

基于实测数据的电压暂降特性分析

司学振¹, 李琼林¹, 杨家莉², 徐永海², 张 博¹

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 452470;

2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 实测数据是分析事物本质属性的最优资源。以某些大型城市电网电能质量监测系统中电压暂降的实测数据为基础, 从典型波形、统计表格、累计概率、暂降相序 4 个方面对不同电压等级下的暂降事件进行分类统计, 总结并分析不同类型暂降事件的统计与描述特性。相关结果表明: 根据电压暂降均方根值波形的变化特征, 可将其划分为 4 种类型; 考虑不同类型的波形特征, 不宜采用现有持续时间与幅值的描述方式, 建议采用多暂降域值和持续时间的电压暂降描述方法; 建议在 IEC61000-2-8 与国标的暂降统计表格中, 对 0.1 s 内的持续时间进行更加详细的区间划分; 给出的电压暂降幅值与持续时间的累计概率曲线能够分析各特征量的分布特性。

关键词: 实测数据; 电压暂降; 典型波形; 统计表格; 累计概率; 暂降相序; 描述; 特性分析

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.020

0 引言

电压暂降是指供电电压方均根值在短时间突然下降且经过短暂时间间隔后又重新恢复的变化现象^[1]。国际电工委员会(IEC)将其定义为电压有效值下降到额定值的 1%~90% 后又回升到正常值, 该过程的持续时间为 10 ms~1 min; 电气与电子工程师协会(IEEE)将其定义为下降到额定值的 10%~90%, 持续时间为 10 ms~60 s^[2]。在许多地区, 电压暂降已成为影响工业用户最主要的电能质量问题, 电压暂降引起的危害及其带来的巨大经济损失是很多用户面临的重要问题^[3-4], 以必要的监测数据为基础分析电压暂降的基本特性是对此类问题进行科学决策的前提^[5]。

近年来, 众多国内外专家学者从描述与统计 2 个方面针对电压暂降基本特性做了大量研究^[6-8]。电压暂降的产生机理是由于某种原因而引起流经系统电源阻抗的电流突然增大, 造成电源阻抗分压增加, 进而导致公共供电点电压暂降^[9]。文献[10-12]将引起电压暂降的原因主要分为三大类, 包括电缆损害、雷击、动物、设备故障等各种原因引起的短路故障、变压器励磁涌流、感应电机启动。其中短路故障是引起电压暂降的主要原因, 对应的暂降均方根值波形为矩形波, 但对于其他 2 种类型暂降的波形特征相关文献并未提及。然而, 不同的电压暂降均方根值波形所刻画的暂降特性存在差异, 分析不同类型的暂降波形特征有助于更深层次的电压暂降描述特性的研究。电压暂降的特征量有很多, 其中幅值和持续时间是标称其特性的最重要的特征量, 相关文献中也大多是以这 2 个特征量来刻画某个暂降事件^[13]。通常对这 2 个特征量的描述方式采用下述定义: 将

暂降时的最小电压均方根值与额定电压的比值定义为暂降幅值, 将暂降从发生到结束之间的时间定义为持续时间^[1]。目前, 针对电压暂降事件的统计主要是采用 IEC61000-2-8 以及国标中的暂降统计表格^[14-16], 通过这类表格的统计结果能够分析相应暂降事件的持续时间与幅值的分布特性。此外, 在三相系统中, 根据电压暂降发生相序的不同, 可将其分为单相暂降、两相暂降以及三相暂降。通常情况下, 3 种相序类型的暂降事件中单相暂降较两相与三相暂降更易发生, 但是在不同电压等级下, 各相序类型暂降发生的具体情况还需进一步讨论, 因此, 根据相序类型对暂降事件进行统计是非常必要的。

综上所述, 本文选取我国 4 个经济发达的大型城市电网电能质量监测系统中记录的电压暂降事件为研究对象, 将不同电压等级下的暂降事件从典型波形、统计表格、累计概率、暂降相序 4 个角度进行归类, 统计暂降事件的分布特性, 探究现有描述方法中存在的问题。

1 数据来源及筛选

本文以国内 4 个大型城市电网电能质量监测系统 2009 年 7 月至 2015 年 1 月监测到的部分电压暂降数据为研究对象进行统计分析。4 个监测系统共记录了 473 组数据, 涵盖 10 kV、35 kV、110 kV、220 kV 这 4 个电压等级。

监测系统记录的 u 为瞬时电压, N 为一个周期的采样点数, 采用滑动平均值法计算各次暂降的电压均方根值, 当采集到新的样本点时, 顺序将最早采集的第一个样本点除去, 然后用一个周期的滑动采样值进行均方根计算, 每个采样瞬间都可求出一个新的均方根值^[1], 进而得到均方根值波形。

电压暂降瞬时值波形在正常情况下应为正弦曲

线,然而 4 个城市监测系统所记录的暂降数据中除正弦波数据外,还存在 2 种情况的非正常数据:数据记录异常,瞬时值波形为非正弦曲线;数据记录不完整,表现为监测开始时已发生暂降或监测结束时暂降仍未恢复。

为得到更加准确的分析结果,将剔除非正常情况的数据作为有效数据进行统计。4 个城市有效电压暂降数据共 369 次,统计结果如图 1 所示。其中 10 kV 电压等级有 155 次,35 kV 有 27 次、110 kV 有 95 次,220 kV 有 92 次。

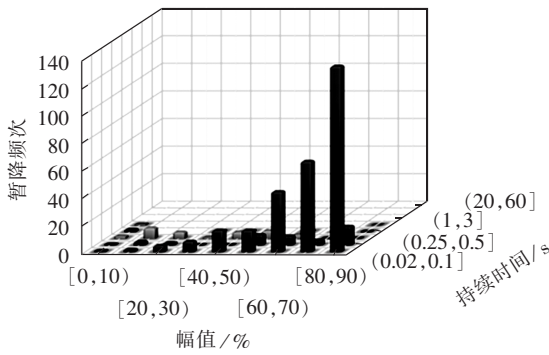


图 1 4 个城市有效电压暂降事件统计结果
Fig.1 Statistical results of effective voltage sag events in four cities

2 基于典型波形的电压暂降特性分析

2.1 电压暂降典型波形分类

将 369 次有效电压暂降的均方根值波形进行归类分析,按其波形特征主要可分为 3 种类型:矩形、左快右慢型、左慢右快型。

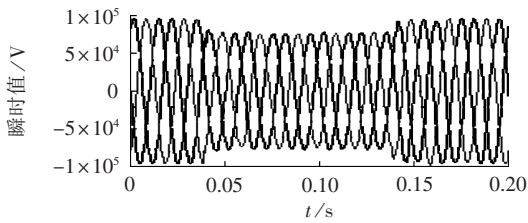
图 2 为矩形波的 3 种典型代表,波形特点为暂降开始与恢复阶段时间较短。一般情况下,矩形波对应的暂降主要是由短路故障引起。电压暂降分为由三相短路故障引起的对称电压暂降和由单相接地短路、两相短路以及两相短路接地引起的不对称电压暂降。其中,当中性点不接地系统发生单相接地短路时,中性点电压上升到相电压,而非故障相电压上升到线电压,即非故障相电压会暂升,如图 2(e)、(f) 所示。

图 3 为左慢右快型的典型波形,其特点为图 3(b)、(d) 中暂降幅值最低点左侧波形下降较慢,右侧波形上升较快。图 4 为左快右慢型的典型波形,波形特点为图 4(b)、(d) 中暂降幅值快速下降到最低点,然后缓慢上升,暂降恢复阶段持续时间较长。除上述 3 种典型波形外,还存在其他无明显特征规律的一类波形,如图 5 所示。

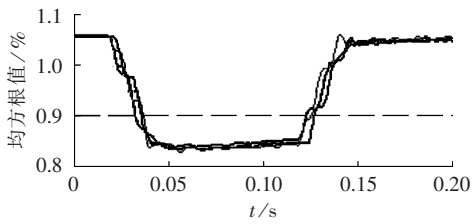
2.2 电压暂降特性描述

将 4 个电压等级下各次暂降事件按这 4 种典型波形进行统计,结果如表 1 所示。表中,矩形波类型的暂降事件发生概率最大,矩形波主要是由短路故障

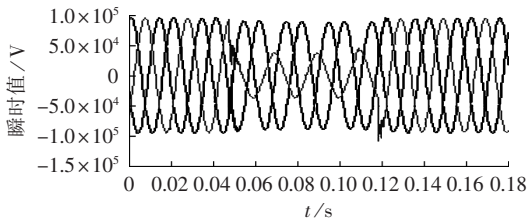
引起,由此验证了短路故障是引起电压暂降的主要原因这一结论,并且电压等级越高,短路故障更易发生,在 220 kV 等级中,所占比例已高达 90.11 %。虽然整体而言矩形波所占比例相对较大,但是左快右慢与左慢右快型波形的比重也不容小觑,例如在 10 kV 与



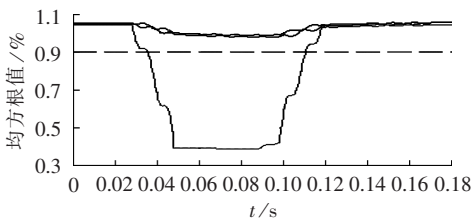
(a) 实测瞬时值波形 I



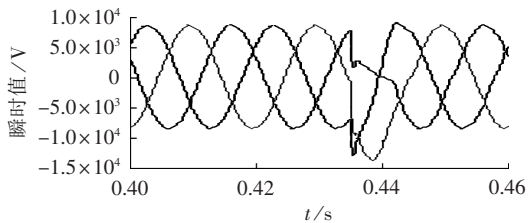
(b) 实测均方根值波形 I



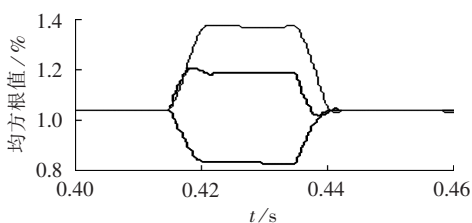
(c) 实测瞬时值波形 II



(d) 实测均方根值波形 II

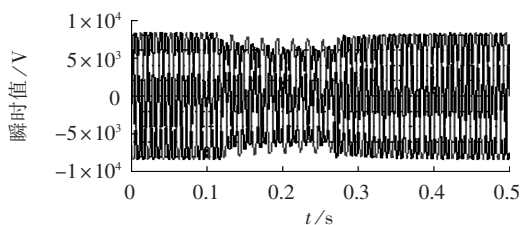


(e) 实测瞬时值波形 III

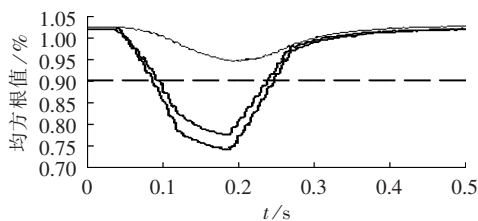


(f) 实测均方根值波形 III

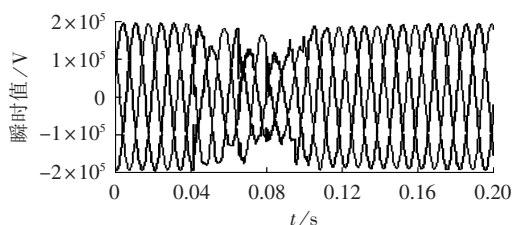
图 2 矩形波对应的电压暂降典型实测波形
Fig.2 Typical measured waveform of voltage sag corresponding to rectangular wave



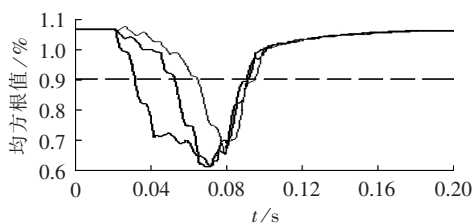
(a) 实测瞬时值波形 I



(b) 实测均方根值波形 I



(c) 实测瞬时值波形 II

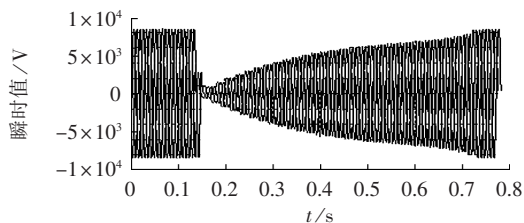


(d) 实测均方根值波形 II

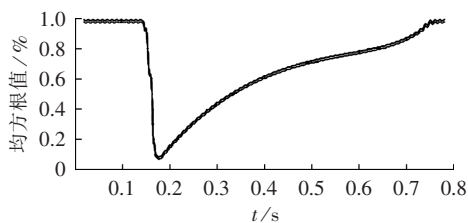
图 3 左慢右快型电压暂降典型实测波形

Fig.3 Typical measured waveform of voltage sag with left slow and right fast

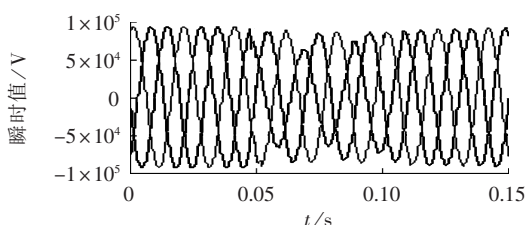
35 kV 等级中,这 2 种波形的占比和均高于 40%。左快右慢型暂降较大可能是由变压器励磁涌流引起,左慢右快型对应于感应电机启动等。此外,针对 3 种典型波形,矩形波在 220 kV 等级中出现的概率较大,左快右慢型在 35 kV 等级中居多,而左慢右快型则多



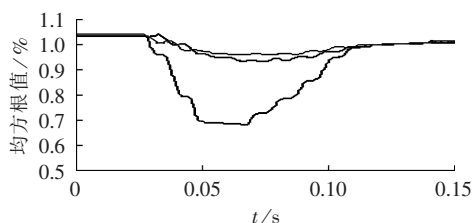
(a) 实测瞬时值波形 I



(b) 实测均方根值波形 I



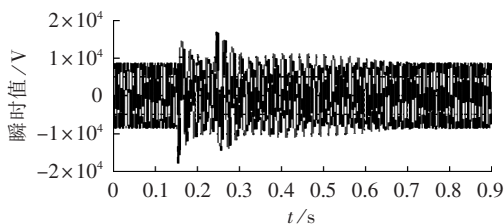
(c) 实测瞬时值波形 II



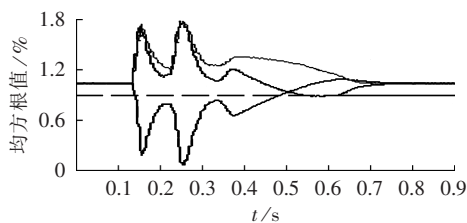
(d) 实测均方根值波形 II

图 4 左快右慢型电压暂降典型实测波形

Fig.4 Typical measured waveform of voltage sag with left fast and right slow



(a) 实测瞬时值波形



(b) 实测均方根值波形

图 5 其他类型的电压暂降实测波形

Fig.5 Measured waveform of voltage sag for other types

表 1 不同电压等级下典型波形对应的暂降概率

Table 1 Sag probability of typical waveform for different voltage levels

均方根值波形	暂降概率/%			
	10 kV	35 kV	110 kV	220 kV
矩形	59.35	51.85	72.92	90.11
左快右慢型	12.26	40.74	23.96	4.40
左慢右快型	16.13	0	1.04	4.40
其他	12.26	7.41	2.08	1.10

见于 10 kV 等级中。

由于矩形波在暂降开始和结束时所需时间相对较短,而对应于最小幅值的时间却相对较长,因此在电压暂降评估中采用现有幅值与持续时间的描述方式能够准确刻画该类暂降。然而,与矩形波不同的是,左慢右快与左快右慢型暂降在幅值最小时对应的时间相对较短,例如在图 3(d)与图 4(b)中几乎为 0,采用现有幅值与持续时间的描述方式会对这 2 种

类型的暂降造成过度评估。据此,建议根据波形特征对现有幅值与持续时间的描述方式进行改进,可采用一组等间隔的持续时间与幅值序列对应的多暂降域值和持续时间的电压暂降描述方法^[17]。

3 不同幅值与持续时间下的电压暂降特性分析

3.1 基于统计表格的电压暂降特性统计

基于 IEC61000-2-8 统计表格对不同电压等级下各幅值与持续时间区间的电压暂降频次统计结果分别如表 2 与表 3 所示。

表 2 不同电压等级下各幅值区间的电压暂降频次统计

Table 2 Frequency of voltage sag in each amplitude intervals for different voltage levels

幅值 / %	电压暂降频次			
	10 kV	35 kV	110 kV	220 kV
[0,10)	5	0	2	0
[10,20)	13	0	0	0
[20,30)	7	0	3	2
[30,40)	2	4	1	3
[40,50)	8	1	6	7
[50,60)	14	1	8	7
[60,70)	26	1	12	16
[70,80)	35	5	19	12
[80,90)	45	15	44	45

表 3 不同电压等级下各持续时间区间的电压暂降频次统计

Table 3 Frequency of voltage sag in each duration intervals for different voltage levels

持续时间 / s	电压暂降频次			
	10 kV	35 kV	110 kV	220 kV
(0.02,0.1]	104	27	72	90
(0.1,0.25]	15	0	22	2
(0.25,0.5]	30	0	0	0
(0.5,1]	5	0	1	0
(1,3]	1	0	0	0
(3,20]	0	0	0	0

由表 2 知,暂降幅值主要集中在[60%,70%)、[70%,80%)、[80%,90%)这 3 个区间内;由表 3 可知,4 个电压等级下的暂降事件在区间(0.02,0.1] s 内发生的次数最多,其中 10 kV 电压等级在该区间内发生的暂降比例相对最小,却也高达 67%。通过上述持续时间统计结果能够推断,实际发生的电压暂降持续时间大都集中在 0.1 s 内。然而,对于 0.1 s 内的持续时间,IEC61000-2-8 与国标中的统计表格都将其归为一个区间,这种描述过于笼统,并未充分利用暂降持续时间所包含的有效信息,因此,建议将 0.1 s 内的持续时间进行更加详细的区间划分,以便得到更加合理的统计结果。

3.2 基于累计概率曲线的电压暂降特性统计

根据表 2 与表 3 计算各幅值与持续时间区间的

累计概率,结果分别如图 6 与图 7 所示。各区间累计概率是指特征量数值不超过该区间数值区域内的频次在总暂降频次中所占的比例,计算方法如下:

$$p(j)=\frac{\sum_{i=1}^j m_i}{M} \quad j=1,2,\cdots,H$$

其中, $p(j)$ 为将各区间按区间数值从小到大依次排序后,第 j 个区间的累计概率; m_i 为第 i 个区间内的暂降频次; M 为总暂降次数; H 为总区间数,当计算幅值区间累计概率时 $H=9$,当计算持续时间累计概率时 $H=8$ 。

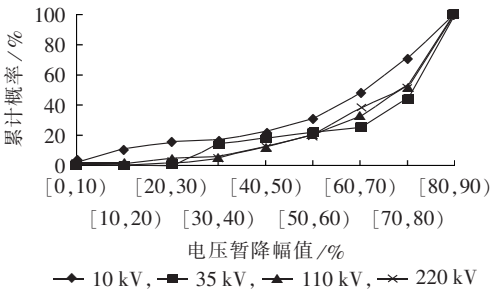


图 6 不同电压等级对应的电压暂降幅值累计概率
Fig.6 Cumulative probability of voltage sag amplitude for different voltage levels

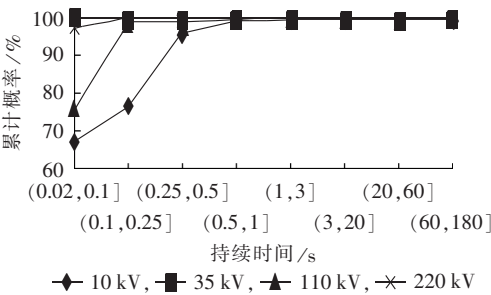


图 7 不同电压等级对应的电压暂降持续时间累计概率
Fig.7 Cumulative probability of voltage sag duration for different voltage levels

累计概率曲线的变化程度能够反映暂降事件幅值与持续时间的整体分布情况,曲线越陡峭表明暂降特征量分布越集中,曲线越平缓表明分布越分散。

图 6 中 10 kV 等级下的电压暂降幅值累计概率曲线变化最平缓,并且该曲线中各幅值区间对应的累计概率均高于其他 3 个电压等级下的累计概率值,因此该电压等级下的暂降幅值分布范围较大,相对分散。当幅值小于 30% 时,35 kV 与 220 kV 等级的累计概率曲线距离最近,则这 2 种电压等级下的暂降事件幅值分布相似;当幅值大于 30% 时,110 kV 与 220 kV 等级对应的累计概率曲线相近,因而其幅值分布较为一致。此外,35 kV、110 kV、220 kV 等级下的暂降事件在幅值[80%,90%)内的频次最多,相应地这 3 种电压等级的累计概率曲线在幅值大于 80% 时变化较陡峭。

由图 7 可知,持续时间累计概率曲线中 10 kV 等

级的累计概率曲线变化最陡峭,35 kV 与 220 kV 等级的相对平缓。因而 10 kV 等级下的持续时间分布相对分散,35 kV 与 220 kV 等级下的持续时间分布则较为集中。

4 基于暂降相序的电压暂降特性分析

表 4 为 4 个电压等级下发生不同相序类型电压暂降的概率。纵向分析该表可知,各电压等级对应的单相暂降总概率值最大,两相暂降次之,三相暂降最小,说明在一般情况下,单相暂降最易发生。

表 4 不同电压等级下各相序对应的暂降概率
Table 4 Sag probability of each phase sequence for different voltage levels

暂降相序		暂降概率 / %			
		10 kV	35 kV	110 kV	220 kV
单相	A	11.61	3.70	23.16	30.43
	B	18.71	29.63	37.89	25.00
	C	21.94	29.63	20.00	22.83
	总概率	52.26	62.96	81.05	78.26
两相	AB	9.68	7.41	5.26	11.96
	AC	14.19	7.41	2.11	2.17
	BC	10.97	11.11	2.11	3.26
	总概率	34.84	25.93	9.47	17.39
三相	ABC	12.90	11.11	9.48	4.35

对表 4 进行横向对比分析易知,在单相暂降事件中,A 相暂降在 220 kV 等级发生的概率较大,B 相暂降在 110 kV 等级发生的概率较大,C 相暂降在 35 kV 等级发生的概率较大;对于两相暂降事件,AB 相暂降在 220 kV 等级中较多,AC 相暂降在 10 kV 等级中较多,BC 相暂降在 35 kV 等级中较多;ABC 三相发生暂降的概率在 10 kV 等级中最大,且随着电压等级增大,概率值越小,说明在电压等级越低时,更易发生三相暂降。

依据上述统计分析可知,虽然总体情况下单相暂降事件发生的概率较大,但两相与三相暂降事件也不容忽视。在不同电压等级下,3 种相序类型的暂降所占的比例各不相同,例如在 10 kV 等级时单相暂降占比为 52.26%,而在 110 kV 等级中高达 81.05%,两相暂降在 110 kV 等级中仅占 9.47%,但在 10 kV 等级中却高达 34.84%,三相暂降在 220 kV 等级中仅为 4.35%,而在 10 kV 等级中却高达 12.9%,以上数据说明在电压等级越高时更容易发生单相暂降,电压等级较低时更易发生两相或三相暂降。

5 结论

本文依托 4 个城市电网电能质量监测系统中的电压暂降监测数据,对不同电压等级下的暂降事件从典型波形、统计表格、累计概率曲线、暂降相序 4 个方面进行特性统计与描述分析,得到如下结论。

a. 依据波形的变化特征,4 个城市电压暂降均

方根值波形可以划分为矩形、左快右慢型、左慢右快型以及其他无明显特征规律这 4 种类型。

b. 根据 3 种典型的波形特征,按现有持续时间与幅值的描述方式会对非矩形波类型的暂降造成过度评估,建议结合波形特征对其描述方式进行改进,可考虑采用多暂降域值和持续时间的电压暂降描述方法。

c. 对不同电压等级下暂降事件的持续时间频次统计可知,暂降持续时间主要集中在 0.1 s 内,而根据 IEC61000-2-8 与国标中的统计表格无法对其进一步划分,导致该范围内持续时间所包含的有效信息并未得到完全利用,因此建议对 0.1 s 内的持续时间进行更加详细的区间划分,以便得到更加合理的统计结果。

d. 通过累计概率曲线分析幅值与持续时间的分布特性,曲线越陡峭表明暂降特征量分布越集中,曲线越平缓表明分布越分散,并且不同曲线间的距离越接近表明其特征分布情况越相似。

e. 按暂降相序的统计结果表明,虽然 4 种电压等级中均为单相暂降发生的概率最大,两相与三相暂降相对较小,但是不同电压等级下这 3 种相序类型的暂降事件所占的比例并不相同。当电压等级较低时,两相或三相暂降发生的概率相对较大;当电压等级较高时,则更易发生单相暂降。

参考文献:

[1] 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,2015:194-197.

[2] 陈礼频,肖先勇,张文海. 考虑扰动源定位的电压暂降监测点最优配置[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):79-84,90.
CHEN Lipin,XIAO Xianyong,ZHANG Wenhai. Optimal allocation of voltage sag monitors considering disturbance source locating [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):79-84,90.

[3] ZHU K,WANG Y,YIN P,et al. Voltage sag source location technology based on corresponding sequence components[J]. IET Generation Transmission & Distribution,2015,9(9):820-827.

[4] SHEN C C,LU C N. A voltage sag index considering compatibility between equipment and supply[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(2):996-1002.

[5] 林芳,肖先勇,张逸,等. 基于暂降信息的监测装置优化配置与系统电压暂降水平评估[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):67-73.
LIN Fang,XIAO Xianyong,ZHANG Yi,et al. Optimal monitor allocation and system sag level assessment based on sag information[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(5):67-73.

[6] 雷何,高山,林新春,等. 基于包含谐波模型的加权最小二乘估计算法的电压暂降检测方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):36-41.
LEI He,GAO Shan,LIN Xinchun,et al. Voltage sag detection based on weighted least squares estimation algorithm with harmonic models[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):36-41.

[7] 杨达,肖先勇,汪颖,等. 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 Xianrong,WANG Ying,et al. 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.
- [8] CHAN J Y,MILANOVIC J V,DELAHUNTY A. Risk based assessment of financial losses due to voltage sag [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(2):492-500.
- [9] 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 characteristics extraction and disturbance reason analysis[D]. Beijing:China Electric Power Research Institute,2005.
- [10] 肖先勇,崔灿,汪洋,等. 电压暂降分类特征可比性、相关性及马氏距离分类法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(6):1299-1305.
- XIAO Xianrong,CUI Can,WANG Yang,et al. Comparability and relevance of voltage sag classifying features and classification methods based on mahalanobis distance[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(6):1299-1305.
- [11] STYVAKTAKIS E,BOLLEN M. J,GU I Y H. Expert system for classification and analysis of power system events[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2002,17(2):423-428.
- [12] 杨志超,詹萍萍,严浩军,等. 电压暂降原因分析及其源定位综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(12):15-20.
- YANG Zhichao,ZHAN Pingping,YAN Haojun,et al. Review on cause analysis and source localization for voltage sag[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2014,26(12):15-20.
- [13] 孔祥雨. 电压暂降特性及其对敏感设备影响评估研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
- KONG Xiangyu. Research on voltage sag characteristics and the assessment of its influence on sensitive equipment[D]. Beijing: North China Electric Power University,2014
- [14] SABIN D D,BOLLEN M H J. Overview of IEEE Std 1564-2014 guide for voltage sag indices[C]//IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power. Piscataway,NJ,USA:IEEE,2014:497-501.
- [15] BOLLEN M H J,SABIN D D. International coordination for voltage sag indices[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco,CA,USA:IEEE,2006:2217-2222.
- [16] 徐永海,陶顺,肖湘宁. 电能质量电压暂降与短时中断:GB/T 30137—2013[S]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [17] 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.

作者简介:



司学振

司学振(1963—),男,河南内黄人,高级工程师,硕士,主要从事电网运维管理及电能质量相关的工作(E-mail:sixuezen@ha.sgcc.com.cn);

李琼林(1980—),男,湖北英山人,高级工程师,博士,主要从事无功电压、电能质量分析与控制、FACTS等方面的研究(E-mail:yingshanli_2001@163.com)。

Analysis of voltage sag characteristics based on measured data

SI Xue-zhen¹,LI Qionglin¹,YANG Jiali²,XU Yonghai²,ZHANG Bo¹

(1. State Grid Electric Power Research Institute of Henan Electric Power Company,Zhengzhou 452470,China;

2. State Key Laboratory Electrical Power System with Renewable Energy Sources,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: The measured data are the best resources to analyze the nature of things. According to the measured data of voltage sag in the power quality monitoring systems of some big cities,the sag events of different voltage levels are classified from four aspects,i.e. typical waveform,statistical table,cumulative probability and sag phase sequence,and the statistical and description characteristics of different sag events are summarized. The related results show that;the voltage sag can be classified into four types according to the variation characteristics of its root mean square waveform;it is unfavorable to adopt the current description method of duration and amplitude due to the waveform characteristics of different types,while it is recommend to use the voltage sag description method of multiple sag thresholds and duration;the duration of 0.1 s is recommended for more detailed interval division in the sag statistical table of IEC61000-2-8 and GB;the cumulative probability curves of voltage sag amplitude and duration can analyze the distribution characteristics of each characteristic quantity.

Key words: measured data; voltage sag; typical waveform; statistical table; cumulative probability; sag phase sequence; description; characteristic analysis