 将电压暂降事件与敏感设备的电压耐受特性曲线相结合, 综合考虑幅值、持续时间和暂降频次三要素的作用, 提出利用过程性能指数评估电压暂降对敏感设备的影响程度。首先根据幅值和持续时间计算单一事件相对于电压耐受特性曲线的严重程度指数, 然后结合暂降频次计算电压暂降严重程度指数的均值和标准差, 最后根据均值和标准差计算电压暂降过程性能指数、年电压暂降过程性能指数, 作为评估电压暂降对敏感设备影响程度的指标。通过仿真, 验证了该方法的实用性和正确性。

**关键词:** 电压暂降; 严重程度指数; 过程性能指数; 影响程度; 电压耐受特性曲线

## A new method for estimating the severity of voltage SAG based on process performance index

XIAO Yan-hui, YANG Hong-geng

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** This paper combines voltage sag event with the tolerant curve of voltage sag on sensitive equipment. Comprehensively considering amplitude, duration and sag frequency, the process performance index is proposed to estimate the influence degree of voltage sags on sensitive equipment. According to amplitude and duration, the severity index relative to the tolerant curve of voltage sag is obtained. Mean and standard deviation of the severity indices of voltage sag are calculated based on the annual frequency, the process performance index of voltage sag and the annual process performance index of voltage sag are obtained according to mean and standard deviation, which are treated as the index to estimate the influence degree of voltage sags. Through simulation, the effectiveness and practicality of the proposed method are validated.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50677041).

**Key words:** voltage sags; severity index; process performance index; influence degree; tolerant curve of voltage sag

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)23-0001-04

## 0 引言

随着高技术产业的飞速发展, 计算机、复杂电子设备等敏感负荷得到了广泛应用, 它们对电压暂降和短时中断(以下简称电压暂降)事件非常敏感<sup>[1,2]</sup>。即便几个周期的电压暂降都将影响敏感负荷的正常工作, 造成巨大经济损失<sup>[3]</sup>。

目前关于电压暂降严重程度的评估已成为国内外研究的热点。文献[4,5]提出系统平均有效值波动频率(SARFI-Curve)指标, 该指标简单, 便于比较, 但只能反映影响敏感设备正常工作的频次, 而无法反映电压暂降的严重程度; 文献[5,6]利用不同的电压暂降表格来统计暂降频次, 通过对幅值和持续时间的不同划分较详细地描述了系统特性, 但指数太多; 文献[2,5]从能量角度评估电压暂降的严重程度,

利用能量指标表征电压暂降的能量损失, 但没与设备的敏感性结合; 文献[7~9]中的严重程度指数( $S_e$ )与设备电压耐受特性曲线相结合, 从幅值-持续时间角度反映电压暂降相对于敏感设备的严重程度, 电压暂降总严重程度指数是所有事件严重程度指数之和, 单一事件严重程度指数可能在总严重程度指数中占主要地位(即10次严重程度指数为0.3的电压暂降对敏感设备的影响程度等价于1次严重程度指数为3的电压暂降对敏感设备的影响程度), 无法反映影响敏感设备正常工作的电压暂降频次, 不能有效反映一年内电压暂降对敏感设备的总影响程度。

本文综合电压暂降幅值、持续时间、暂降频次三要素, 根据过程性能指数PPI(Process Performance Index)原理提出利用电压暂降过程性能指数评估电压暂降对敏感设备的影响程度。该方法首先将电压暂降特性(幅值和持续时间)与电压耐受

特性曲线相结合, 计算单一事件的严重程度指数, 然后计算电压暂降严重程度指数的均值和标准差, 最后根据均值和标准差得到电压暂降过程性能指数、年电压暂降过程性能指数。该方法从幅值-持续时间角度考虑电压暂降的平均严重程度, 从频次角度考虑影响敏感设备正常工作的电压暂降的频次分布, 有效避免了从单一角度评估电压暂降对敏感设备的影响程度, 以及单一事件严重程度过大所带来的误判缺陷。仿真结果表明, 年电压暂降过程性能指数更加合理地反映电压暂降对敏感设备的总影响程度, 电压暂降过程性能指数有效地反映了电压暂降对敏感设备的平均影响程度。

### 1 过程性能指数

统计过程控制是指用统计学的方法和技术对过程进行分析和控制。美国休哈特(W.A.Shewhart)最早提出统计过程控制的概念, 并应用于质量管理实践活动中<sup>[10]</sup>。

过程性能指数反映了当前过程的性能满足标准与规范的程度, 根据采集到的数据对当前过程性能估计, 可以反映生产过程信息的综合指标<sup>[11,12]</sup>。使用户对电能质量以及供电部门对电能质量的实际控制能力有一个全面的了解。根据规格限值的不同过程性能指数分为双侧过程性能指数和单侧过程性能指数。本文只介绍单侧过程性能指数。

#### 1.1 上单侧过程性能指数 $P_{PU}$

若只有规格上限要求, 则上单侧过程性能指数 ( $P_{PU}$ ):

$$P_{PU} = \frac{T_U - \bar{x}}{3S} \quad (1)$$

式中:  $T_U$  表示规格上限;  $\bar{x}$  表示过程样本均值;  $S$  表示过程样本标准差。

参数  $\bar{x}$ 、 $S$  可用容量为  $n$  的样本来估计, 即:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

式中:  $n$  表示样本个数;  $x_i$  表示第  $i$  个样本值。

#### 1.2 下单侧过程性能指数 $P_{PL}$

若只有规格下限要求, 则下单侧过程性能指数 ( $P_{PL}$ ):

$$P_{PL} = \frac{\bar{x} - T_L}{3S} \quad (3)$$

式中:  $T_L$  表示规格下限。

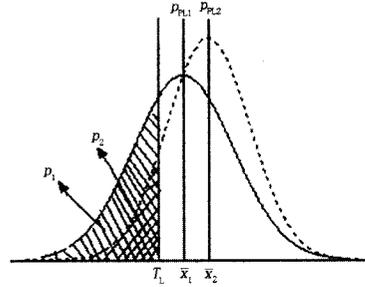


图 1 下单侧过程性能指数

Fig.1 The lower unilateral process performance index

如图 1 所示, 过程性能指数的大小取决于样本均值与样本标准差。过程性能指数越大, 表示质量特性越满足限值的要求, 或者位于限值区域内的样本越多, 过程的性能越强。

### 2 电压暂降评估指标

暂降幅值、持续时间、发生频次是电压暂降的重要特征量, 三者是相互关联的。暂降幅值和持续时间是一次电压暂降的特性, 频次是一年内监测到的电压暂降次数。考察电压暂降严重程度时需要综合考虑这三个要素。

#### 2.1 电压暂降严重程度指数

文献[7,8]中的严重程度指数体现了暂降幅值和持续时间的共同作用, 并与电压耐受特性曲线相结合, 反映电压暂降相对于敏感设备的严重程度。在计算事件严重程度指数前, 先要选择一种电压耐受特性曲线, 例如: CBEMA、ITIC 曲线等。电压暂降严重程度指数 ( $S_e$ ) 计算公式如下:

$$S_e = \frac{1-U}{1-U_{curve}(d)} \quad (4)$$

式中:  $U$  表示暂降事件的幅值;  $d$  表示暂降事件的持续时间;  $U_{curve}(d)$  表示与持续时间相对应的电压暂降容忍限值。

如图 2, 电压耐受特性曲线左上方为可接受区域, 右下方为不可接受区域, 不同持续时间对应不同的电压暂降容忍限值。从图中可以看出, 对于幅值低于其持续时间所对应的电压暂降容忍限值的电压暂降, 必然会在比该持续时间更短的时刻发生故障, 因此对于持续时间相同的电压暂降, 幅值低于电压暂降容忍值越大, 即偏离限值的距离越大, 电压暂降越严重。可接受区域电压暂降虽然不会影响敏感设备的正常工作, 但对敏感设备具有一定的潜在影响, 因此, 在考虑电压暂降对敏感设备整体的影响程度时, 也要考虑可接受区域电压暂降对敏感设备的潜在影响程度。

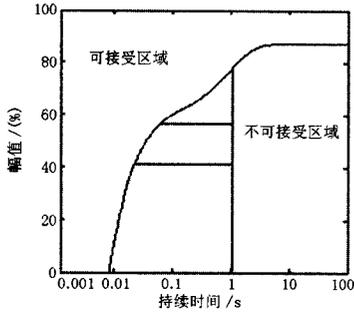
图2 电压耐受特性曲线<sup>[13]</sup>

Fig.2 Power acceptability curve

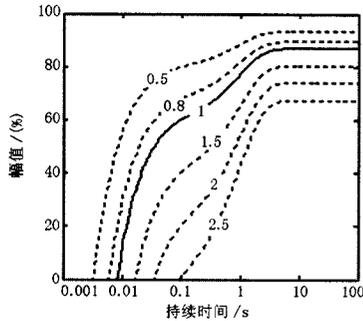


图3 严重程度指数等高线

Fig.3 Event severity index (Se) relative to the tolerant curve of voltage sag

如图3, 实线为电压耐受特性曲线, 该曲线上所有电压暂降严重程度指数为1, 不可接受区域的电压暂降严重程度指数大于1, 偏离电压耐受特性曲线越远, 严重程度指数越大; 可接受区域的电压暂降严重程度指数小于1, 偏离电压耐受特性曲线越近, 严重程度指数越大。由于不同敏感设备的电压耐受特性曲线不同, 不同严重程度指数之间的偏移距离略有不同, 本文近似认为不同严重程度指数与电压耐受特性曲线的偏移距离相同, 即严重程度指数相同的电压暂降严重程度相同。

## 2.2 电压暂降严重程度指数统计量

电压暂降严重程度指数均值( $\bar{x}_{sc}$ ):

$$\bar{x}_{sc} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{ei} \quad (5)$$

式中:  $N$  表示一年内监测的电压暂降频次;  $S_{ei}$  表示第  $i$  次电压暂降的严重程度指数。

电压暂降严重程度指数标准差( $S_{sc}$ ):

$$S_{sc} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (S_{ei} - \bar{x}_{sc})^2} \quad (6)$$

## 2.3 电压暂降过程性能指数

电压耐受特性曲线上所有电压暂降的严重程度指数均为1, 是可接受区域和不可接受区域电压暂降的界限, 本文以严重程度指数“1”为界限, 定义电

压暂降过程性能指数( $P_{PL}$ ):

$$P_{PL} = \frac{\bar{x}_{sc} - 1}{3S_{sc}} \quad (7)$$

如图4所示, 电压暂降严重程度指数均值一定时, 标准差越小, 过程性能指数越大。从幅值-持续时间角度来看, 电压暂降对敏感设备的平均影响程度相同; 从频次角度来看离散度越小, 不可接受区域的电压暂降频次越多, 影响敏感设备正常工作的频次越多, 电压暂降对敏感设备的影响程度就越大。

如图5所示, 标准差不变, 电压暂降严重程度指数均值越大, 电压暂降过程性能指数越大。从幅值-持续时间角度来看电压暂降严重程度指数均值偏离“1”越远, 对敏感设备的影响程度越大; 从频次角度来看影响敏感设备的频次越多, 电压暂降对敏感设备的平均影响程度就越大。

综上所述可以看出, 电压暂降过程性能指数越大, 电压暂降对敏感设备的平均影响程度越大。电压暂降过程性能指数从幅值-持续时间角度考虑了电压暂降的平均严重程度, 结合标准差, 考虑了影响敏感设备正常工作的电压暂降分布。

为了评估电压暂降一年内对敏感设备总的影响程度, 定义年电压暂降过程性能指数( $P_S$ ):

$$P_S = N \times P_{PL} \quad (8)$$

年电压暂降过程性能指数越大, 电压暂降一年内对敏感设备的总影响程度越大。

为了比较不同系统之间的电压暂降对敏感设备的影响程度, 可以用系统电压暂降过程性能指数进行比较。系统电压暂降过程性能指数( $S_S$ ):

$$S_S = \sum_{i=1}^n P_{Si} \quad (9)$$

式中:  $P_{Si}$  表示第  $i$  节点年电压暂降过程性能指数;  $n$  表示系统有  $n$  个节点。

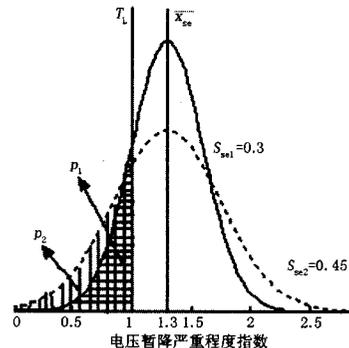


图4 均值相同标准差不同时电压暂降过程性能指数的比较  
Fig.4 Comparison of process performance index of voltage sag when mean is same and standard deviation is different

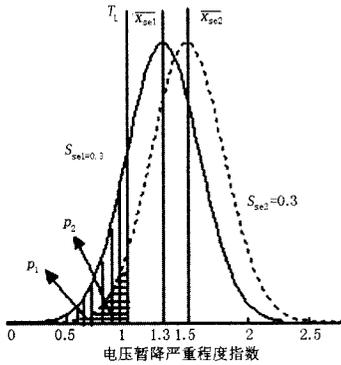


图 5 标准差相同均值不同时电压暂降过程性能指数的比较  
Fig.5 Comparison of process performance index of voltage sag when standard deviation is same and mean is different

### 3 仿真验证

算例一：两节点任意产生 31 次电压暂降事件，见图 6 的电压暂降散点图。结合图 2 的电压耐受特性曲线评估电压暂降对敏感设备的影响程度。

根据表 1 的分析可知，SARFI-Curve 从频次角度反映影响敏感设备正常工作的暂降频次，节点 2 比节点 1 多 2 次，节点 2 电压暂降对敏感设备的总影响程度大，但是没有考虑电压暂降幅值-持续时间的影响程度；电压暂降严重程度指数从幅值-持续时间角度反映电压暂降对敏感设备的影响程度，电压暂降总严重程度指数是所有事件严重程度指数之和，节点 1 电压暂降总严重程度指数比节点 2 大，即节点 1 电压暂降对敏感设备的总影响程度大，但是无法反映影响敏感设备正常工作电压暂降频次的多少；电压暂降过程性能指数从幅值-持续时间角度反映电压暂降的平均严重程度，结合电压暂降严重程度指数标准差，反映一年内监测到的电压暂降频次分布，综合三要素，节点 2 电压暂降过程性能指数比节点 1 大，再考虑一年内监测到的电压暂降频次，得到节点 2 的年电压暂降过程性能指数比节点 1 大，即节点 2 电压暂降对敏感设备的总影响程度大。

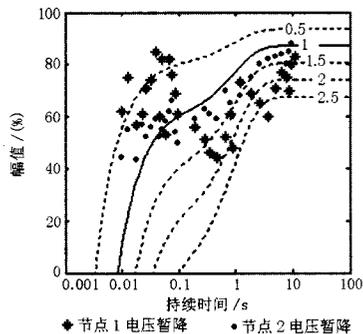


图 6 电压暂降散点图

Fig.6 Scatter diagram of severity indices for voltage sags

表 1 节点指数比较

Tab.1 Comparison of the node indices

SARFI-Curve	平均电压暂降严重程度指数	电压暂降总严重程度指数	电压暂降过程性能指数	年电压暂降过程性能指数	
节点 1	18	1.276 8	39.580 8	0.128 2	3.974 2
节点 2	20	1.113 6	34.521 6	0.139 2	4.315 2

算例二：节点 1 任意产生 23 次电压暂降，节点 2 产生 27 次电压暂降，见图 7 的电压暂降散点图。结合图 2 的电压耐受特性曲线评估电压暂降对敏感设备的影响程度。

根据表 2，从频次角度，节点 2 影响敏感设备正常工作的电压暂降频次比节点 1 多 1 次，从幅值-持续时间角度，节点 2 电压暂降总严重程度指数比节点 1 大，年电压暂降过程性能指数综合幅值-持续时间、频次三要素，得到节点 2 年电压暂降过程性能指数比节点 1 大，有效地反映了电压暂降对敏感设备的总影响程度。

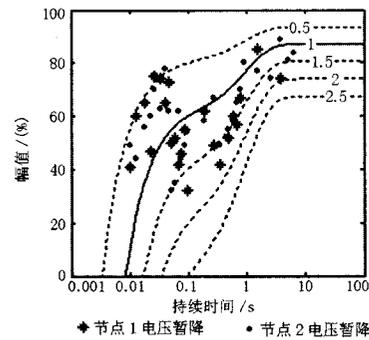


图 7 电压暂降散点图

Fig.7 Scatter diagram of severity indices for voltage sags

表 2 节点指数比较

Tab.2 Comparison of the node indices

SARFI-Curve	平均电压暂降严重程度指数	电压暂降总严重程度指数	电压暂降过程性能指数	年电压暂降过程性能指数	
节点 1	14	1.107 3	25.467 9	0.079 4	1.826 2
节点 2	15	1.083 2	29.246 4	0.076 4	2.062 8

上述两个算例可以看出，年电压暂降过程性能指数综合考虑了电压暂降幅值-持续时间、电压暂降频次三个因素，更加合理地反映了电压暂降对敏感设备的影响程度。避免了 SARFI-Curve、电压暂降严重程度指数从单一角度评估电压暂降严重程度造成误判的缺陷。

(下转第 44 页 continued on page 44)

作时间都有很大意义。特别是像冰灾期间,由于弱馈电源出现和高频通道衰耗增大,使高频保护退出工作,“反时限”零序电流保护能弥补此时的不足。

如图 1,当接地电阻  $R$  较大时,零序功率也会减小,反时限保护的動作时间相对会延长,由于单相接地电流的减小,对系统动态稳定的冲击也会减小,这时可以由固定时限的零序电流后备保护配合动作。而“同特性”反时限保护确保了前后各级保护动作时间上的配合,保证选择性。

我们认为零序功率构成反时限的零序保护,这种方法在理论上是可行的。当然,从理论到实际还需要一个过程,要实现全网统一的同特性的反时限零序电流保护,还需要不断探索,解决实施过程中出现的问题。

(上接第 4 页 continued from page 4)

### 4 结论

(1) 电压暂降过程性能指数反映电压暂降对敏感设备的平均影响程度,年电压暂降过程性能指数反映电压暂降对敏感设备的总影响程度。

(2) 电压暂降过程性能指数不仅考虑了幅值-持续时间的严重程度,还考虑了影响敏感设备正常工作的电压暂降频次分布,从统计特性出发,更加合理地评估电压暂降对敏感设备的影响程度。

### 参考文献

[1] 杨洪耕,刘守亮,肖先勇.基于  $s$  变换的电压凹陷分类专家系统[J].中国电机工程学报,2007,27(1):98-104.  
YANG Hong-geng, LIU Shou-liang, XIAO Xian-yong. S-transform-based Expert System for Classification of Voltage Dips[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 98-10.

[2] 陶顺,肖湘宁,刘晓娟.电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(21):63-69.  
TAO Shun, XIAO Xiang-ning, LIU Xiao-juan. Study on Distribution Reliability Considering Voltage Sags and Acceptable Indices[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 63-69.

[3] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇.电能质量问题的研究和技术发展(三)—电力系统的电压凹陷[J].电力自动化设备,2003,23(12):1-4.  
YANG Hong-geng, XIAO Xian-yong, LIU Jun-yong. Issues and Technology Assessment on Power Quality-Part 3: Voltage Sags in Power System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 1-4.

[4] Lee G J, Albu M M, Heydt G T. A Power Quality Index Based on Equipment Sensitivity, Cost, and Network Vulnerability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(3): 1504-1510.

[5] Bollen M H J, Sabin D D, Thallam R S. Voltage Sag

### 参考文献

[1] 彭莉萍,张丽.继电保护转置整定值适应性问题探讨[J].江西电力,2008,(2).

[2] 李晓华,柳焕章.反时限电流保护应用[J].中国设计师网.

[3] 杨增力,石东源,段献忠.计及接地距离保护影响的输电线路零序电流保护整定计算及简化问题[A].中国高校电力系统及自动化专业第 22 届学术年会论文集[C].

收稿日期:2008-12-07; 修回日期:2009-03-02

### 作者简介:

张旭俊(1937-),男,教授级高工,主要从事电力系统继电保护工作;

上官帖(1958-),男,教授级高工,主要从事电力系统继电保护工作。E-mail:sgtnc@163.com

Indices-recent Developments in IEEE P1564 Task Force[A]. in:CIGRE/IEEE PES International Symposium[C]. 2003.34-41.

[6] Kagan N, Ferrari E L, Matsuo N M, et al. A Methodology for the Assessment of Short Duration Voltage Variations in Electric Power Distribution Systems[A]. in:10th International Conference on Harmonics and Quality of Power[C].2002.577-581.

[7] Bollen M H J, Sabin D D. International Coordination for Voltage Sag Indices[J]. Digital Object Identifier,2006. 229-234.

[8] JOINT WORKING GROUP CIGRE c4.7/CIREN, Power Quality Indices and Objectives[Z].CIGRE REPORT DRAT, Mar, 2004.

[9] Shen C C, Lu C N. A Voltage Sag Index Considering Compatibility Between Equipment and Supply[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(2): 996-1002.

[10] 杨跃进.统计过程控制技术[M].北京:航空工业出版社,2003.

[11] 陈育蕾.过程能力指数和性能指数的若干问题研究[J].中国计量学院学报,2005,16(4):305-310.  
CHEN Yu-lei. Study on Process Capability Index and Process Performance Index[J]. China Jiliang University Transaction, 2005, 16(4): 305-310.

[12] Dzekevich J A, Garretson J. A Design Margin Index for MTBF and Ao[A]. in:IEEE Reliability and Maintainability Symposium[C]. 2007.288 - 291.

[13] Kyei J, Ayyanar R, Heydt G, et al. The design of Power Acceptability Curves[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(3): 828-833.

收稿日期:2008-12-03

### 作者简介:

肖艳辉(1982-),女,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制;E-mail:xyh\_19831001@126.com

杨洪耕(1949-),男,教授,博士生导师,研究方向为电能质量分析与控制。