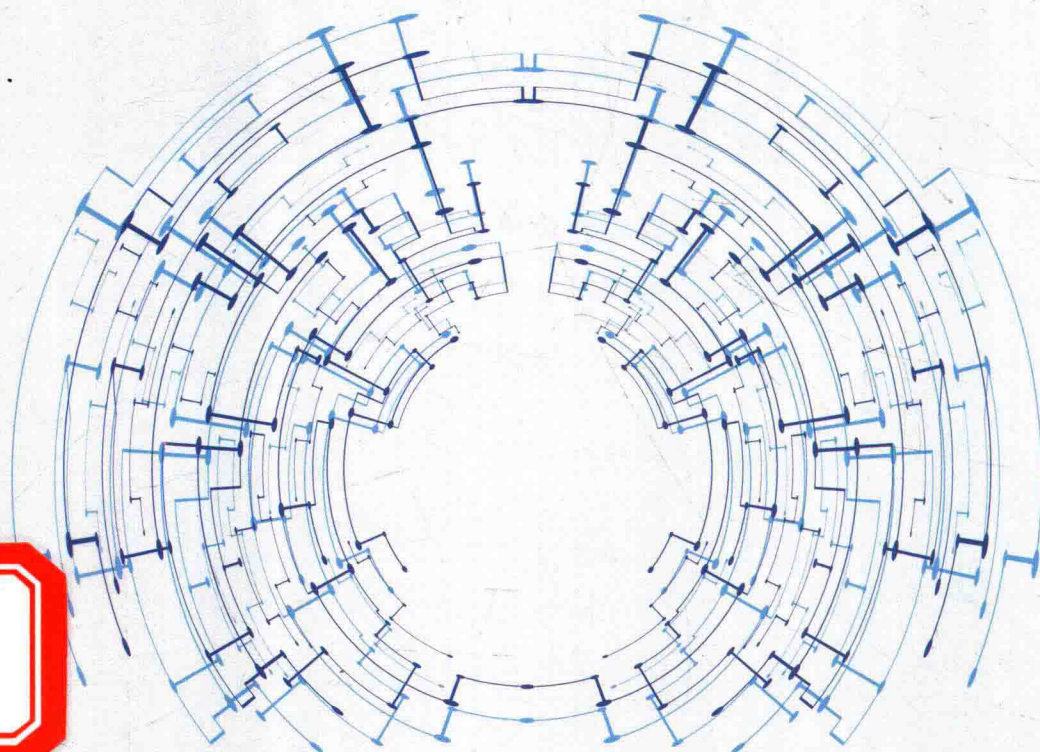


电压暂降导致的 电动机动态过程

李希年 著



科学出版社

电压暂降导致的 电动机动态过程

李希年 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在介绍电能质量定义与标准的基础上,系统介绍电压暂降经变压器的传递规律、电压暂降导致的电动机动态过程、电压暂降的检测和锁相环四部分内容,每一部分均自成体系。具体包括电压暂降经变压器的传递规律、电压短时中断后电动机的最大低电压穿越能力、电压暂降导致的电动机动态过程、基于同步坐标变换的电压暂降检测、基于瞬时对称分量法的电压暂降检测和电网电压锁相技术。

本书可作为从事电能质量分析与控制、新能源并网发电等研究与应用的工程技术人员的参考用书,也可作为高等学校电力系统自动化及相关专业研究生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电压暂降导致的电动机动态过程/李希年著. —北京:科学出版社, 2017
ISBN 978-7-03-055745-2

I. ①电… II. ①李… III. ①电压稳定—研究 IV. ①TM712.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 294191 号

责任编辑:赵丽欣 常晓敏 / 责任校对:马英菊
责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方人华平面设计部

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017 年 12 月第一次印刷 印张: 9 1/2

字数: 192 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈中科〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62134021

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

随着国民经济的发展,我国电力行业发展迅猛,装机容量、发电量持续增长,电网规模不断扩大。但我国能源和电力负荷分布不均衡,构建智能坚强互联电网、实施西电东送是必然选择。与此同时,现代工业的高自动化和复杂工艺对电能质量提出更高的要求,其中电压暂降和短时中断是电能质量的重要指标,两者占到全部工业电能质量问题的92%以上。电力系统任一处发生的电压暂降和短时中断均会沿输配电网传播,影响范围大,易造成电动机的发热甚至绝缘损害和工业连续生产过程的中断。因此,分析电压暂降与短时中断在电力系统中的传播规律,研究其对电动机运行过程的影响,以及电量的实时检测方法是十分有必要的。

本书分为四部分,每一部分均自成体系且紧密相关。第1章和第2章介绍电能质量的定义、分类与标准;应用对称分量法分析不对称电压暂降经YNyn0、Yy0与Yd11等7种标准连接组别变压器后的变化,并给出B型电压暂降经两级降压变压器传递后的实例计算。第3章和第4章介绍电压短时中断后电动机的最大低电压穿越能力,给出了电动机转差率与临界时间的计算方法;推导三相不对称电压暂降时电动机转差率的解析式。第5章和第6章为电压暂降的检测,介绍基于方程解的单相电压暂降的检测、基于同步坐标变换的三相不对称电压暂降的检测;为减小检测时间,将瞬时对称分量法引入电压暂降的检测中,实现基于 $\alpha\beta$ 静止坐标系改进瞬时对称分量变换的电压暂降检测;重点介绍复域瞬时对称分量法,并应用复域 abc/dq 变换和复域 $120/dq$ 变换两种方法实现了电压暂降的检测。第7章介绍锁相环,包括基于正交信号构造的单相锁相环和基于广义旋转角的三相锁相环等内容。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目(项目编号:61472227、61672327)、山东省高等学校科技计划项目(项目编号:J15LN10)、烟台市科技计划项目(项目编号:2016ZH055)等的资助。山东大学高峰教授,山东工商学院朱智林教授、华臻教授、刘成印教授、庞清乐教授对本书的出版给予了大力帮助和支持,在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2017年12月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 电能质量的定义	1
1.1.2 电能质量的分类	2
1.1.3 电能质量标准	3
1.2 电压暂降与短时中断	6
1.2.1 电压暂降	6
1.2.2 电压短时中断	9
1.2.3 电压暂降对电动机的影响	10
1.3 本书主要章节安排	13
第2章 电压暂降概论	15
2.1 三相不对称电压暂降	15
2.1.1 电压暂降的类型	15
2.1.2 电压暂降的特征量	16
2.2 电压暂降经变压器的传递规律	19
2.2.1 YNyn0 型变压器	19
2.2.2 Yyn0 型变压器	20
2.2.3 Yd11 型变压器	22
2.2.4 电压暂降经变压器的传递规律	26
2.3 本章小结	32
第3章 电压短时中断后电动机的最大低电压穿越能力	34
3.1 电压暂降变为短时中断	34
3.2 电压短时中断后电动机的动态过程	35
3.2.1 临界转差率	35
3.2.2 一阶机电模型	38
3.3 仿真验证与误差分析	39
3.3.1 仿真验证	39
3.3.2 误差分析	42
3.4 解析式的应用	43
3.5 本章小结	45

第4章 电压暂降导致的电动机动态过程	46
4.1 临界电压	46
4.1.1 利用阻抗参数计算	46
4.1.2 利用铭牌参数计算	49
4.2 电压暂降时电动机转差率的变化	52
4.2.1 转差率解析式的推导	53
4.2.2 实例应用	54
4.3 电压暂降时电动机输出参数的变化	57
4.3.1 原理分析	57
4.3.2 实例应用	59
4.4 本章小结	64
第5章 基于同步坐标变换的电压暂降检测	66
5.1 电压暂降的检测方法	66
5.1.1 时域检测法	66
5.1.2 时频域检测法	69
5.1.3 智能检测法	70
5.1.4 其他检测法	71
5.2 基于方程解的单相电压暂降检测	72
5.2.1 单相电压暂降的二元一次方程组	72
5.2.2 仿真与实验验证	74
5.3 基于同步坐标变换的电压暂降检测	76
5.3.1 坐标变换原理	76
5.3.2 单相电压暂降的检测	81
5.3.3 三相不对称电压暂降的检测	86
5.4 本章小结	91
第6章 基于瞬时对称分量法的电压暂降检测	92
6.1 瞬时对称分量法简介	92
6.1.1 传统对称分量法	92
6.1.2 瞬时对称分量法	92
6.2 基于瞬时对称分量法的电压暂降检测	93
6.3 基于复域瞬时对称分量法的电压暂降检测	97
6.3.1 复域瞬时对称分量法	97
6.3.2 单相电压暂降的检测	101
6.3.3 三相不对称电压暂降的检测	103
6.4 分布式电压暂降监测系统设计	111

6.4.1 系统整体结构	111
6.4.2 系统软件组成	112
6.5 本章小结	113
第 7 章 电网电压锁相技术	114
7.1 概述	114
7.2 单相锁相环	115
7.2.1 SRF-PLL 原理	115
7.2.2 基于 SOGI 的单相锁相环	116
7.2.3 基于 MAF 的单相锁相环	118
7.3 基于广义旋转角的三相锁相环	121
7.3.1 广义旋转角	122
7.3.2 GDSC 提取基波电压正序分量	123
7.3.3 仿真与实验验证	124
7.4 本章小结	128
参考文献	129

第 1 章 绪 论

现代电力系统的规模不断扩大,其运行管理的网络化与自动化水平不断提高,而整流器等非线性设备的应用极大地恶化了系统的电能质量。同时,以计算机、可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)为代表的信息技术和以变频器为代表的电力电子技术极大地促进了现代工业的高度和自动化水平,也对电能质量提出更高的要求。

本章主要介绍电能质量的定义、分类与相关标准,综述电压暂降与短时中断的定义、危害及其对电动机的影响,最后简要介绍本书的主要内容。

1.1 引 言

下面分别介绍电能质量的定义、分类与标准。

1.1.1 电能质量的定义

电能作为一种清洁能源,是由供电部门向电力用户提供并由发电、供电和用电三方共同保证质量的一种特殊商品,在推动社会进步、促进科技发展和提高人民生活水平方面发挥着重要作用。

从普遍意义上讲,电能质量是指优质供电,包括电压质量、电流质量、供电质量和用电质量;从狭义角度讲,电能质量是指供电的电压质量,主要包括电压的幅值、频率与三相不平衡等稳态指标。以往供电可靠性是衡量电力系统的主要指标,供电企业普遍认为,保证了电网的供电可靠性就保证了电网的电能质量。这是由于以往企业的自动化程度低,设备间关联性小,而且设备对电能质量干扰尤其是暂态干扰不够敏感。电压中断是影响企业正常生产的最主要的电能质量问题,但其发生的频次少。即使电能质量干扰影响部分设备的正常运行,也不会造成整个生产工艺流程的中断,电能质量问题造成的经济损失相对较小。因此,电能质量没有引起足够的重视。

自 20 世纪 80 年代以来,随着计算机技术、通信技术与电力电子技术等的发展,电力系统的规模、网络化与自动化水平不断提高,系统中的冲击性负荷、不平衡负荷与电力电子装置等设备极大地恶化了系统的电能质量。与此同时,以 PLC 为代表的智能化设备在工业中得到广泛应用,极大地促进了现代工业的自动化水平,但它们对电能质量扰动极为敏感。电能质量扰动会影响其正常

运行，甚至导致工业连续生产过程的中断，从而造成巨大的经济损失^[1]。例如，电压暂降使民航西南空管局下属的某一导航雷达站异常，造成某航班偏离航向；谐波与负序电流造成某 220kV 变电站继电保护误动作，导致襄渝铁路累计停运 167min^[2]。

据调查，电能质量问题导致欧洲联盟（简称欧盟）每年工业损失高达 1500 亿欧元^[3]、美国每年经济损失达 2000 亿美元^[4]。我国每年由电能质量问题造成的经济损失约占国内生产总值（gross domestic product, GDP）的 5%^[5]。因此，提高电能质量对促进我国经济和社会的可持续发展、提高人民的生活质量均具有重要意义。

电能质量问题的研究主要是由电力用户的生产需求驱动的，因此，导致用户设备不能正常工作、造成设备故障或误动作的任何电力问题都是电能质量问题。文献[6]将电能质量定义为导致用电设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率的偏差，包括频率偏差、电压偏差、电压波动与闪变、三相不平衡、暂时或瞬时过电压、波形畸变、电压暂降与短时间中断及供电连续性等。

电气和电子工程师协会（Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE）将合格的电能质量（power quality）定义为给敏感设备提供的电力和设置的接地系统均是适合该设备正常工作的^[7]。国际电工委员会（International Electrotechnical Commission, IEC）采用电磁兼容（electromagnetic compatibility, EMC）的概念描述电能质量，将其定义为供电装置正常工作情况下不会中断和干扰用户使用电能的物理特性；强调设备之间及设备与电源之间的相互作用和影响^[8]；采用排放（emission）反映电流质量问题，表示由设备产生的电磁污染；采用抗扰（immunity）反映电压质量问题，表示设备对电磁污染的抵抗能力。

1.1.2 电能质量的分类

为了更加系统地分析和研究电能质量问题，对电能质量干扰进行检测和分类，从中找出引起电能质量问题的具体原因并采取有针对性的措施，将电能质量分类并给出相应的定义是很重要的。

电能质量问题可以从不同的角度来分类。其中，IEC 以电磁现象及相互干扰的途径和频率特性为基础，引出广义电磁扰动的基本现象分类^[9]，如表 1.1 所示。

表 1.1 IEC 关于电磁扰动的基本现象分类

现象	分类	现象	分类
传导型低频现象	谐波、间谐波	辐射型低频现象	工频电磁场
	信号系统（电力线载波）	辐射型高频现象	磁场
	电压波动		电场
	电压暂降与中断		电磁场
	电压不平衡		连续波
	工频变化		瞬变

续表

现象	分类	现象	分类
传导型低频现象	感应低频电压	静电放电现象	—
	交流电网中的直流成分	核电磁脉冲	—
传导型高频现象	感应连续波电压或电流		
	单方向瞬变		
	振荡性瞬变		

从表 1.1 中可以看出，电能质量问题基本上为 EMC 中的传导低频现象。

IEEE 将电力系统中的各种电能质量问题分为七大类^[7]，如表 1.2 所示。

根据表 1.2，电力系统中的电能质量问题分为稳态与暂态两大类；其中，稳态电能质量问题包括电压波动、三相不平衡与波形畸变等；暂态电能质量问题主要包括电磁瞬态与短时电压扰动。

表 1.2 IEEE 给出的电力系统中电磁现象的种类与特征属性

电能质量扰动分类			典型频谱成分	典型持续时间	典型电压幅值
电磁瞬态	瞬态冲击	纳秒级	5ns 上升沿	<50ns	
		微秒级	1μs 上升沿	50ns~1ms	
		毫秒级	0.1ms 上升沿	>1ms	
	瞬态振荡	低频	<5kHz	0.3~50ms	0~4pu
		中频	5~50kHz	20μs	0~8pu
		高频	0.5~50MHz	5 μs	0~4pu
短时电压扰动	即时电压扰动	电压暂降		0.5~30T	0.1~0.9pu
		电压暂升		0.5~30T	1.1~1.8pu
	瞬时电压扰动	短时中断		30T~3s	<0.1pu
		电压暂降		30T~3s	0.1~0.9pu
		电压暂升		30T~3s	1.1~1.4pu
	暂时电压扰动	短时中断		3s~1min	<0.1pu
		电压暂降		3s~1min	0.1~0.9pu
		电压暂升		3s~1min	1.1~1.2pu
		长时电压扰动	持续中断		>1min
欠电压			>1min	0.8~0.9pu	
过电压			>1min	1.1~12pu	
三相不平衡	电压		稳态	0.5%~2%	
	电流		稳态	1%~3%	
波形畸变	直流分量		稳态	0~0.1%	
	谐波	0~9kHz	稳态	0~20%	
	间谐波	0~9kHz	稳态	0~2%	
	陷波		稳态		
	噪声	宽频带	稳态	0~1%	
电压波动			<25Hz	断续	0.1%~7%
频率偏移				<10s	±0.1Hz

1.1.3 电能质量标准

电能质量标准是保证电网安全经济运行、保护电气环境、保障电力用户正常使用电能的基本技术规范，是实施电能质量监督管理、推广电能质量控制技术、

维护供用电双方合法权益的依据^[6]。

电能质量问题造成的损失日益严重，发达国家也对此愈加重视，欧盟每年为治理电能质量问题的投入高达 130 亿欧元^[3]。为了规范管理和减小电能质量问题的影响，各国政府和国际组织相继制定并颁布了一系列电能质量标准。目前，国际上广泛采用的电能质量标准主要是 IEC 的 61000 系列标准和 IEEE 的 1159 系列标准等。IEC 61000-4-30^[10]规范了各类电能质量扰动的测量方法与误差要求，IEC 61000-4-11/34^[11,12]提出了关于电力电子设备对电压暂降抗扰度的测试方法，IEC 61000-4-29^[13]为关于直流电源输入端口电压暂降、短时中断和电压波动时的抗扰度试验与测量方法；IEEE Std 1159.1 提出了关于电能质量干扰的推荐测量方法，IEEE Std 1159.3 为电能质量数据的交换格式；IEEE Std 1250^[14]提出了提高电力系统电能质量的指导方法；IEEE P1668 规范了低压电气设备抗电压暂降与短时中断的能力及其测试方法^[15]。各行业协会也针对电能质量问题做了大量的研究工作，如美国信息技术工业协会（Information Technology Industry Council, ITIC）的 ITIC 曲线^[16]根据大型计算机的试验数据定义了计算机应能承受的电压暂升/暂降程度与持续时间的关系；国际半导体设备材料产业协会（Semiconductor Equipment and Materials International, SEMI）的 SEMI F47^[17]提出了设备必须能够承受的不同程度的电压暂降与持续时间。

1. 从供电方考虑

为了便于衡量电力系统的可靠性，IEEE 提出了一系列关于供电可靠性的指标，如 IEEE Std 1366^[18]为关于配电系统供电可靠性的指标。通常，采用表格的形式来分析电力系统节点处的电压暂降情况，如 UNIPED 表格^[19]、NRS 048-2^[20]表等。

电网的供电结构影响电压暂降的次数、大小与持续时间等，因此，各企业所经历的电压暂降情况不同。表 1.3 提供了一个统计分析电压暂降特性的统一形式，强调用户设备对发生频次高、持续时间短的电压暂降的抗扰性。电力公司需要优化电力系统的继电保护设置以减少 T 区和 Z2 区的电压暂降次数；而用户需要确定设备能承受电压暂降的程度并采取相应措施，以减小电网电压暂降给企业生产造成的影响。但表 1.3 没有提供电压暂降时相角跳变的信息。

表 1.3 南非电网电压暂降分析表格

1	2	3	4	5
跌落电压 $\Delta U/\%$	残余电压 $U/\%$	持续时间/s		
		$0.02 < t \leq 0.15$	$0.15 < t \leq 0.6$	$0.6 < t \leq 3$
$10 < \Delta U \leq 15$	$90 > U \geq 85$	Y		
$15 < \Delta U \leq 20$	$85 > U \geq 80$			
$20 < \Delta U \leq 30$	$80 > U \geq 70$	S		Z1
$30 < \Delta U \leq 40$	$70 > U \geq 60$			X1
$40 < \Delta U \leq 60$	$60 > U \geq 40$			X2
$60 < \Delta U \leq 100$	$40 > U \geq 0$	T		

我国对电能质量问题日益重视，先后颁布了一系列电能质量标准^[21-29]，其中，《电能质量 电压暂降与短时中断》已正式颁布，并于 2014 年 5 月 10 日实施。电能质量标准汇总如表 1.4 所示。

表 1.4 电能质量标准汇总

标准编号	标准名称
GB/T 156—2007	《标准电压》
GB/T 12325—2008	《电能质量 供电电压偏差》
GB/T 15543—2008	《电能质量 三相电压不平衡》
GB/T 15945—2008	《电能质量 电力系统频率偏差》
GB/T 12326—2008	《电能质量 电压波动和闪变》
GB/T 14549—1993	《电能质量 公用电网谐波》
GB/T 24337—2009	《电能质量 公用电网间谐波》
GB/T 18481—2001	《电能质量 暂时过电压和瞬变过电压》
GB/T 30137—2013	《电能质量 电压暂降与短时中断》

2. 从用户方考虑

基于行业特点，各协会制定了适用于本行业电气设备的相关电能质量标准，如 SEMI F47 与 ITIC 曲线。

半导体制造工艺复杂，对电能质量要求高，SEMI F47 为 SEMI 制定的半导体行业的设备应具有的抗电压暂降能力的通用标准，规定了设备保持正常运行的电压暂降与持续时间。ITIC 曲线为 ITIC 为防止电压暂升/暂降等短时扰动影响计算机的稳定运行而制定的计算机类设备所应具备的对电压短时波动的抗扰能力曲线，最初只适用于额定电压 120V、频率 60Hz 的计算机设备，现已成为设备抗电压暂降的通用量化指标，以及电力公司与工业用户签订电能质量合同的参考依据。但文献[30]指出，实际额定电压 230V 设备的抗电压暂降能力要远大于 ITIC 曲线要求的能力，大部分 230V 设备在 ITIC 曲线下方仍然可以正常工作。因此，直接将 ITIC 曲线应用于其他电压等级的设备会导致错误。

图 1.1 所示为 SEMI F47 与 ITIC 曲线。可以看出，SEMI F47 曲线对设备抗电压暂降的要求要高于 ITIC 曲线。前者要求设备能承受的最小电压暂降为 0.5pu、持续时间 0.05s；后者为 0.7pu，持续时间 0.02s。但当电压 $\geq 0.9pu$ 时，两者均要求设备保持正常稳定运行，不受电压轻微暂降的影响。

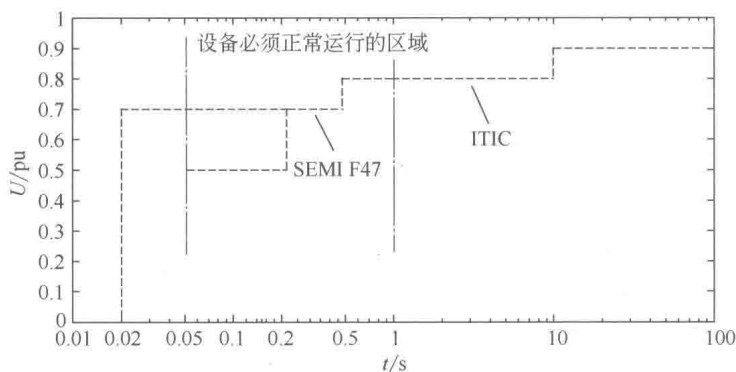


图 1.1 SEMI F47 与 ITIC 曲线

1.2 电压暂降与短时中断

自 20 世纪 70~80 年代以来,随着计算机、PLC 与变频器等对电压敏感设备的应用,电压暂降和短时中断对工业连续生产过程的影响日益严重。目前,两者占到工业用户电能质量问题的 92%^[31],每年给美国造成 1040 亿~1640 亿美元的经济损失^[32]。

1.2.1 电压暂降

1. 定义

电压暂降是指电力系统中某点工频电压方均根值暂时降低至 0.01~0.9pu,并在短暂持续 0.5T~1min 后恢复正常的现象^[4];根据持续时间的不同,可划分为 0.5~30T、30T~3s 与 3s~1min 三个阶段,其中大部分电压暂降的持续时间在 0.5~30T 范围内。美国电力研究协会(Electric Power Research Institute, EPRI) 2000 年的电能质量监测数据表明,92%的用户电能质量问题是由持续时间 20ms~2s 的电压暂降引起的。

电压跌落至 0.7~0.9pu、持续 3~30T 的电压暂降是电力系统的主要扰动形式,也是导致工业连续生产过程中中断的主要原因^[33]。

对于工业用户而言,外部电网输电线路中的单相接地故障是造成电压暂降的主要原因,而雷击又是导致输电线路单相接地故障的最常见原因,但由此导致的用户终端的电压暂降不会低于 0.33pu^[34]。

调查显示,在所有配电系统故障中,电压暂降占到了 70%~80%;在输电系统故障中,电压暂降的比例超过了 96%。目前,在欧美各国,电压暂降引起的用户投诉占全部电能质量问题投诉的 80%以上,而谐波、三相不平衡与电压中断等

其他电能质量问题投诉不到 20%^[35]。对于工业用户而言,电压暂降的危害要小于电压中断,但由于其发生的频率要远大于电压中断,电压暂降总的危害要大于电压中断^[36]。因此,电压暂降被看作最严重的工业电能质量问题。

调查显示,在半导体企业聚集的中国台湾新竹科学园区,电压暂降每次给企业造成 10 万~100 万美元的经济损失^[31]。对于现代化的石油化工等连续性生产企业,电压暂降轻者造成电动机与变频器等敏感电气设备的跳闸、导致连续生产过程的中断,重者导致毒气泄漏、爆炸等严重的环保甚至伤亡事故。

电压暂降不可避免,为了减小电压暂降的影响,可采用不间断电源(uninterruptible power system, UPS)与动态电压恢复器(dynamic voltage storer, DVR)等措施。法国电力公司通过减少中压电网的馈线长度、增加地下电缆的铺设,使电力系统中的暂态故障减少了 50%^[34]。为了减少故障,中国台湾新竹科学园区所有新建变电所的 161kV 架空线均改为地下电缆^[31]。此外,由于采用昂贵的点对点通信,输电系统中的故障清除时间要远小于配电系统中的故障清除时间,因此,对电压暂降极为敏感的重要用户也可选择从输电系统直接接入电网^[37]。

2. 特点

电压暂降具有持续时间短、影响范围广的特点,且具有明显的季节性,主要发生于雷雨季节。

SEMI 对世界范围内半导体企业所经历电压暂降情况的统计表明,大部分电压暂降的持续时间小于 200ms,幅值为 0.5~0.9pu^[38];日本的电能质量监测中 80% 以上的电压暂降持续时间小于 200ms^[34];澳大利亚 2011~2012 年 1089 个电压暂降的监测数据中 67% 的电压暂降幅值大于等于 0.6pu,其中 43% 的电压暂降幅值在 0.8~0.9pu 范围内^[30]。

表 1.5 和表 1.6 为山东兖矿集团某煤化工公司 2012 年与 2013 年所经历的外部电网故障情况。据统计,一次严重的电压暂降导致该企业的连续生产中断两天以上,直接经济损失高达 500 万元人民币。

表 1.5 2012 年外部电网故障统计

日期	时间	电压幅值/pu			持续时间/ms
		U_a	U_b	U_c	
7 月 7 日	15:06:01:850	0.82	0.94	0.94	220
7 月 12 日	19:57:43:165	0.88	0.88	0.88	180
8 月 18 日	22:39:19:069	0.94	0.72	0.94	140
	23:33:37:253	0.88	0.72	0.88	140
	23:58:10:012	0.77	0.88	0.88	140
10 月 8 日	17:11:46:904	0.88	0.77	0.77	120

表 1.6 2013 年外部电网故障统计

日期	时间	电压幅值/pu			持续时间/ms
		U_a	U_b	U_c	
6 月 17 日	8:10:39:997	0.82	0.94	0.94	850
7 月 1 日	6:19:02:179	0.68	0.69	0.69	535
	12:19:05:748	0.92	0.92	1.0	555
	12:37:09:510	0.92	0.92	0.80	501
7 月 15 日	13:02:31:216	0.81	0.82	0.83	507
8 月 28 日	23:06:28:719	0.59	0.59	0.59	200

从表 1.5 和表 1.6 可以看出，外部电网故障主要发生于 7~8 月的雷雨季节，故障类型全部为电压暂降，且主要为三相不对称电压暂降，持续时间小于 1s，电压幅值在 0.5~0.9pu 范围内。

输电线路上的电压暂降会影响数百千米外电压敏感设备的正常运行^[39]。2002 年 11 月 4 日美国威斯康星州丰迪拉克郡一架飞机撞上了 345kV 输电线路，导致 50km 外的配电系统发生电压暂降，且此配电系统安装的 25 个故障录波器中有 5 个检测到了明显的电压暂降，其部分故障记录^[40]如表 1.7 所示。

表 1.7 故障录波数据

录波器号	故障时间	故障类型	持续周期/ $T=0.02s$	电压幅值/V	暂降程序
1	2002/11/4 17:35:31	电压暂降	5.8	101.3	84%
2	2002/11/4 17:35:32	电压暂降	2.4	417.6	87%
3	2002/11/4 17:35:32	电压暂降	2.4	98.9	82%
2	2002/11/4 17:35:32	电压暂降	2.5	395.4	82%
4	2002/11/4 17:35:32	电压暂降	1	104.4	87%
5	2002/11/4 17:35:32	电压暂降	6.7	99.3	83%
1	2002/11/4 17:35:32	电压暂降	1.1	104.9	87%
3	2002/11/4 17:35:32	电压暂降	4.1	96.3	80%

表 1.7 说明，电压暂降的影响范围广，输电系统中的电压暂降会沿输电线路传递到配电系统，并最终传递到终端企业用户，影响敏感设备的正常运行。

3. 评价指标

IEEE 采用电压暂降严重度 S_e 和电压暂降能量 E 两个指标对单次电压暂降事件进行定量描述^[19]。

电压暂降严重度 S_e 为

$$S_e = \frac{1-U}{1-U_{\text{ref}}(t)} \quad (1.1)$$

式中, U 为故障后的电压(故障后残余电压的最低有效值与额定电压的比值); t 为电压暂降的持续时间(s), 即电压值低于设定阈值的时间; $U_{\text{ref}}(t)$ 为参考曲线(如 SEMI F47)在该持续时间内的对应电压。

S_e 表征电压暂降的实际影响程度。具有较长持续时间和较小暂降程度的电压暂降的严重度指标较大^[41]。

电压暂降能量 E 为

$$E = \int_0^T \left(1 - \frac{U(t)}{U_{\text{nom}}} \right) dt \times 100 \quad (1.2)$$

式中, $U(t)$ 为故障时的电压暂降幅值; U_{nom} 为额定电压的幅值。

假定负载在额定电压 U_{nom} 时的有功功率为 P_0 , 当电压暂降至 U 时, 负载减少的有功功率为

$$\Delta P = P_0 \left[1 - \left(\frac{U}{U_{\text{nom}}} \right)^2 \right] \quad (1.3)$$

由式(1.2)和式(1.3)可得

$$\Delta E = \int_0^T \Delta P dt = P_0 \int_0^T \left[1 - \left(\frac{U(t)}{U_{\text{nom}}} \right)^2 \right] dt \quad (1.4)$$

式(1.4)说明, 能量指标 E 与电压暂降时电力系统没有向负载输送的能量成正比; 节点与系统的电压暂降指标可参考文献[18]和文献[42]。

1.2.2 电压短时中断

电压中断是指电力系统的电压或负载电流小于 0.1pu、持续时间不超过 1min 的波动过程。

电压短时中断是指电压有效值降低到接近或等于零。根据暂降程度与持续时间的不同, IEC 将短时中断定义为电压的突然中断且持续时间小于 1min 的波动过程, 并将其看作电压幅值为零的电压暂降^[8]; 而 IEEE 标准中, 电压短时中断是持续时间 0.5T~3s 的电压中断。

电力系统故障、设备故障与控制设备失效均会导致电压中断; 系统故障导致的电压中断的持续时间由故障与系统的继电保护设置决定, 而设备故障导致的电压中断的持续时间取决于设备故障的清除时间^[7]。

随着现代工业中敏感设备的广泛应用及电力系统电能质量的不断恶化, 电压短时中断等电能质量问题造成的经济损失日趋严重。加拿大于 20 世纪 80 年代开

展了电压中断导致的经济损失的调查^[43-45]，文献[46]～文献[53]比较分析了电压中断导致的化工、食品与机械制造等行业的经济损失情况，并给出不同行业的设备维修费、原材料损失费等相关费用占总经济损失的比重。表 1.8 比较了电压中断造成的经济损失。

表 1.8 电压中断造成的经济损失比较 （单位：美元/kW）

国家/地区	行业	时间	持续时间							
			2s	2min	20min	1h	2h	4h	8h	24h
尼泊尔 ^[47]	工业	1997 年	—	0.11	0.23	0.42	0.58	1.5	3	10.99
印度 ^[48]	商业	2002 年	—	—	0.41	—	—	—	2.28	—
加拿大 ^[49]	工业	1993 年	1.07	2.55	3.65	7.71	13.68	28.13	52.06	82.87
希腊 ^[50]	工业	1998 年	2.1	2.55	7.35	12	16.75	21.8	—	46.86
英国 ^[51]	工业	1996 年	14.49	15.24	33.62	59.5	—	170.1	283	354.3
中国台湾 ^[52]	IT	2001 年	37.03	55.15	60.9	87.6	118.1	167.1	242.4	425.2
韩国 ^[53]	医药	2006 年	80.3	120.7	—	120.7	—	299.4	405.6	430.5

表 1.8 说明，电压中断造成的经济损失相当严重，并且呈现上升趋势。单位时间内电压中断造成的经济损失与持续时间成反比，即持续时间越长，单位时间内的经济损失越小。以韩国医药行业为例，电压中断 2s 的平均经济损失为 40.15 美元/s，中断 2min 的平均损失为 2.01 美元/s，中断 1h 的平均损失为 0.063 美元/s。同时，发达国家（或地区）的经济损失要明显高于欠发达国家（或地区）的经济损失。这是由于发达国家（或地区）工业中的 PLC 等智能化设备应用广泛、自动化程度高且生产工艺复杂，对电压质量扰动更为敏感，某一单体设备的停机可能会造成整个连续生产过程的中断。

1.2.3 电压暂降对电动机的影响

本书中的电动机均指三相鼠笼式异步电动机，其结构简单，运行可靠，坚固耐用，在工农业生产中获得了广泛应用。电力系统故障、大功率电动机直接起动与变压器励磁等均会导致不同程度的电压暂降，本书主要研究了电力系统故障导致的电压暂降对三相鼠笼式异步电动机的影响。电压暂降对变压器等的影响可参考文献[54]和文献[55]，大功率电动机直接起动导致的电压暂降对敏感设备的影响可参考文献[56]。

根据美国能源部（United States Department of Energy, USDOE）的统计，工业电动机负载功率占到了电网总功率的 70%，典型工业 80% 的负载为交流电动机^[57]。