

设备电压暂降耐受能力测试技术分析与测试规范建议

汪颖¹, 周杨¹, 莫文雄², 许中², 肖先勇¹

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 广州供电局电力试验研究院, 广东 广州 510641)

摘要:设备电压暂降耐受能力测试是认识、理解和解决电压暂降问题的基础。系统分析了国内外的设备电压暂降耐受能力测试技术相关标准, 结合测试现状指出标准中尚存在的问题。从现有文献统计、现有研究团队、设备测试成果、工业过程耐受能力、设备对电压暂降的响应机理等角度出发, 分析了设备电压暂降耐受能力测试领域研究成果及尚未解决的问题。提出一套通用测试规范, 包括测试条件、测试判据、测试平台、测试方法和测试步骤等。最后, 对设备电压暂降耐受能力测试技术的发展趋势进行分析, 并提出了进一步值得研究的问题。

关键词:电能质量; 电压暂降; 耐受能力; 测试技术; 工业过程; 设备

中图分类号: TM 761

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202001029

0 引言

电能质量问题是供电系统与电力用户之间通过传导引起的电磁兼容问题。在用户侧表现为供电扰动导致用户设备不能达到期望效用。在现有已定义的供电扰动中, 电压暂降是用户抱怨和投诉最多的电能质量问题, 表现为导致用户生产中断, 造成巨大经济损失。因此, 对用电设备的电压暂降耐受能力进行测试, 是认识、理解和解决电压暂降问题的基础, 具有重要的理论价值和现实意义。

近年来, 国内外对设备电压暂降耐受能力测试技术开展了大量研究。在标准化、测试方法和结果分析等方面取得了大量成果, 但尚未达成共识。国内外对典型设备, 如交流接触器 ACC (AC-Contactor)^[1-8]、个人计算机 PC (Personal Computer)^[9-15]、可调速驱动器 ASD (Adjustable Speed Driver)^[16-19]、可编程逻辑控制器 PLC (Programmable Logic Controller)^[20-23]等的电压暂降耐受能力进行了研究。通过测试, 积累了大量的设备电压暂降耐受能力数据和成果。但是现有研究也显示了诸多不足, 如测试方法不准确、设备耐受能力影响因素不明确、测试步长不合理、未考虑受测设备的运行工况等。

本文对现有设备电压暂降耐受能力测试技术进行系统研究, 总结现有测试标准、方法和结果, 针对尚存在的问题, 提出一套通用测试规范, 并针对建立一套公认的测试体系和设备电压暂降耐受能力的科

学刻画提出意见和建议。

值得说明的是, 现有文献或标准中, 对设备或敏感设备的表述有多种方式, 包括用户设备 (customer equipment)^[24]、电气设备 (electrical equipment)^[25]等。对耐受能力 (tolerance)^[26]的表述包括: 免疫力 (immunity)^[27]、穿越能力 (ride-through ability)^[25]、兼容性 (compatibility)^[28]、可接受能力 (acceptable ability)^[29]、脆弱性 (vulnerability)^[30-31]、抗扰度^[32]等。本文统一采用“设备”和“耐受能力”这2个术语。

1 相关标准

国际电工委员会 IEC (International Electrotechnical Commission)、国际电子电气工程师学会 IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) 和国际大电网会议 CIGRE (International Council on Large Electric Systems, 法语全称为 Conseil International des Grands Reseaux Electriques) 等学术组织围绕设备电压暂降耐受能力提出了一些标准建议, 我国也对其进行了标准化探索。现有的标准普遍将电压暂降的幅值与持续时间作为评价设备耐受能力的2个特征量, 并认识到电压暂降的相位跳变、波形起始点等特征对设备电压暂降耐受能力也有影响^[33-35]。

1.1 设备电压暂降耐受能力建议标准

现有国际标准主要有 CBEMA、ITIC^[36]、SEMI F47^[37]曲线等:

(1) CBEMA 曲线由美国计算机和商用设备制造协会于 1978 年提出, ITIC 曲线由美国信息技术工业协会所属的第三技术委员会于 1996 年提出, 两者均为针对 IT 设备制造商提出的建议标准;

(2) SEMI F47 曲线由国际半导体设备材料产业协会于 1999 年提出, 其为针对半导体设备制造商的强制性标准, 1999 年以来已进行了 3 次修订。

通常, 在电压暂降幅值与持续时间平面上用一

收稿日期: 2019-03-29; 修回日期: 2019-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51807126); 南方电网科技项目 (基于多功能变流装置的优质供电技术研究与示范应用) (080037KK52160006)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51807126) and the Science and Technology Program of China Southern Power Grid (Research and Demonstration Application of High-quality Power Supply Technology Based on Multifunctional Converter) (080037KK52160006)

条曲线或折线刻画设备的电压暂降耐受能力,该曲线被称为设备的电压耐受曲线 VTC (Voltage Tolerance Curve)。ITIC 曲线和 SEMI F47 曲线的主要差别在于,在 20~200 ms, SEMI F47 曲线和 ITIC 曲线分别要求设备能耐受 50% 和 70% 电压暂降。但现有标准仅考虑了设备在电压暂降作用下的电气状态,并未考虑用户感知效用,难以准确反映用户遭受的实际影响。

1.2 设备电压暂降耐受能力测试所需扰动源标准

进行设备电压暂降耐受能力测试,扰动源是基础。IEEE 1159—1995 标准^[24]对电压扰动源的监测和评价进行了相关规定。建议以所监测的数据为基础,结合电压暂降对设备的影响程度进行分类。IEEE 1159—1995 标准于 2009 年进行了修订^[38],修订版,即 IEEE 1159—2009 标准更关注电能质量事件对终端设备的影响。我国于 2013 年制定的国家标准 GB/T 30137—2013 提出了电压暂降测量和统计方法,并规定电压暂降监测仪器应满足 GB/T 17360—1998 和 GB/T 19862—2005 标准(等同于 IEC61000-4-30^[39])的要求^[40]。但目前国内外尚无针对设备电压暂降耐受能力测试所用标准扰动源的统一标准,尤其是针对除电压暂降幅值、持续时间以外的其他特征尚无统一标准。

1.3 设备电压暂降耐受能力测试标准

设备电压暂降耐受能力测试标准可分为符合性测试和耐受能力测试标准。IEC、IEEE 和我国均进行了标准化探索。

IEC 已颁布 IEC61000-4-30/11/34^[39,41-42]、IEC 61000-2-1^[43]等标准,对电压暂降发生源、测试步骤、测试条件、测试报告撰写等做出了规定或提出了建议。其中,IEC61000-4-11/34 标准适用于额定相电流小于/大于 16 A 的设备;IEC61000-4-30 标准规定了电压暂降测量和评估方法;IEC61000-2-1 标准主要关注电压暂降的来源和影响。IEC 测试标准仅对几个特定测试点进行了规定,属于符合性测试范畴,所得结果尚不能精确反映设备电压暂降耐受能力的全貌,甚至不足以绘制 VTC。

IEEE 1668—2017 标准^[25]推荐了 1000 V 以下设备耐受能力测试方法,提出了从上到下法、从左到右法和封闭式 3 种测试方法,可获得设备 VTC,但存在一些局限,如不能准确测量交流接触器 0° 起始点的 VTC。IEEE 1346—1998 标准^[28]推荐了测试逻辑,方法与 IEC61000-4-11 标准相同。

国家标准 GB/T 17626.11—2008、GB/T 17626.34—2012^[32,44](等同于 IEC61000-4-11/34)的引入对设备耐受能力提出了标准化建议。

国内外已有标准中,仍存在诸多未解决或模糊不清的问题:

(1)测试方法方面,存在固定测试步长、逼近结

果慢、不适用于所有设备的问题,为此,华北电力大学提出了改进封闭法^[45],四川大学提出了二分测试法^[46]。

(2)影响因素方面,所有标准均未考虑步长调节值和受测设备运行工况等。

1.4 我国标准化建设进程

现有标准中,IEC61000-4-11/34 标准存在的符合性测试结果不能反映设备电压暂降耐受能力的全貌的问题;IEEE 1668—2017 标准存在所提测试方法趋近速度慢、未给出测试停止时幅值的精确度和设置的影响因素不全面等问题。为应对现存问题,我国正在开展相关标准化研究,并高度重视设备耐受能力测试标准。

2017 年,广州供电局、四川大学、华北电力、华南理工大学等单位联合建议了 3 项国家标准,即《电压暂降/短时中断低压设备耐受特性测试方法》、《1000 V 以下敏感过程电压暂降免疫时间测试方法》和《电压暂降指标与严重程度评估方法》。其中,正在起草的《电压暂降/短时中断低压设备耐受特性测试方法》适用于 50 Hz 低压接入设备,主要规定测试方法、范围和耐受能力刻画方法;《1000 V 以下敏感过程电压暂降免疫时间测试方法》对 1000 V 以下工业过程测试方法进行了规定。

2018 年,由陕西省电力公司牵头,全球能源互联网研究院、四川大学等单位共同开展行业标准《敏感负荷用户电压暂降控制技术导则》的制定工作。该导则对电网侧、用户侧电压暂降控制技术及敏感设备电压暂降耐受能力提升技术等提出了相关建议。由广州供电局牵头制定的团体标准《电气设备电压暂降及短时中断耐受能力测试方法》已完成初稿,其对测试条件、测试设备性能判据、测试电路布置、最小测试要求、测试流程、测试结果与测试报告、测试数据格式要求等提出了建议。

2019 年,由电力行业电能质量及柔性输电标准化技术委员会发起的行业标准《低压变频器电压暂降及短时中断穿越能力测试技术规范》正处于起草阶段,全球能源互联网研究院、华北电力大学、四川大学等单位也参与了该标准的制定工作。

2 设备电压暂降耐受能力测试技术研究现状

2.1 国内外文献统计

国内外对设备受电压暂降影响的认识和研究经历了由表及里、由浅入深的过程,可分为经验积累、观测与统计、实验分析、理性分析 4 个阶段,取得了大量成果。以“voltage sag(dip)”加“equipment”为检索词,在 EI Engineering Village 和 ISI Web of Knowledge 数据库中检索出的文献数量详见附录 A 中的图 A1。

Web of Science 数据库中检索到的文献中, 70% 来自美国、中国、印度、巴西、马来西亚、英国, 其中, 美国和中国学者的文献约占 1/3。在关注的内容方面, 北美、西欧最早报道电压暂降给工厂造成的影响。随着先进制造业的快速发展, 电压暂降引起的生产过程、设备不正常运行问题在全球工业界内逐渐凸显, 成为了全球关注热点, 其中, 针对造纸^[47]、半导体^[48]、钢铁^[49]、塑料^[50]等行业的研究较多。同时, 西方多个国家对工业界常用设备进行了调查和测试, 提出了设备电压暂降耐受能力测试要求、方法和标准等。

2.2 电压暂降耐受能力刻画方法

1979年, T. S. Key 提出了 VTC^[51]。以 SEMI F47 曲线等为代表的 VTC 对发生电压暂降时设备的电气属性进行刻画, 反映设备能否正常运行。

对 ACC、ASD、PLC、PC 等进行实测发现, 设备运行工况、环境、使用寿命等对 VTC 有影响, 使 VTC 存在不确定性区域, 如图 1 所示。图中, $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 和 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为不确定性区域的最大、最小暂降幅值和最长、最短持续时间。肖先勇等对该不确定性区域的诸多问题开展了深入研究^[52-54]。

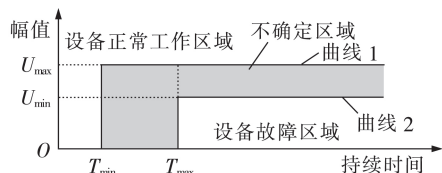


图1 VTC不确定性区域

Fig.1 Uncertainty region of VTC

实际生产中, 能直接感受到电压暂降影响的不是电气工程师, 而是过程、工艺或仪器仪表工程师, 这种感知直接来自于生产过程中的风速、压力、温度、流量等物理参数偏离期望值范围的现象。为此, 2010年, CIGRE、CIRED 与国际电力应用联盟 UIE (International Union Electricity Applications) 组成的联合工作小组 JWG C4.110 提出了过程参数免疫时间 PIT (Process Immunity Time) 的概念^[27], 如图 2 所示。图中, 过程参数是度量受影响的物理参数, 如风速、流量等; P_{nom} 和 P_{limit} 分别为过程参数的正常值和可接受极限值; t_1 、 Δt 、 t_2 分别为电压暂降发生时刻、响应延时和临界时刻。JWG C4.110 建议通过 PIT 识别工业过程中的敏感环节和元件, 但若若要满足实

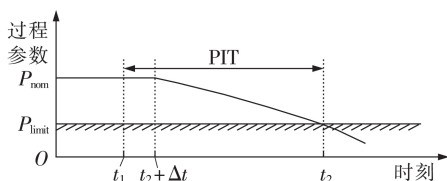


图2 PIT曲线

Fig.2 PIT curve

际应用需要, 尚需进一步研究。

2.3 国内外主要研究团队

国内外多个团队针对设备电压暂降耐受能力开展了研究。早在 20 世纪 40 年代, 国外就有关于输油管道受电压暂降影响的报道^[55-56], 随后针对电压暂降造成的影响进行了大量经验积累。进入 20 世纪 90 年代后, 以英国学者 J. V. Milanovic^[10, 33-34, 57]、西班牙学者 A. Honrubia-Escribano^[58-59]、澳大利亚学者 S. Elphick^[60]、马来西亚学者 H. SURYA^[13, 61] 以及我国四川大学肖先勇^[62-63]、华北电力大学肖湘宁^[64-69]、台湾中山大学陈志强^[70] 等为代表的团队开展了大量研究。我国的全球能源互联网研究院、中国电科院、东南大学、华南理工大学、湖南大学、燕山大学, 以及归属于国家电网的北京市电科院、上海市电科院、福建省电科院、湖北省电科院等省(直辖市)级电科院, 归属于南方电网的广州电科院、广东电科院、深圳电科院等均很重视对电压暂降耐受能力的研究^[71-80]。国内外对 ACC、PC、ASD、灯具、低压脱扣器、单相电机、三相电机、家用电器等设备的电压耐受能力测试, 积累了大量样本。

3 测试成果及存在的问题

3.1 ACC

ACC 广泛应用于工业过程, 利用电磁感应吸合力控制设备开合, 其电压暂降响应特性较复杂。文献[1-4]仅考虑暂降幅值和持续时间, 进行了测试, 但不能解释 ACC 复杂的响应特性; 文献[5-6]在测试时考虑了暂降波形起始点, 证明波形起始点特征对 ACC 的影响满足近似 1/4 对称性; 文献[6]首次考虑了相位跳变特征对 ACC 的影响; 文献[7-8]进行了相似测试, 绘制出了 VTC, 但文献[8]的测试时间步长过长, 所得结果的准确性不足。附录 B 中的表 B1 总结了部分文献的测试成果。

3.2 PC

PC 是最常见电压暂降敏感设备, 国内外对 PC 进行测试所得结果非常丰富。马来西亚学者 H. Surya 等对 3 台不同型号的 PC 进行了测试^[13], 证明 PC 的 VTC 呈矩形; S. J. Djoick 团队对不同操作系统、不同厂家的 6 台 PC 进行了测试^[14], 提出 PC 故障判据, 将 PC 重启作为“硬件”故障, 将读/写操作锁定、蓝屏等作为“软件”故障, 测试结果表明, “软件”故障比“硬件”故障更敏感, 并得出不确定性区域为 (40~205 ms, 46%~63%)。部分测试成果汇总见附录 B 中的表 B2。

3.3 其他设备

工业界大量使用的 ASD^[16-19]、PLC^[20-23]、灯具^[78-82]、开关电源^[65, 83-84]、继电器^[58]、低压脱扣器^[72-77] 等设备的结构和机理不同, 电压暂降耐受能力也存在明显差异, 给工业过程的电压暂降耐受能力测试和评估

带来了极大的困难。

ASD是一种非线性电子设备,由整流、逆变、中间直流电路和控制电路等构成,其电压耐受能力受电压不对称水平、控制策略等影响。PLC中包含中央处理器(CPU)、输入/输出(I/O)等模块,电压暂降可能导致这些模块发出错误指令,影响工业过程运行,甚至导致严重损失。开关电源内部的整流、滤波、逆变和控制电路均可能因电压暂降造成不同程度的紊乱。继电器和低压脱扣器结构类似,电压暂降导致电磁吸合力不稳定是关键因素。

附录B中的表B3给出了相关文献测试成果。研究发现,除暂降幅值、持续时间外,暂降波形起始点、相位跳变、运行工况、控制策略等均可能对这些设备的耐受能力造成影响。

3.4 存在的问题

现有测试取得了大量成果,但当前研究成果也存在较多不足之处,主要体现在3个方面。

(1)现有的设备耐受能力测试多考虑电压暂降特征量,而较少考虑负荷特性、自身工作特性等其他影响因素,所测数据适用范围小。

(2)测试判据单一。例如,开关电源的功能是输出功率,对电压暂降的响应即为输出端电压的下降,这是开关电源所带负载的“输入电压”,所带负载不同,负载故障阈值也存在差异,故而导致负载跳闸的电压阈值是开关电源的故障判据。因此,在测试过程中应根据所带负载的特性,选择不同测试判据。

(3)上述测试基本依靠人工完成,测试过程中难免出现操作误差,且测试环境等因素考虑不全,使得所测数据科学性不高。

4 现代工业过程的电压暂降耐受能力

现代工业过程以用户需求为导向,由多种设备按一定结构、层次、逻辑组合而成,迄今为止,对工业过程电压耐受能力的测试研究还很少见报道。现有方法主要是利用构成工业过程的典型设备的耐受能力,按照设备间的串、并联关系评估工业过程的耐受能力^[57,85-86]。文献[85]的测试结果证明,这种方法不够合理。事实上,工业过程的电压暂降耐受能力不仅与构成过程的设备的电压暂降耐受能力有关,还与中间缓冲环节、所带负载、生产工艺等有关。

以实际物理参数作为工业过程电压暂降耐受能力的判据已成为国内外共识,正在起草的国家标准《1000 V以下敏感过程电压暂降免疫时间测试方法》主要采用了这种方案,但该标准中的测试步骤、测试条件和边界等还需深入研究。

5 设备对电压暂降响应机理

通过测试,学术界和工业界对设备的电压暂降耐受能力形成了直观的认识,但是如第3节所述,仍

存在不确定区域等问题,需要通过对设备电压暂降的响应机理进行分析揭示其物理过程。在测试技术的基础上,可将各类设备的敏感模块划分为电磁模块^[11,69,72]、电力电子模块^[87]进行深入探讨。

5.1 电磁模块

ACC内部结构是典型的电磁模块,电压暂降期间ACC内部电-磁-力的变化可描述其电压暂降响应机理。

图3为典型双E型ACC, a 、 b 、 c 分别为短路环、非短路环、主磁极截面面积。设真空磁导率为 μ_0 ,线圈磁通为 Φ_1 ,短路环磁通为 Φ_2 。若忽略极小的断开时间,得到电磁吸力 F_m 如式(1)所示。

$$F_m = \frac{\Phi_1^2}{2\mu_0} \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{b} \right) + \frac{\Phi_1 \Phi_2}{c\mu_0} + \frac{\Phi_2^2}{2\mu_0} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (1)$$

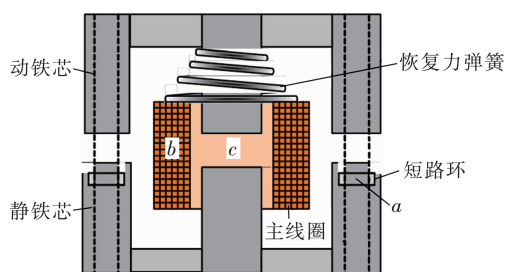


图3 ACC结构原理图

Fig.3 Structural schematic diagram of ACC

发生电压暂降时,线圈端电压幅值下降导致通过线圈的电流减小,使得铁芯中磁通量减小,导致电磁力减小,当其小于反作用力(弹簧力)时,衔铁带动触头系统运动,切断电路。

5.2 电力电子模块

PLC与PC的主要结构相似,包含电源、CPU、I/O、存储模块,其中,电源模块是受电压暂降影响最直接的模块。ASD包括整流电路、直流中间电路、控制电路和逆变电路,其整流模块工作原理与电源模块类似。

交流侧电压下降到一定幅值后,整流桥关断,后级电路正常工作所需电压由电容器提供,电容器两端电压降低到一定值时,过流/欠压保护动作。设直流侧电容值为 C ,在电压暂降发生时刻与电压暂降持续期间某一时刻 t , C 两端的电压分别为 U_1 、 U_2 。假设负载功率为 P ,且直流侧电压大于输入电压绝对值,则存在以下关系式:

$$Pt = C(U_1^2 - U_2^2)/2 \quad (2)$$

若保护电路动作电压为 U_{de} ,则电压暂降发生时刻到保护电路动作的时间为设备能耐受的最大时间见式(3)。

$$t_{\max} = C(U_1^2 - U_{de}^2)/(2P) \quad (3)$$

6 设备电压暂降耐受能力测试规范

针对设备电压暂降耐受能力测试存在的主要问

题,本文提出一套设备电压暂降耐受能力测试规范,包括规范测试条件、测试判据、测试平台、测试方法和测试步骤等,供相关单位进行设备电压暂降耐受能力测试工作时参考。

6.1 测试条件

设备电压暂降耐受能力本质上是设备与接入点电压暂降水平之间的电磁兼容问题,主要测试条件应从电源特性、负荷特性和工作特性3个方面考虑。

(1)电源特征。

a. 电压暂降特征:电压暂降类型、幅值、持续时间、波形点、相位跳变、非矩形暂降恢复率。

b. 非电压暂降特征:谐波、频率、电压暂降前后幅值等。

(2)负荷特性。实际工业过程中常见的负荷特性有开关电源负载率、ASD的恒转矩/恒功率负荷、PC的CPU占有率等。

(3)工作特性,如PLC的工作类型、I/O点数、ASD的控制策略等。

6.2 测试判据

设备受电压暂降影响通常会经历从“能耐受(正常)”到“不能耐受(故障)”的过渡过程,测试判据是用于判定达到不能耐受程度的依据,与设备后果状态有关。肖先勇等将其描述为设备电压暂降响应事件的后果状态,为刻画和判断设备电压暂降耐受能力找到了一种通用方法。结合设备结构、运行状况、工作特性等,将设备后果状态分为正常、自动恢复、人工恢复3种状态,以此确定测试判据,见图4。

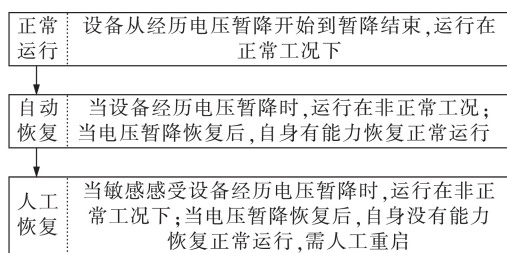


图4 设备测试判据

Fig.4 Test criterion of equipment

6.3 测试平台

设备电压暂降耐受能力测试平台主要由电压暂降发生器、受测设备、采集装置等构成,其中采集装置用于监测电压暂降特征、记录设备电气和设备后果状态。一般推荐按照图5连接测试装置。

6.4 测试方法及测试步骤

现有测试方法以IEEE 1668—2017标准中的方法和逐点测试法为主。IEEE 1668—2017标准中所提测试方法测试计划明确,但易漏测非矩形耐受曲线的关键点;逐点测试法在较小测试步长下,准确度高,但工作量大、耗时多。二分测试法^[46]的提出,解

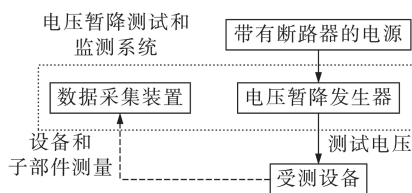


图5 测试装置连接图

Fig.5 Wiring connection diagram of test devices

决了上述问题。本文以二分测试法为例,考虑0°波形起始点、0°相位跳变下,电压暂降幅值与持续时间对设备的影响,对具体测试步骤给出建议,为其他测试方法的测试步骤提供参考。本文给出的具体测试步骤建议如下:

(1)设计和搭建测试平台,记录受测设备产地、品牌、型号、暂降发生器与采集装置型号、测试场景、温度和环境等;

(2)调节电压暂降发生器,将波形起始点与相位跳变都设置为0°,且保证测试前供电侧和设备侧处于完全正常状态;

(3)电压暂降幅值范建议从0开始,以2%步长增加至86%,利用二分测试法找出不同电压暂降幅值下持续时间的临界点,并记录测试结果;

(4)根据测试结果,绘制VTC。

7 发展趋势与展望

目前,国内外的设备电压暂降耐受能力测试技术已累积了大量成果,但存在如何改进测试手段、建立统一标准、测试结果共建共享等尚需解决的问题,需在以下方面进行完善:

(1)针对规范测试条件、测试判据、测试平台、测试方法和测试步骤等,建立设备电压暂降耐受能力测试统一标准,特别应考虑材料、机械、电子、电力电子等对设备电压暂降耐受能力的影响;

(2)围绕测试环境、测试参数等因素开展测试,探究环境、参数、测试方法等对测试结果的影响,累积测试样本,进一步完善国内外相关测试规范/标准中的测试环境、参数等内容;

(3)已有测试技术中,存在完全依靠人工实施、耗时长、电压暂降发生器移动困难等问题,对此需开发自动化程度较高的测试系统,实现测试特征提取、测试过程、结果记录和VTC绘制的全自动化,全面提升测试效率;

(4)国内外多个单位都开展了相关测试工作,但测试结果未能实现无障碍共享,在完善(1)的前提下,统一测试结果报表,开发相关网站,实现全世界测试数据共建共享。

值得进一步研究的问题有:

(1)根据VTC的形状,提出幅值/持续时间步长自适应的测试方法,以提高测试效率及测试精度;

(2)将测试数据科学地用于故障诊断、设备选型、工艺改进和补偿方案决策;

(3)设备受电压暂降影响的物理机理分析及数学模型搭建,即将设备按电磁电路模块、电力电子模块等划分,搭建各环节的数学模型,利用能量守恒定律、暂态分析等揭示设备对电压暂降的响应特性;

(4)基于设备对电压暂降的响应特性,研究不同工业过程的电压暂降响应机理,从物理结构、工艺过程、能量转换等角度,揭示电压暂降对工业生产的影响规律,构筑由设备制造商、用户、供电企业和政府部门共同参与的电压暂降综合治理体系,是未来发展的方向。

8 结论

本文对设备电压暂降耐受能力测试技术的研究现状进行综述,分析测试技术的相关标准、研究现状、测试成果及存在的问题、现代工业过程电压暂降耐受能力及设备对电压暂降的响应机理等。基于现有问题,提出一套通用测试规范。分析了设备电压暂降耐受能力测试技术的发展趋势,并提出了进一步值得研究的问题。本文主要得出了以下结论。

(1)系统剖析和梳理了国内外的测试技术相关标准,得出现有测试标准中的测试方法不能适用于所有设备测试,且设置的影响因素不全面的结论。

(2)从文献统计、现有研究团队及研究内容等角度出发,针对目前测试技术存在的问题,提出了一套通用的测试规范,测试规范包括测试条件的设置、测试判据的制定、测试平台的搭建、测试方法的选择和测试步骤等,为测试设备电压暂降耐受能力提供参考。

(3)对于设备耐受能力测试,还需要按响应机理划分各类设备的敏感模块,分析其受电压暂降影响的物理过程。深入探讨设备受电压暂降的影响的机理,从机理上细化到材料、机械、电子、电力电子等学科层面是当前研究的重点。

(4)值得进一步研究的问题包括标准建设、自动化测试、全球测试数据共建共享、工业过程受电压暂降影响机理等。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] MCGRANAGHAN M, MUWLLER D, SAMOTYI M. Voltage sags in industrial systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(2): 397-403.
- [2] TURNER A E, COLLINS E R. The performance of AC contactors during voltage sags[C]//IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power. Tartu, Estonia: IEEE, 1996: 2-6.
- [3] COLLINS E R, BRIDGWOOD M A. The impact of power system disturbances on AC coil contactors[C]//1997 IEEE

Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference. Greenville, SC, USA: IEEE, 1997: 2-6.

- [4] COLLINS E R, ZAPARDIEL F. An experimental assessment of AC contactor behavior during voltage sags[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Atlanta, GA, USA: IEEE, 1997: 439-444.
- [5] POHJANHEIMO P, LEHTONEN M. Equipment sensitivity to voltage sags-test results for contactors, PCs and gas discharge lamps[C]//IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power. Bergamo, Italy: IEEE, 2002: 559-564.
- [6] DJOKIC S, MILIANOVIC J, KIRSCHEN D. Sensitivity of AC coil contactors to voltage sags, short interruptions, and under-voltage transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1299-1307.
- [7] HARDI S, DAUT I. Sensitivity of low voltage consumer equipment to voltage sags[C]//2010 4th International Power Engineering and Optimization Conference. Shah Alam, Malaysia: IEEE, 2010: 396-401.
- [8] SHAREEF H, MARZUKI N, MOHAMED A. Experimental investigation of AC coil contactors ride through capability during voltage sag[C]//2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Shah Alam, Malaysia: IEEE, 2010: 325-328.
- [9] 吴亚盆. 典型敏感设备电压暂降耐受特性与评估模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
WU Yapen. Study on voltage sag withstand characteristics and evaluation model of typical sensitive equipment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [10] GUPTA C P, MILIANOVIC J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 711-718.
- [11] 洪旺松. 电压暂降对典型敏感设备影响的机理分析与试验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
HONG Wangsong. Mechanism analysis and experimental study of voltage sag on typical sensitive equipment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [12] MILIANOVIC J V, GUPTA C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags: part 1: the methodology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 918-924.
- [13] SURYA H, DAUT I. Sensitivity of low voltage consumer equipment to voltage sags[C]//2010 4th International Power Engineering and Optimization Conference. Shah Alam, Malaysia: IEEE, 2010: 325-328.
- [14] DJOKIC S Z, DESMET J, VANALME G. Sensitivity of personal computers to voltage sags and short interruptions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 375-383.
- [15] 刘书铭, 吴亚盆, 张博, 等. PC机电压暂降敏感度试验研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(11): 32-36, 48.
LIU Shuming, WU Yapen, ZHANG Bo, et al. Experimental research on sensitivity of PC to voltage sags[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(11): 32-36, 48.
- [16] DJOKIC S, STOCKMAN K, MILIANOVIC J. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 494-505.
- [17] BOLLEN M H, LIDONG D. Analysis of voltage tolerance of AC adjustable-speed drives for three-phase balanced and unbalanced sags[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(3): 904-910.
- [18] 陶顺, 唐松浩, 陈聪, 等. 变频调速器电压暂降耐受特性试验及量化方法研究 I: 机理分析与试验方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1273-1281.
TAO Shun, TANG Songhao, CHEN Cong, et al. Experimental research on adjustable speed drivers tolerance to voltage sags

- and quantitative method part I: mechanism analysis and test method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1273-1281.
- [19] 唐松浩, 陶顺, 刘颖英, 等. 变频调速器电压暂降耐受特性试验及量化方法研究 II: 试验及量化方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2207-2215.
- TANG Songhao, TAO Shun, LIU Yingying, et al. Experimental research on adjustable speed drivers tolerance to voltage sags and quantitative method part II: experiment and quantification method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2207-2215.
- [20] XU Y H, WU Y P, ZHANG M M, et al. Sensitivity of programmable logic controllers to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 2-10.
- [21] 莫文雄, 吴亚盆, 许中, 等. 典型 PLC 电压暂降耐受性能实验研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(3): 53-59, 66.
- MO Wenxiong, WU Yapen, XU Zhong, et al. Research on tolerance characteristics of typical PLC to voltage sags[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2018, 45(3): 53-59, 66.
- [22] BOLLEN M H. Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions[M]. New York, USA: Wiley-IEEE Press, 2000: 156-178.
- [23] 吴亚盆, 徐永海, 李晨懿, 等. 可编程控制器对电压暂降与短时中断的敏感度试验研究[J]. 大功率变流技术, 2016, 31(3): 53-57.
- WU Yapen, XU Yonghai, LI Chenyi, et al. Experimental research on the sensitivity of PLC to voltage sag and short interruption[J]. High Power Converter Technology, 2016, 31(3): 53-57.
- [24] IEEE. IEEE recommended practice for monitoring electric power quality: IEEE 1159-1995[S]. New York, USA: IEEE, 1995.
- [25] IEEE. IEEE recommended practice for voltage sag and short interruption ride-through testing for end-use electrical equipment rated less than 1 000 V: IEEE 1668-2017[S]. New York, USA: IEEE, 2017.
- [26] 谢巍. 电压暂降敏感负荷耐受能力分析 & 补偿策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- XIE Wei. Voltage sag sensitive load tolerance analysis and compensation strategy research[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [27] CIGRE / CIREN / UIE Joint Working Group C4.110. Voltage dip immunity of equipment and installations[R]. London, UK: Working Group C4.110, 2010.
- [28] IEEE. IEEE recommend practice evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment: IEEE 1346-1998[S]. New York, USA: IEEE, 1998.
- [29] HEYDT G T, AYYANAR R, THALLAM R. Power acceptability[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(9): 12-15.
- [30] MC G M, MUELLER D, SAMOTYJ M. Voltage sags in industrial system[C]//1991 Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference(ICPSTC). Memphis, TN, USA: IEEE, 1991: 397-403.
- [31] MILANOVIC J V, AUNG M T, GUPTA C P. The influence of fault distribution on stochastic prediction of voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 278-285.
- [32] 中国国家标准化委员会. 电磁兼容试验和测量技术: 电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验: GB/T 17626.11—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [33] DJOKI S Z, MILANOVIC J V. Advanced voltage sag characterisation. part I: phase shift[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(4): 423-430.
- [34] DJOKI S Z, MILANOVIC J V, ROWLAND S M. Advanced voltage sag characterisation II: point on wave[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(1): 146-154.
- [35] IEC. ElectroMagnetic Compatibility (EMC)-part 2-8: environment voltage dips and short interruptions on public electric power supply systems with statistical measurement: IEC61000-2-8[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2002.
- [36] TC3 of ITI Council. ITI(CBEMA) curve application note[S]. Washington DC, USA: TC3 of ITI Council, 2000.
- [37] Semiconductor Equipment and Materials International. Specification for semiconductor processing equipment voltage sag immunity: SEMI F47[S]. San Jose, UK: SEMI, 1999.
- [38] IEEE. IEEE recommended practice for monitoring electric power quality: IEEE 1159-2009[S]. New York, USA: IEEE, 2009.
- [39] 杨帆. 谈 GB/T 30137—2013《电能质量电压暂降与短时中断》的贯彻 访中国电力科学研究院教授级高工林海雪[J]. 电气应用, 2015(11): 6-9.
- [40] IEC. ElectroMagnetic Compatibility(EMC): part 4-30: testing and measurement techniques-power quality measurement methods: IEC61000-4-30[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2014.
- [41] IEC. ElectroMagnetic Compatibility(EMC): part 4-11: testing and measurement techniques voltage dips, short interruption and voltage variations immunity tests: IEC61000-4-11[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2001.
- [42] IEC. ElectroMagnetic Compatibility (EMC)-part 4-34: testing and measurement techniques-voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests for equipment with mains current more than 16 A per phase: IEC61000-4-34[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2009.
- [43] IEC. ElectroMagnetic Compatibility (EMC)-part 2-1: description of the environment-electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbance and signaling in public power supply systems: IEC61000-2-1[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 1990.
- [44] 中国国家标准化委员会. 电磁兼容试验和测量技术: 每相大于 16 A 的设备的电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验: GB/T 17626.34—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [45] 陈聪. 变频调速系统电压暂降耐受特性测试方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- CHEN Cong. Study of test method on sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [46] WANG Y, MA Zhiyuan, XU Zhong, et al. A new method for sensitive single-phase equipment testing to voltage sag[C]//IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power. Ljubljana, Slovenia: IEEE, 2018: 1-6.
- [47] AGNEHOLM E, DAALDER J E. Load recovery in the pulp and paper industry following a disturbance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 831-837.
- [48] ANDERSSON T, NILSSON D. Test and evaluation of voltage dip immunity[D]. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2002.
- [49] CARLSSON F, WIDELL B, SADARAANGANI C. Ride-through investigations for a hot rolling mill process[C]//Proceedings of the International Conference on Power System Technology. Sydney, Australia: IEEE, 2000: 1605-1608.
- [50] LANGLEY R, MANSOOR A, COLLINS E R, et al. Voltage sag ride-through testing of adjustable speed drives using a controllable dynamic dynamometer[C]//8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Athens, Greece: IEEE, 1998: 566-571.
- [51] KEY T S. Diagnosing power quality related computer problems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1979,

- 15(4):381-393.
- [52] 马超,肖先勇,杨洪耕,等. 电网灾难性事故不确定性评价测度体系与模型[J]. 中国电机工程学报,2012,32(10):118-125.
MA Chao, XIAO Xianyong, YANG Honggeng, et al. Uncertain evaluation measure system and model for power grid catastrophic accident[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 118-125.
- [53] 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. Multi-uncertainty assessment of failure level of sensitive equipment caused by voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 36-42.
- [54] 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.
- [55] GROSS I W, LIPPERT G D. Lightning investigation on 132 kV transmission system of the American gas and electric company: field study of natural lightning currents measured in towers, line wires, and ground wires; and currents and voltages at stations[J]. Electrical Engineering, 1942, 61(4):178-184.
- [56] RHEA T R, ZIELINSKI H. Electric equipment for large electrochemical installations[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1942, 61(10):733-741.
- [57] MILANOVIC J V, GUPTA C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags: part II: practical implementation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2):925-932.
- [58] HONRUBIA E A, GOMEZ L E, MOLINA G A, et al. Influence of voltage dips on industrial equipment: analysis and assessment[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2012, 41(1):87-95.
- [59] HONRUBIA E A, GOMEZ L E, MOLINA G A, et al. Load influence on the response of AC-contactors under power quality disturbances[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 63(4):846-854.
- [60] ELPHICK S, SMITH V, GOSBELL V. Voltage sag susceptibility of 230 V equipment[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2013, 7(6):576-583.
- [61] SURYA H, DAUT I, ROHANA I, et al. Sensitivity of induction motor under symmetrical voltage sags and interruption[J]. Advanced Materials Research, 2014(875-877):1923-1928.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] XU Y H, LU W Q, WANG K, et al. Sensitivity of low-voltage variable-frequency devices to voltage sags[J]. IEEE Access, 2019, 46(7):2068-2079.
- [65] 兰巧倩. 电压暂降对敏感设备影响及传播特性研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.
LAN Qiaoqian. Study of voltage sag on typical sensitive equipment and its propagation property[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2016.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 徐永海,兰巧倩,洪旺松. 交流接触器对电压暂降敏感度的试验研究[J]. 电工技术学报,2015,30(21):136-146.
XU Yonghai, LAN Qiaoqian, HONG Wangsong. Experimental research on AC conductor sensitivity during voltage sags[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21):136-146.
- [69] 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):92-97.
XU Yonghai, HONG Wangsong, LAN Qiaoqian. Influence analysis of point-on-wave of voltage sag initiation and sag phase jump on alternating current contactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4):92-97.
- [70] 陈志强. 敏感性设备受电压暂降影响分析[D]. 高雄:国立中山大学,2005.
CHEN Zhiqiang. Effect of voltage sag on sensitive equipment[D]. Kaohsiung:National Sun Yat-sen University, 2005.
- [71] 赵剑锋,王浔,潘诗锋. 用电设备电能质量敏感度测试系统研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(22):35-40.
ZHAO Jianfeng, WANG Xun, PAN Shifeng. Study on power quality susceptibility testing system of AC contactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22):35-40.
- [72] 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.
OUYANG Sen, LI Xiang, LIU Ping, et al. Experimental research on sensitive characteristic to voltage sag for electronic circuit of low-voltage release[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2):211-218.
- [73] 刘平,欧阳森. 低压脱扣器电压暂降试验分析及配置策略研究[J]. 电工电能新技术,2016,35(1):74-80.
LIU Ping, OUYANG Sen. Experiment analysis on low-voltage release under voltage sags and its configuration strategy research[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(1):74-80.
- [74] 欧阳森,刘平,吴彤彤,等. 低压脱扣器电压暂降敏感性试验研究[J]. 电网技术,2015,39(2):575-581.
OUYANG Sen, LIU Ping, WU Tongtong, et al. Experimental research on sensitivity of low voltage releaser to voltage sag[J]. Power System Technology, 2015, 39(2):575-581.
- [75] 欧阳森,刘平,李翔. 基于大规模实验的低压脱扣器电压暂降脱扣特性研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2015,43(4):85-94.
OUYANG Sen, LIU Ping, LI Xiang. Investigation into tripping characteristics of low-voltage release under voltage sag based on large-scale experimental[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(4):85-94.
- [76] 欧阳森,刘平,梁伟斌,等. 低压脱扣器电压暂降敏感度三维模型[J]. 电力系统自动化,2015,39(22):157-163.
OUYANG Sen, LIU Ping, LIANG Weibin, et al. A three-dimensional model for sensitivity of low-voltage releases to voltage sags[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22):157-163.
- [77] OUYANG Sen, LIU Liyuan. Test and analysis on sensitivity

- of low-voltage releases to voltage sags[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(16): 2664-2671.
- [78] 吴彤彤. 基于双DSP的电压暂降发生器的设计与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- WU Tongtong. Design and application of the voltage sag generator based on double DSP[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [79] 史帅彬, 吴彤彤, 黄力鹏, 等. 电压暂降对高压钠灯的影响分析[J]. 智能电网, 2014, 34(8): 31-35.
- SHI Shuai bin, WU Tongtong, HUANG Lipeng, et al. Influence of voltage sag upon the high pressure sodium lamp[J]. Smart Grid, 2014, 34(8): 31-35.
- [80] 于希娟, 李洪涛, 赵贺. 照明灯具对电压暂降敏感性研究[J]. 大功率交流技术, 2011, 22(4): 22-25.
- YU Xijuan, LI Hongtao, ZHAO He. Research on the impacts of voltage sag to lighting fixture[J]. High Power Converter Technology, 2011, 22(4): 22-25.
- [81] 李倩, 程良伦, 马智远. 照明灯具电压暂降容忍度机理建模及试验分析[J]. 电器与能效管理技术, 2016(20): 53-57.
- LI Qing, CHENG Lianglun, MA Zhiyuan. Theory modeling and experimental analysis of lighting lamps voltage sag tolerance[J]. Dianqi Yu Nengxiao Guanli Jishu, 2016(20): 53-57.
- [82] UDDIN S, SHAREE H, MOHAMED A. Power quality performance of energy-efficient low-wattage LED lamps[J]. Measurement, 2013, 46(10): 3783-3795.
- [83] MEDORA N K, KUSKO A, THOMPSON M. Impact of line voltage sag on switch mode power supply operation[C] // 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Singapore: IEEE, 2008: 2178-2183.
- [84] AKOLKAR S M, KUSHARE B E. Effect of point on wave angle on sensitivity of AC coil contactor and SMPS to voltage sags[C] // 2010 Conference Proceedings of IPEC. Singapore: IEEE, 2008: 957-961.
- [85] 莫文雄, 许中, 陈伟坤, 等. 自动扶梯电压暂降抗扰特性测试[J]. 供用电, 2018, 35(2): 18-23.
- MO Wenxiong, XU Zhong, CHEN Weikun, et al. Voltage sag anti-disturbance characteristic for escalator[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(2): 18-23.
- [86] 汪颖, 任杰, 许中, 等. 光伏逆变器电压暂降耐受能力刻画与测试[J]. 中国测试, 2018, 44(1): 95-100.
- WANG Ying, REN Jie, XU Zhong, et al. Characterization and test of PV inverter for voltage sag tolerance[J]. China Measurement & Testing Technology, 2018, 44(1): 95-100.
- [87] 吴亚盆, 刘颖英, 徐永海. 可编程控制器对电压暂降敏感度的试验研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1422-1430.
- WU Yapen, LIU Yingying, XU Yonghai. Experimental research on PLCs sensitivity during voltage sags[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1422-1430.
- [88] WSLDEMARIAM L E, GARTNER H J, CUK V, et al. Experimental investigation on the sensitivity of an industrial process to voltage dips[C] // 2015 IEEE PowerTech Eindhoven. Eindhoven, Holland: IEEE, 2015: 1982-1988.
- [89] 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 sags[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 136-142.

作者简介:



汪颖

汪颖(1981—),女,重庆人,副教授,博士,主要研究方向为电能质量与优质供电(E-mail: 20312028@qq.com);

周杨(1994—),女,四川内江人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量与优质供电(E-mail: 2680800235@qq.com);

莫文雄(1971—),男,广东广州人,高级工程师,博士,主要研究方向为电能质量分析与控制;

许中(1986—),男,安徽舒城人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电能质量分析与控制;

肖先勇(1968—),男,四川宜宾人,教授,博士,通信作者,研究方向为电能质量与优质供电(E-mail: xiaoxianyong@163.com)。

(编辑 任思思)

Technical analysis and recommendation of test specification for equipment voltage sag tolerance test

WANG Ying¹, ZHOU Yang¹, MO Wenxiong², XU Zhong², XIAO Xianyong¹

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

2. Guangzhou Power Supply Bureau Power Test Research Institute, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Equipment voltage sag tolerance test is the basis of studying, understanding and solving the problem of voltage sag. The related standards of equipment voltage sag tolerance test at home and abroad are systematically analyzed. Combining with the present situation of the tests, the unsolved problems in the standards are pointed out. The research achievements and unsolved problems in the field of equipment voltage sag tolerance test are analyzed from the aspects of current literature statistics, existing research teams, equipment test achievements, tolerance of industrial process, mechanism of equipment response to voltage sag and so on. A set of general test specifications is proposed including test conditions, test criteria, test platforms, test methods and test procedures. The development trend of equipment voltage sag tolerance test is analyzed, and the unsolved problems worthy of study are pointed out.

Key words: power quality; voltage sag; tolerance; test technology; industry process; equipment

附录 A

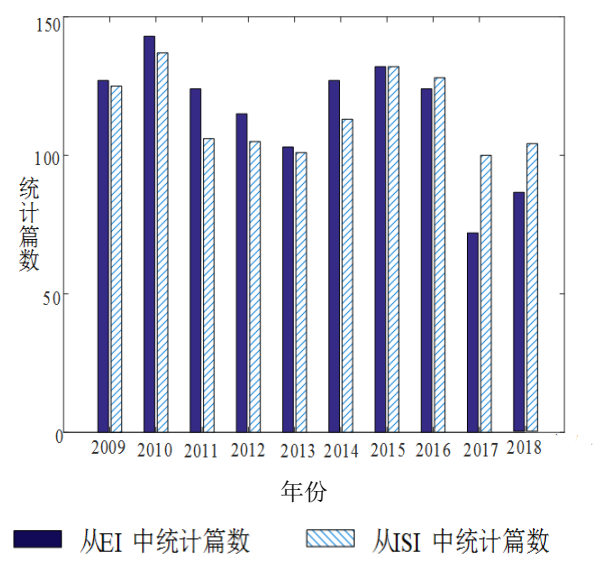


图 A1 从 EI Engineering Village、ISI Web of Knowledge 中检索到的文献数量

Fig.A1 Quantity of correlative paper indexed by EI Engineering Village and ISI Web of Knowledge

附录 B

表 B1 ACC 耐受能力部分文献测试成果汇总
TableB1 Summary of partial tolerance test results of ACC

参考文献	ACC 额定电压/V	耐受幅值/%		持续时间/ms	
		90° 起始点	0° 起始点	90° 起始点	0° 起始点
[1]		50	—	20	—
[2, 3]	120	43	62	12	30
[4]	220	54	59	10	30
[5]	—	45	50	40	130
[6]	24	65	72	8	80
	240	50	50	10	70
[7]	240	40	30	40	90
	240	20	—	20	200
[8]	240	55	65	10	80
	240	47	63	10	80
	240	47	—	10	160
	240	55	57	10	80

表 B2 PC 耐受能力部分文献测试成果汇总
TableB2 Summary of partial tolerance test results of PC

文献	PC 型号			耐受幅值/%	持续时间/ms
	CPU	操作系统	RAM 容量		
[13]	Intel PIII	Windows98	64MByte	50	100
	Intel PVI	Windows2003	512MByte	50	200
	IP Duo core	Windows2007	1GB	40	500
	Celeron MMX P II	Windows98	132 MByte	46	380
[14]	Intel P II	Windows2000	64 MByte	55	100
	Intel PIII	Windows2000	128 MByte	55	120
	Intel PIV	Windows2000	256 MByte	62	45
[62]	Pentium (R) 42	Windows2003	256 MByte	41	135

表 B3 测试典型设备电压暂降耐受能力的相关文献成果汇总
TableB3 Summary of relevant literature results of testing voltage endurance capability of typical devices

测试对象	参考文献	幅值	持续时间	波形起始点	相位跳变	备注
ASD	[16]	√	√	√	√	ASD 所带电机的转矩、转速、负载水平会影响其耐受能力
	[58]	√	√	√	√	
开关电源	[65]	√	√	√	√	所带负载容量会影响其耐受能力
	[84]	√	√	√	—	
PLC	[87]	√	√	√	—	PLC 内部的 I/O 模块比整个 PLC 系统弱耐受能力弱
低压脱扣器	[72]	√	√	√	—	波形起始点对耐受能力影响明显
	[77]	√	√	√	—	
电梯	[88]	√	√	√	—	上行工况耐受能力比下行弱
接地故障继电器	[58]	√	√	***	—	工作温度等工况不会影响其耐受能力
光伏逆变器	[89]	√	√	√	—	光照、温度会影响耐受能力
金属卤化灯	[80]	√	√	√	√	灯具的电压暂降耐受能力由电源特性（幅值、持续时间）和负载特性（灯具结构等）共同决定
LED 灯	[82]	√	√	√	√	

注：“—”表示未测试；“***”表示已测试，无影响；“√”表示已测试，有影响。