

设备侧电压暂降严重程度评估方法研究

卢文清¹, 常乾坤², 贾东强², 钱叶牛², 徐永海¹

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075)

摘要:综合考虑 ITIC 曲线、SEMI 曲线和 C4.110 工作组提出的敏感设备耐受曲线, 基于严重程度函数单调性和连续性的实际分布特征, 分别建立了单相、两相和三相电压暂降影响度函数; 在此基础上考虑电压暂降非矩形实测波形, 利用多暂降阈值描述改进影响度函数, 从而提出了一种考虑电压暂降类型与多暂降阈值描述的多暂降阈值设备侧电压暂降严重程度评估方法, 该评估指标综合考虑设备耐受曲线及电压暂降事件的持续时间、暂降幅值、暂降类型和暂降波形评估严重程度。实例分析验证了所提方法的正确性。

关键词:电压暂降; 影响度函数; 电压暂降类型; 多暂降阈值

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.026

0 引言

随着电力电子技术的发展, 电压暂降问题的影响越来越显著^[1-2]。为了改善电网供电质量、提高用户满意度, 开展电压暂降严重程度评估刻不容缓。电压暂降严重程度评估可以从源、网、荷各侧出发, 其影响因素和响应机制有所不同^[3]。在电源侧和电网侧, 保护、控制、测量以及灵活输电设备等一般都配有直流电源, 因此对电压暂降的问题关注较少。在用户侧, 尤其是针对现代工业系统, 大量元件和过程对电压暂降非常敏感, 而这些设备与电压暂降不兼容容易导致某些业务过程中断, 甚至导致整个业务系统瘫痪, 造成巨大的经济损失^[4]。因此从设备角度研究电压暂降严重程度评估机制具有重要意义。

从设备角度对电压暂降的严重程度进行评估通常基于敏感设备耐受曲线, 目前常用的耐受曲线有针对半导体和电子信息技术设备的 SEMI F47 曲线^[5]和 ITIC 曲线^[6]。专家学者基于敏感设备耐受曲线, 针对电压暂降严重程度评估提出了典型指标, 包括电压暂降严重性指标 S_v ^[7] 和电压暂降综合性指标 MDSI^[8] (下文简称指标 S)。 S_v 和指标 S 在评估电压暂降的严重程度时具有简洁高效的特点, 但也存在一些不合理的地方: S_v 指标不满足单调性^[9], 而指标 S 不满足连续性^[10]。文献^[11]提出一种基于权值函数法的电压暂降严重程度评估方法, 此方法解决了 S_v 指标和指标 S 存在的问题, 但在确定电压暂降严重程度的权值函数的参数时直接利用经验数据, 存在一定的主观性。因此本文在权值函数的方法基础上, 根据设备的耐受特性确定权值函

数的参数。

以上敏感设备耐受曲线以及评估指标主要考虑暂降幅值与持续时间 2 个特征量。但文献^[12]中的试验表明, 不同暂降类型下, 变频调速装置的耐受曲线并不相同。同时, 国际联合工作组 C4.110 针对综合负荷, 依据电压暂降类型的不同, 分别给出了单相/两相和三相暂降的耐受曲线^[13]。综上所述, 电压暂降类型(单相、两相、三相电压暂降)的不同也会影响敏感设备的耐受能力^[12-14]。而现有评估方法和指标将各类型的电压暂降统一作为单相电压暂降处理, 可能造成欠评估。因此本文将电压暂降类型作为电压暂降特征量之一, 依据不同电压暂降类型下敏感设备耐受能力进行电压暂降严重程度评估。

敏感设备对电压暂降的响应具有复杂性和多样性^[15-17], 即耐受曲线难以确定。因此本文广泛考虑现有的设备敏感曲线, 包括 SEMI 曲线、ITIC 曲线以及考虑电压暂降类型的 C4.110 敏感设备耐受曲线, 建立综合负荷的电压暂降影响度函数。而在已知某一特定设备的耐受曲线的情况下, 可选择建立针对该设备的电压暂降影响度函数反映其严重程度, 评估单次电压暂降事件发生时设备受到影响的程度。

同时, 一般利用最低的电压暂降幅值及所对应的持续时间反映该次电压暂降的情况^[7]。这种描述简单地将电压暂降波形认为是矩形波, 虽然简化了评估的过程, 但对于实际电网中具有较长恢复时间的电压暂降事件容易造成过度评估。因此在评估中考虑采用电压暂降的实际波形信息对其进行描述。文献^[1]提出一种多暂降阈值描述与时间序列的方式描述电压暂降, 避免在评估中对非矩形波电压暂降的过度评估。

考虑到上述电压暂降评估中存在的评估函数分布不合理以及忽略电压暂降类型和波形等特征量的情况, 本文综合 ITIC 曲线、SEMI 曲线和 C4.110 工作组提出的敏感设备耐受曲线, 根据严重程度函数单

收稿日期: 2017-12-10; 修回日期: 2018-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51277069); 国网北京市电力公司科技研究项目 (SGTYHT/16-JS-198)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51277069) and the Science & Technology Project of State Grid Beijing Electric Power Company (SGTYHT/16-JS-198)

调性和连续性的实际分布特征,分别建立了单相/两相和三相电压暂降影响度函数;在此基础上考虑到非矩形波电压暂降,利用多暂降阈值描述改进影响度函数,从而提出了一种考虑电压暂降类型与多暂降阈值描述的设备侧电压暂降严重程度评估方法。

1 典型设备侧电压暂降评估指标分析

针对设备侧的电压暂降评估指标包括 2 类:

①仅考虑电压暂降事件的特征,分析该事件对设备造成的影响,包括能量指标、暂降分指标以及电压时间面积缺失指标;②同时考虑电压暂降事件的特征和设备耐受情况,分析设备在该次事件作用下的响应情况,包括 S_e 指标、 S 指标和基于权值函数的电压暂降严重程度评估。前者忽略设备的耐受能力,无法针对性地表征设备受到电压暂降事件的影响。因此,第 2 类指标更适用于设备侧电压暂降严重程度的精确评估。

1.1 电压暂降严重性指标 S_e

IEEE P1564 中推荐的电压暂降严重性指标 S_e 用于描述敏感设备受电压暂降事件影响的严重程度^[7],针对单一事件的电压暂降严重性指标定义如式(1)所示。

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

其中, d 为电压暂降持续时间; U 为电压幅值; $U_{curve}(d)$ 为在敏感设备耐受曲线上持续时间为 d 时对应的电压幅值。

严重性指标 S_e 基于设备敏感性曲线(如 SEMI 曲线)定义电压暂降的严重性,如图 1 所示(图中,电压暂降幅值为标么值,后同)。随着电压暂降持续时间的增大和电压暂降幅值的减小,电压暂降严重性也随之增加,符合设备对电压暂降事件的实际响应情况。但该评估指标没有考虑电压暂降的类型和电压暂降的波形:在评估电压暂降时不进行单相、两相与三相电压暂降的区分,对于电压暂降幅值和持续时间相同的三相暂降事件和单相暂降事件的评估结果相同,这往往与实际电压暂降对设备的影

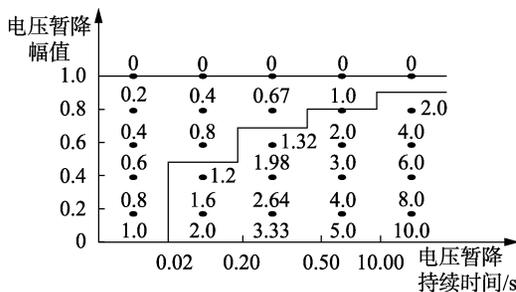


图 1 电压暂降严重程度与 SEMI 曲线的关系
Fig.1 Relationship between voltage sag severity degree and SEMI curve

响情况不符,从而造成对三相暂降的欠评估;而在评估非矩形波电压暂降时,没有考虑其幅值随时间的变化情况,将其视为矩形波进行评估,容易造成对实际电网中具有较长恢复时间的电压暂降事件的过度评估。此外,由于典型敏感设备耐受曲线多是阶梯型的,只要电压暂降事件的持续时间在同一阶梯内,会出现在电压暂降幅值相等而持续时间不等时 S_e 指标相等的问题,造成电压暂降事件评估的误差。而电压暂降的严重程度随着电压暂降持续时间的增大和电压暂降幅值的减小都应呈现单调增大的特性。

1.2 电压暂降综合性指标 S

针对不同设备,根据经验数据,当设备用电电压出现电压暂降时,若电压幅值低于 U_{min} 且持续时间大于 T_{max} ,则会引起设备非正常运行;若电压幅值高于 U_{max} 且持续时间小于 T_{min} ,则不会引起设备非正常运行。为此,可建立如图 2 所示的广义设备耐受曲线。

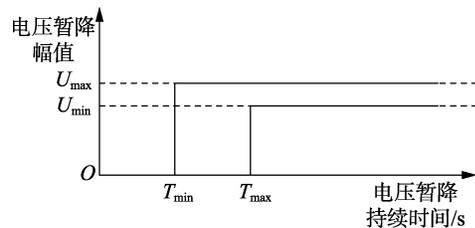


图 2 敏感设备广义耐受曲线

Fig.2 General tolerance curve of sensitive equipment

基于敏感设备广义耐受曲线,电压暂降的持续时间严重性指标 S_D 、电压暂降幅值严重性指标 S_M 和电压暂降严重性综合指标 S 可分别表示为:

$$S_D(T) = \begin{cases} 0 & T < T_{min} \\ (T - T_{min}) \frac{100}{T_{max} - T_{min}} & T_{min} \leq T \leq T_{max} \\ 100 & T > T_{max} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_M(U) = \begin{cases} 0 & U > U_{max} \\ (U_{max} - U) \frac{100}{U_{max} - U_{min}} & U_{min} \leq U \leq U_{max} \\ 100 & U < U_{min} \end{cases} \quad (3)$$

$$S(U, T) = \frac{S_M(U) S_D(T)}{100} \quad (4)$$

S_D 指标、 S_M 指标和 S 指标的取值范围均为 $[0, 100]$,电压暂降持续时间越长,电压暂降幅值越小,指标值越大,反映出电压暂降的严重程度越大。当 $S=0$ 时,表示电压暂降不严重,设备正常运行;当 $S=100$ 时,表示电压暂降非常严重,设备故障;当 $S \in (0, 100)$ 时,表示设备处于不确定区域,且 S 越大,电

压暂降越严重。对于处于不确定区域的电压暂降,相比于利用故障区间来反映其对敏感设备的影响,利用 S 指标能量化其严重程度。但与 S_c 指标一样, S 指标存在欠评估以及过度评估的问题。同时,当 S 指标的耐受曲线采用平均形式时,在曲线跳变的位置会出现严重程度的突变。而电压暂降的严重程度随着电压暂降持续时间和电压暂降幅值的变化是连续的,即严重程度函数应为连续函数^[10]。

1.3 基于权值函数法的电压暂降严重程度评估

基于权值函数的电压暂降严重程度评估首先构造影响度函数 D 量化电压暂降的严重程度,影响度函数值越大,说明电压暂降越严重。

$$D = F(C) \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (5)$$

其中, C 为电压暂降的持续时间和暂降幅值; $F(\cdot)$ 为映射函数,可根据图 2 所示的敏感设备广义耐受曲线,利用权值函数法确定。

根据图 2 所示的敏感设备广义耐受曲线,关于电压暂降持续时间与电压暂降幅值对设备的影响度函数应具有两端平缓、中间变化较快的特性。因此采用式(6)所示的逻辑斯蒂函数作为电压暂降持续时间与电压暂降幅值影响度的权值函数,此函数满足连续性和单调性,曲线的变化特征为两端变化缓慢、中间变化较快。

$$y = \frac{1}{1 + e^{-ax - bx}} \quad (6)$$

其中, a, b 为控制参数。

根据电压暂降持续时间和电压暂降暂降幅值的区间统计,由于电压暂降持续时间在(0.02, 1) s 区间内,电压暂降幅值在(0.7, 0.9) p.u. 区间内的电压暂降事件较多,因此认为:电压暂降持续时间 0.02 s 对应的影响度值为 0.05,电压暂降持续时间 1 s 对应的影响度值为 0.9;电压暂降幅值 0.8 p.u. 对应的影响度值为 0.15,电压暂降幅值 0.1 p.u. 对应的影响度值为 0.95。从而得到电压暂降持续时间、电压暂降幅值及电压暂降事件影响度函数分别如式(7)~(9)所示。

$$D_T = \frac{1}{1 + e^{-3-10T}} \quad (7)$$

$$D_M = \frac{1}{1 + e^{-4+7U}} \quad (8)$$

$$D = \frac{\sqrt{D_T^2 + D_M^2}}{2} \quad (9)$$

上述设备侧电压暂降指标 S_c, S 以及权值函数法,考虑电压暂降持续时间和电压暂降幅值以及设备耐受曲线的情况定义设备侧受电压暂降影响的严重程度。但 S_c 和 S 指标在定义电压暂降严重程度

函数时不满足函数的单调性和连续性, S_c 指标无法准确评估在同一敏感设备耐受曲线阶梯下暂降幅值相同的电压暂降事件;而利用 S 指标进行评估时,设备耐受曲线阶梯上的电压暂降事件的严重程度突变为 0。权值函数法虽然满足连续性和单调性,但定义的权值函数主观性较强。

2 电压暂降影响度评估模型

综合上述电压暂降严重程度评估指标存在的问题,本节以敏感设备为主要分析对象,综合考虑敏感设备耐受曲线以及电压暂降事件本身所具有的特征量,包括电压暂降持续时间、电压暂降幅值、电压暂降类型和波形建立评估模型。首先对各特征量进行分析建模;考虑到电压暂降严重程度函数所具有的单调性和连续性,根据文献[11]中的影响度 $D = F(C)$ 表征电压暂降的严重程度, F 函数由逻辑斯蒂函数表示;然后通过综合敏感设备耐受曲线所反映的设备对电压暂降持续时间和电压暂降幅值的响应情况确定逻辑斯蒂函数的未知参数,从而可建立单相/两相和三相电压暂降综合影响度函数。在此基础上,通过多暂降阈值的描述方法进行精确评估,避免电压暂降严重程度评估中的过度估计和欠估计。

2.1 电压暂降特征量分析及建模

影响设备对电压暂降响应的特征量主要有电压暂降持续时间、电压暂降幅值、电压暂降类型和电压暂降波形。其中,电压暂降幅值与电压暂降持续时间为电压暂降最基本的 2 个特征量,电压暂降持续时间越长,电压暂降幅值越低,电压暂降对设备的影响也越大,即电压暂降越严重。除此之外,电压暂降类型及电压暂降波形对设备侧电压暂降影响度的评估也有影响。

2.1.1 电压暂降类型

电压暂降根据暂降相可分为单相暂降、两相暂降以及三相暂降,以笔者参与建设的我国 4 个城市电能质量监测系统 2009 年 7 月至 2017 年 1 月部分监测点捕获的 484 次电压暂降事件作为研究对象,按照电压暂降类型统计后可得,单相、两相电压暂降发生的概率为 80.54%,三相电压暂降发生的概率为 9.46%。三相电压暂降的发生概率虽然较低,但其影响不容忽视。为此,C4.110 工作组给出的敏感设备耐受曲线中,对单相/两相电压暂降和三相电压暂降分别进行考虑^[13]。考虑到不同类型敏感设备耐受特性差异,本文以 SEMI 曲线、ITIC 曲线以及 C4.110 工作组给出的单相和两相耐受曲线作为设备侧单相和两相电压暂降影响度的综合耐受曲线,如图 3 所示,将 SEMI 曲线、ITIC 曲线以及 C4.110 工作组给出的三相耐受曲线作为设备侧三相电压暂降影响度的综合耐受曲线,如图 4 所示。

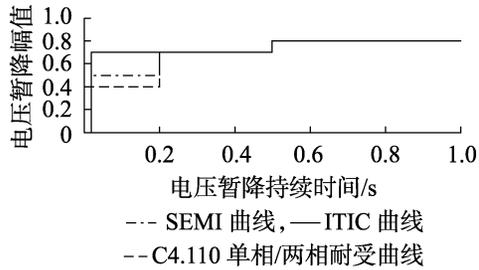


图 3 SEMI 曲线、ITIC 曲线以及 C4.110 单相/两相耐受曲线

Fig.3 SEMI curve, ITIC curve and single-phase and two-phase tolerance curve of C4.110

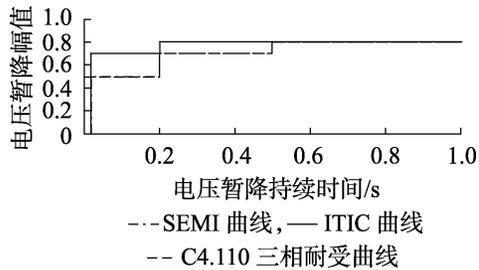


图 4 SEMI 曲线、ITIC 曲线以及 C4.110 三相耐受曲线

Fig.4 SEMI curve, ITIC curve and three-phase tolerance curve of C4.110

2.1.2 电压暂降波形

在进行电压暂降严重程度评估时,将作用在设备上的电压暂降认为是矩形波。从电力系统的角度,引起电压暂降的主要原因有 2 个:①短路故障,其特征是电压均方根值下降幅值大,其变化曲线近乎矩形,持续时间短;②用户设备如重型负载投切,主要包括变压器励磁涌流以及感应电机启动,其特征是电压均方根值下降幅值相对较小,变化曲线为非矩形,持续时间相对较长^[18-19]。以 2.1.1 节中所述的 484 次电压暂降事件按照波形进行统计分析,电压暂降波形在各电压等级下的结果如表 1 所示。由表 1 可见,代表短路故障的矩形波占有所有事件的 67.92%,且电压等级越高,矩形波的占比越大,在 220 kV 电压等级下由其引发的电压暂降占比高达 89.61%,但在电压等级低的系统中,非矩形波的电压暂降事件不容小觑,几乎占到 50%。

表 1 按电压暂降波形统计的电压暂降事件

Table 1 Statics of voltage sag events based on voltage sag waveform

波形	概率/%				平均 概率/%
	10 kV	35 kV	110 kV	220 kV	
矩形	57.23	50.47	73.72	89.61	67.92
非矩形	42.77	49.53	26.28	10.39	32.08

现有电压暂降描述采用最严重的那一相的电压暂降幅值及对应的电压暂降持续时间,而基于此描述评估非矩形波电压暂降往往会造成过度评估。因此,从准确评估的角度,根据波形特征对现有描述方式进行改进,可采用一组等间隔的电压暂降阈值及

与其对应的持续时间的电压暂降描述方法^[1],如式(10)所示。

$$U=S(t) \text{ 或 } t=S^{-1}(U) \quad (10)$$

对于电压暂降过程中的任意电压 U_c 可以描述为 $t=S^{-1}(U_c)$, 根据实际录波数据,可求得 2 个解 t_{c1}, t_{c2} , 如式(11)所示。

$$t(U_c) = |t_{c1} - t_{c2}| \quad 0.1 \leq U_c \leq 0.9 \quad (11)$$

其中, $t(U_c)$ 为电压暂降过程中电压小于或等于 U_c 的时间。

综上所述,将电压暂降描述为多暂降阈值和持续时间序列 $t(0.9), t(0.9-h), t(0.9-2h), \dots, t(0.1)$, 其中, h 可根据需要求取^[2]。

2.2 基于综合耐受曲线电压暂降影响度函数

考虑到电压暂降严重程度的单调性和连续性的分布特征,本节基于综合负荷耐受曲线构建权值函数,从而建立基于综合耐受曲线的电压暂降综合影响度函数,反映电压暂降严重程度。

根据式(6),电压暂降持续时间及幅值的影响度函数分别有 2 个待确定的未知参数,结合图 3、4 所示的 SEMI F47 曲线、ITIC 曲线和 C4.110 工作组给出的标准敏感曲线,分别利用其中 2 个关键节点确定设备侧单相/两相和三相电压暂降综合影响度函数。

2.2.1 单相/两相电压暂降影响度函数

根据单相、两相敏感设备耐受曲线的特征,在电压暂降持续时间为 0.02 s、0.2 s 和 0.5 s 时,耐受曲线跳变,在电压暂降幅值为 0.4 p.u.、0.5 p.u.、0.7 p.u. 和 0.8 p.u. 时,耐受曲线跳变。耐受曲线的跳变表明设备的状态突变,即电压暂降的持续时间或暂降幅值改变极小的值就会引起设备状态的突变。而在各电压暂降持续时间区段内,当电压暂降幅值确定时,电压暂降持续时间对设备状态几乎没有影响;在各电压暂降幅值区段内,当电压暂降持续时间确定时,电压暂降幅值对设备的状态几乎没有影响,因此这些跳变点是决定电压暂降影响度函数分布的关键。由于影响度函数呈现 S 形,因此分别选择 2 个极值,确定电压暂降持续时间的关键节点为 0.02 s 和 0.5 s,电压暂降幅值的关键节点为 0.4 p.u. 和 0.8 p.u.。

对于电压暂降持续时间影响度的权值函数,认为曲线下方为故障区,其影响度值接近 1,曲线上方为非故障区,其影响度值接近 0。而实际上存在不确定区域,因此当电压暂降持续时间小于 0.02 s 或者电压暂降幅值大于 0.8 p.u. 时,选取 95% 的置信区间,取其影响度值为 0.05,而当电压暂降持续时间大于 0.5 s 或者电压暂降幅值小于 0.4 p.u. 时,选取 95% 的置信区间,取其影响度值为 0.95。

因此电压暂降持续时间影响度函数权值的关键节点为 (0.02, 0.05) 和 (0.5, 0.95), 电压暂降幅值影

响度函数权值的关键节点为(0.8, 0.05)和(0.4, 0.95)。由于 U 的取值范围为 0.1~0.9 p.u., 而 t 的取值范围为 0.02~180 s, 根据 IEC16000-2-8 标准, 二者的影响度区间一致^[11], 但区间长度差距过大, 电压暂降幅值改变极小值, 其影响度值会发生很大改变, 而电压暂降持续时间要改变相对大的值, 其影响度值才能够达到同样的改变程度。因此将电压暂降持续时间映射到(0, 1)区间, 得到电压暂降持续时间影响度函数权值的关键节点为(0, 0.05)和(0.375, 0.95), 电压暂降幅值影响度函数权值的关键节点为(0.8, 0.05)和(0.4, 0.95)。

将关键节点的坐标值代入式(6)中, 可计算控制参数, 得到电压暂降持续时间影响度函数和电压暂降幅值影响度函数, 分别如式(12)和(13)所示。

$$D_{T1} = \frac{1}{1+e^{-2.94-11.78T}} \quad (12)$$

$$D_{M1} = \frac{1}{1+e^{-8.33+14.72U}} \quad (13)$$

电压暂降持续时间影响度函数和电压暂降幅值影响度函数曲线的变化特征分别如图 5 和图 6 所示。由图可见, 曲线两端变化缓慢、中间变化较快, 与前文分析结果相符。

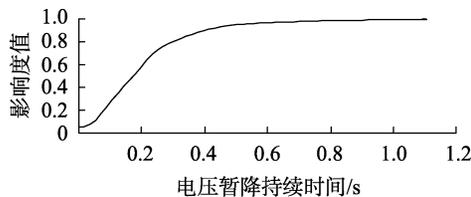


图 5 电压暂降持续时间影响度函数

Fig.5 Influence function of voltage sag duration

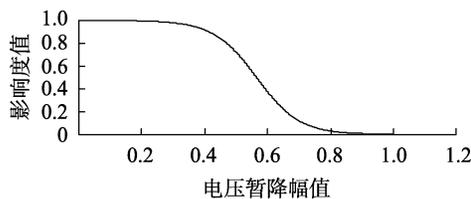


图 6 电压暂降幅值影响度函数

Fig.6 Influence function of magnitude of voltage sag

则定义单相/两相电压暂降综合影响度函数如式(14)所示。

$$D_1(U, T) = \sqrt{\frac{D_{M1}^2(U) + D_{T1}^2(T)}{2}} \quad (14)$$

2.2.2 三相电压暂降影响度函数

对于三相电压暂降, 根据图 4 所示的曲线, 在电压暂降持续时间为 0.02、0.2 s 时, 耐受曲线跳变, 在电压暂降幅值为 0.7 p.u.、0.8 p.u. 时, 耐受曲线跳变, 因此分别选择 2 个极值, 确定电压暂降持续时间的关键节点为 0.02 s 和 0.2 s, 电压暂降幅值的关键节

点为 0.7 p.u. 和 0.8 p.u.。

与单相/两相电压暂降影响度函数类似, 由于电压持续时间的区间太大, 因此将其映射到(0, 1)区间。则三相电压暂降持续时间的关键节点取为(0, 0.05)和(0.208 3, 0.95), 三相电压暂降幅值关键节点取为(0.8, 0.05)和(0.7, 0.95)。据此, 三相电压暂降持续时间影响度函数、三相电压暂降幅值影响度函数和三相电压暂降综合影响度函数分别式(15)、(16)和(17)所示。

$$D_{T3} = \frac{1}{1+e^{-2.94-28.27T}} \quad (15)$$

$$D_{M3} = \frac{1}{1+e^{-44.17+58.89U}} \quad (16)$$

$$D_3(U, T) = \sqrt{\frac{D_{T3}^2(T) + D_{M3}^2(U)}{2}} \quad (17)$$

本节基于权值函数, 根据敏感设备耐受曲线的特性, 分别建立了单相/两相和三相电压暂降影响度函数, 可在实际电压暂降评估时避免对三相电压暂降的欠评估。

2.3 多暂降阈值描述下的电压暂降影响度函数

本文将持续时间 t 映射到 T 上进行计算, 因而多暂降阈值与时间序列转换为 $T(0.9)$ 、 $T(0.9-h)$ 、 $T(0.9-2h)$ 、 \dots 、 $T(0.1)$ 。

根据多暂降阈值的描述方式, 建立电压暂降综合影响度函数如式(18)所示。

$$S_{CDk} = \max \{ D_k(0.9, T(0.9)), D_k(0.9-h, T(0.9-h)), D_k(0.9-2h, T(0.9-2h)), \dots, D_k(0.1, T(0.1)) \} \quad (18)$$

其中, $k=1$ 和 $k=3$ 分别表示单相/两相暂降和三相暂降; D_k 表示暂降事件在多暂降阈值描述下, 各暂降阈值与对应持续时间计算的电压暂降影响度, 而暂降事件最终的影响度值为所有 D_k 中的最大值。

基于多暂降阈值和持续时间序列的描述方法以电压暂降幅值和电压暂降持续时间为重要的特征量, 同时考虑其波形特征对电压暂降进行描述, 解决了电压暂降的过度评估问题。

3 电压暂降综合影响度函数特性分析

3.1 综合影响度函数分布特性分析

以单相/两相电压暂降综合影响度函数为例, 利用 MATLAB 作出其关于持续时间和幅值的三维图像, 分布情况如图 7 所示。由图可见, 随着电压暂降持续时间的增加, 电压暂降幅值的减小, 影响度函数呈现连续增大。其增大的速度不是均匀的, 在电压暂降持续时间为 0 而电压暂降幅值为 1 p.u. 时, 电压暂降严重程度几乎为 0 且增长缓慢, 而在电压暂降持续时间为 1 s 而电压暂降幅值为 0 时, 电压暂降严

重程度几乎为 1 且增长缓慢。

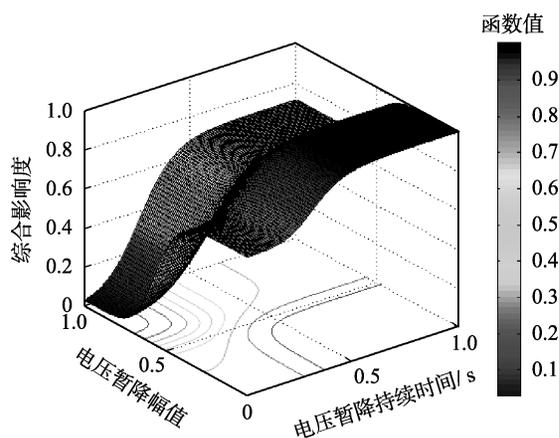


图 7 电压暂降综合影响度函数

Fig.7 Voltage sag influence function

将电压暂降影响度函数的三维分布投影到电压暂降持续时间和电压暂降幅值平面得到影响度函数的等值线分布,通过统计得到我国 4 个大型城市电网监测系统监测到的 484 次电压暂降事件在影响度函数等高线平面上的分布情况,如图 8 所示。由图 8 可见,在电压暂降幅值大而电压暂降时间短和电压暂降幅值小而电压持续时间长的位置,其影响度等高线分布密集,说明影响度变化缓慢,而在中间区域等高线稀疏,说明影响度变化快。以 SEMI 曲线作为参考,电压暂降事件集中分布于 SEMI 曲线上方的区域①,即影响度值小的区域。根据设备耐受曲线下方为故障区、设备耐受曲线上方为非故障区,在 SEMI F47 曲线下方共有 69 次事件,即按照理想情况共有 69 次事件造成设备故障。同时以 SEMI 曲线作为设备耐受曲线,根据其和影响度函数的分布关系可以看出,当影响度函数值小于 0.3 时,基本不会造成设备故障,而当影响度值大于 0.7 时,设备极有可能会发生故障。

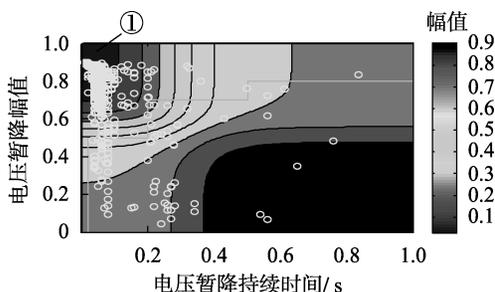


图 8 电网电压暂降事件在电压暂降综合影响度函数等高线上的分布情况

Fig.8 Distributions of voltage sag events on influence function contour map

综上所述,本文提出的基于设备耐受曲线,同时考虑电压暂降持续时间、电压暂降幅值、电压暂降类型和电压暂降波形的电压暂降评估方法,具有合理性和实用性,可应用于实际系统的电压暂降严重程

度评估。

3.2 实例分析

以某城市电网电能质量监测系统在 2012 年 2 月至 2014 年 12 月监测到的 19 次电压暂降事件为例,利用第 2 节得到的电压暂降影响度函数进行评估,并将其与第 1 节中的指标评估结果进行对比,分析电压暂降影响度函数评估的合理性。

3.2.1 单次电压暂降事件严重程度评估

监测节点于 2012 年 3 月 1 日 19:31:12 发生电压暂降的方均根如图 9 所示。本文以此次电压暂降事件为例,计算其综合影响度指标。

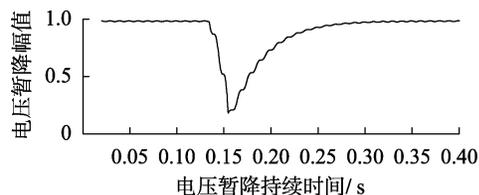


图 9 电压暂降方均根波形

Fig.9 RMS waveform of voltage sag

图 9 所示的电压暂降为用户设备投切引起的单相电压暂降,其波形为非矩形波,电压暂降幅值为 0.182 p.u.,电压暂降持续时间为 0.1 s,根据式(11)列出多暂降阈值和对应的电压暂降持续时间序列如表 2 所示。

表 2 多暂降阈值与时间序列

Table 2 Voltage sag thresholds and time series

阈值	持续时间/s	映射 T	阈值	持续时间/s	映射 T
T(0.9)	0.1	0.125	T(0.4)	0.0195	—
T(0.8)	0.069 8	0.077 8	T(0.3)	0.010 8	—
T(0.7)	0.050 9	0.048 3	T(0.2)	0.001 8	—
T(0.6)	0.039 3	0.030 2	T(0.1)	0	—
T(0.5)	0.024 9	0.007 65			

因此,图 9 所示的电压暂降事件通过多暂降阈值与时间序列描述为: $T(0.9)$ 、 $T(0.8)$ 、 \dots 、 $T(0.2)$ 、 $T(0.1)$,对应的时间序列值为 0.1 s、0.069 8 s、 \dots 、0.010 8 s、0 s。采用式(14)计算该电压暂降阈值和电压持续时间序列对应的基于权值函数法的影响度值,结果为:0.505、0.054 7、0.271、0.515、0、0、0、0。基于上述计算结果,利用式(18)可得该电压暂降事件所对应的基于多暂降阈值描述方法的电压暂降综合影响度值为 0.515。若采用传统电压暂降描述方式,应用权值函数计算其综合影响度函数值为 0.706,与多暂降阈值描述方式下的综合影响度相比存在过度评估现象。

3.2.2 节点电压暂降严重程度评估

节点的电压暂降严重程度一般用所有电压暂降事件的严重程度和的平均值来表征。

选取某城市 10 kV 电压等级下某监测节点的 19 组电压暂降数据进行实例分析,针对电压暂降类型

和电压波形情况的统计如表 3 所示。

表 3 19 组电压暂降相及波形统计情况
Table 3 Statics of nineteen groups of voltage sag phases and waveform

电压暂降相	频次	电压暂降波形	频次
单相/两相	15	矩形	15
三相	4	非矩形	4

由表 3 可以看出,该监测节点的三相电压暂降和非矩形波形的电压暂降事件的占比均为 21.05%,因此按传统的评估指标会造成欠评估或者过度评估。

因此分别利用 S_e 指标、 S 指标和权值函数法评估单次暂降事件的严重程度,其中 S_e 指标和 MDSI 指标分别利用 SEMI、ITIC 和 C4.110 曲线计算得到的均值表示严重程度。

电压暂降严重程度的计算结果如附录中的表 A1 所示,由表可见:影响度函数指标 S_{CD} 与 S_e 指标、 S 指标、权值函数法评估的电压暂降严重程度基本呈一致的趋势;但若采用敏感设备耐受曲线的平均值形式, S 指标在评估时将曲线上的模糊区域的值都定为 0,使得评估过于乐观;其评估的小持续时间和大暂降幅值事件结果大部分为 0,表示设备处于无故障状态,虽然设备侧最终的响应确实只有故障和无故障状态,但应用此评估模型却不利于事件之间的横向比较; S_e 指标评估的事件 13 和事件 14 的结果一致,但从电压暂降持续时间和电压暂降幅值上看事件 13 的严重程度更大;权值函数法的评估结果呈现单调性和连续性的特点,但出现三相电压暂降或者非矩形波形暂降时,与 S_e 指标和 S 指标一样难以得到精确的评估结果,如对比事件 3 与事件 4 可知,按照电压持续时间和电压暂降幅值进行判断,事件 3 的严重程度明显更大但由于事件 3 的波形为非矩形,对其严重程度的评估过度;3 种指标对事件 8、9 和 16 的严重程度处于乐观的状态,其评估忽略了该电压暂降为三相电压暂降的事实;而本文所提的电压暂降综合影响度函数在权值函数法的基础上充分考虑了电压暂降类型和电压暂降波形对严重程度的影响,避免了上述评估指标存在的问题,因此电压暂降严重程度的影响度函数评估模型在精确评估上有其合理性和先进性,可用于实际系统的暂降事件评估。

4 结论

本文从设备响应角度对电压暂降严重程度进行评估。由于现有指标存在不符合实际分布的问题,因此本文从电压暂降严重程度连续性和单调性的实际分布入手,在权值函数法的基础上结合敏感设备耐受曲线,分别确定电压暂降持续时间和电压暂降

幅值的影响度函数,在此基础上考虑实际电压暂降的非矩形波,建立了考虑电压暂降类型与多暂降阈值描述的电压暂降影响度函数,避免了评估过程中的欠评估和过度评估。通过对 19 组电压暂降事件评估的实例分析,验证了本文电压暂降影响度函数评估模型的优越性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 孔祥雨,徐永海,陶顺.基于一种电压暂降新型描述的敏感设备免疫能力评估[J].电工技术学报,2015,30(3):165-171.
KONG Xiangyu, XU Yonghai, TAO Shun. Sensitive equipment immunity assessment based on a new voltage sag description [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 165-171.
- [2] 徐永海,陶顺,肖湘宁.电网中电压暂降和短时间中断[M].北京:中国电力出版社,2015:1-5.
- [3] 刘旭娜,肖先勇,汪颖.电压暂降严重程度及其测度、不确定性评估方法[J].中国电机工程学报,2014,34(4):644-658.
LIU Xuna, XIAO Xianyong, WANG Ying. Voltage sag severity and its measure and uncertainty evaluation [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 644-658.
- [4] CHAN J Y, MILANOVIĆ J V, DELAHUNTY A. Risk-based assessment of financial losses due to voltage sag [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 26(2): 492-500.
- [5] Semiconductor Equipment Materials International. Specification for semiconductor processing equipment voltage sag immunity: SEMI F47-0706-2006[S]. [S.l.]: SEMI, 2006.
- [6] Technical Committee 3. ITI (CBEMA) curve application note-2000 [S]. Washington DC, USA: [s.n.], 2000.
- [7] IEEE Power and Energy Society. IEEE guide for voltage sag indices: IEEE Std 1564-2014[S]. New York, USA: IEEE Standard Association, 2014.
- [8] CHAN J Y, MILANOVIĆ J V. Severity indices for assessment of equipment sensitivity to voltage sags and short interruptions [C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA: IEEE, 2007: 1-7.
- [9] 林焱,吴丹岳,章雪萌,等.电压暂降指标的探讨[J].电力系统保护与控制,2010,38(3):147-152.
LIN Yan, WU Danyue, ZHANG Xuemeng, et al. An exploration on index about voltage sags [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 147-152.
- [10] LIAO H, ABDELRAHMAN S, GUO Y, et al. Identification of weak areas of power network based on exposure to voltage sags: part I: development of sag severity index for single-event characterization [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(6): 2392-2400.
- [11] 杨家莉,刘书铭,徐永海,等.基于熵权法的电压暂降严重程度综合评估方法[J].现代电力,2017,34(4):40-49.
YANG Jiali, LIU Shuming, XU Yonghai, et al. Comprehensive evaluation method of voltage sag severity based on entropy coefficient method [J]. Modern Electric Power, 2017, 34(4): 40-49.
- [12] DJOKIĆ S Z, STOCKMAN K, MILANOVIĆ J V. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 494-505.
- [13] Working Group C4.110. Voltage dip immunity of equipment and installations [R]. London, UK: Working Group C4.110, 2010.
- [14] SANTOS A D, BARROS M T C D. Voltage sags tolerance and responsibility curves [C] // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. Eindhoven, 2015.

- hoven, the Netherlands; IEEE, 2015: 1-6.
- [15] 汪颖, 李成鑫, 李国栋, 等. 基于响应事件工艺参数免疫时间的设备电压暂降敏感特征识别[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(4): 181-187.
WANG Ying, LI Chengxin, LI Guodong, et al. Sensitive characteristic identification of voltage sag based on equipment response event and process[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(4): 181-187.
- [16] 杨达, 肖先勇, 汪颖. 计及失效事件和严重程度不确定性的设备电压暂降失效率评估[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 107-111, 117.
YANG Da, XIAO Xianyong, WANG Ying. Assessment of equipment invalidation due to voltage sags considering uncertainties of failure and severity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 107-111, 117.
- [17] 李春海, 李华强, 刘勃江. 基于过程免疫不确定性的工业用户电压暂降经济损失风险评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 136-142.
LI Chunhai, LI Huaqiang, LIU Bojiang. Risk assessment based on process immunity uncertainty for industrial customers' financial losses due to voltage sag[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 136-142.
- [18] 袁媛, 吴丹岳, 林焱, 等. 电压暂降评估体系研究[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 128-133.
YUAN Yuan, WU Danyue, LIN Yan, et al. Study on assessment system of voltage sags[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 128-133.
- [19] 张波. 电压暂降特征提取与扰动原因分析[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
ZHANG Bo. Voltage sag feature extraction and analysis of disturbance reasons[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2005.

作者简介:



卢文清

卢文清(1994—), 女, 福建福州人, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析与控制(E-mail: daqing1033@163.com);

常乾坤(1985—), 男, 吉林公主岭人, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为大功率电力电子变流技术和定制电力技术;

贾东强(1986—), 男, 甘肃白银人, 工程师, 博士, 主要研究方向为电能质量与智能电网技术。

Research on evaluation methods of voltage sag severity for equipment side

LU Wenqing¹, CHANG Qiankun², JIA Dongqiang², QIAN Yeniu², XU Yonghai¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Company Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: Comprehensively considering the ITIC curves, SEMI curves and the tolerance curves of sensitive equipment proposed by C4.110 working group, the influence degree function of single-phase, two-phase and three-phase voltage sag are established respectively based on the actual monotonous and continuous distribution of severity function. On this basis, the non-rectangular waveform of voltage sag is taken into consideration, and the multiple sag threshold is used to describe the improved influence degree function, then a multiple sag threshold method considering the type of voltage sag and the tolerance characteristics of equipment is proposed to evaluate the severity of voltage sag on the equipment side of the actual system, and its evaluation indices comprehensively consider the equipment tolerance curve, the voltage sag duration, magnitude, type and waveform. Case study shows the correctness of the proposed method.

Key words: voltage sag; influence degree function; voltage sag type; multiple sag threshold

(上接第 174 页 continued from page 174)

张厚楷(1994—), 男, 贵州安顺人, 硕士研究生, 研究方向为电能质量控制技术(E-mail: xixizhk_gs@stu.xjtu.edu.cn);

肖国春(1965—), 男, 四川华蓥人, 教授, 博士研究生导

师, 博士, 研究方向为电能质量分析与控制技术、电力电子装置设计及应用技术等(E-mail: xgc@mail.xjtu.edu.cn);

韩笑黎(1992—), 女, 山东淄博人, 硕士研究生, 研究方向为电能质量控制技术(E-mail: han_xiao_li667@163.com)。

Comparison and analysis of two filter structures for low-voltage dynamic voltage restorer

WANG Youyun¹, MA Baohui¹, ZHANG Houkai², XIAO Guochun², HAN Xiaoli²

(1. State Key Laboratory of Large Electric Drive System and Equipment Technology, TEDRI, Tianshui 741020, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: DVR(Dynamic Voltage Restorer) is an important device to compensate voltage sag. According to the connecting points of filter capacitors in LC filters, DVR can be divided into output-filtering type and capacitor-load-parallel type. The performance of the two types of DVR and their influences on power grid are different. Based on the analysis and design of the two types of DVR control system, the influence of power grid impedance on stability and system performance of the two types of DVR are studied, the interference on power grid caused by the application of these two types of DVR are compared and the method for capacitor-load-parallel DVR to suppress the interference is proposed.

Key words: dynamic voltage restorer; LC filter; grid impedance; stability; parallel capacitor

附录

表 A1 节点电压暂降严重程度情况

Table A1 Voltage sag severity of nodes

暂降事件	暂降特征	持续时间/s	幅值	S_e			S_e , 排序	S			S , 排序	D , 排序	S_{CD-k} 排序
				SEMI	ITIC	C4.110		SEMI	ITIC	C4.110			
1	单相矩形波	0.06	0.2921	1.42	2.36	1.18	1.65, 2	9.24	4.86	809.25	274.5, 2	0.439, 2	0.698, 2
2	单相矩形波	0.04	0.3294	1.34	2.24	1.12	1.56, 3	3.79	2.21	353	119.7, 3	0.423, 3	0.687, 3
3	非矩形	0.06	0.6989	0.6	1	0.5	0.7, 8	0	0.12	0	0.04, 8	0.147, 8	0.078, 11
4	单相矩形波	0.06	0.7619	0.48	0.79	0.4	0.56, 9	0	0	0	0, 9	0.107, 9	0.080, 10
5	单相矩形波	0.0602	0.6777	0.64	1.07	0.54	0.75, 5	0	0.28	0	0.093, 5	0.163, 5	0.134, 7
6	单相矩形波	0.04	0.8254	0.35	0.58	0.29	0.41, 11	0	0	0	0, 9	0.076, 12	0.052, 14
7	单相矩形波	0.03	0.884	0.23	0.39	0.19	0.27, 19	0	0	0	0, 9	0.056, 19	0.043, 19
8	三相	0.07	0.8511	0.3	0.5	0.5	0.44, 13	0	0	0	0, 9	0.067, 13	0.0230, 5
9	三相	0.08	0.8524	0.3	0.49	0.49	0.43, 14	0	0	0	0, 9	0.066, 14	0.303, 4
10	单相矩形波	0.04	0.6843	0.63	1.05	0.53	0.74, 7	0	0.093	0	0.031, 7	0.159, 7	0.117, 9
11	单相矩形波	0.06	0.6788	0.64	1.07	0.54	0.75, 5	0	0.25	0	0.083, 6	0.162, 6	0.132, 8
12	单相矩形波	0.03	0.8185	0.36	0.61	0.3	0.42, 10	0	0	0	0, 9	0.079, 10	0.046, 17
13	单相矩形波	0.04	0.8725	0.26	0.43	0.21	0.3/17	0	0	0	0, 9	0.058, 17	0.050, 16
14	单相矩形波	0.03	0.8725	0.26	0.43	0.22	0.3/17	0	0	0	0, 9	0.058, 17	0.043, 18
15	单相矩形波	0.04	0.869	0.26	0.44	0.22	0.31/16	0	0	0	0, 9	0.06, 15	0.051, 15
16	三相	0.03	0.8724	0.26	0.43	0.43	0.37/15	0	0	0	0, 9	0.059, 16	0.054, 13
17	非矩形	0.05	0.8238	0.35	0.59	0.29	0.41/11	0	0	0	0, 9	0.077, 11	0.061, 12
18	单相矩形波	0.05	0.6275	0.75	1.24	0.62	0.87/4	0	1.73	0	0.58, 4	0.203, 4	0.212, 6
19	三相	0.1	0.182	1.64	2.73	2.73	2.36/1	2826	1233	4286	2782, 1	0.48, 1	0.84, 1
节点电压暂降严重程度					0.72				167.20			0.153	0.215

注：幅值为标么值。