

华北电力大学（北京）

硕士学位论文

杏石口变电站供电系统电压暂降问题的研究

姓名：程宏

申请学位级别：硕士

专业：电气工程

指导教师：刘连光;祝秀山

20080101

摘 要

电力系统大量使用的晶闸管以及终端用户使用的基于计算机控制的精密设备对电压暂降十分敏感,使得电压暂降成为电力部门和用户所关注的重要电能质量问题。作为杏石口变电站的重要负荷——首钢日电电子有限公司,是一家半导体器件制造公司,对电能质量要求极高。本文介绍了电压暂降的基本概念,结合杏石口变电站发生的几次电压暂降事件,分析了电压暂降扰动的识别信息和扰动的原因,比较了电压暂降的几种分析计算方法,进行了电压暂降凹陷域的分析计算。最后,结合分析计算结果,提出了杏石变电站电压暂降问题的治理措施。

关键词: 电压暂降, 短时断电, 电磁暂态分析, 杏石变电站

ABSTRACT

With the wide application of modern power electronics equipments, more and more attention from both electrical engineers and customers are increasingly paid to the voltage sag as one of the power quality problems. As the most important load of Xing Shikou substation, Shougang NEC Electronics Co. (SGNEC), manufactures Semiconductor Devices, called for strict electric power quality. Based on some voltage sag accident happened on Xing Shikou substation and the basic concept of voltage sag, this paper presents the cause of the voltage sag and identifying information. Some calculating method of voltage sag are compared after calculating the characteristic value of voltage sags. Finally combined with the results some measures of suppressing probability of voltage sags in Xing Shikou substation are proposed.

Hong Cheng (Electric Power System and Automation)

Directed by prof. Lianguang Liu

senior engineer Xiushan Zhu

KEY WORDS: Voltage sag, short supply interruption, Electromagnetic transient analysis; Xing Shikou substation

摘 要

电力系统大量使用的晶闸管以及终端用户使用的基于计算机控制的精密设备对电压暂降十分敏感，使得电压暂降成为电力部门 and 用户所关注的重要电能质量问题。作为杏石口变电站的重要负荷——首钢日电电子有限公司，是一家半导体器件制造公司，对电能质量要求极高。本文介绍了电压暂降的基本概念，结合杏石口变电站发生的几次电压暂降事件，分析了电压暂降扰动的识别信息和扰动的原因，比较了电压暂降的几种分析计算方法，进行了电压暂降凹陷域的分析计算。最后，结合分析计算结果，提出了杏石变电站电压暂降问题的治理措施。

关键词：电压暂降，短时断电，电磁暂态分析，杏石变电站

ABSTRACT

With the wide application of modern power electronics equipments, more and more attention from both electrical engineers and customers are increasingly paid to the voltage sag as one of the power quality problems. As the most important load of Xing Shikou substation, Shougang NEC Electronics Co. (SGNEC), manufactures Semiconductor Devices, called for strict electric power quality. Based on some voltage sag accident happened on Xing Shikou substation and the basic concept of voltage sag, this paper presents the cause of the voltage sag and identifying information. Some calculating method of voltage sag are compared after calculating the characteristic value of voltage sags. Finally combined with the results some measures of suppressing probability of voltage sags in Xing Shikou substation are proposed.

Hong Cheng (Electric Power System and Automation)

Directed by prof. Lianguang Liu

senior engineer Xiushan Zhu

KEY WORDS: Voltage sag, short supply interruption, Electromagnetic transient analysis; Xing Shikou substation

声 明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《杏石口变电站供电系统电压暂降问题的研究》，是本人在华北电力大学攻读硕士学位期间，在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。据本人所知，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北电力大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：程宏 日期：2008.3

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解华北电力大学有关保留、使用学位论文的规定，即：①学校有权保留、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤同意学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(涉密的学位论文在解密后遵守此规定)

作者签名：程宏

导师签名：刘建奎

日期：2008.3

日期：2008.3.12

第一章 引言

1.1 课题研究背景

随着现代工业规模的扩大和科学技术的发展,国民经济各部门的用电量不断增加,电气化程度越来越高,新工艺、新技术广泛应用于工业生产和人民生活的各个方面,越来越多的用户采用了性能好、效率高但对电源特性变化敏感的高科技设备,电力用户对电能质量的要求不断提高,尤其是数字式自动控制技术在生产中得到大规模应用,基于计算机、微处理器的管理、分析、检测、控制的用电设备和各种电力电子设备在电力系统中也大量投入使用,它们比一般机电设备更加敏感,对供电质量的要求更苛刻,对配电系统可靠性提出更高的要求,从而使电压暂降问题引起了有关部门和研究人员的广泛关注。在电能质量的诸多原因中,由电压暂降引起的电能质量问题投诉数量占整个电能质量问题投诉数量的 80%以上,而由谐波、开关操作过电压等引起的电能质量问题投诉数量所占不到 20%。电压暂降与短时中断已上升为最重要的电能质量问题,成为信息社会对供电质量提出的新挑战^[1-2]。

电压暂降就是由短时电流增加,特别是远离电压暂降测量处的短时电流增加引起的短时电压均方根值的降低。导致电压暂降现象的过流原因一般是电机启动、变压器的投切等。电容器的投入和电力负荷的切除也会引起短时过流,但过流时间太短还不至于引起严重影响的电压均方根值的减少,一般不把这些事件称为电压暂降,而是称为电压缺陷或者电压瞬变。由短路和接地故障引起的电压暂降是引起设备故障的主要原因,所以近年来对电压暂降分析、研究的重点主要是在由这些短路和接地故障引起的电压暂降的研究上^[1]。

杏石口变电站位于石景山八大处路东杏石口村,占地面积为 3675 平方米。1994 年开始土建工程,1996 年进行电气设备安装,1997 年进行无人化改造工程,增加"四遥"功能。1998 年 5 月 29 日发电正式投入运行,并同时实现无人值班。杏石口 110kV 变电站下属于石景山供电公司,地理接线图如图 1-1 所示。上级电源为宝山 220kV 变电站和八里庄 220kV 变电站。两条 110kV 进路分别是田西一杏支线和田西二杏支线,主变容量为 2×50MVA。共有两条 35kV 出线和 19 条 10kV 出线。其中 35kV 出线为石调一线和石调二线,为该地区重要的负荷首钢日电电子有限公司供电。首钢日电电子有限公司(SGNEC)是由首钢总公司和 NEC 电子株式会社(NEC ELECTRONICS CORPORATION)合资兴建,是一家半导体集成电路制造和销售的

生产厂商,拥有半导体集成电路生产的完整生产线(包括晶圆制造和 IC 封装),主要产品品种有 MCU(微机控制单元)电路、遥控电路、显示驱动电路、通用 LIC 等。属于电子精密仪器生产厂家,对电能质量的要求较高,多次因供电质量问题造成严重的经济损失。

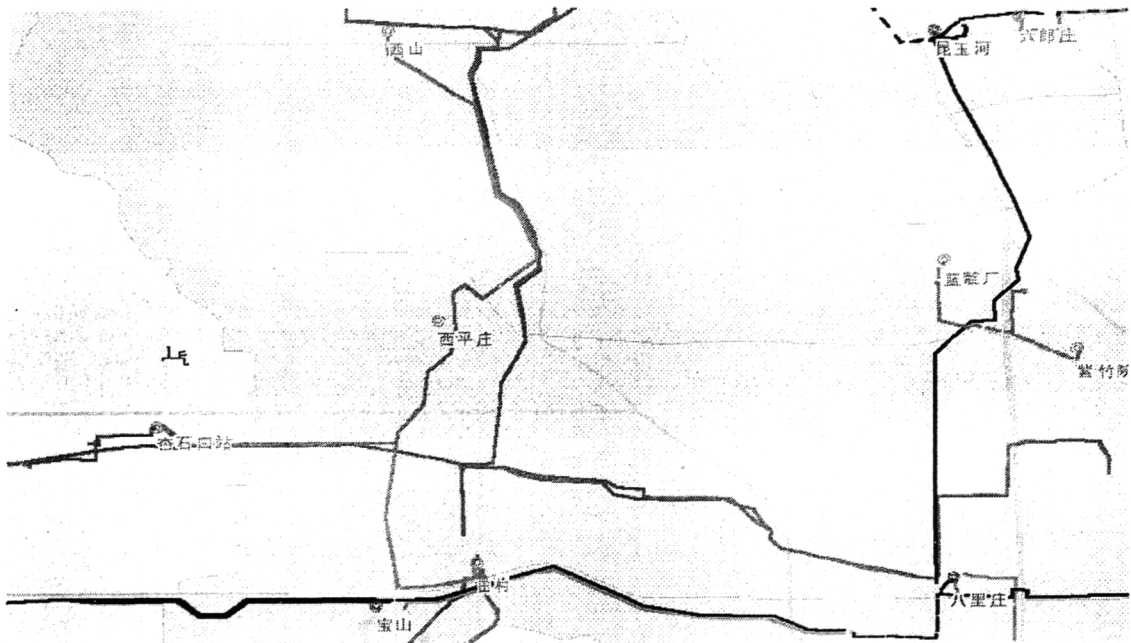


图 1-1 杏石口变电站地理接线图

2003 年 2 月 25 日,因小雨加雪的天气,3:00 分 10kV 八大处线路故障跳闸,3:11 分八大处线路未再次跳闸,造成两次电压降低,对首钢日电电子有限公司生产及设备造成很大损失。2004 年 5 月 15 日,20:59 分,石调一线发生故障致使首钢日电 53 台生产设备停机,造成重大损失。2004 年 6 月 7 日 17:28 分石调一线和石调二线同时发生故障,致使首钢日电再次遭受重大损失,经济损失达 255 万元(直接+间接)。2006 年 10 月 9、10、15 日连续发生 3 次电压大幅度波动故障,给公司生产造成很大影响,直接经济损失 1100 万元,间接经济损失 2300 万元。如何采取切实有效的技术措施,提高供电的可靠性和系统电能质量水平,为企业提供一个良好的外部环境成为亟待研究解决的问题。

传统定义上的供电可靠性仅限于计及长时间(一般只考虑持续时间 5min 以上,有的国家规定为 1 min 以上)电源中断和平均故障时间的概率问题,它认为瞬时性的停电由于其对系统、设备以及用户的影响较小,一般在考虑供电的连续性和可靠性时可以忽略不计。但随着当代电力系统负荷结构的变化,用电设备和生产工艺对短时间断电等电能质量要求越来越高,在工业发达国家,研究者提出在计算敏感负荷所在系统的可靠性时,应将这些因素计入在内^[3]。其原因如下:

(1) 与长时间断电相比,电压暂降和短时间断电等电能质量问题发生的频率更

高。

(2) 若电压暂降和短时间断电引起生产线间断而重新启动时,对负荷的影响能长达几个小时。

(3) 因为电能质量不良而使用户用不到符合其要求的电能,就应看作电能质量不合格,此时也可能引起用户侧电压间断,例如,电压暂降、暂升、谐波畸变、瞬时过电压以及稳态电压偏差等电能质量问题就应该予以考虑。

(4) 在当代电力系统中,电能质量与供电可靠性之间既有联系又有区别,有专家指出,电力供应可靠与否应当以电力系统和电力用户的生产过程保持持续正常工作而不会收到干扰为准则,因此它包括许多相关内容,需要提供包含电能质量这一重要组成部分在内的广泛意义上的供电可靠性评价报告。

1.2 国内外研究现状

在国外,电压暂降问题已经得到广泛的重视。在很早的时候,国外就开始对一些与电压暂降有关的现象进行统计。小波变换也广泛的应用于暂态信号的分析当中,使用多分辨率分析的方法,提取不同尺度的细节信号,从而找到一些暂态故障的信息。随着小波理论的进一步发展,更多的母小波被人们发现,既包含幅值信息,还包括相位信息的母小波——复小波得到广泛的应用,小波变换的相位信息往往对奇异性更为敏感,易于捕获奇异点,准确检测出信号的突变^[4, 5]。

在国内,对于电压暂降故障也越来越重视。电压暂降不仅对电力部门构成的危害,而且对电力用户也造成严重的危害。但是现在,国内对电压暂降问题的研究刚刚起步,还没有相对有效的检测电压暂降的设备和算法。对于电压暂降检测的算法研究,人们大多局限在快速傅立叶变换及其改进算法,另外还包括最小二乘估计、卡尔曼滤波、时间序列分析、及神经网络等方法。但是由于种种原因,对于电力系统中的暂态现象至今还没有相对比较统一的方法来描述。随着小波理论的形成与发展,使小波变换技术在电力系统暂态故障分析中得到了广泛的应用。随后,人们把小波变换应用到了电能质量监测领域得到了良好的效果,人们也越来越注意到小波变换对奇异值的敏感性^[6, 7]。

参考文献[8]讨论短时间电压中断对可靠性的影响。该文献对当时有研究者提出的去除馈电线瞬时跳闸,以减少短时间断电的观点,通过仿真得出结论:若去掉馈电线上保护,可减少短时间断电次数,但长时间断电的发生频次会增加,且总的故障持续时间也会延长。

参考文献[9]对电压暂降和短时间断电的定义、起因和影响因素等进行了详细的阐述,着重探讨了用临界距离法和故障点法解决电压凹陷域的评估以及采用故障模式后果法和蒙特卡洛模拟法这两种可靠性评估方法计算配电系统可靠性。

参考文献[10]中指出,现有可靠性方法中,只计入了用户所经历的长时间断电,未将短时间断电和暴风雪的影响计入在内,作者采用了马尔科夫模型将这些影响因素也加以考虑,通过对比得出,计入电压暂降和暴风雪的影响后,配电系统可靠性各项指标都会变差。

参考文献[11]中介绍了一种适合带有多敏感负荷的工业系统的可靠性分析方法,该方法将蒙特卡洛模拟法与一个工业网络模型相结合,并且在计算过程中将保护是否正确动作、元件老化及维修问题加以考虑,还提出了详细的中断准则,以更准确地计算带有敏感负荷系统的可靠性。

参考文献[12]中将电压有效值变化按持续电压分为瞬间(持续时间为0.5—30周期)、暂时(持续时间为0.5周期—3秒)、瞬时(持续时间为3-60秒)三种,文中指出,这些指标已被照明公司用于计算计入电压暂降影响后变电站的可靠性指标,由各变电站指标可进一步得到系统指标。并将各个变电站的指标与系统指标进行比较,将那些与系统指标相差很大的变电站设为需改造的对象。文中指出,至少有两家供电公司使用其介绍的电压有效值变化指标对许多供电质量进行评估。

参考文献[13]中利用SCBEMA曲线、历史可靠性数据以及蒙特卡洛模拟法对电压暂降进行分析,推导了电压暂降对配电系统中不同类型负荷的影响。

通过上述研究现状可看出,对于配电系统的电压暂降问题大部分多为理论分析类文章;工程应用不够。本论文将在电压暂降理论分析的基础之上,探讨电压暂降的识别信息和扰动原因,结合杏石口变电站电压暂降事故,对其进行分析计算,结合电压暂降机理,提出杏石口变电站电压暂降问题的有效治理措施。

1.3 本论文的主要工作

本论文进行了以下几方面的研究:

(1) 电压暂降的基本分析

电力系统中各种扰动引起的电能质量问题主要分为稳态电能质量问题和暂态电能质量问题两大类。稳态电能质量问题以波形畸变为特征,主要包括谐波、间谐波和频率波动等;暂态电能质量问题通常是以频谱和暂态持续时间为特征,可分为脉冲瞬变、振荡瞬变以及电压暂降、电压暂升、短时断电等。本论文将首先对电压暂降的基本概念进行分析。

(2) 电压暂降扰动原因的研究

以杏石口变电站电压暂降事故发生时的故障波形为依据,从中提取三项幅值不对称度指标、电压谐波干扰度指标、电压暂降结束幅值信息等信息,并根据三种不同原因引起的电压暂降特点,对电压暂降扰动原因进行识别,为电压暂降的有效治

理提供依据。

·(3) 电压凹陷域的分析

当系统发生故障引起电压暂降，使所关心的敏感负荷不能正常工作的各故障点所在区域称为电压凹陷域。电压暂降现象是否引起用户设备不能正常工作，即发生暂降事件，要看故障是否发生在该设备的电压凹陷域内。因此，针对杏石口变电站的重要用户——首钢日电电子有限公司，对其进行电压凹陷域的评估计算。

(4) 提出治理杏石口变电站电压暂降问题的措施

在对杏石口变电站电压暂降问题进行全面分析计算的基础之上，根据不同原因引起的电压暂降的不同特点，提出电压暂降应采取不同的治理措施。

第二章 供电系统电压暂降问题的分析

在一个理想的网络中，用户可以把电源当成一个零阻抗的理想电压源，这样，不论电流多大，电压都可以保持恒定。但实际情况往往并非理想，电压总是在变化的，只是通常在允许的幅度内，也就是说所关心的电能质量是实际与理想之间的偏差。本章将对电压暂降现象的定义、起因、危害、特征量描述方法等进行介绍。

2.1 电压暂降的基本分析

2.1.1 电压暂降的定义

电压暂降是一种短时间的电压波动，用电压暂降这一术语来描述电能质量问题中的短时电压降低已有多年的，但到目前为止，对电压暂降的定义尚不统一，IEEE 标准中把电压暂降(voltage sag)定义为：供电系统中某点的工频电压有效值突然下降至额定值的 10%~ 90%，并在随后的 10ms~1 min 的短暂持续期后恢复正常。IEC 标准中将这一现象称之为 voltage dip,与 IEEE 标准不同之处仅在于电压暂降中电压幅值为正常值的 10%~ 90%。sag 和 dip 这两个术语是可以交换的，在美国的电力行业把它们看成是同义词，而我国对 sag 和 dip 的翻译长时间来非常不统一，最近，在电工术语标委会组织的国家标准“发电、输电及配电领域中的运行术语”审查会议上，专家们认为将 IEC 标准中的“voltage dip”翻译为“电压暂降”比较合适，并将其定义为：在系统的某供电点上，电压突然降低，在几个周波到几秒钟的时间内得以恢复。这个定义描述了电压暂降的特征，但没有规定下降的幅值范围^[8, 14]。

2.1.2 电压暂降的起因

当输配电系统中发生短路故障、雷击、开关操作、变压器以及电容器组的投切等。用户的原因包括用户内部短路以及大型电机的启动、电弧炉、轧钢机等冲击性负荷的投运等。其中，短路故障和大型感应电机启动是最主要的两个原因^[15]。

雷击时造成的绝缘子闪络或对地放电会使保护装置动作，从而导致供电电压暂降。这种暂降影响范围最大，持续时间一般超过 100ms。

短路故障可能引起较为严重的电压暂降，影响工业生产中对电压敏感的电气设

备,造成严重的经济损失。因此,此类电压暂降已成为用户所面临的最重要的电磁干扰问题之一。配电系统故障多数为单相接地故障,是产生电压暂降的最主要原因。

据统计,单相、两相短路、两相短路接地和三相短路故障占全部故障的比例分别约为 70%、15%、10%和 5%。电机启动造成的电压暂降程度与短路故障引起的暂降相比不太严重,但暂降持续时间往往较长^[16]。

2.1.3 电压暂降的危害

新型设备在电力系统中的大量投入使用使劣质电能质量带来的严重影响与危害表现得尤其突出,直接影响到国民经济的总体效益,这是现代电能质量问题受到广泛关注的最主要的原因之一。从技术角度讲,提供优质电能是由供用电双方共同保证的(可以将发电厂视为理想的正弦电压源),因而对电能质量日益关注的原因是多方面的,比如电力用户对电能质量认识的提高、对电力系统运行总效率重视程度的不断加强、电力系统负荷结构的重大变化以及电力市场机制的作用等。

近十多年以来,在电能质量问题的各种现象中,电压暂降是造成电压敏感设备不能正常工作的主要原因,通常可认为电压暂降引起 70%~90%电能质量问题。如英国 1995 年就电能质量问题对容量超过 1MW 的 100 家用户做了调查,结果显示:在监测的 12 个月里,69%用户的生产过程因电能质量问题受到破坏,并且 83%的事故是由电压暂降和短时间中断引起的^[17]。

电压暂降已成为威胁现代社会各用电设备正常、安全工作的主要干扰,并且成为威胁信息化社会供电质量不可忽视的因素,其危害性主要表现在以下几个方面:

(1) 电压暂降轻则造成工作、生活上的不便。例如电压暂降可能造成个人用计算机程序紊乱,数据丢失等。中国国际广播电台曾报道,《商业周刊》的一名编辑因供电系统突然降压造成电梯故障而被困在电梯内长达 40 小时,以心理和身体受到严重伤害为由向相关部门提出索赔 2500 万美元的要求^[18]。

(2) 电压暂降影响面宽,造成的经济损失大,因而带来的严重影响与危害表现得尤其突出,几个周期的供电电压暂降都将影响一些设备的正常运行,造成产品质量下降,甚至使生产线程序紊乱或中断,并且暂降后的无序启动比计划断电后的有序恢复造成的危害及损失大得多。例如,上海浦东华虹 NEC 电子有限公司是一家以生产硅晶片为主的高科技企业,NEC 有一部分负荷对电压变动十分敏感,当电压跌至正常电压的 80%,持续时间超过 20ms 时,其内部的部分设备就会停机,据粗略估算,每发生一次类似事件,造成的直接经济损失在 200 万元人民币以上。再如某计算中心 2 秒的供电中断引起约 60 万美元的损失,某玻璃制品厂工频 5 个周期的电压中断,造成损失约 20 万美元^[19]。

(3) 暂降不仅造成经济损失,还可能造成人员意外伤亡和设备毁坏。比如医

院中的一些医疗保健设备、用计算机进行的脑外科、心血管外科、眼科手术等，当发生电压暂降而造成设备不能正常工作时将带来严重后果。

和其他电能质量问题一样，电压暂降并不是一个新问题，自电力系统运行中出现短路故障之时就存在电压暂降现象，只是前述几种原因特别是新型用电设备在电力系统中的大量投入使用促进了对它的关注与研究。目前，欧美等发达国家对电压暂降(包括电压中断)的研究范围已相当广泛和深入，主要包括：电网中电压暂降的监测和统计分析、暂降的危害、暂降过程的仿真计算、凹陷域的研究、不平衡暂降的特性、暂降在不同电压等级之间的传播、暂降对配电系统可靠性的影响、减缓暂降的技术措施以及暂降的标准等。

电压暂降对那些对电压敏感的设备影响较大，但暂降所造成的危害的大小不仅与设备敏感度有关而且还和设备的应用场合有关，敏感度越高、应用场合越重要，所带来的危害就可能越大。

另外，在竞争日益激烈的市场经济中，若因电网电压暂降问题而使招商引资的减少或引起意外的作业中断而不能按期交货导致商家的信誉度下降等，无疑也是巨大的隐形损失，因此电压暂降所造成的实际经济损失可能远大于所能计算出的直接损失。

2.1.4 电压暂降特征量的描述

在描述电压暂降时，使用的最多的是幅值、持续时间和频次这三大特征量，它们之间是相互关联的^[20]。另外，故障不仅会引起公共连接点电压幅值的降低，而且会引起电压的相位跳变，这里一并介绍。

(1) 电压暂降幅值的描述

在电压暂降的分析中，通常将暂降时的电压有效值与额定电压有效值的比值定义为暂降幅值。本文以后的论述中，暂降幅值都是指暂降后的结果电压与额定电压有效值的比值。

对于同一电压暂降，不同的描述方法会得到不同的暂降幅值。人们常用测量到的最大偏差值来表征电压暂降幅值，即为偏离额定值的最大值，此时并不考虑事件的持续时间，但暂降幅值和持续时间是关联的，它们应是相互对应的。大量研究表明，当幅值低于 90% 时，并持续一定时间，就会对部分设备造成影响。这也是多数定义将暂降幅值定义为低于 90% 的原因^[21]。

(2) 与特定暂降幅值对应的暂降持续时间

通常，人们将暂降从发生到结束之间的时间定义为持续时间，这对矩形形状的电压暂降来说是准确的，但对非矩形形状的暂降则不够精确。对于大部分电压暂降，通常约有 10% 的暂降是非矩形的。对于这种非矩形暂降，持续时间的确定是近似的，

也是比较困难的，对于所谓的“故障后电压暂降”事件，就存在这种问题。因此有的文献提出“特定电压法”来描述暂降的持续时间，该方法指出，持续时间指有效值低于指定电压阈值的一段时间，如果暂降是非矩形状的，则持续时间应是指定阈值下的与矩形相关联的部分。这样一来，一个给定的非矩形暂降可有不同的持续时间，其值随所关心电压有效值的不同而变化。此方法用于实际还有一定距离。

(3) 电压暂降的频次

暂降频次是表征电压暂降对敏感电力用户影响频繁程度的重要指标，暂降频次的增加无疑将加重暂降对敏感用户的危害。孤立地谈暂降频次是没有意义的，因不同用户对电压暂降的敏感程度不同，故我们在描述暂降频次时总是针对特定暂降幅值和持续时间的^[1]。利用图 2-1 可以直观地描述三者之间的关系，更好地理解频次的含义。自重合闸技术出现以来，暂降发生的频次有所增加。

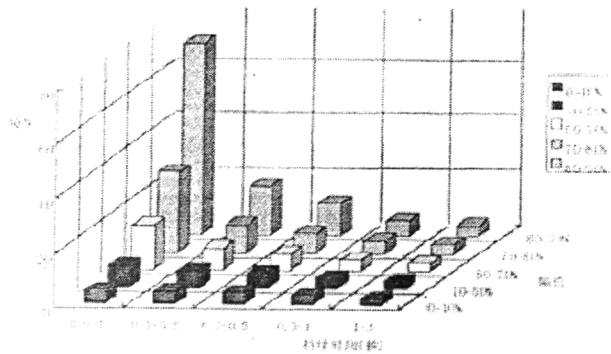


图 2-1 电压暂降三大特征量示意图

在统计电压暂降的次数上，目前还未形成一致的看法。UNIPED (国际电力生产与供电组织) 推荐了表 2-1 所示的表格来统计各种深度及持续时间的电压暂降次数。表中数据 N11 为一定时间内发生的深度在 10%至 15%之间、持续时间在 10ms 至 100ms 之间的暂降次数。利用此表对电压暂降进行统计，可以很容易地看出暂降深度、持续时间以及发生频次大致在什么范围之内^[22]。

表 2-1 电压暂降频次统计表

深度 d (%)	$10\text{ms} \leq t < 100\text{ms}$	$100\text{ms} \leq t < 500\text{ms}$	$500\text{ms} \leq t < 1\text{s}$	$1\text{s} \leq t < 3\text{s}$	$3\text{s} \leq t < 20\text{s}$	$20\text{s} \leq t < 1\text{min}$
$10 < d < 15$	N11	N21	N31	N41	N51	N61
$15 \leq d < 30$	N12	N22	N32	N42	N52	N62
$30 \leq d < 60$	N13	N23	N33	N43	N53	N63
$60 \leq d < 99$	N14	N24	N34	N44	N54	N64
$\geq 99 \leq d < 100$	N15	N25	N35	N45	N55	N65

(4) 相位跳变(相移)

电压出现相位跳变是由于系统的 X_S/R_S 和线路的 X_F/R_F 比值的不同,或不平衡暂降向低压系统传递引起的。在图 2-2 中,若 $Z_S=R_S+jX_S$ 、 $Z_F=R_F+jX_F$,则相位跳变角 ϕ 为:

$$\phi = \arg(\overline{V_{sag}}) = \arctan\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \arctan\left(\frac{X_S + X_F}{R_S + R_F}\right) \quad \text{式 2-1}$$

如果 $X_S/R_S = X_F/R_F$, 则无相位跳变,否则将会出现相位跳变。当系统和线路 X/R 比值接近时,在输电系统可能会发生小的正值相位跳变,但超过 $+10^\circ$ 的相位跳变很少发生。对于大多数暂降情况的研究,可认为相位跳变角在 0 到 -60° 之间变化。

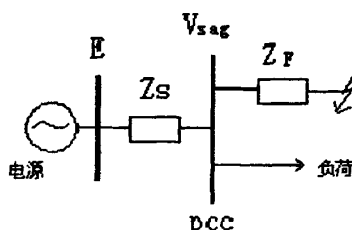


图 2-2 电压暂降电压分配器模型

2.1.5 电压暂降幅值、持续时间及发生频次的有关统计

电力系统在其运行过程中,电压暂降的实际发生情况需要大量的实际监测记录和统计,而在我国至今尚未开展这项工作。以下整理给出发达国家多年来统计分析的结果,以供我们研究借鉴^[1]。

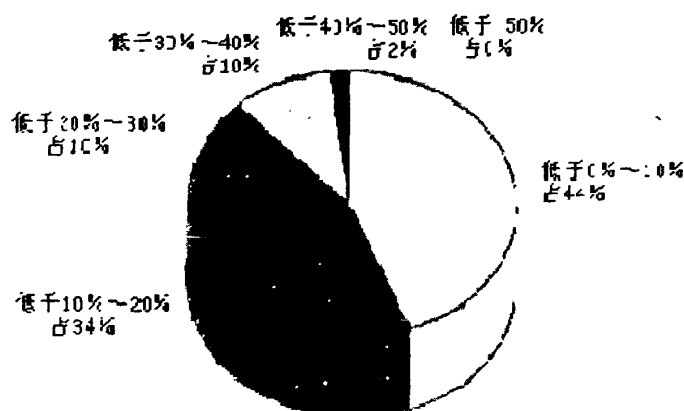


图 2-3 某 115kV 系统实测电压暂降发生情况

图 2-3 所示为某 115kV 系统大约一年内实测电压暂降的发生情况(图中幅值按低于额定电压的百分比给出)。由图可知，多数暂降幅值为额定电压的 90%~70%，绝大多数幅值大于 60%，图 2-4 给出了与图 2-3 对应的暂降频次和暂降幅值以及持续时间的三维柱状图^[1]。

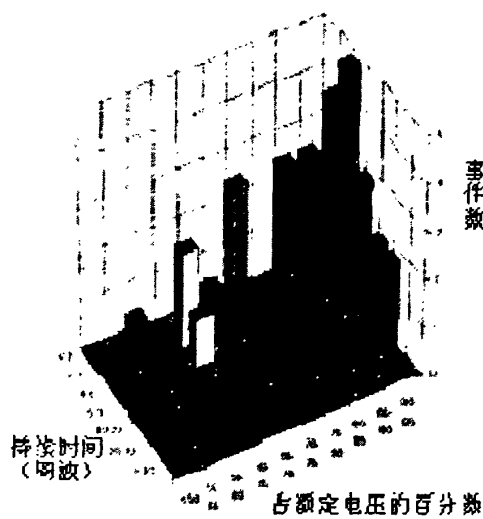


图 2-4 暂降频次和暂降幅值以及持续时间的三维柱状图

表 2-2 为某工厂供电点一年内测得的电压暂降统计结果。由该表可以看出，电压暂降的幅值一般大于 60 %。电压暂降的幅值与测量的供电点位置有关，但这个测量结果可认为具有代表性。

表 2-2 电压暂降统计值

电压暂降幅值(%)	80—90	70—80	60—70	<50
发生概率(%)	61	18	4	0

图 2-5 介绍了两工业部门在 17 个月内对电压暂降的监测情况，所有暂降的平均持续时间为 17.8 个周期，大部分暂降持续时间小于 30 个周期。图 2-6 为对应的柱状图，可见所有暂降的幅值都在 60%以上，且大部分处于 70%~90%之间^[1]。

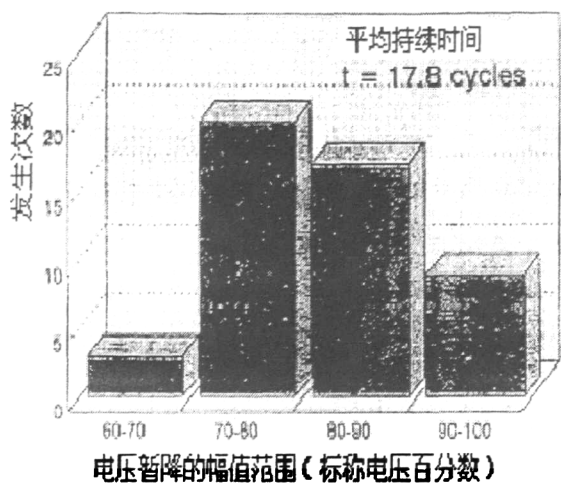


图 2-5 电压暂降柱状图

表 2-3 中电压暂降数据得自美国 222 条配电线路，时间段为从 1993 年 6 月 1 日至 1995 年 6 月 1 日。表中数据代表的意义是：比如，幅值在 80%~ 90%之间、持续时间在 0 至 0.2 秒的电压暂降每年发生 18 次，幅值在 70%~80%之间、持续时间在 0.2 至 0.4 秒的电压暂降每年发生 0.7 次等等。从表 2-3 可见，绝大多数暂降的幅值也在 60%以上^[1]。

表 2-3 电压暂降频次数据

概率	每秒的次数				
	0.0<0.2	0.2<0.4	0.4<0.6	0.6<0.8	=0.8
>80~90%	18.0	2.8	1.2	0.5	2.1
>70~80%	7.7	0.7	0.4	0.2	0.5
>60~70%	3.9	0.6	0.2	0.1	0.2
>50~60%	2.3	0.4	0.1	0.1	0.1
>40~50%	1.4	0.2	0.1	0.1	0.1
>30~40%	1.0	0.2	0.1	0.0	0.1
>20~30%	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0
>10~20%	0.4	0.1	0.1	0.0	0.1
0~10%	1.0	0.3	0.1	0.0	2.1

从以上统计结果可以看出，绝大多数暂降的幅值都大于 60%，电压暂降的持续时间大都小于 1 秒。从图 2-2, 2-5, 2-6 和表 2-3 可见，每年发生电压暂降的次数统计不太一致，但也在几十次上百次范围内，这种不一致可能是由系统结构、气象条件等因素不同造成的。虽然各个电网情况不同，但这些统计结果很具参考性。

2.2 电压暂降与中断的比较

电压中断是与电压暂降相关联的另一电能质量问题，当电压有效值降低到接近于零并持续一定时间时，则称为中断。由于对电压暂降下降幅度定义的不同，“接近于零”也有不同的定义。IEC 定义“接近于零”为“低于额定电压的 1%”，IEEE 的定义为“低于 10%”^[23]。三大国际标准对于电压中断的定义对照如表 2-4 所示。

表 2-4 三大国际标准对电压中断的定义对比

中断类型	EN50160	IEEE Std.1159-1995	IEEE Std.1250-1995
长时	>3 分钟		
短时	=3 分钟		
瞬时		0.5 周波~3 秒	30 周波~2 秒
暂时		3 周波~1 分钟	2~2 分钟
瞬间			0.5 周波~30 周波
持续		>3 秒	>2 分钟

造成中断的原因可能是系统故障、用电设备故障或控制失灵以及运行人员误操作等。电压中断往往是以其幅值总是低于额定值百分数的持续时间来量度的。一般来讲，由系统故障造成的中断持续时间是由保护装置的动作时间决定的，通常对于非永久性故障，瞬时重合闸将会使电压中断时间限定在工频下的 30 个周期以内。带有延时的重合闸可能导致暂时的或短时的电压中断。由设备故障等造成的电压中断持续时间一般是无规律的。有时，由系统故障造成的电压中断，在其出现之前，即在故障发生至保护动作期间，可能先出现电压暂降。从图 2-6 所示的短时间中断现象可以看到，在此变化过程中，电压降低到额定值的 20%，再经三个周期后下降为 0，间断持续时间为 1.8 秒，之后重合闸重新恢复供电。还可看出，这一电压跌落波形所反映的是典型的电弧故障现象。

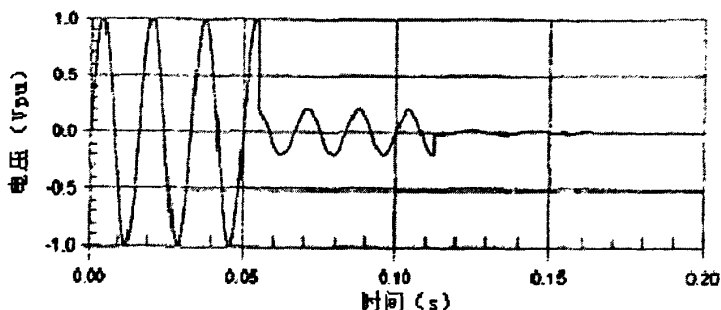


图 2-6 由一次故障引起的电压暂降和断电

一定意义上说，电压暂降的危害程度比短时电压中断严重更具有全局性，发生

频次远高于短时电压中断，对某一用户来说这是由于电压暂降，一次电压暂降带来的危害可能不如一次中断大，但由于暂降发生的次数的增加，总体上看暂降所带来的损失是巨大的。

虽然电压暂降和中断在定义、起因等方面有所不同，但对于本课题的研究来说，可以把电压中断看作一种特殊的、幅值下降特别严重的电压暂降，因此，本文以后的论述中，除特别说明之外，对暂降和中断都不作严格的区分。

2.3 电压暂降的检测

电力系统发展的初期，系统的容量较小，设备性质相对单纯，出现的故障类型也相对集中于周期性的、稳态的情况。譬如谐波问题就是一个很好的例子。随着谐波问题的深入研究，人们发现，在时间信号中很难寻找到关于信号的频率信息(即使找到的也局限于基波)，于是在数学的“空间”，“基”，“正交基”的概念基础之上，人们利用三角函数 $\sin(x)$ ， $\cos(x)$ 的正交性，实现了时域到频域的一映射，构建了一座时域与频域的桥梁—Fourier 变换。

对信号 $f(x) \in L^2(R)$ ，其 Fourier 变化的定义为：

$$F(\omega) = \int f(t)e^{-j\omega t} d\omega \quad \text{式 2-2}$$

Fourier 逆变化为：

$$f(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int F(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad \text{式 2-3}$$

Fourier 变换中的基函数是三角函数，这些三角函数构成了平方可积的函数空间 $L^2(R)$ 的一组正交基，所以可以将 $f(t)$ 分成不同频率的三角函数的线性组合，从而得出待分析信号的频率组成方式。

通过 Fourier 变换，揭示了更加深刻的认识空间，但是，它也存在先天带来的不足：由于二角函数填满空间的本性，它在物理空间是双向无限延伸的正弦波，因此 Fourier 变换是先天非局限的，它对信号 $f(t)$ 中的任何局部信息的处理都是相同的，为了用式(2-2)从信号中提取谱信息 $F(t)$ ，就要取无限的时间量，使用过去与将来的信号信息只为了计算单个频率的频谱，不能反映随时间变化的频率当信号只在某一部局变化时，会影响到每一个谱值的变化，从而使局部化特征“平淡化”^[24]。

通过“电压暂降”问题的定义描述，我们可以发现，“电压暂降”实际上是电压随时间变化的，非周期性质的暂态信号，这与 Fourier 变换的基本定义是相悖的。因此，可以得出结论：Fourier 变换是不适合作为分析暂态信号的数学工具的。

2.4 小结

在众多的电能质量扰动中，电压暂降与谐波是最为突出的 2 个电能质量问题。由于各种非线性用电设备的大量应用，谐波畸变在当前和未来是我国电网配电系统所面临与急需解决的重要问题。

(1) 从电压暂降的有关统计结果可见，绝大多数暂降的幅值都大于 60%，电压暂降的持续时间大都小于 1 秒。每年发生电压暂降的次数统计不太一致，但也在几十次上百次范围内。

(2) 当变压器与电动机的额定容量相对不够大时，电动机较大的启动电流会对公共母线造成不同程度的电压暂降，暂降幅值与持续时间和变压器与电动机容量比有关，但启动时的机械负载转矩只影响暂降的持续时间。电动机启动引起的电压暂降发生频次高，持续时间长，电压变化不规则。

在电力市场环境下，除非采取有效措施，电压暂降的危害将增加，电力市场化运营允许远距离输送功率，将使电压暂降的发生次数和严重程度增加。同时，随着国民经济与高新技术的发展，各种精密用电设备越来越多地应用在各行各业中，这些精密设备往往对电压暂降较为敏感，从而使得电压暂降问题变得愈加突出。

第三章 杏石口变电站电压暂降扰动原因分析

电压暂降是配电系统中最为常见的一种电能质量扰动,据统计,在 2003 年到 2006 年期间,杏石口变电站共发生电压暂降事故 8 起,由于其发生频率高、对其重要负荷——首钢日电电子有限公司造成经济严重损失。造成电压暂降的原因总的来说是由于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,进而引起公共供电点(Point of common coupling, PCC)电压暂降。

3.1 电压暂降的识别信息

由于系统短路故障、变压器激磁以及感应电动机启动造成的电压暂降各自特点不同,因而可以提取此特征指标对其进行区分,下面将首先介绍这些用于电压暂降扰动原因识别的信息^[25]。

3.1.1 三相幅值不对称度指标

三相幅值不对称度指标 ε_N 取电压暂降开始后一个周期内三相不对称度的均方根值,可以表示为:

$$\varepsilon_N = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{t_k=t_i}^{t_i+m\Delta t} \varepsilon_N(t_k)} \quad \text{式 3-1}$$

其中:

$m=fs/2f$ 为周期采样点数,一般为 256 点;

t_i 为电压暂降开始的时刻;

$\varepsilon_N(t_k)$ 可由下式计算得到:

$$\varepsilon_N(t_k) = \frac{1 - \max(V_1^A(t_k), V_1^B(t_k), V_1^C(t_k))}{1 - \min(V_1^A(t_k), V_1^B(t_k), V_1^C(t_k))} \quad \text{式 3-2}$$

考虑到电压暂降开始时电压幅值下降过程以及滤波准确度的影响,取三相幅值不对称度阈值 $\varepsilon_U = 0.6$,则根据电压暂降扰动原因引起电压暂降特征可以得出如下结论:

(1) $\varepsilon_N < \varepsilon_U$ 三相幅值不对称,不对称短路故障、变压器激磁引起;

(2) $\varepsilon_N = \varepsilon_U$ 三相幅值对称, 三相短路故障、异步电动机启动引起。

3.1.2 电压谐波干扰度指标

通过分析对电压暂降记录做高阶滤波的原理, 用基波估计值与实测值之间的符合程度来评价电压谐波的干扰。此指标效果与《电能质量公用电网谐波》标准中对总谐波畸变率 (THD, 周期性交流量中谐波含量的有效值与其基波分量的有效值之比) 类似。电压谐波干扰度指标用 ε_h 表示, 可以用下式求出:

$$\varepsilon_h = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{t_k=t_i}^{t_i+m\Delta t} d(t_k)^2} \quad \text{式 3-3}$$

其中 m 为电压暂降过程中采样点数, 为周期采样点数,

t_i 为电压暂降开始的时刻。

取三相电压谐波干扰指标的最大值与阈值比较, 根据电压暂降谐波特征可以得出以下结论:

- (1) $\varepsilon_h > \varepsilon_H$ 变压器激磁引起;
- (2) $\varepsilon_h = \varepsilon_H$ 短路故障、异步电动机启动引起。

3.1.3 电压暂降结束幅值

由短路故障引起的电压暂降, 当故障清除后电压幅值恢复。考虑到幅值估计的滞后性, 在电压暂降结束瞬间三相基波电压幅值最小值仍低于设定阈值。由变压器激磁和感应电动机启动引起电压暂降无明显结束标志, 取其幅值信息作为电压暂降结束标志, 因而电压暂降结束瞬间基波三相电压幅值最小值不低于设定阈值。则可得出以下结论:

- (1) $\min(V_{A1}(t_j) V_{B1}(t_j) V_{C1}(t_j)) < \varepsilon_v$ 短路故障引起;
- (2) $\min(V_{A1}(t_j) V_{B1}(t_j) V_{C1}(t_j)) = \varepsilon_v$ 变压器激磁、感应电动机启动引起。

3.2 短路故障引起的电压暂降 (FRS)

电力系统运行过程中, 雷击、电缆损坏、设备故障、动物以及绝缘污染等原因都可能引起电力系统短路故障。短路故障发生后, 短路点附近节点电压下降, 电压暂降发生; 随着故障清除, 操作将短路点与系统快速隔离, 短路点附近节点电压恢复正常, 电压暂降结束, 因而电压暂降的持续时间取决于故障清除时间。与其它原因引起电压暂降相比, 短路故障引起的电压暂降最为严重, 也是灵敏设备误动作的

主要原因。短路故障引起的电压暂降可以分为两类：对称电压暂降（三相短路故障引起）和不对称电压暂降（单相接地短路、两相短路以及两相短路接地引起）。

如图 3-1 是否石口变电站供电系统的示意图，由于 10kV 负荷端发生短路故障引起电压暂降，图中 $Z_S=R_S+jX_S$ 是 PCC 的电源阻抗， $Z_F=R_F+jX_F$ 是故障馈线线路的阻抗。PCC 是同时给馈线线路和负荷线路供电的网络节点，即负荷电流与故障电流分流的节点。

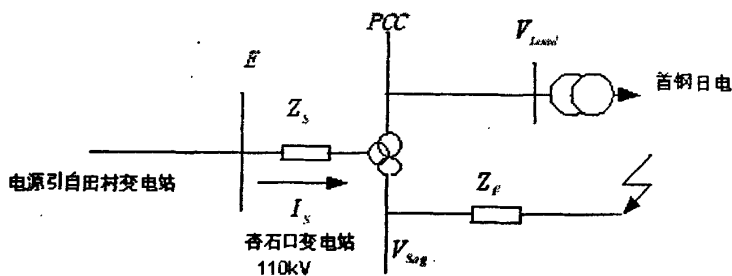


图 3-1 短路故障引起电压暂降

假设故障发生前后负荷电流可以省略，则电源阻抗 Z_S 上流经的电流 I_S 为：

$$\overline{I_s} = \frac{\overline{E}}{\overline{Z_s} + \overline{Z_F}} \quad \text{式 3-4}$$

当短路故障发生后， Z_F 减小， I_S 增大。PCC 电压可以表示为：

$$\overline{V_{PCC}} = \overline{E} - \overline{Z_s} \overline{I_s} \quad \text{式 3-5}$$

故障后，由于电源阻抗分压增加，PCC 电压下降，发生电压暂降。假设电源容量无限大，即恒有 $E=1$ ；且故障阻抗 $Z_F=r+jx=z \times l$

其中：

z 为故障线路单位距离阻抗；

L 为故障点到 PCC 距离，

将公式(3-4)代入(3-5)可得电压暂降幅值为：

$$\overline{U_s} = \left| \frac{\overline{z} \times L}{\overline{Z_s} + \overline{z} \times L} \right| \quad \text{式 3-6}$$

从式(3-6)中可以看出 L 越小，即故障点离 PCC 越近，PCC 电压暂降越严重，电压暂降发生时还可能发生电压相角的跃变，为：

$$\Delta\phi = \arg(\overline{V_{sag}}) = \arctan\left(\frac{x}{r}\right) - \arctan\left(\frac{X_s + xl}{R_s + rl}\right) \quad \text{式 3-7}$$

由公式 3-7 可以看出 PCC 经受的电压暂降幅值和相角变化是由电源阻抗（即电源强度）、线路单位阻抗、故障点与 PCC 之间的距离决定的。并且负荷终端设备经历的电压暂降与网络中变压器类型、中性点接地方式以及设备接线方式都有关系。

2006 年 10 月 15 日 4 点 25 分 34 秒，杏石口变电站发生电压暂降，电压下降 53.9%，持续时间 300ms，造成首钢日电电子有限公司生产设备 90% 停机，全线停产。图 3-2 为实测的三相故障引起的电压暂降信号波形，这次电压暂降是由于接地短路故障引起。

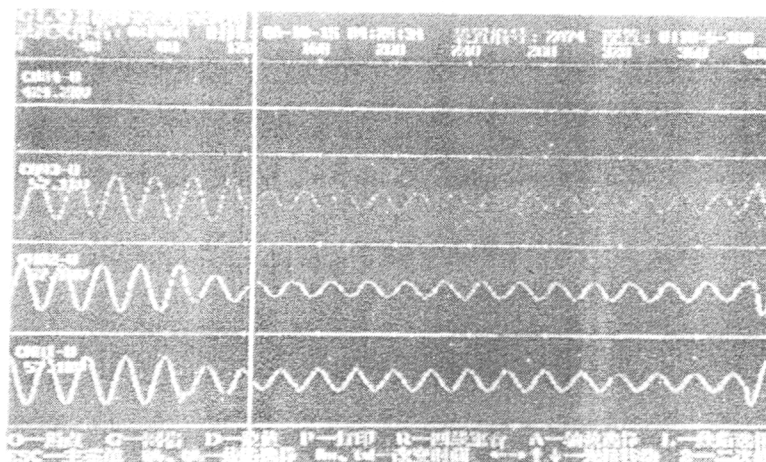


图 3-2 三相短路引起的电压暂降波形

由短路故障引起的电压暂降主要有列特点：

- (1) 电压暂降较深，电压暂降幅值一般低于 0.7pu；暂降持续时间与保护动作时间有关；
- (2) 三相短路故障引起电压暂降，三相电压同时开始暂降，并且暂降幅值相等；其它短路故障类型引起电压暂降，三相电压暂降幅值不相等；
- (3) 电压暂降开始与结束瞬间，电压幅值发生突变。

3.3 变压器激磁引起的电压暂降 (TERS)

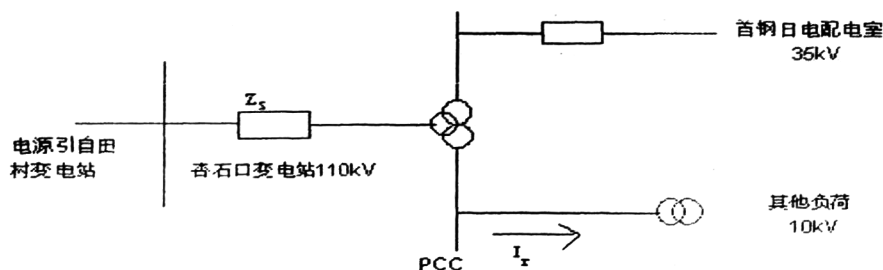


图 3-3 变压器激磁引起电压暂降

当变压器终端电压发生剧烈变化时，由于变压器铁芯的饱和效应可能产生很大的激磁涌流。如图 3-3 所 T 系统假设母线容量无限大，开关动作后变压器与系统相连，这时变压器铁芯电压为：

$$u(t) = V \sin(\omega t + \alpha) = N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{式 3-8}$$

设变压器剩余磁通为 Φ_r ，对 $u(t)$ 从 0 到 t 积分

$$\phi(t) - \phi_r = -\frac{V}{\omega N} \{ \cos(\omega t + \alpha) - \cos \alpha \} \quad \text{式 3-9}$$

$V/\omega N$ 为稳定最大磁通 $\Phi_{\max}$ ，则

$$\phi(t) = \phi_r + \phi_{\max} \cos \alpha - \phi_{\max} \cos(\omega t + \alpha) = \phi_r + \phi \quad \text{式 3-10}$$

Φ_r 与 Φ 半个周期内极性相同，半个周期极性不同。

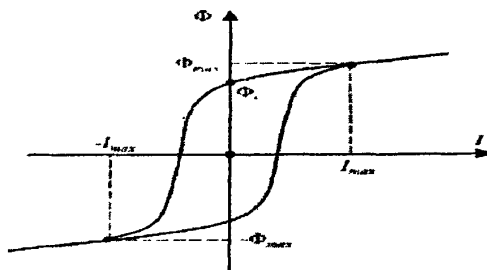


图 3-4 变压器铁芯的磁化曲线

由图 3-4 可以看出，稳态状态下，当磁通在 $-\Phi_{\max}$ 与 $\Phi_{\max}$ 之间变化时，激磁电流变化很小；当 $|\Phi(t)| > |\Phi_{\max}|$ 之后，即变压器铁芯磁通饱和后，激磁电流会迅速增大。一般变压器激磁电流可达变压器额定电流的 3~5 倍，由于系统阻尼的作用，在几秒中恢复到正常激磁电流值。由公式 3-10 可以看出，变压器饱和磁通受波形关断角 α 、电源强度，铁芯剩余磁通等因素的影响。在变压器铁芯磁通饱和期间内，由于激磁电流的影响，电源阻抗分压增加，引起 PCC 电压暂降，并且由于三相电压相角相差 120° ，故三相波形关断角不同，激磁电流大小也不同，因而三相电压暂降的程度是不同的，即变压器激磁引起的电压暂降是不对称的。

2004 年 5 月 15 日 20 点 59 分 37 秒，杏石口变电站发生电压暂降，造成首钢日电电子有限公司设备大部分停机，造成重大损失，图 3-5 实测的电压暂降信号波形，图中三相电压暂降幅度不同，其中 A 相电压降幅最严重，降幅达 47.6%，经过 6 个周波大约 120 毫秒后电压缓慢恢复为正常值，此次电压暂降是由于变压器激磁引起。

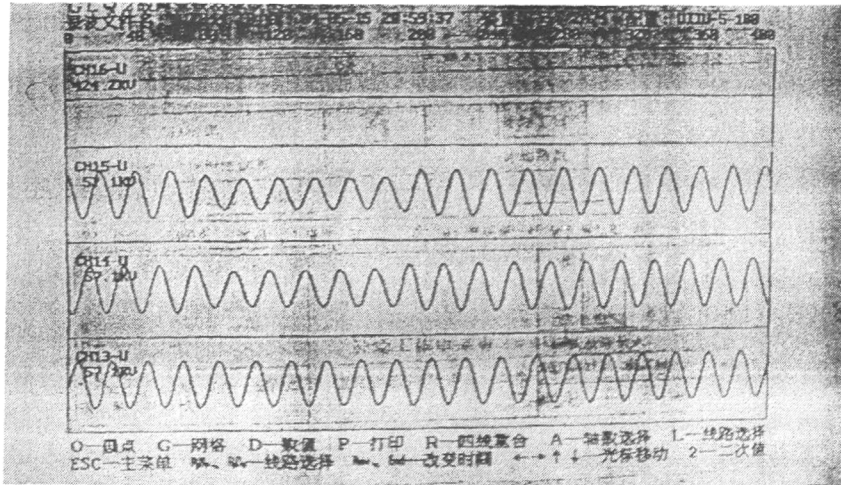


图 3-5 变压器激磁引起电压暂降

由变压器激磁引起的电压暂降主要有列特点:

- (1) 三相电压暂降幅值不相等;
- (2) 伴随着电压暂降, 电压信号中含有谐波分量, 主要为 2~5 次谐波;
- (3) 电压暂降开始时, 电压幅值突然下降, 随后电压缓慢恢复至正常值。

3.4 感应电动机启动引起的电压暂降 (MSRS)

大容量感应电动机启动也是引起电压暂降的主要原因。当电动机启动时, 定子电流明显增大, 一般为额定电流的 5~6 倍, 电源阻抗分压增加, 造成 pcc 发生电压暂降。

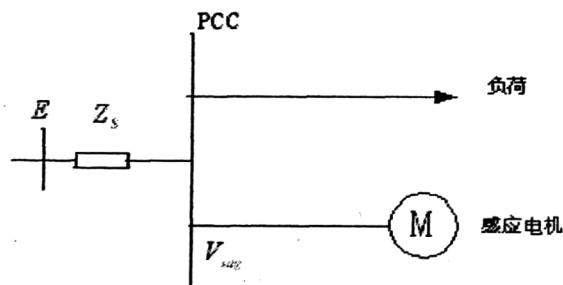


图 3-6 感应电动机启动引起电压暂降

如图 3-6 所示系统, 假设电源电压恒为标么值, 即 $E=1$ 。图 3-7 感应电动机 T 形等值电路图。当电动机启动时, 转差 $S=1$, 转子等效电阻较小, 转子电流 I_2 较大, 由于定子电流向量 I_1 与转子电流向量 I_2 方向基本相反, 因而 I_1 也比额定状态下 ($S \ll 1$) 大, 大约为额定电流的 4~7 倍, 由于系统阻尼的作用, 在几秒中内恢

复到正常定子电流值。假设其它负荷电流可以省略，则感应电动机启动后，PCC 电压为：

$$V_{PCC} = V_{sg} \approx E - Z_s I_s = \frac{Z_M}{Z_s + Z_M} E = \frac{U_1}{Z_s I_1 + U_1} \quad \text{式 3-11}$$

Z_M 为感应电动机的等效阻抗， U_1 为电动机定子电压， I_1 增大， I_s 增大， V_{PCC} 减小，形成电压暂降。

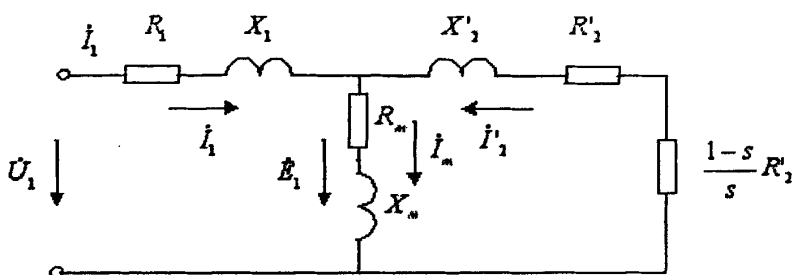


图 3-7 感应电动机 T 型等值电路

由公式 3-11 可以看出，由感应电动机启动引起的电压暂降特征与感应电动机特性(容量、启动方式、负载等)、PCC 系统电源强度以及系统阻尼参数等因素有关。图 3-8 为 Matlab 仿真得出的电动机启动引起的电压暂降信号， $t=50\text{ms}$ 时刻，三相电压同时开始暂降，随后慢慢恢复，直到 150ms 左右，电压恢复到正常值附近^[26]。

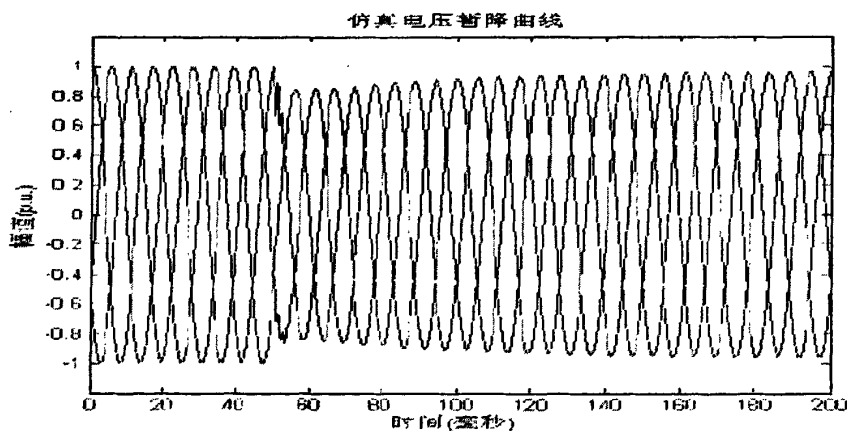


图 3-8 感应电动机启动引起电压暂降

综上所述，由感应电动机启动引起的电压暂降主要有下列特点：

- (1) 三相电压同时开始发生暂降，三相电压暂降幅值相同；
- (2) 电压暂降开始时，电压幅值突然下降，随后电压缓慢恢复至正常值；
- (3) 电压暂降幅值一般不低于 80% 。

不仅感应电动机在启动时能引起电压暂降，而且在其运行时也能对由于系统短路故障引起的电压暂降产生影响。当电压暂降开始时，电动机机械转矩以终端电压平方比例下降，转速下降，转差 s 增大，线电流增大。由于惯性作用的影响，感应电动机对转速下降能够抵抗一段时间，在这段时间内，由于线电流逐渐增大，供电点电压逐渐下降。当故障清除后，电压恢复，电动机加速，吸收大量无功电流，造成电源系统阻抗电压降增大，抵抗了电压快速回升，延续了电压暂降。

3.5 小结

本章主要从机理上分析了三种主要原因，即系统短路故障、变压器激磁、感应电动机启动引起电压暂降的过程，并根据电压暂降过程中电压、电流等状态的变化从三相电压对称性、谐波、电压幅值下降与恢复过程等方面总结了三种原因造成电压暂降的特征，从而得出以下结论，短路故障引起电压暂降电压快速下降并快速恢复；感应电动机启动引起电压暂降三相电压对称、电压恢复缓慢；变压器激磁引起电压暂降三相电压不对称、电压恢复缓慢、含有大量谐波。从测得的故障波形来看，杏石口变电站的两起电压暂降分别是由短路故障和变压器激磁引起的。

第四章 杏石口变电站电压暂降的计算

电压暂降虽持续时间短，但严重干扰了许多现代化设备的正常工作，电压暂降会给电力设备带来很多不良影响。首钢日电电子有限公司是一家半导体集成电路制造和销售的生产厂商，属于电子精密仪器生产厂家，对供电质量的要求较高，多次因电压暂降问题造成严重的经济损失。本章主要研究电压暂降问题的计算。

4.1 电压暂降的实测统计法

实测统计法指选择电力系统的部分站点进行电能质量实地监测，通过统计处理和分析计算所采集的数据来确定电压暂降情况^[27]。

根据首钢日电电子有限公司设备现场运行情况，选取某台自动化机器作为敏感负荷，有针对性地在工厂的配电网络中的某些节点安装监视设备，进行监视测量，并利用暂降发生装置测试三台敏感设备的电压承受能力，根据这些测试结果得到了关于该配电网络的电能质量分析报告。

通过监视来获得统计信息有很大的局限性，由于电压暂降（电压跌落）的发生是随机事件，如采用实地监测，监测周期的长短直接影响了分析结果的准确度。应用统计学做了一个简单计算，对于非常敏感的负荷，如每天都会因电压暂降跳闸 1 次的设备，要获得 50% 的准确度需观察 2 周，要获得 10% 的准确度需观察 1 年；而对于每年经历 1 次跳闸事故的设备，要获得 50% 的准确度需观察 16 年，要获得 10% 的准确度需观察 400 年。因此实地监测的结果对于因电压暂降而跳闸频繁的负荷有参考价值，而对于一般负荷，监测结果由于时间不够长而变得意义不大。

4.2 电压暂降的随机预估法

随机预估法将故障的发生视为随机事件，通过已有的故障统计建立系统模型，从理论上预估由故障导致的电压暂降^[28]。随机预估法基于以下两点假设：电压在短路发生瞬间立即下降到暂降幅值；故障切除后电压即恢复。有两种公认可行的随机预估法：故障点法和临界距离法。

4.2.1 故障点法

故障点法的基本思想,即假定在系统中发生多处故障,计算这些故障所引起的电压暂降的幅值、持续时间、频率等特征量^[1]。图 4-1 为计算电压暂降幅值的电压分割原理图。

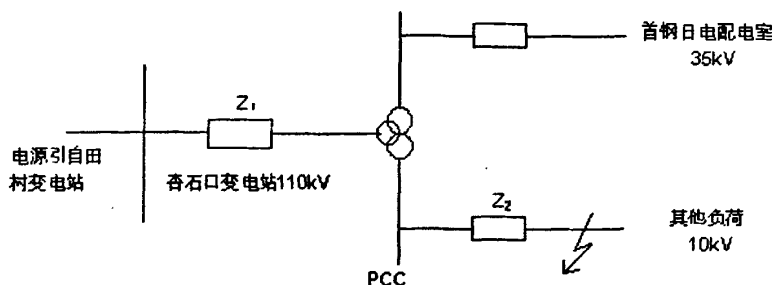


图 4-1 电压分割原理

图中, Z_1 为开环网络电源阻抗, Z_2 为负荷公共连接(PCC)点与三相短路故障点(包括故障阻抗)之间的阻抗值, 设电源电压为 1.0, 忽略负荷电流, 则故障点与 PCC 点之间的电压暂降幅值为:

$$U_{\text{seg}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \text{式 4-1}$$

实际工程计算中, 如发生不对称故障, 还要确定系统的正、负及零序网络等值电路图和故障阻抗才能应用式 4-1 来计算暂降的幅值。暂降的持续时间就是保护设备允许故障电流流过的时间。电压暂降发生的频繁程度也是电压暂降的重要特征。

电力系统中发生的故障都是随机事件, 运行部门可将电力元件分为若干组(配电变压器、输电线路等), 再根据运行记录得到这些元件的故障率, 采用故障率来预估电压暂降的频率。具体做法是: 首先假定线路的某部分发生故障, 计算这一故障所导致的电压暂降, 再根据统计的故障率得到暂降的发生频率; 在系统的各部分及元件上重复类似的计算, 即可得到系统中不同地点、不同程度的电压暂降发生频率。

基于故障点法, 利用历史数据和先进的计算机图形处理功能, 对电压暂降进行了图形化描述, 可用计算电压暂降的软件包可由用户设定不同的故障位置, 可输出系统的电压暂降幅值, 并可采用图表的形式输出。还可基于故障点法分析电压暂降的频率和严重性, 并对可采用的技术措施进行了经济性比较, 为用户选择合理的补偿装置提供了理论依据。对于详细的电压暂降分析, 可以得到了电压暂降的幅值、持续时间、频率等特征量, 并分析电压暂降的相角跳变及不对称故障下的电压暂降, 绘出重要负荷的电压暂降敏感区域图。

故障点法已成为广为接受的电压暂降分析方法, 该方法便于编制程序, 借助计

算机对电压暂降进行分析计算,在故障点选取数足够多的情况下可取得较为精确的预估结果。该方法还依赖于系统参数和所提供的故障记录,如电力部门能够提供电网各线路每公里的故障次数及故障类型,即可直接用于电压暂降分析,但实际上,往往仅能得到每个电压等级每公里的平均故障次数(且不包括临时性故障),过流保护的重合闸次数往往也没有记录,这些因素影响了随机预估输出结果的准确度。

4.2.2 临界距离法

临界距离法是一种简单快速的电压暂降预估方法;该方法计算给定电压暂降幅值的故障点位置,目标是发现系统中何处故障会使电压下降到给定幅值以下。任何一种比该处故障更接近负荷母线的故障都将引起一次更深度的电压暂降,因此低于给定值的电压暂降次数仅是比该特定位置更靠近负荷母线的短路故障次数^[1, 29]。

实际工程中,用户所关心的不是暂降的幅值,而是设备是否会跳闸。假设图 4-1 所示的 PCC 点有一临界电压,该点电压比临界电压低时设备会跳闸,比临界电压高时设备不会跳闸。对于给定的 PCC 点,考虑到所有的故障点,有式(4-2)成立

$$\left| \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right| < U_{crit} \quad \text{式 4-2}$$

式中:

$Z_2 = l \times z$, z 为线路每公里阻抗值, l 为 PCC 点与故障点间的线路长度;

U_{crit} 为临界电压。

进一步假设 Z_1 与 Z_2 的比值相等,则临界距离 l_{crit} 为:

$$l_{crit} = \frac{Z_1}{z} \times \frac{U_{crit}}{1 - U_{crit}} \quad \text{式 4-3}$$

估算特定负荷位置的电压暂降次数需对每个 PCC 点计算临界距离该临界距离以内的故障的持续时间大于某一特定值时,会导致敏感设备跳闸。将估计的临界距离以内的故障次数相加,即可得到预计的电压暂降次数。式(4-3)还可用于分析不对称短路故障的临界距离和电压暂降域。

采用临界距离法对某工业负荷所经历的电压暂降进行分析计算,可得到各种故障条件下的设备终端的电压暂降特征值(幅值、持续时间、相角跳变及频率),可提出了设备在系统存在电压暂降时应承受的电压阈值。并可分析结果以电压暂降图的形式输出,同时使用临界距离法分析变电站的电压暂降域,比较两种方法所得的电压暂降域后,认为临界距离法输入的网络参数虽少,但所得计算结果表现出与故障点法的计算结果较好的一致性。临界距离法忽略了负荷电流并假定故障前节点电压的标么值为 1.0,这样可以减小计算量,适用在实际工程中估计系统的电压暂降

次数。因此临界距离法适用于系统参数不完整、精度要求不高的情况，可对系统的电压暂降情况作出初步评价。

4.3 电压暂降的电磁暂态分析

实际上系统中发生短路故障的瞬间，不同的负荷具有不同的负荷特性，电磁暂态响应也不同，上述两种随机预估方法忽略了暂态过程，这种处理方法对某些负荷将不能得到合理的计算结果，且这两种方法只针对系统故障导致的电压暂降，不适合于分析感应电动机负荷启动或再加速、变压器投切等原因造成的电压暂降，为更全面、更合理地分析计算电力系统的电压暂降，应建立合理的负荷模型和采用电磁暂态分析研究手段^[30]。

电压暂降多用幅值和持续时间这两个特征来描述，但这两个特征不足以描述各种设备所经历的电压暂降过程，因此可以采用电磁暂态仿真计算作为辅助手段来分析电压暂降过程中的相角跳变，以了解电压暂降的全时域过程，观察电压暂降过程中相角跳变导致的波形畸变现象。采用电磁暂态计算程序(EMTP)分析线路故障导致的电压暂降、变压器激磁产生的电压暂降和感应电动机启动时产生的电压暂降，采用小波变换从波形图中提取特征量来辨识产生电压暂降的原因。

对于带有感应电动机和调速电机的系统在故障中和故障后的电压暂降情况，利用 EMTP 分析感应电动机、调速电机在系统发生对称和不对称电压暂降时，各节点的电压暂降波形。当配电网存在三相故障时，用户终端的电动机负荷对电压暂降过程有重要影响，电动机在电压暂降的起始阶段减小了其下降的严重性；但故障清除后电动机再加速所需的大电流又会阻止电压的立即恢复。不对称电压暂降的情况与此类似，但没有三相短路时那么严重。对采用固态开关的负荷切换过程，在故障发生后的 1/4 周期内，将电动机负荷切换到备用馈电线上，虽然切换过程中对电动机的转速和力矩产生了短时的暂态扰动，但不会影响电动机的平稳运行。

工业负荷中的大型感应电动机使得故障后的电压暂降成为导致某些电动机电压保护跳闸的重要原因，对于实际系统的电压暂降，要找到引起电压暂降的故障类型与故障区域。考虑到电力系统负荷成分的复杂性，分析电压暂降过程中各种负荷的行为及各种设备对电压暂降过程的影响是非常有实用价值的。

4.4 电压凹陷域的计算

当系统发生故障引起电压暂降，使所关心的敏感负荷不能正常工作的各故障点所在区域称为电压凹陷域。换言之，在凹陷域内任一点短路都会使得给定用户设备

的电压低于其暂降承受值，而造成非正常工作。当用户已知自身设备的敏感曲线并决定接入电网某 PCC 处，可先确定某一运行方式下该处是否满足设备正常工作率所要求的凹陷域。反之，若已知某 PCC 不同暂降幅值的凹陷域，就可确定其上设备的电压暂降敏感范围。因此，设备对电压暂降的敏感度不同，其凹陷域不同；设备的电压凹陷域反映了设备受电网故障影响的范围。当系统接线及阻抗一致，凹陷域越大，设备对暂降的敏感度越高，因暂降造成非正常工作可能性越大。另外，配电网中用户的电压暂降由凹陷域内输电侧和配电侧的故障决定^[1]。

对于杏石口变电站，采用临界距离法计算其发生三相短路故障时的电压凹陷域如图 4-2 所示。将敏感负荷首钢日电电子有限公司所在的母线的所有馈电线上的与设定的临界电压对应的各临界距离点连接起来，得到与所设定临界电压相对应的凹陷域，图中给出了临界电压分别是额定电压的 30%、50% 和 80% 时所对应的凹陷域。

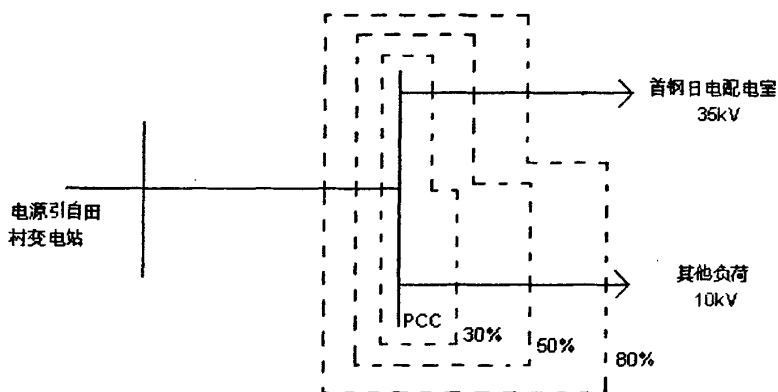


图 4-2 电压凹陷域示意图

影响设备电压凹陷域的因素主要有：

(1) 故障类型不同，引起用户设备所接 PCC 处的电压跌落值不一样，其电压凹陷域也有异。

(2) 不同的运行方式，系统的短路容量不一样，短路引起的电压暂降值也不一样。因而其电压凹陷域不同。

(3) 终端用户的电压暂降特征与用户变压器的接线方式，以及设备电源接入方式(如单相电压接入还是线电压接入)有关。同一变压器供电，如采用 Δ/Y_0 接线，单相负载，最低电压值为 0.58；两相负载且接在 a-c 间，则为 0.33。因此在分析设备对暂降的敏感度时，还要结合变压器接线方式和设备电源接入方式的影响。

从以上对电压暂降凹陷域的分析可知：

(1) 凹陷域可作为在故障条件下敏感设备是否发生暂降事件的判断条件和用户选厂择址的依据，即选择暂降幅值为设备暂降承受值的尽可能小范围的凹陷域的

PCC 处接入，以减少电压暂降对自身造成的影响和损失；

(2) 凹陷域可作为辅助手段帮助系统调度员在满足电网安全的前提下选择合适运行方式防御用户发生暂降事件，减少用户投诉；即选择有敏感设备的 PCC 上凹陷域最小的运行方式；

(3) 凹陷域可作为电网设计和工厂内配电系统设计的依据之一；

(4) 可利用凹陷域内故障发生的历史记录来评估用户设备年电压暂降期望次数和年电压暂降经济损失及其它指标。

4.5 本章小结

本章分析了杏石口变电站发生的几次电压暂降问题，比较了三种电压暂降计算方法，对电压凹陷域进行了分析，得到如下结论：

(1) 故障点法和临界距离法都忽略了负荷电流的影响，估算 PCC 点电压暂降的分压原理假设电压暂降不衰减地从高电压等级公共连接点向低电压等级公共连接点传播，实际上这种近似处理对于不同负荷不可一概而论，目前采用随机估算法得到的电压暂降还不是实际系统的准确结果。因此应考虑不同性质负荷电流的影响，采用合理的电路模型来描述负荷，以期得到更为准确的结果。

(2) 随着用户负荷中敏感设备的增加，供电部门为用户提供丰富的电力系统电压暂降信息是必要的。除提供每个电力供应点的电压暂降特征、确定系统中严重电压暂降发生的区域、确定敏感用户、找出敏感用户所能承受的电压暂降幅值以外，还应包括：分析电压暂降所造成的经济损失；对可能采取的技术改造方案进行技术经济性分析，为供电部门和用户提供改造依据。

(3) 随着新型电力电子设备在电力系统中的广泛应用，电压暂降已日益成为电力设备安全运行的一大隐患，电力部门有责任为用户提供本系统电压暂降的详细信息，用户应根据实际情况选购新设备，或者为保证设备的安全运行采取必要的技术措施；而设备制造行业也应重视设备对电压暂降的敏感程度，及提供相应的技术参数描述设备对电压暂降的免疫能力。总之，解决电压暂降所带来问题的关键在于电力部门、电力用户和设备制造商的密切合作。

第五章 杏石口电压暂降问题的治理

对杏石口变电站电压暂降分析的最终目的是治理电压暂降，降低电压暂降对首钢日电电子有限公司生产设备的影响，改善供电电能质量状况。不同原因引起的电压暂降有不同的特点，针对不同原因引起的电压暂降应采取不同的治理措施。

5.1 电压暂降的抑制技术

对电压暂降问题，从产生机理考虑，可以采取相应的措施，从而减少电压暂降造成的损失。可以从以下几个方面着手：

（1）减少故障数目，缩短故障切除时间。

减少系统短路故障数目是提高供电质量最显而易见的方法，然而，真正实施起来可能代价很高，电力企业往往会在经济和技术可行的基础上确定合理的方案。缩短故障清除时间虽然不能降低电压暂降发生的频率，但却能明显的减少电压暂降的深度及持续时间，从而减少电压暂降造成的损失；使用限流熔断器或者使用固态断路器以及缩短继电保护动作时间等措施可以减少故障清除时间。

（2）改变系统设计，使得短路故障发生时用户设备处的电压扰动最小。

通过供电方式的改变，可以有效降低电压暂降问题的严重性。但采取这类方法时，电压质量的改善是通过增加更多的线路及配电设备达到的，因而，一般都需要经过投资与效益的权衡，适用于对供电质量要求非常高的工业和商业用户。

（3）提高用电设备对电能质量问题的抵御能力。

提高用电设备的抗扰能力，是解决由于电压暂降引起设备跳闸的最有效的方法。但是，用户通常是在设备安装后才发现设备对电压质量问题的抵御能力不够，而要求设备制造厂家重新设计、制造满足要求的设备可能需要很长的周期以至于不可能实现。其就目前的状况和水平来看，提高设备的电压暂降抵御能力还有一定的局限性。因此，只对于部分大型设备，用户才有可能依据现场电能质量的水平，提出电能质量扰动抵御能力的要求。

（4）在供电网络与用户设备间加装缓解设备。

在大多数情况下，电力用户很难对配电网络或用电设备本身有所作为。他们所能开展的工作只能是在供电系统与用电设备的交界处安装缓解装置。因此，应用最

普遍的缓解电压瞬变的方法，是在供电系统与用电设备的接口处安装附加设备：采用不间断电源(UPS)是抑制电压暂降、解决供电中断的有效方法。但 UPS 存在价格昂贵、储能设备维护量大等缺点。

动态电压调节器(Dynamic Voltage Regulator DVR)主要由储能单元、DC/AC 逆变器模块、连接变压器等部分组成。由于 DVR 装置只补偿系统电压中因干扰而缺失的部分，无需承担负荷所需的全部电压，因此与 UPS 相比容量可以更小，通常只需负荷容量的 $1/5 \sim 1/3$ ，造价可以大大降低。DVR 被看作是减轻电压瞬变影响的有利措施。决定 DVR 成本的是补偿电压最大值和负荷电流值。据统计，在最大补偿值为正常电压的 30% 时(即 DVR 的额定容量是负荷功率的 30%)，大约可消除 95% 以上的扰动事件^[31]。

5.2 杏石口变电站应采取的措施

对于杏石口变电站供电系统，可以通过加强线路巡视，及时修剪线路走廊两旁的树枝来防止通过树木造成短路；在变电设备周围加设护栏防止动物造成的短路；定期清洗绝缘子防止污闪；减小接地电阻；用电缆代替架空线；改进电网结构；建立优质电力园区等措施减少故障发生次数。

由于暂降前电压影响敏感设备的敏感度，因此可以通过调节配电变压器的分接头等措施使电压保持在设备安全电压范围内的较高水平。

另外，杏石口变电站应对电能质量进行准确监测，以便为确定设备敏感度和解决设备敏感度问题提供资料。

5.3 首钢日电应采取的措施

对于首钢日电电子有限公司，首先应该在选择设备时考虑设备的敏感度问题，并在设备订货合同上向制造商明确有关的技术要求，使设备具有某种程度的对电压、暂降的抗干扰能力。

如有可能，可以调整设备内部某些环节参数来加强设备的抵抗电压暂降的能力，例如某企业热压加工厂由于每次电压暂降，使调速传动装置跳闸，浇铸的聚酯粘住压模和辊子，停止生产达四个小时后才能恢复，蒙受很大的损失，后来在电力部门帮助下，在该厂的电源进线处安装了电压监测器，传动工程师根据记录下来的波形数据，调整了交流调速传动控制的整定值，降低了生产线对电压暂降的敏感度，使频繁出现的较轻或很短时间的电压暂降发生时，传动设备不跳闸。

另外，首钢日电电子有限公司在资金允许的条件下，可配备各种补偿装置，如

不间断电源(UPS)、动态电压恢复器(DVR)、超导储能设备(SMES)等,利用固态切换开关(SSTS)在不同电源之间切换、采用铁磁谐振变压器,磁合成器等等。由于SMES价格太昂贵,因此距实用阶段还有很大的距离;UPS主要用于提高信息处理系统的供电可靠性,其容量一般在1kW至1MW之间,很难解决综合性敏感负荷的供电质量问题,并且售价昂贵;SSTS装置用于对电源电压波动非常敏感的用户供电上,当供电电源波动过大时,在1/4周波内即可实现电源转换,但此方法需要有几个相互独立的电源向敏感用户供电,当这些电源同时发生电压暂降时,利用该方法就无法保证对敏感用户的供电质量;DVR则是目前保证对敏感负荷供电质量非常有效的串联补偿装置,该装置能在毫秒级时间内将电压暂降补偿至正常值,是抑制动态电压干扰的有效补偿装置,在消除电压暂降、提高大型综合性敏感工业负荷的供电质量方面而有显著的效果。

另外,首钢日电电子有限公司应加强对设备的维护和管理,使其处于良好状态,提高管理水平和人员素质,减少由于本身的用电设备故障或使用不当造成故障而带来的影响。

5.4 设备制造商应采取的措施

对于首钢日电电子有限公司设备的制造商,应该采取改善产品设计等技术措施来降低设备对电压暂降的敏感度。比如,在PC机内部的直流电源侧加装2个680 μ F的大容量电容(直径和高度为35mm和45mm),这种方案可使PC机躲过深度在30%额定电压以上、持续时间在1s以内的电压暂降。而实际测量及调查表明,大部分的电压暂降在此范围内,同时PC机箱内部也有空间来安装这2个附加的电容。

另外,设备的制造部门提供的产品技术说明中应该有设备敏感曲线,并标明曲线的适用条件,为解决或减缓敏感度问题提供最直接的技术资料。因为同一种设备对电压暂降的敏感度还可能和用户的要求有关,因此设备制造厂商应根据用户需要调整设备的控制参数或整定值等,使设备的运行在满足用户需要的前提下,尽可能降低对一定幅值和持续时间的电压暂降的敏感度。

另外,应学习国外的一些方法和经验,电力部门 and 用户一道配合进行调查研究,电力部门测量记录电压暂降发生的准确时间以及电压暂降的深度和持续时间,用户则记录设备异常运行的准确时间,从而确定各种设备对电压暂降的敏感度。这不仅可以为分析电压暂降的起因(雷击、闪络、树木放电等)和减少事故次数提供依据,而且为用户及设备制造商提供设备的免疫能力提供资料,进而有助于杏石口变电站电压暂降问题的解决。

5.5 小结

电压暂降已成为威胁现代新型设备正常工作的重要因素，其产生原因涉及电力系统和用户两方面，所造成的危害与设备敏感度以及负荷性质(用户的要求)密切相关，用户当然更偏爱对电压暂降承受能力更强的设备，而制造商却对使他们的设备具有更严格的抗干扰水平不太热心，甚至有些制造商出于成本和竞争的原因而提供对电压暂降耐受能力尽可能低的产品，从而使用户需要另外的辅助设备以使主设备能够承受频繁发生的电压暂降。因此，对于杏石口变电站电压暂降问题的解决涉及电力部门、用户和设备制造商，需要三方协力合作，共同解决。总之，对电压暂降的治理要以电压暂降监测分析为基础，考虑系统以及用户具体情况，以治理效果、治理成本为评估标准，由供电企业和用户配合完成，才有可能把电压暂降造成的危害降低到最小。

第六章 结论和展望

6.1 结论

通过对杏石口变电站电压暂降问题的研究，得到如下结论：

(1) 分析了电压暂降的基本特性，电压暂降是由短时电流增加，特别是远离电压暂降测量处的短时电流增加引起的短时电压均方根值的降低。导致电压暂降现象的过流原因一般是电机启动、变压器的投切以及发生短路故障等。

(2) 根据杏石口变电站发生电压暂降时的故障电压波形和各种不同原因引起的电压暂降的特点，分析了杏石口变电站两次电压暂降所引起的原因；电压暂降产生原因大体分为系统、变压器和负荷三类。系统侧为短路故障、开关操作等；变压器指的是变压器激磁涌流；负荷侧主要是大容量感应电动机的启动、大容量负荷投入等。

(3) 分析比较了电压暂降的分析计算方法，有实测统计法，随机预估法，其中随机预估法又有故障点法和临界距离法两种，并采用临界距离法分析了杏石口变电站三相短路故障时的电压凹陷域；

(4) 对于杏石口变电站电压暂降对首钢日电电子有限公司生产活动造成的影响问题，只有通过电力部门和用户的共同努力，电力部门测量记录电压暂降发生的准确时间以及电压暂降的深度和持续时间，用户则记录设备异常运行的准确时间，针对不同原因引起的电压暂降的不同特点，提出了电压暂降应采取的不同治理措施。

6.2 展望

新型电力电子设备在电力系统中的广泛应用，电压暂降已日益成为电力设备安全运行的一大隐患，电力部门有责任为用户提供本系统电压暂降的详细信息，用户应根据实际情况选购新设备，或者为保证设备的安全运行采取必要的技术措施；而设备制造行业也应重视设备对电压暂降的敏感程度，及提供相应的技术参数描述设备对电压暂降的免疫能力。

电力工业不断的发展，用户需求不断增加，对电能质量更加重视。针对杏石口

110kV 变电站有关电压暂降问题，详细讨论分析了电压暂降对其重要负荷首钢日电电子有限公司生产活动造成的严重影响，但是，将提出的减少电压暂降事故发生和降低电压暂降对用户影响的有效措施如何落到实处，还有待在理论和实践结合中不断探索。

参考文献

- [1]肖湘宁. 电能质量分析与控制. 中国电力出版社. 2004 年 6 月
- [2]林海雪. 现代电能质量的基本问题. 电网技术, 2001, 25(10) :5--12
- [3]肖遥, 李澎森. 供电系统的电压凹陷. 电网技术, 2001, 25 (1) : 73--77
- [4]Cheryl Marinello Warren. The Effect of Reduction Momentray Outages onDistribution Reliability Indices. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.7, NO. 3, July 1992
- [5]R. E. Brown, S. Gupta, R. D. Christie, S. S. Venkata, R. Fletcher. DistributionSystem Reliability Assessment Momentary Interruptions and Storms. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997
- [6]刘玲群. 电压凹陷和短时间断及其对配电系统. 可靠性影响的分析: (硕士学位论文) 华北电力大学(北京), 2001 年, 北京.
- [7]奚瑚. 电能品质内涵的进一步扩展——华虹 NEC 电子有限公司供电系统改造综述, 华东电力, 2002 年第 7 期:6—10
- [8]M. H. J. Bollen. Reliability Analysis of Industrial Power System Taking into Account Voltage Sags. IEEE 1993, IEEE Industry application society Annual Meeting Proceeding of the 1993, Conference Record of the 1993 IEEE, 2-8 Oct., vol. 2, 1993 Page (s):1461-1468
- [9] D. L. Brooks, R. C. Dugan, Marek Wacławski, Ashok Sundaram. Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, NO. 1 January 1998
- [10]Sang-Yun Yun, Jung-Hwan Oh. An Enhanced Method for Assessing the Effect of Voltage Sag in Power Distribution System, Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE, Volume: 1, 18-22 July 1999, vol.1, Pages: 518-523
- [11]倪伟. 计及电压骤降的配网可靠性程序. (硕士学位论文). 华北电力大学(北京). 2004 年.
- [12]Roy Billinton, Satish Jonnavithula. A Test System For Teaching Overall Power System Reliability Assessment. IEEE Transaction on Power System. Vol. 11, No. 4, November 1996:1670-1676
- [13]陈志业, 李鹏. 电能质量研究——电压暂降及其治理

[14]张鹏, 郭永基. 电压骤降的可靠性评估新方法. 电力系统自动化, 2002 年 4 月:20—24

[15] Thallam, R. S. Heydt, G. T. Power acceptability and voltage sag indices in the three phase sense, Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, Volume : 2, 16-20 July, 2000, Page (s):905910

[16]肖湘宁, 徐永海, 刘连光. 供电系统电能质量. 华北电力大学(北京). 2000 年 8 月

[17] Heydt, CT. ; Jewell, W. T. Pitfalls of electric power quality indices, Power Delivery, IEEE Transactions on, 1998, 13 (2):570578

[18]Kyei, J, Ayyanar, R. The design of power acceptability curves, Power Delivery, IEEE Transactions, 2002, 17 (3) :828833

[19]Heydt, G. T., Ayyanar, R., Thallam, R. Power acceptability, Power Engineering Review, IEEE, 2001, 21(9):12-15

[20]杨晓东, 栗然, 吕鹏飞, 卢锦玲. 配电网可靠性评估算法. 电力环境保护, 2002 年 12 月, 第 18 卷, 第 4 期:33-36 页.

[21]别朝红, 王锡凡. 蒙特卡罗法在评估电力系统可靠性中的应用. 电力系统自动化, 1997 年 6 月, 第 21 卷第 6 期:68-75 页.

[22]Carl Becker, William Braun Jr. Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags(Dips)in Revision to IEEE Std 493, the Gold Book, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No.3, May/June 1994 Pages):808-812

[23]索智勇. 地区电力网的可靠性评估与分析. 广东工业大学, 2003 年, 11—15.

[24]陈文高. 配电系统可靠性实用基础. 中国电力出版社. 1998 年 6 月

[25]曹国臣, 宋家骥, 柳悼. 66kV 及以下电网短路计算的新方法. 中国电机工程学报. 第 17 卷第 3 期 1997 年 5 月:207210.

[26]车仁飞, 李仁俊, 李玉忠. 基于叠加原理的配电网短路电流计算. 电力系统自动化. Dec. 25, 2001: 22-25.

[27]张红 一种辐射型配电网短路电流实用算法. 电网技术. 25 卷 12 期 2001 年 12 月:38-41.

[28]Mello J C O, Pereira M V F, Silva A M L D. Evaluation of Reliability Worth in Composite Systems Based on Pseudo-Sequential Monte Carlo Simulation. IEEE Trans on PWRs, 1994, 9 (3):1318-1326.

[29]Khan M E, Billinton R. A Hybrid Model for Quantifying Different Operating States of Composite Power Systems. IEEE Trans on PWRs, 1992, 7(1):187-193.

[30]刘亚成, 丁明, 宋云亭. 概率短路计算的蒙特卡罗仿真. 合肥工业大学学报(自然科学版)第 22 卷第 1 期, 1999 年 2 月:66—71 页.

[31]Math H. J. Bollen. Understanding Power Quality Problem, Voltage Sags and Interruptions. IEEE PRESS 2000.

致 谢

衷心感谢我的导师刘连光教授对我的精心指导，本论文是在刘老师的悉心指导和帮助下完成的。刘教授严谨治学、求真务实的工作作风，锐意进取、积极乐观的工作态度都使我受益匪浅。三年多的研究生学习期间，在刘老师的关怀和指导下，我各方面的能力得到了进一步提高，在此对恩师深表感激！同时也感谢北京电力公司延庆供电公司祝秀山高级工程师对我的论文的指导和工作的帮助。

同时，也要感谢我妻子和儿子在我的论文工作过程中所给予的支持和帮助，在此表示衷心感谢。

在学期间发表的学术论文和参加科研情况

发表的学术论文

- 1、程宏，龙大伟，浅析短路故障引起的电压暂降与短时中断对用电客户的影响，2007年中国电机工程学会年会，2007，11