

海南电网电压暂降监测数据特征分析

方 铭^{1,2}, 李天楚^{1,2}

(1.海南电网有限责任公司电力科学研究院,海南 海口 570311;

2.海南省电网理化分析重点实验室,海南 海口 570311)

摘要:电压暂降监测数据特征分析是明确地区电压暂降水平的关键手段之一,可为电压暂降治理及预防提供基本信息。以海南电网电能质量监测平台的电压暂降监测数据为基础,对电压暂降波形幅值、持续时间、相位跳变和暂降类型4个特征量进行计算和分析。结果表明:该地区70%的实测暂降的幅值高于0.7 pu,持续时间小于0.1 s;90%的实测电压暂降的相位跳变在 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 内,可推测该地区敏感设备可以躲过绝大多数因相位跳变而导致设备故障的暂降事件;60%的实测电压暂降的暂降类型为单相接地故障导致的D型,A型对称暂降仅占比3.79%。所分析的数据和结果可为电网侧和用户侧的电压暂降治理决策、设备参数设置和调试相关参数提供技术基础。

关键词:电压暂降;监测数据;暂降类型;相位跳变;特征计算

中图分类号:TM 713 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)03-0035-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220306

Data Characteristic Analysis of Monitored Voltage Sags in Hainan Power Grid

FANG Ming^{1,2}, LI Tianchu^{1,2}

(1.Electric Power Research Institute of Hainan Power Grid Corporation Ltd., Haikou

570311, Hainan, China; 2.Key Laboratory of Physical and Chemical Analysis

for Hainan Power Grid, Haikou 570311, Hainan, China)

Abstract: The characteristic analysis of voltage sag monitoring data is one of the key means to understand the voltage sag level in the region, which can provide the basic information for control and prevention of voltage sag. Based on the voltage sag monitoring data of power quality monitoring platform of Hainan power grid, the voltage sag waveform amplitude and duration, phase angle jump and sag type are calculated and analyzed. The results show that: the amplitude of 70% measured voltage sag is higher than 0.7 pu, and the duration is less than 0.1 s. 90% of the measured voltage sags are in the range of $[-10^\circ, 10^\circ]$, which can be inferred that most of the sensitive equipment in this area can avoid the sags causing equipment failure due to the phase angle jump. 60% of the measured voltage sags are type D caused by single-phase ground fault, and only 3.79% are symmetrical sags type A. The analysis data and results can provide a technical basis for the decision-making of voltage sag control in grid side and user side, and for the setting and commissioning of relevant parameters by equipment manufacturers.

Key words: voltage sag; monitoring data; sag type; phase angle jump; characteristic calculation

0 引言

海南自由贸易港建设总体方案的实施,必然带动大量高精尖工业用户的投资入驻,供电质量是发展重要保障。微机、计算机、芯片、机器人等高端

基金项目:海南电网科技项目(073000KK52190007)

制造业以及自动化智能技术等高新产业对电压暂降非常敏感,可能造成工业过程中断导致用户产生巨大的经济损失^[1-3]。以海南电网近三年来的监测数据为基础,分析海南电网电压暂降特征,是科学解决电压暂降问题的前提。

电压暂降被定义为电压幅值在某一时刻开始减小,经过一定时间恢复到标称电压的暂态现象。国

际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)将电压暂降事件定义为电压有效值下降到正常工作电压的 1%~90%,持续时间为 0.01 s~1 min 的暂态现象^[4]。电压暂降是电力系统正常运行不可避免的电能质量现象,主要由电网短路故障、变压器激磁和大电机启动等原因造成,导致工业用户敏感设备跳停,用户抱怨严重。电压暂降有幅值、持续时间、相位跳变、波形点等一系列单次事件特征。各特征偏离正常值,导致敏感设备不能在额定参数范围内正常工作,进而发生设备跳停事故^[5]。治理各地区电压暂降现象,需要从数据源入手展开分析。

现有研究围绕电压暂降发生、危害等方面展开^[6-7]。文献[8-9]从统计描述的角度对暂降特征量进行了深度分析。CIGRE C4.110 工作组对不同暂降源导致的电压暂降波形进行了详细划分^[10],从波形特点映射出暂降原因,有助于对敏感用户进行后果评价及责任划分^[11-12]。基于幅值和持续时间的电压暂降耐受曲线(voltage tolerance curve, VTC),是刻画敏感电压暂降设备耐受能力的主要手段。文献[13-15]在进行敏感设备耐受能力测试时,考虑了相位跳变的影响,设置不同相位跳变参数进行耐受试验,研究其对敏感设备的影响程度。电压暂降类型以三相电压幅值和相位进行刻画,不同类型具有不同的幅值和相位特征,对敏感用户的影响也不同。文献[16]在进行敏感设备耐受力测试时,也考虑了暂降类型。对暂降特征量进行统计分析,有助于揭示暂降原因,了解地区暂降水平,为暂降治理及预防提供基本依据。

下面采用数据统计分析的思想,考虑幅值、持续时间、相位跳变和暂降类型 4 个特征量,对海南电网 5 个主要城市的电压暂降监测数据进行特征计算和分析,揭示了各地区导致暂降的主要原因及其比例,以及暂降幅值和持续时间的分布情况。通过对相位跳变的统计分析,预测了该地区敏感设备受相位跳变影响情况;最后,计算和分析了各地区暂降类型情况,为电网侧和用户侧的电压暂降治理提供技术依据。

1 电压暂降监测数据概况

目前,中国主流监测装置的暂降触发算法统一

采用 IEC 61000-4-30 的标准^[4],记录的波形包括了暂降开始前 5 个周期和暂降结束后 5 个周期。筛选电压中断、噪声干扰较大、波形紊乱的数据,所采用的电压暂降监测数据共 2786 条,来源于 2018 年 1 月 16 日至 2020 年 3 月 30 日海南省三亚供电局、海口供电局、文昌供电局、琼海供电局和儋州供电局共 5 个地市局所属的 17 个变电站监测平台,包含 110 kV 和 220 kV 两个电压等级。

经统计,5 个城市分别记录到 685 次、858 次、332 次、234 次、677 次电压暂降;两个电压等级分别监测到 729 次和 2057 次电压暂降。基于已有监测数据,对该地区电压暂降幅值、持续时间、相位跳变、电压暂降类型等特征量进行分析,探明海南地区近两年的电能质量扰动状态,为电压暂降治理及预防提供关键决策依据。

2 基于实测数据的电压暂降源分析

2.1 电压暂降原因

造成电压暂降的原因包括短路故障、变压器激磁、大电动机启动等;如果在非有效接地系统发生短路故障,导致电压暂降的同时,还会发生电压暂升。不同电压暂降源导致的电压暂降波形不同,根据波形特征可推测某地区电压暂降的主要原因,为暂降治理提供相关信息。

1)以三亚供电局监测平台某条监测数据为例,三相电压有效值波形呈矩形,如图 1 所示。黑色、蓝色和红色曲线分别表示 A、B、C 相电压有效值。本次暂降事件的 B 相电压幅值在 1 个周期的时间内从额定电压瞬间跌落至 1.5 kV 左右,并持续约 53 个周期,再恢复为额定电压。而 A、C 相电压没有发生跌落,可以判断此次暂降事件是由单相(B 相)接地故障造成。

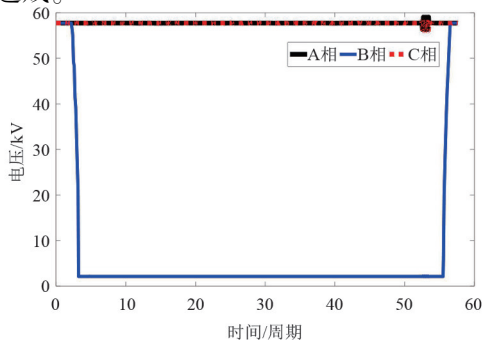


图 1 短路故障的电压波形

2) 变压器投切是电网公司运行方式改变、设备检修等不可避免的生产安排。当某台变压器投入时,产生较大励磁电流,导致临近的正常供电母线发生电压暂降,其有效值波形示例如图2所示。当变压器投运时,瞬间汲取大电流,导致电压突然跌落,而后随着电流的缓慢衰减,电压逐渐恢复。变压器激磁导致的电压暂降严重程度低于绝大多数的短路故障造成的后果,电压有效值跌落一般不会低于80%,基本不会导致变频器、中控电脑等敏感设备跳停。

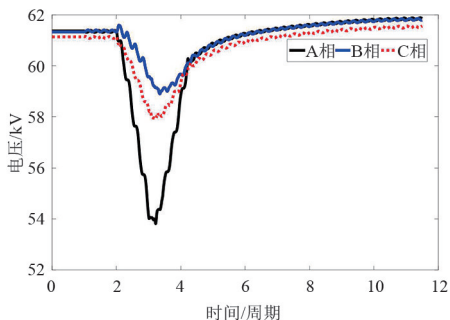


图2 变压器的激磁波形

3) 用户的大型感应电动机在启动的时候,电动机汲取大电流,转子转速从0升至额定值,整个升速过程约持续十几秒至几十秒,感应电动机所接母线的电压会在电动机启动瞬间有大幅的跌落。随着转子转速提升,电压缓慢恢复至额定值或接近额定值,恢复过程较为平缓,三相电压有效值的幅值基本相同。如图3所示为大型感应电动机启动导致的电压暂降,明显可见陡峭的发生过程和较平缓的恢复过程。

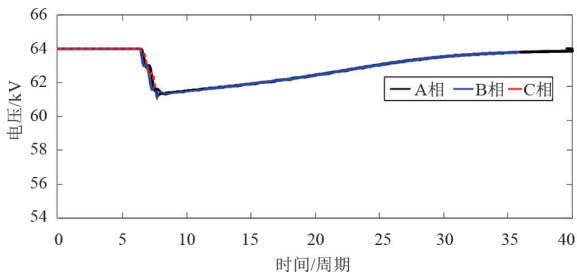


图3 大型感应电动机启动导致的电压暂降波形

4) 非有效接地系统中发生短路故障时,非故障相发生电压暂升现象。实际工程中往往直接称伴随暂升的暂降现象为电压暂升,一般默认电压暂升发生时,必定有一相或两相发生暂降。某实测电压暂升波形如图4所示。C相电压幅值在第6个周期时上升至大约1.1 pu, B相电压上升至1.03 pu,而A

相电压跌落至0.87 pu,推测该事件是由较远端发生A相接地故障导致。

2.2 实测数据统计

剔除较混乱、不易判别暂降原因的波形,分不同供区对海南电网实测的2455条电压暂降监测数据进行分析,结果如表1所示。统计短路故障时没有考虑电压暂升,将电压暂升进行单独划分。变压器激磁和电动机启动造成的暂降事件较多,占78%以上。因为监测点主要安装在110 kV、220 kV变电站,系统接地方式多为有效接地,故记录的电压暂升事件非常少。供电局需要重点关注变压器激磁和电机启动造成的暂降及其影响。

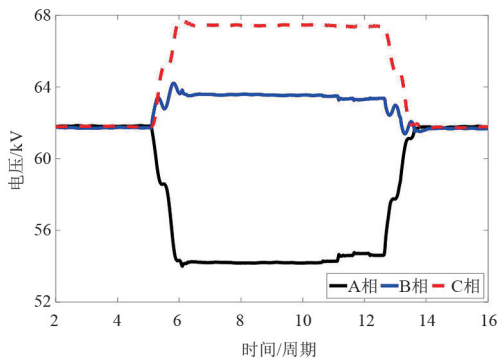


图4 电压暂降期间伴随暂升的波形

表1 不同电压暂降特征频次统计 单位:次

特征类型	三亚	海口	文昌	琼海	儋州
短路故障(暂降)	92	130	42	24	104
变压器激磁	324	425	168	97	326
电动机启动	155	185	88	43	114
电压暂升	21	75	10	8	22
总计	592	817	308	172	566

3 电压暂降特征量计算与分析

电压暂降特征量是多维度刻画暂降事件的物理量,包括幅值、持续时间、相位跳变、暂降类型、暂降频次等。对海南电网电压暂降监测数据进行特征量计算和分析,明确近几年海南电网的电压暂降信息,为后续暂降事件评估和治理决策提供有力的数据支撑。

3.1 幅值和持续时间计算与分析

监测到的暂降数据为三相瞬时电压,根据监测终端的品牌、型号和设置的不同,实测数据每周期的采样率包括128点、256点和512点3种。应用

式(1)计算各相电压有效值,三相波形最低的电压幅值即为该事件的暂降幅值。

$$V_{\text{rms}}(i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V(i)^2} \quad (1)$$

式中: N 为每周期的采样点数; $V(i)$ 为采样的瞬时电压。

2786 组数据的电压等级包括 110 kV 和 220 kV,本节将电压幅值区间 $[0,0.9]$ 分为 9 个子区间,并考虑幅值大于 1.1 pu 的电压暂升,分不同电压等级对三相电压幅值进行统计分析,结果见表 2。110 kV 和 220 kV 电网各相暂降幅值分布规律大致相同,超过 70%的暂降事件的幅值高于 0.7 pu。一般来讲,幅值高于 0.8 pu 时,不会对敏感负荷造成影响;但是,某些低压脱扣器、变频器的保护设置在 0.7~0.8 pu,所以这个区间的电压暂降需要重点关注。低于 0.7 pu 的电压暂降一般都会导致敏感设备跳停,需要重点关注敏感负荷接入处低于 0.7 pu 的暂降频次,研究针对性的治理方案。110 kV 电网发生电压暂升的频次非常少,基本上都集中在 220 kV 电网,需要进一步明确具体的变电站及发生原因。

表 2 电压暂降幅值分区间的暂降频次统计

幅值区间/(pu)	单位:次					
	110 kV			220 kV		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
[0,0.1)	8	18	5	24	17	33
[0.1,0.2)	42	38	8	32	25	15
[0.2,0.3)	38	52	34	55	32	57
[0.3,0.4)	67	87	57	52	61	83
[0.4,0.5)	81	74	62	101	89	98
[0.5,0.6)	117	92	101	131	140	152
[0.6,0.7)	194	254	311	211	173	254
[0.7,0.8)	457	421	522	413	404	428
[0.8,0.9]	1522	1487	1555	1511	1621	1477
>1.1	10	11	12	55	58	43

实测数据中,暂降持续时间最长为 54 s,最短为 0.01 s,将 $[0.01,60]$ s 分为 6 个区间,统计各区间的暂降事件数量,见表 3。

从表 3 可知,两个电压等级的绝大多数暂降持续时间都集中在 0.01~0.10 s 的时间范围内,超过 0.50 s 的暂降发生次数较少,这与电力公司的保护装置动作时间设置有关,一般越高电压等级的电网,保护动作就越迅速。快速切除故障从而减小

暂降持续时间,是降低电压暂降危害的一种直接方式。

表 3 电压暂降持续时间分区间的暂降频次统计

持续时间区间/s	暂降频次/次	
	110 kV	220 kV
[0.01,0.05)	189	514
[0.05,0.10)	474	1330
[0.10,0.50)	57	112
[0.50,1)	7	22
[1,5)	1	35
[5,60]	0	45

对 2786 组监测数据分不同幅值和持续时间区间进行统计,结果如图 5 所示。很明显,暂降幅值越高,持续时间越短,暂降频次越密集,且绝大多数暂降幅值介于 0.8~0.9 pu,持续时间介于 0.01~0.1 s,这些暂降都不会对敏感工业用户造成影响。需要关注的是幅值较低、持续时间较长的电压暂降事件。

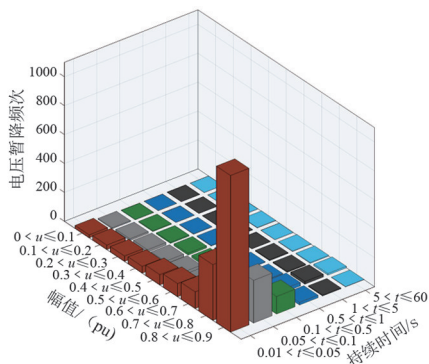


图 5 不同幅值和持续时间的电压暂降频次实际统计

3.2 相位跳变计算与分析

理想情况下,以 A 相相位为参考量,A、B、C 三相电压相位分别为 0° 、 -120° 、 120° ,当发生电压暂降时,往往伴随着不同程度的相位跳变^[17]。电压暂降期间相位跳变产生的根本原因是公共连接点到故障位置之间的馈线阻抗与系统阻抗比不同。根据经验,电力系统相位跳变值一般在 $[-10^\circ, 60^\circ]$ 的范围内,极个别暂降波形的相位跳变值可能超过该范围。

暂降期间相角的变化可能导致某些受角度控制的设备发生误动,如变流器、逆变器等^[18-19];对其他类型的敏感设备,没有重大的影响。明确某区域电压暂降时相位跳变的范围,是治理电压暂降影响和危害的重要信息。

暂降期间的相位跳变存在一定波动,这里计算

暂降期间三相相位跳变的绝对值最大值^[20]。将相位跳变范围 $[-30^\circ, 70^\circ]$ 分为8个子区间,统计每相电压波形相位跳变情况,如表4所示。可见,各相的相位跳变值基本上都集中在 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 的区间内,占90%以上,并呈现出相位跳变越大,样本数量越少的规律。如果该地区敏感设备的相位跳变耐受范围在 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 时,便可以躲过绝大多数因相位跳变而导致设备故障的暂降事件。

表4 电压暂降相位跳变值分区间频次统计

相位跳变区间/ $(^\circ)$	暂降频次/次		
	A相	B相	C相
$[-30, 20)$	5	2	5
$[-20, -10)$	88	39	97
$[-10, 0)$	1661	1592	1762
$[0, 10)$	952	1033	892
$[10, 20)$	38	78	6
$[20, 30)$	29	28	7
$[30, 40)$	5	8	9
$[40, 50)$	4	2	6
$[50, 60)$	4	3	2
$[60, 70]$	0	1	0

3.3 暂降/暂升类型计算与分析

电压暂降/暂升因其跌落、升高相不同,有不同的分类方法,采用文献[21]提出的包含A、C、D、H、I的分类方法。该方法将电压暂降/暂升分为三相对称暂降、两相暂降、单相暂降、两相暂升、单相暂升,其三相对称电压矢量图如图6所示。

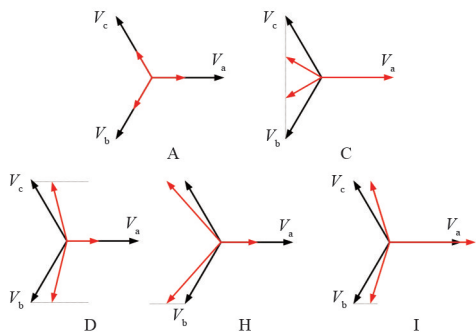


图6 电压暂降/暂升类型

电压暂降/暂升的类型是进行电网侧和用户侧电能质量治理的关键信息。电压暂降和暂升类型与短路故障类型密切相关,例如,A类型暂降由三相对称短路故障造成,C类型暂降由相间短路故障造成,非有效接地系统中,非故障相电压发生暂升。开展电压暂降和暂升类型计算和分析,不仅

有助于明确该地区短路故障情况,有针对性制定暂降预防及治理决策方案,还能为用户侧电压暂降治理提供信息。在用户侧,主要采用动态电压恢复器、不间断电源等补偿措施进行电压暂降治理,明确暂降类型,有助于敏感用户配置补偿装置的容量和相关技术参数。例如,当接入点的大多数暂降是B类或者D类时,说明有两相电压未发生明显跌落,补偿容量可考虑按被补偿设备容量的三分之一或更小来进行设计。

由于电压暂降类型是基于短路故障进行刻画,本次分析不包括由变压器激磁、电动机启动等非短路故障导致的实测电压暂降数据。应用文献[21]提出的欧式距离法计算电压暂降和暂升类型,分不同地区对528组短路故障数据进行类型计算与分析,结果如表5所示。

表5 电压暂降和暂升类型统计

电压暂降和暂升类型	暂降频次/次				
	三亚	海口	文昌	琼海	儋州
A型	3	6	4	3	4
C型	11	18	7	4	15
D型	78	106	31	17	85
H型	10	40	4	2	7
I型	11	35	6	6	15
总计	113	205	52	32	126

由表5可知:各城市发生的D型暂降频次最高,共计占60%,表明该地区单相接地故障发生概率最大;三相对称故障导致的A型暂降最少,仅占3.79%。这一结果符合短路故障的基本特性。相比之下,海口供电局发生的电压暂升频次较高,需要排查相关原因。虽然A类型的三相对称暂降发生频次低,但是由于其危害严重,电力公司应加强线路运行维护,降低三相短路的故障率。

4 结论

依托海南电网电能质量监测平台在5个城市的电压暂降监测数据,对其波形特征进行统计分析,同时从电压暂降特征量中的幅值、持续时间和相位跳变、暂降类型几个方面进行特征计算与分析,得到以下结论:

1)接短路故障、电动机启动、变压器激磁和电压暂升进行暂降源分析,各城市由变压器激磁和电动机启动导致的暂降事件最多,共占样本数

量的 78% 左右,而短路故障和电压暂升事件较少。建议电力公司重点关注大电动机用户的开机方式、调度合理安排变压器投入的作业时间和频次等。

2)按不同电压暂降幅值和持续时间进行分析,70%的实测数据幅值大于 0.7 pu,持续时间在 [0.01, 0.1]s 的数据大约占 90%,幅值越小持续时间越长,样本数量呈递减趋势。

3)相位跳变在 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 范围内的样本数据大约占 90%,处于大多数敏感设备的耐受范围,可推测该地区受暂降相位跳变影响,发生设备跳停的事故较少。

4)计算和分析 528 组短路故障导致的暂降类型,结果表明 D 型暂降频次最高,推测各地区单相接地故障发生频繁,相间故障导致的 C 型暂降次之。

参考文献

- [1] 张军,浦天宇.多层次电压暂降评价方法研究[J].电力工程技术,2018,37(6):49-54.
- [2] 黄瑞,肖先勇,李国栋,等.敏感设备电压暂降免疫力测试标准与尚需研究的问题[J].中国测试,2015,41(增刊1):32-36.
- [3] 肖先勇,谭秀美,汪颖,等.基于电气特性-物理属性-感知损失的电压暂降经济损失评估[J].中国电机工程学报,2018,38(增刊):105-110.
- [4] Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-30:Testing and measurement techniques-Power quality measurement method:IEC 61000-4-30[S],2015.
- [5] 汪颖,周杨,莫文雄,等.设备电压暂降耐受能力测试技术分析 with 测试规范建议[J].电力自动化设备,2020,40(2):167-171.
- [6] 浦雨婷,杨洪耕,马晓阳,基于数据挖掘与改进灰靶的电压暂降严重度分析与评估[J].电力系统自动化,2020,44(2):198-213.
- [7] 许丹,黄利军,李献伟,等.基于小波变换的抗噪声电压暂降检测方法研究[J].供用电,2018,35(2):57-62.
- [8] 李伟,丁凯,李琼林,等.省级电能质量监测平台实测电压暂降特征分析[J].水电能源科学,2019,37(10):155-158.
- [9] 司学振,李琼林,杨家莉,等.基于实测数据的电压暂降特性分析[J].电力自动化设备,2017,37(12):144-149.
- [10] CIGRE/CIREN/UIE Joint Working Group C4.110. Voltage Dip Immunity of Equipment and Installations[R]. CIGRE Publications,2010:1-18.

- [11] 丁凯,李伟,谢佳妮,等.电压暂降治理效果评价指标体系及综合评价模型[J].科学技术与工程,2019,19(25):197-203.
- [12] 贾清泉,艾丽,董海艳,等.考虑不确定性的电压暂降不兼容度和影响度评价指标及方法[J].电工技术学报,2017,32(1):48-57.
- [13] 徐永海,韦鹏飞,李晨懿,等.电压暂降相位跳变及其对敏感设备的影响研究[J].电测与仪表,2017,54(21):105-111.
- [14] 徐永海,洪旺松,兰巧倩.电压暂降起始点与相位跳变对交流接触器影响的分析[J].电力系统自动化,2016,40(4):92-98.
- [15] 欧阳森,李翔,刘平,等.低压脱扣器电子电路电压暂降敏感特性试验研究[J].电力自动化设备,2017,37(2):211-218.
- [16] 李晨懿,汪坤,卢文清,等.变频器对不同类型电压暂降的耐受特性研究[J].电测与仪表,2018,55(15):1-7.
- [17] 欧然,肖先勇,吴丹岳,等.三相系统电压暂降的相位跳变检测[J].中国测试,2015,41(6):101-106.
- [18] Isao IYODA, Yoshiki ABE, Toshifumi ISE, et al. A new parameter of voltage sags and its effect on inverters of PV systems surveyed by a newly developed voltage sag generator[C]. IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society,2010.
- [19] Mansour MOHSENI, Syed ISLAM, Mohammad A S MASOUM. Impacts of Symmetrical and Asymmetrical Voltage Sags on DFIG-Based Wind Turbines Considering Phase-Angle Jump, Voltage Recovery and Sag Parameters[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2011,26(5):1587-1598.
- [20] Ying WANG, Math H J BOLLEN, Xianyong XIAO. Calculation of the Phase-Angle-Jump for Voltage Dips in Three-Phase Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2015,30(1):480-487.
- [21] Ying WANG, Huaxi YU, Xianyong XIAO, et al. New method for calculating voltage dip/swell types based on six-dimensional vectors and Euclidean distance [J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2019, 13(18):4206-4213.

作者简介:

方 铭(1988),女,工程师,从事电能质量、电压管理与仪器仪表检定技术研究;

李天楚(1988),女,硕士,高级工程师,从事电能质量、电磁环境与仪器仪表检测技术研究。

(收稿日期:2021-07-29)