

DIANNENG ZHILIANG
FENXI FANGFA

电能质量

分析方法

刘军成 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DIANNENG ZHILIANG
FENXI FANGFA

电能质量分析方法

ISBN 978-7-5123-2164-9



9 787512 321649 >

上架建议：电力工程/供用电

定价：39.00 元

DIANNENG ZHILIANG
FENXI FANGFA

电能质量 分析方法

刘军成 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

该书以实际工程案例为线索,从工程实用的角度介绍了电能质量问题的分析方法及其步骤。全书共分九章:第一章介绍了电能质量问题及其发展动态;第二章详细介绍了非线性负荷及其用电特性;第三章介绍了分析电能质量干扰响应特性的一种工程方法——等效冲击电流分析法;第四章介绍了贯穿源特性与系统响应特性的电能质量监测及其数据评估方法;第五章介绍了电能质量问题分析的基本步骤及难点;在上述几章介绍的基础上,第六、七、八章分别以不同的实际工程为背景,介绍了非线性负荷接入电网的危害性评估及对策,电能质量事故分析及其控制方案设计以及暂态电能质量控制等内容;第九章分析了瞬态电能质量及其控制。

本书可供从事电能质量分析、研究、工程设计及实施等方面的专业技术人员和相关管理人员参考,也可作为相关专业本科生、研究生的辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

电能质量分析方法/刘军成著. —北京:中国电力出版社, 2011. 10

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2164 - 9

I. ①电… II. ①刘… III. ①电能—质量分析—分析方法
IV. ①TM60

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 202927 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 12 月第一版 2011 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12 印张 273 千字

印数 0001—3000 册 定价 39.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

序

在电力系统中，理想的电压波形是三相对称、周期性的正弦波，其频率和有效值都等于相应的额定值。与这一理想波形的任何差别都可能在不同程度上影响到电力用户和电力系统本身的正常运行，乃至发生事故。为了定性和定量地表征这些差别，出现了电压和频率的偏差、三相不平衡度、谐波和次谐波、电压暂升和暂降、短时中断以及波形凹陷等电能质量的分类和指标。

长期以来，电能质量的恶化和污染主要来源于用户，而输电和供电环节是污染的传播和扩散途径，对其严重程度产生影响。近年来，随着大规模风力发电和太阳能发电的并网以及分布式发电的出现和发展，电能质量问题呈现出新的特点，电力生产环节也成为不可忽视的污染源，需要对其进行检测和控制。

电能质量问题就其污染源本身来看，属于低频传导干扰；但是从电力系统公共连接点来看，它又表现为商品所具有的基本特点即“质量”这一属性。因此，对电能质量如何检测、分析、评估和控制是一个与技术经济密切相关的问题。在工程实践中采取何种方式来分析电能质量，也是一个值得深入思考的问题。

本书的编写侧重于实践性和应用性，其主要内容来自作者长期的工程实践经验，具有良好的阅读性与实用性。它既适合于从事电能质量技术工作的一线人员，也适合于从事电能质量监管工作的管理人员阅读。

本书介绍了电能质量问题的现状及其发展动态；详细阐述了电能质量干扰的源特性，并介绍了一种分析电能质量干扰响应特性的工程方法——等效冲击电流分析法，阐述了电能质量监测数据的分析评估方法。书中结合大量的实际工程案例介绍了电能质量工程的实施步骤、技术难点，非线性负荷接入电网的分析评估方法，事故分析方法，电能质量控制方案论证设计等内容；另外还介绍了瞬态电能质量问题及其控制方法。

该书对从事电能质量实际工作的一线技术人员、管理人员以及高等学校的本科生和研究生来说，是一本很好的参考书。

夏道止

2011年5月

前言

自从电力工业出现以来，电能质量问题就一直存在。随着工业化进程及互联电力系统的不断发展，目前的电能问题比以往任何时候都更加突出。工业生产过程的信息化、自动化、精细化，电力系统的智能化，家用及办公电气的人性化等都与电能质量的有效控制存在着密切的关系。

作为在生产的同时就被消耗的特殊商品，电能质量的控制过程与常规意义的有形产品存在着较大的差别。但是不管怎样，电能生产存在生产环节、流通环节，而且也存在付费使用环节，因此，已经具备了商品所应有的基本特征。也正因为如此，电能作为商品的概念逐步被大多数国家所接受。而且随着电力市场化的逐步深入，这种认识将会更加深入。基于这种认识，电能质量这个名词逐步得到应用。

电能的质量有其系列衡量指标，这点与传统商品没有区别。但是，这些指标的合格与否需要进行实时检测与评估，因为下一时刻的质量可能与这一时刻的质量完全不同，而且引起的后果也可能完全不一样，这点与传统的商品存在本质的区别。同时，不合格的电能质量需要供用电双方共同采取措施进行控制，这点也是电能区别于常规产品的另外一个原因。可见，电能质量的控制过程是有其自身特点的。

目前，对电能质量的监测、控制手段多有论述，主要面对专业的技术人员，偏重理论性的叙述。作为长期从事电能质量检测、控制实际工程的技术人员，笔者通过自身体会及与广大客户的交流，感觉到市场缺少可以直接应用到实际工程的、经验性简便性较强的电能质量分析方法方面的书籍。笔者基于 20 余年从事电能质量检测、控制、分析评估的实践经验，概括了作者面对实际电能质量问题时所采取的分析方法，希望本书的出版能够对电能质量一线的技术、管理工作人员有所助益。

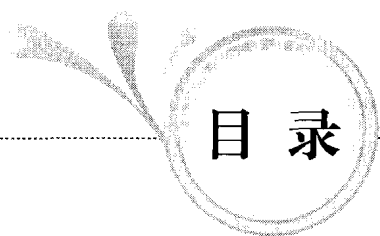
本书第一章简单分析回顾了目前电能质量行业发展的基本动态；其后各章贯穿了电能质量问题由“源”特性到“传播”特性、检测评估方法、控制方法这样一个线索，涉及稳态、暂态、瞬态电能质量相关内容。第二章分析了非线性负荷的用电特性及其相关敏感负荷的用电特性，便于读者把握电能质量问题与负荷之间的相互联系。第三章介绍了一种电能质量传播特性的等效冲击电流分析法，该方法在工程实践中比较实用。第四章介绍了电能质量监测及其数据的分析评估方法，论述了海量数据评估过程中应注意的问题。第五章在介绍分析电能质量问题基本步骤的基础上，结合目前电能质量领域的现状，着重分析了在具体分析过程中遇到的难点问题，起到抛砖引玉的作用。第六章结合实际的电气化铁道负荷工程，介绍了非线性负荷接入电网的评估过程及其对应的稳态电能质量问题的主要解决措施。第七章结合具体事故案例介绍了电能质量事故的分析方法、无源滤波器的设计步骤及其过程。第八章结合实际的高新技术企业负荷特点，介绍了暂态电能质量控制措施的论证过程及其控制方案。第九章介绍了低压供电系统瞬态电能质

量及其控制方法。

本书所涉及的主要内容均来自于作者的工作实践。个别经验性公式是作者日常交流过程中所得到的，但其出处并未考证，因此，在阅读过程中请读者注意批判性吸收。

本书承蒙西安交通大学夏道止教授通篇审稿并作序，并得到了李世林研究员的大力协助。在此深表感谢！

由于作者水平有限，书中缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。



目录

序 前言

第一章 电能质量问题及其发展动态	1
第一节 电能质量问题	1
第二节 电能质量问题发展动态	6
第二章 非线性负荷及其用电特性	18
第一节 非线性负荷	18
第二节 交流电弧炉	19
第三节 直流电弧炉	21
第四节 中频感应炉	22
第五节 电石炉	25
第六节 铁合金电炉	25
第七节 电气化铁道负荷	27
第八节 电化工业大型整流负荷	31
第九节 节能电器及变频设备	34
第十节 敏感负荷及其用电特性	37
第三章 等效冲击电流分析法	42
第一节 供电网络谐波固有特性分析	42
第二节 干扰源传播特性分析	49
第三节 电能质量等效冲击电流法的统一建模思路	55
第四章 电能质量监测及其数据评估方法	56
第一节 电能质量指标的监测方法	56
第二节 电能质量监测系统的选择	66
第三节 电能质量监测数据的评估方法	72
第五章 电能质量问题分析的基本步骤及难点	81
第一节 电能质量问题分析的基本步骤	81
第二节 电能质量指标危害的量化评估	82
第三节 电能质量控制的实时响应特性	88
第六章 非线性负荷接入电网的危害性评估及对策	93
第一节 背景及原始资料	93
第二节 电气化铁路负荷的电能质量危害定性分析	96

第三节	电气化机车运行产生的谐波污染定量分析	98
第四节	三相不平衡度危害分析	112
第五节	电能质量问题的主要对策	114
第七章	电能质量事故分析及其控制方案设计	130
第一节	事故及其分析	130
第二节	110kV 控制目标下滤波器方案的论证	141
第三节	10kV 控制目标下滤波器方案	147
第四节	滤波装置测量保护要求	150
第五节	主设备原理接线及平面布置	151
第八章	暂态电能质量控制	154
第一节	某芯片封装企业电压暂降抑制方案论证分析	154
第二节	某化工企业暂态电能质量抑制方案	160
第九章	瞬态电能质量及其控制	165
第一节	瞬态电能质量问题	165
第二节	瞬态电能质量的危害	167
第三节	瞬态电能质量环境分析	169
第四节	瞬态电能质量控制	177

电能质量问题及其发展动态

电能质量问题是工业自动化水平发展到一定程度必然会出现的问题；反过来，工业信息化程度的提高又会带来更加复杂的新的电能质量现象。目前广泛热议的智能电网概念、节能技术、清洁能源发展等均涉及电能质量技术经济思考，因为这些技术进步必将涉及电力能源的多次转换，转换即存在效率、重新加工的问题，当然也存在转换本身引起的能源“污染”。因此，面对纷繁复杂的负荷用电特性，要求完全净化的电能供应是不现实的，应该在技术、经济双重制约下寻求一种平衡。

第一节 电能质量问题

一、电能质量及其主要技术指标

目前，电能质量术语还没有一个被普遍接受的定义。一般可以这样认为：电能质量是与电力系统安全经济运行相关的、能够对用户正常生产工艺过程及产品质量产生影响的电力供应的综合技术指标描述，它涉及电压电流波形形状、幅值及其频率三大基本要素。电能质量指标的下降是继发电环节以后，理想电能 在输配供用这一延续环节中被“污染”造成的，相当于在理想电能载体上所依附的其他“坏”信息，其主要影响因素包括电网结构、电气设备电磁兼容抗扰度水平、继电保护设置、环境气候、供电设备用电特性、负荷用电特性、系统管理维护等。

关于电能质量，IEC 以前主要以电磁兼容的低频传导干扰（小于 9kHz）描述（即 IEC TC77 的 IEC 61000 系列标准），目前，电能质量议题划归为 IEC TC8（全称为 systems aspects for electrical energy supply）。

主要的电磁兼容低频传导现象见表 1-1，其稳态及非稳态情况下的特征指标见表 1-2。EMC 范畴中所涉及的众多低频传导干扰指标限值主要从发射水平、规划水平、兼容水平三个角度给出，一般情况下发射水平 \leq 规划水平 \leq 兼容水平。

表 1-1 IEC 低频传导现象^[1]

序号	现 象	序号	现 象	序号	现 象
1	谐波、间谐波	4	电压暂降、短时中断	7	低频感应电压
2	电力传输线传输的信号电压	5	电压不平衡度	8	直流分量
3	电压波动	6	频率变化		



表 1-2

低频传导现象的特征指标^[1]

序号	稳态描述指标	非稳态描述指标	序号	稳态描述指标	非稳态描述指标
1	幅值	上升率	5	源阻抗	频率
2	频率	幅值	6	波形凹痕深度	发生率
3	频谱	持续时间	7	波形凹痕面积	能量
4	调制	频谱	8	—	源阻抗

美国电气电子工程师协会 IEEE 采用“power quality”这一术语描述电能质量，定义为：合格电能质量的概念是指给敏感设备提供的电力和设备的接地系统是均适合于该设备正常工作的^[2]。IEEE Std 1159—2009^[3]指出：电能质量是描述电力系统给定点、给定时间由电磁现象引起的电压电流特征。该标准描述的电能质量现象描述见表 1-3。

2002 年 IEEE 成立了专门的电能质量分委会（Power Quality Subcommittee），工作组包括：谐波工作组、电压质量工作组、电力系统谐波监测工作组、电能质量治理工作组、电能质量管理培训工作组。

表 1-3

IEEE 对电能质量的现象描述^[3]

种 类		典型频谱	典型持续时间	典型幅值	
瞬态	脉冲	纳秒级	5ns 上升	<50ns	—
		微秒级	1μs 上升	50ns~1ms	—
		毫秒级	0.1ms 上升	>1ms	—
	振荡	低频	<5kHz	0.3~50ms	0~4p. u.
		中频	5~500kHz	20ms	0~8p. u.
		高频	0.5~5 MHz	5ms	0~4p. u.
短时变化	瞬时	电压暂降	—	0.5~30cycles	0.1p. u. ~0.9p. u.
		电压暂升	—	0.5~30cycles	1.1p. u. ~1.8p. u.
	暂时	电压中断	—	0.5cycles~3s	<0.1p. u.
		电压暂降	—	30cycles~3s	0.1p. u. ~0.9p. u.
		电压暂升	—	30cycles~3s	1.1p. u. ~1.4p. u.
	短时	电压中断	—	3s~1min	<0.1p. u.
		电压暂降	—	3s~1min	0.1p. u. ~0.9p. u.
		电压暂升	—	3s~1min	1.1p. u. ~1.2p. u.
长时间电压变化		停电	—	>1min	0
		电压负偏差	—	>1min	0.8p. u. ~0.9p. u.
		电压正偏差	—	>1min	1.1p. u. ~1.2p. u.
电压不平衡		—	稳态	0.5%~2%	
波形畸变	直流	—	稳态	0~0.1%	
	谐波	0~100 次	稳态	0~20%	
	间谐波	0~6kHz	稳态	0~2%	
	波形凹痕				
	噪声	宽频带	稳态	0~1%	
电压波动		<25Hz	断续的	0.1%~7%	
频率偏差		<10s			

欧洲广泛以电压特征描述电能质量,其定义为:公共电网中表征电力系统干扰水平的一系列指标^[4],限值标准涉及低压、中压系统。

中国电能质量相关国家标准由全国电压电流等级和频率标准化技术委员会负责起草,主要内容涉及限值标准、监测评估标准(相关评估的内容分散包含在限值标准中)、控制设备系列标准,暂缺乏技术监督管理标准(规范)。目前已颁布实施的6项电能质量限值国家标准颁布实施、1项电能质量监测设备国家标准及2项电能质量控制产品(SVC功能特性、SVC现场试验)。主要标准如下:

GB/T 12325—2008 电能质量 供电电压偏差

GB/T 15945—2008 电能质量 电力系统频率偏差

GB/T 15543—2008 电能质量 三相电压不平衡

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 12326—2008 电能质量 电压波动和闪变

GB/T 19862—2005 电能质量监测设备通用要求

GB/T 20297—2006 静止无功补偿装置(SVC)现场试验

GB/T 20298—2006 静止无功补偿装置(SVC)功能特性

一般来说,描述电能质量的技术参数应该具有明确的物理意义,要能够进行监测、评判,并能够根据相关理论研制出有效的控制产品。目前的电能质量问题以电网运行方式的不同可以粗分为稳态电能质量问题及暂态电能质量问题,但这两类问题在许多方面又相互交织,因此应正确对待。稳态电能质量参数表征电力系统稳态运行方式下的运行状态,主要参数包括电压偏差、频率偏差、三相不平衡度、谐波电压电流、电压波动闪变5类电能质量指标。暂态电能质量即电力系统暂态事件或局部暂态事件所引起的运行参数的变化,以有效值为出发点的主要技术参数有电压暂降、电压暂升、电压短时中断等。目前,过电压指标已纳入电能质量的技术参数范畴,可称为瞬态电能质量问题。图1-1为一系列电能质量现象示意图。

二、电能质量问题的基本特征

电能质量问题的基本特征主要表现在以下几个方面:

(1) 技术经济性。就具体的某一电能质量现象而言,其定义的描述、监测算法、控制方法等是一个纯技术问题;但是,描述这一现象的参数限值指标确定及其评估方法又表现出强烈的经济属性。要从实际出发,从供用双方的利益、电网运行及用户生产工艺的常态、产品的设计及电网管理的技术进步等方面出发,宏观把握,微观调整。

(2) 参数时变性。电力系统是一个动态时变的非线性系统,用户生产工艺过程也是千差万别的,其负荷用电特性及负荷模型描述历来就是一个难以准确把握的问题。因此,任何电能质量指标均不同于常规商品意义上的质量指标,需要采用长期在线的监测及合理的统计算法加以衡量。

(3) 需求多样性。千变万化的负荷用电特性使得其对电能质量的需求各异。仅从用户生产工艺过程的连续性角度考虑,其对电能质量的需求一般可简单地分为常规负荷、敏感负荷两大类。如何结合负荷特性控制电能质量指标是一个值得思考的细分问题。

(4) 非单方面控制性。电能质量的特殊性在于只有在使用过程中才能表现出其质量

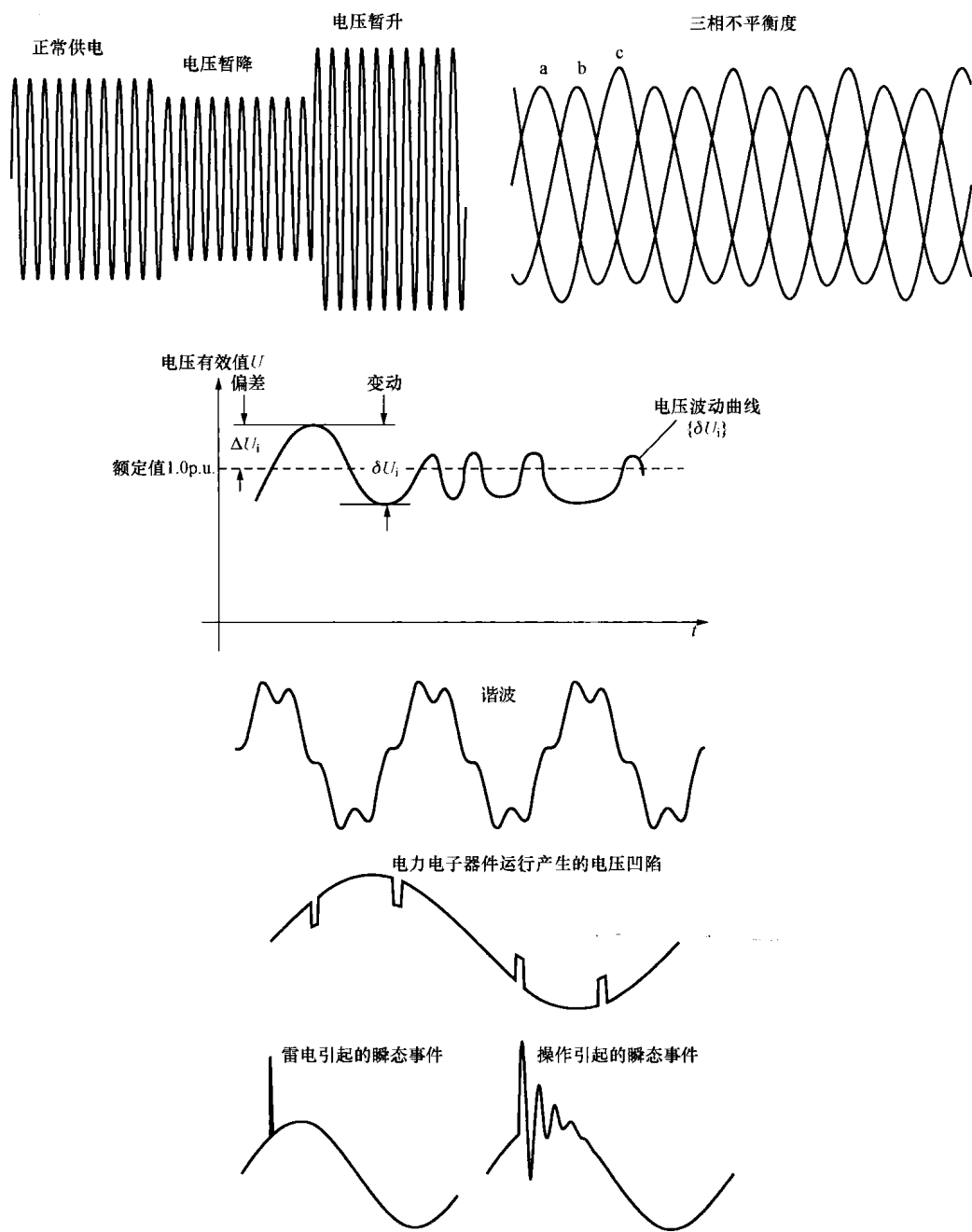


图 1-1 电能质量现象示意图

特征。因此，它不仅仅受电力生产传输系统控制，更深受电力用户的影响，同时也受用电设备 EMC 抗扰度水平的影响。

(5) 传导性。电能质量“污染”就像空气污染一样表现为强烈的流动性。一个地方的结果其原因可能在其他地方。

(6) 不断发展性。随着科技的进步，电能质量现象也是不断变化的。以重合闸事件为例，它是一个经历不到 1s 的电力中断事件，精细工业例如计算机配置了 UPS 电源，就能顺利地渡过这一短暂过程。对计算机而言，也就不存在由这一电能质量事件导致的问

题。再如随着节能灯、LED 灯的普及使用,闪变问题将逐渐淡出或可能逐步退出电能质量指标范畴等。

传统的观点认为发电环节一般不存在电能质量污染,但是随着国家能源政策的调整,随着风力发电、光伏发电的大规模发展,发电环节本身将出现不可忽视的电能质量问题。

三、电能质量问题与电磁兼容问题的关系^[5]

长期以来,人们一直将电能质量问题等同为电磁兼容问题。直到 2003 年,IEC 将电能质量问题划归 TC8 分委会。目前 TC8 发布了电能质量相关第一部标准:IEC/TR 62510 技术报告,阐述了电能质量的基本内容及其与电磁兼容的相互关系。

IEC/TR 62510 指出:电能质量问题首先表现为供电的连续性,在此基础上,需要保证电网标称电压、频率与所连设备额定电压、频率的协调,进而考虑影响供用电双方的电能质量指标问题。从用户角度,保护其生产工艺流程及预期功能的连续性,同时要保证电网的安全稳定运行。实际上,这一过程包括了三个利益实体:电力公司、用户、设备提供商。

而电磁兼容的主要关注点在于设备的设计及其制造是否合理,其定义为:在规定的电磁环境中保证其自身功能完善且不给本环境中其他设备带来不可容忍的电磁干扰的能力。可见,电磁兼容评价首先需要定义一个环境,在此环境里设备自身及其他设备均能够正常工作。但是电力系统公共连接点的负荷呈现出强烈的时变性与不可控性,即使所有用电设备在其测试的电磁环境中合格,也不能保证公共连接点电能质量指标一定在可接受的范围内。

可见,电能质量与电磁兼容是两个不同的量值控制体系,但是又互相联系:电磁兼容是电能质量控制的一个方面,设备的发射水平控制在合理的范围,有助于电能质量综合指标的改善与控制;公用电网电能质量水平的控制,又有利于给电气设备创造一个良好的用电环境。

四、电能质量与供电可靠性的关系

2004 年,美国能源部就专门进行分析、调研,在此基础上提出电能质量问题就是电力可靠性问题,特别是在信息工业高速发展的情况下,电力可靠性指标必须考虑电能质量指标^[6]。

南非电监局(NER)2002 年发布南非电能质量管理导则,明确提出每年度公布电能质量年度统计报告和各电力公司电能质量的数据信息。澳大利亚 1999 年就成立了电能质量与供电可靠性中心(The Power Quality & Reliability Centre),主要研究分析电能质量与电力可靠性的关系^[7]。

电力系统可靠性即电力系统长期运行的满意程度,它描述电力系统长期运行条件下向用户提供持续的、稳定的、充足的电力服务的能力。可靠性指标是电力系统设计、运行管理的总体追求目标。

依据传统的思路及传统的电力系统可靠性概念,只要给用户提供连续的电力供应,其供电可靠性就是满足用户要求的,用户就是满意的。但是,随着高新技术产业特别是电子类设备的大规模应用,此类负荷对电能质量指标诸如电压暂降、暂升、谐波、三相不平衡度等非常敏感,虽然出现电能质量问题时并没有引起传统的供电中断,也没有引

起传统意义的电力可靠性指标恶化,但是这些电能质量问题却可能引起重大的用户损失或引起重大的电力事故,进而引起电力可靠性问题,此时的供电质量问题成为重要的电力可靠性指标。因此新形势下任何电力可靠性问题的讨论应该涉及电能质量问题^[6]。

例如某生产硅晶片的企业,任何持续时间超过 10ms、电压降超过 10% 的电压跌落对企业而言相当于一次供电中断,损失超过上百万美元,但这样的电压暂降事件电力系统根本无法感知,更不可能影响电力可靠性指标。

再例如,20 年前重合闸功能被认为是提高系统供电可靠性的有力手段,对于非永久性故障,重合闸后能够持续地向用户提供电力供应,没有哪一个用户会关注如此短时间的电力中断问题;但是,随着大量计算机及电子设备的应用,一次成功的重合闸就已经是一次电力中断事故了,因为在不到 1s 的时间里,电子钟停止了走动、计算机重新启动等已经引起了很大的损失。

一般来说,电能质量与供电系统可靠性存在下述关系:

(1) 以往供电可靠性是系统运行的终极目标,而当今世界,合格电能质量的电力供应才是系统运行的终极目标。也就是说,电能质量问题本身就是电力可靠性问题,是传统可靠性概念的进一步延伸。

(2) 传统的电力可靠性能清楚地描述明显的电力中断事件,但电能质量事件常常发生在半个周波至几十毫秒内,这些事件系统几乎无法感知;然而对用户而言,可能是一次严重的电力中断,因此需要用电能质量的观点去描述这样的电力可靠性事件。

(3) 传统的电力可靠性的目标是不随时间而改变的,即提供持续不断的电力供应;但是电能质量指标却可以随着技术的进步而变化。

第二节 电能质量问题发展动态

目前,随着国家产业化政策的调整以及科技的进步,电能质量领域出现了一系列新的变化。新形势下需要进一步把握电能质量问题的变化及其发展,更好地从技术、经济两方面实现电能质量综合治理。

一、新能源及分布式发电引起的电能质量问题^[8]

目前,风力发电及光伏发电装机容量迅速增加。由此带来的一系列问题诸如并网问题、低电压穿越问题、电能质量问题、分布电源稳定运行问题、系统备用及调节问题等引起了业界的广泛关注与研究。就电能质量问题而言,无论是风力发电还是光伏发电,其影响主要表现在:

- 1) 产生谐波:励磁回路或主回路的整流、逆变电路的引入。
- 2) 功率波动:风速、日光的波动引起。
- 3) 电压冲击:感应发电机的启动产生。
- 4) 电压偏差。

以下就两种新能源分别介绍。

1. 风力发电对电能质量的影响

风力资源的不确定性和风电机组本身的运行特性使风电机组的输出功率呈波动趋势,风电场接入电网后,在向电网提供清洁能源的同时,可能会影响电网的电能质量,对电

力系统的安全稳定运行也会产生不利的影响。

对风力发电这类波动性动力而言，很难采用同步发电机与系统直接并网。当采用同步机时，通常与逆变器联合才能实现控制和联网。将同步发电机发出的功率经整流、逆变，通过变压器与交流系统连接，如图 1-2 所示。因此，其并网方式决定了发电过程中会产生谐波污染。

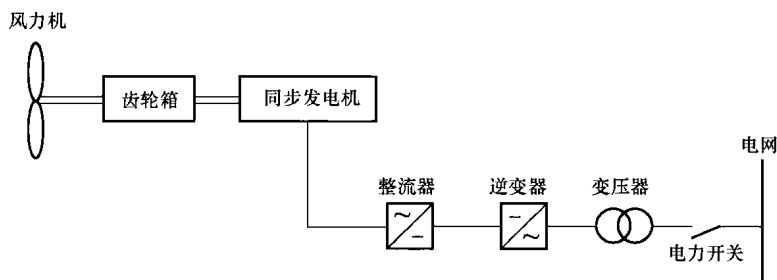


图 1-2 同步发电机风力发电通过逆变器实现并网

为了降低谐波污染,有时采用双馈发电机模式。其结构与绕线式感应电动机类似,定子绕组直接接入电网,转子绕组由一台频率、电压可调的低频电源供给三相励磁电流,如图 1-3 所示。当转子绕组通过三相低频电流时,在转子中形成一个低速旋转磁场,这个磁场的转速与转子的机械转速相叠加,使其等于定子的同步转速,从而在发电机定子绕组中感应出相应于同步转速的工频电压。当风速变化时,机械转速随之变化,这速度,以补偿电机速度的变化,保持输出频率恒变换装置容量小、控制灵活,因此,并网冲击小降低。

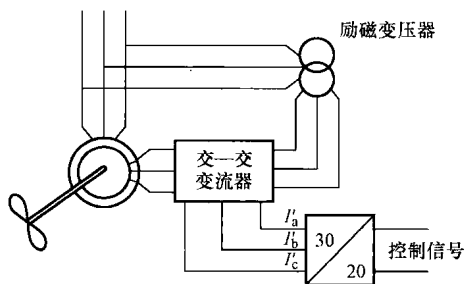


图 1-3 双馈风力发电机组的并网

频电压。当风速变化时,机械转速随之变化,这时,改变转子电流的频率和旋转磁场的速度,以补偿电机速度的变化,保持输出频率恒定。由于双馈发电系统所用的电力电子变换装置容量小、控制灵活,因此,并网冲击小,谐波水平可通过变换装置的合理设计降低。

2. 光伏发电对电能质量的影响

不论是独立使用还是并网发电，光伏发电系统都主要由太阳电池板、控制器、蓄电池和逆变器几部分组成。以太阳能电池板接收太阳光并产生电能，将产生的电能储存在蓄电池里，再经过逆变器将直流电变换为交流电，给交流电器供电或直接进入电网。

大规模并网太阳能光伏电站的作用类似于大型风力发电场,其电能质量、稳定性和规律性略优于风力发电,但由于太阳能光伏发电属于能量密度低、稳定差,调节能力差的能源,发电量受天气及地域的影响较大,而且太阳光的日夜交替变化,导致光伏并网发电装置只能间歇工作,太阳能光伏发电并网发电后会对电网的安全稳定、经济运行以及电网的供电质量会造成一定影响。其并网方式如图 1-4 所示。

(1) 工频变压器方式: 光伏输出经过平波、逆变滤波后, 通过工频变压器与系统连接。采用工频隔离, 避免了直流偏磁。

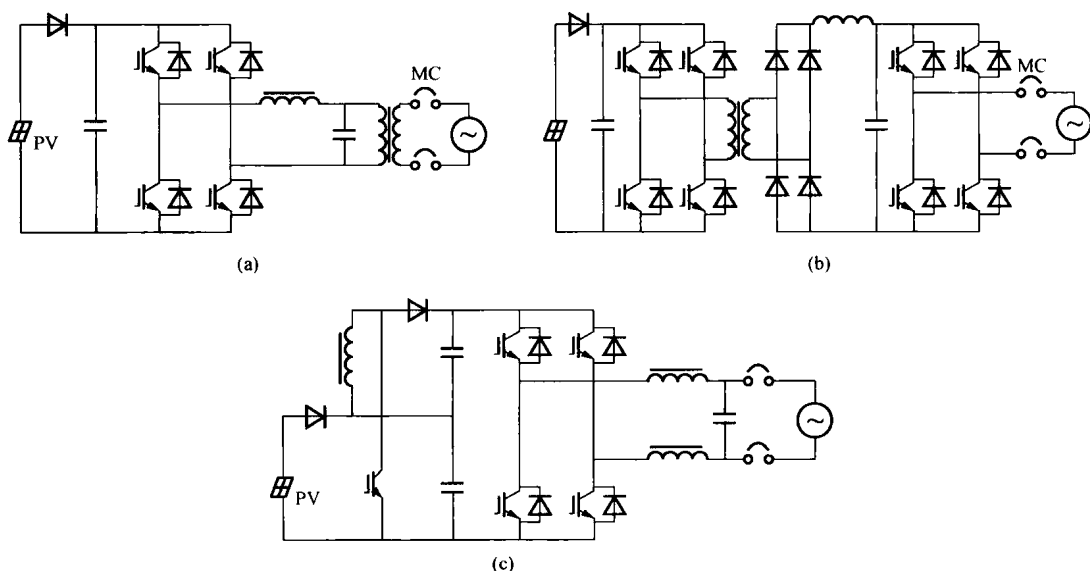


图 1-4 太阳能光伏发电并网方式

(a) 工频变压器方式；(b) 高频连接方式；

(c) 无变压器方式

(2) 高频连接方式：高频逆变后，通过变压器隔离，再经过整流逆变与系统相连。这种电路设有隔离变压器，直流分量不会流入主电网，避免了直流偏磁，滤波器也易于设计，谐波水平低。

(3) 无变压器方式：这种方式通过升压斩波器、逆变器和滤波器直接与电力系统相连，造价适中，但存在直流分量流入系统的可能性。要特别关注直流问题。

二、高速列车、动车组引起的电能质量问题变化^[9]

目前，高速铁路已进入大规模建设和使用阶段，为克服交直型电力机车的缺点，高速列车均采用交直交型电力机车。其工作原理如图 1-5 所示。

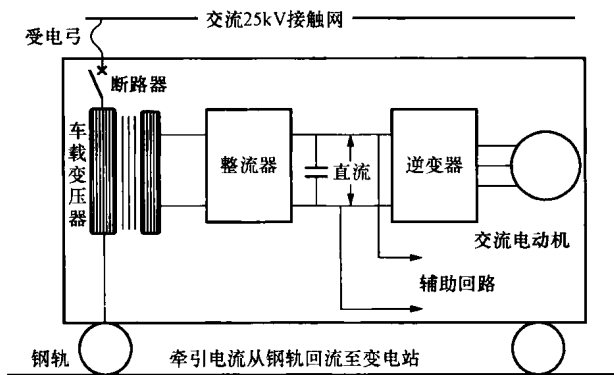


图 1-5 交直交型电力机车工作原理图

不同于传统的直流机车，交直交机车采用四象限整流，通过 GTO 或 IGBT 控制导通和关断角来控制机车的功率，可分别控制导通和关断机车主变压器的若干个低压绕组，使电流波形逼近正弦波，且电流与电压的相位基本同步。所以，交直交型电力机车与传统的交直型机车相比，具有下述特点：

(1) 谐波含量减小, 但谐波频谱更加复杂, 谐波频谱可表示为

$$n\omega_c \pm k\omega_r (n = 1, 3, 5, \dots \text{时}, k = 0, 2, 4, \dots; n = 2, 4, 6, \dots \text{时}, k = 1, 3, 5, \dots)$$

式中: ω_c 为载波频率 (开关频率); ω_r 为调制波频率。

(2) 功率因数高, 理论上可以达到 1。

(3) 由于其容量较大, 而且多采用单相变压器供电模式, 因此三相不平衡度问题比较严重。

某城际高速列车谐波电压实测频谱图如图 1-6 所示。

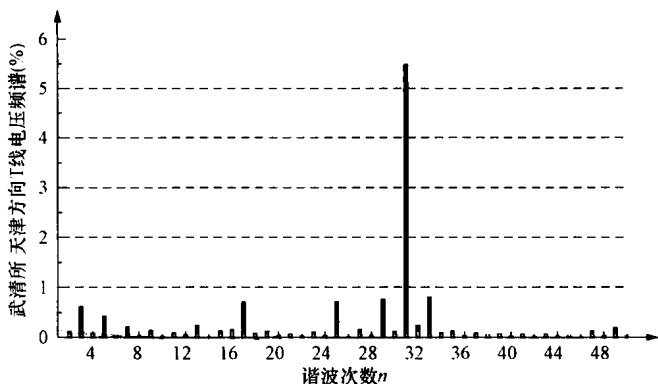


图 1-6 某城际高速列车谐波电压实测频谱图

三、各种节能型电气设备的研制与运行

随着建设节约型社会概念的逐步推广, 各类节能型家用电器及工业电器大量出现。

节能型电器设备的基本特点在于一般均经过电力电子装置的能量转换, 与传统型晶闸管为主的电力电子器件相比, 节能电气设备中全控型器件采用了新的控制方式 (例如 WPM 整流逆变), 因此带来了一系列新的电能质量问题, 主要表现在:

(1) 高频谐波现象, 主要由开关频率决定;

(2) 高频切换带来的浪涌问题 (详细参阅第九章)。

当然, 传统电力电子装置控制过程中出现的换相瞬时短路现象还将带来新的电能质量问题——电压凹陷 (norch), 需要进一步关注, 如图 1-7 所示。

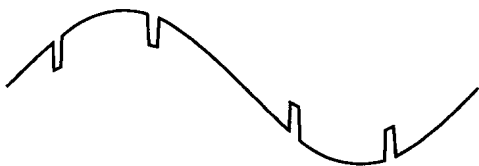


图 1-7 电压凹陷示意图

四、电能质量监测

目前, 电能质量监测还仅仅停留在评判某一点指标超标与否的阶段, 缺乏深层次的数据挖掘应用分析。其总体发展方向表现为:

(1) 系统层面的评估方法的研究;

(2) 海量检测数据的进一步挖掘应用;

(3) 基于 WAMS 的电能质量检测系统的建立及其在智能电网建设中的应用。

五、定制电力技术

定制电力 (Custom Power) 概念是美国电力研究院 (EPRI) N. G. Hingorani 博士于 1988 年首先提出的。1993 年, IEEE 成立了专门的 IEEE 1409 工作组, 研究配网系统定

制电力技术,并发布相关 IEEE 标准。

如图 1-8 所示,所谓定制电力是对于 1~35kV 配电系统,应用电力电子技术(设备)进行能量交换,向用户提供满足其设备正常运行性能的电力供应。常用的定制电力设备分为两类:

(1) 无功功率/谐波补偿设备,保护电源免受来自负荷侧的危害。常用设备有 SVC (Static Var Compensator)、D-STATCOM。

(2) 电压暂降/短时中断抑制器,保护负荷来自电源侧的干扰。常用设备有静态转换开关 (Static Transfer Switch, STS)、静止串联补偿器 (Static Series Compensator, SSC)、静止电压调节器 (Static Voltage Regulator, SVR)、备用电源 (Back-up Stored Energy Source, BSES 与有储能设备的 DSTATCOM 一样)。

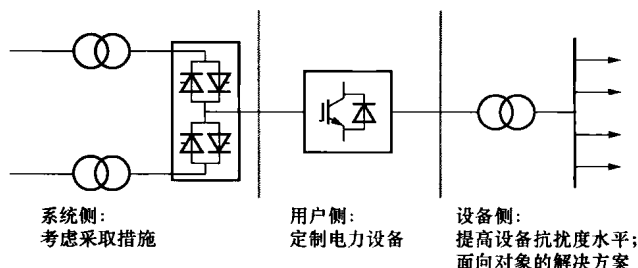


图 1-8 补偿位置示意图

目前,就电能质量的控制而言,考虑到智能电网概念及微网概念,其控制技术的发展主要表现为定制电力技术的研究及其产品开发。其中的难点在于暂态电能质量控制技术的研究与产品开发。当然,这些技术的研究首先立足于人们对暂态电能质量特征的研究及其监测技术的发展。从技术、经济两方面考虑,监测、研究、分析可能出现的暂降幅度及其持续时间,是决定采取什么措施的基础。电力公司应积极采取措施,评估暂态事件发生的频度(次数)、分析引起的原因及对用户的影响程度。从设计、运行方面加强安全,规范措施研究,提高管理水平。

当然,电力系统暂态电能质量事件是难以避免的,因此,设计决策过程中应尽可能少用敏感设备,或选用抗扰度强的敏感设备,同时应考虑必要的抑制措施。

下面简述几款主要的定制电力产品,感兴趣的读者可进一步参考相关专业书籍。

(1) 静止无功补偿器 (Static Var Compensator, SVC)。SVC 是一种被动补偿的设备,如图 1-9 所示。主要应用晶闸管器件控制电抗器 (Thyristor Controlled Reactor, TCR),或应用晶闸管投切电容器 (Thyristor Switched Capacitor, TSC)。图 1-10 是其 $U-I$ 特性曲线。

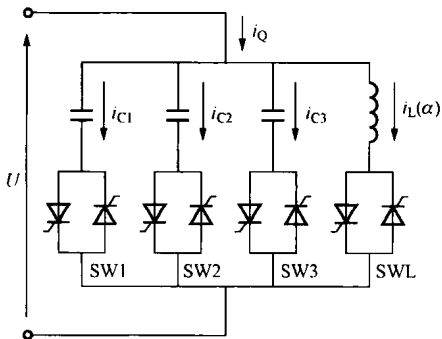


图 1-9 SVC 原理接线图

SVC 的主要应用主要表现在无功补偿和三相不平衡度、闪变抑制。

(2) 配电系统用静止同步补偿器 (D-STATCOM)。D-STATCOM (Distribution Static Synchronous Compensator) 是 STATCOM (Static Synchronous Compensator) 在配电系统的应用,即配电系统用静

止同步补偿器；STATCOM 在日本一般又叫 SVG (Static Var Generator) 即静止无功发生器；ASVG (Advanced Static Var Generator) 即先进的静止无功发生器，在美国则习惯称作 STATCON (Static Condenser)，即静止调相机。其补偿原理如图 1-11 所示。

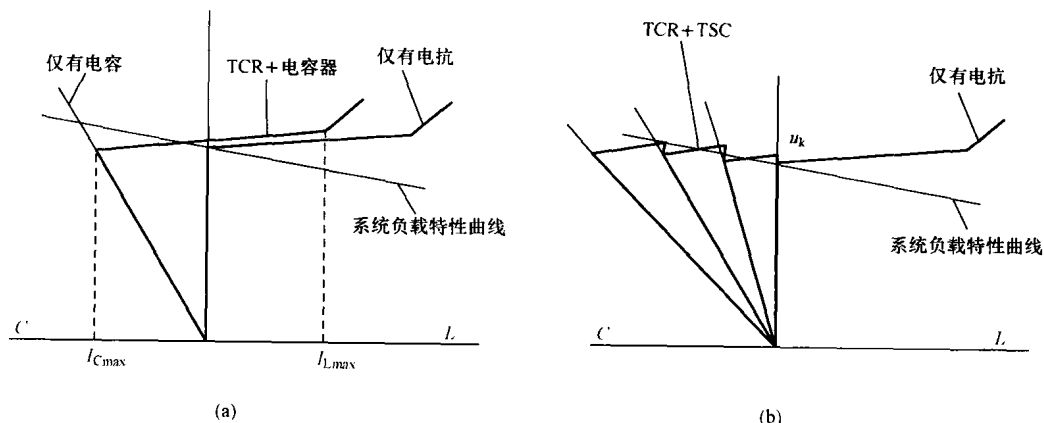


图 1-10 U-I 特性曲线示意图

(a) 电容器+TCR 补偿器特性曲线；(b) TCR 与 TSC 组成的 SVC 特性曲线

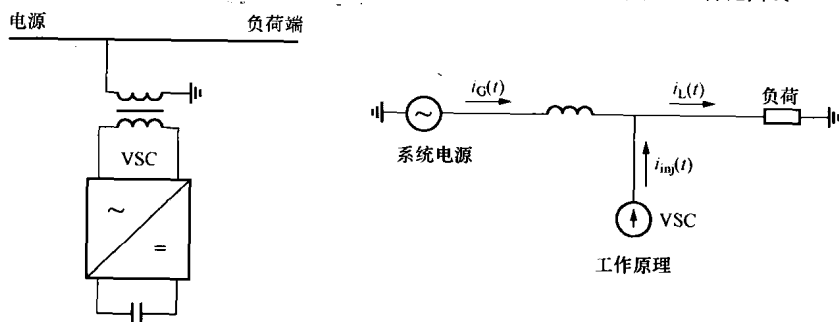


图 1-11 D-STATCOM 补偿原理图

与 SVC 相比，STATCOM 是一种电压源逆变器，一般应用于可关断电力电子器件 (GTO、IGBT、IGCT)，依据无功总是由电压高的地方流向电压低的地方的原理来控制逆变器的电压输出幅值，以达到向电网输出或吸收无功功率的目的。与阻抗改变型 SVC 相比，STATCOM 接入电网不改变电网的阻抗特性，其无功调节范围与 SVC 比较如图 1-12 所示。

STATCOM 响应速度较快，不仅可用于无功补偿、闪变抑制，而且可以通过发出或吸收无功电流来补偿有限的电压跌落。

(3) 静止电压调节器 (Static Voltage Regulator, SVR)。它类似一有载调压变压器，不同点在于用晶闸管代替了原来的机

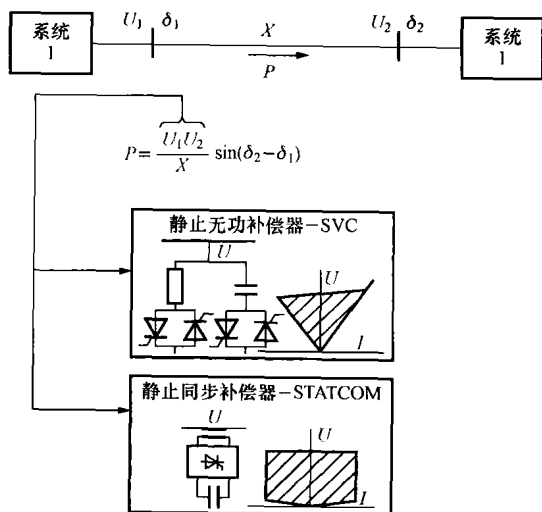


图 1-12 SVC 与 STATCOM 无功调节范围比较

械调节开关,如图 1-13 所示,因而响应速度较快,一般半个周波内可实现变压器分接头的调节,主要用以抑制电压暂降。

(4) 备用电源 (Back-up Stored Energy Source, BSES)。类似于有储能设备的 D-STATCOM,如图 1-14 所示,抑制电压暂降、短时中断。

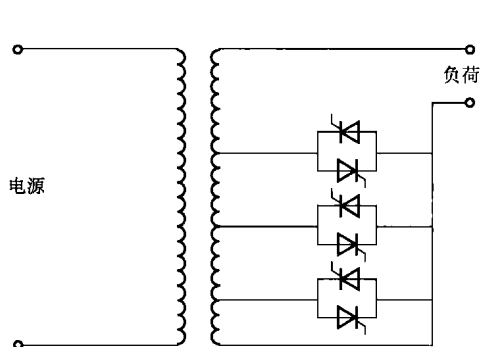


图 1-13 SVR 示意图

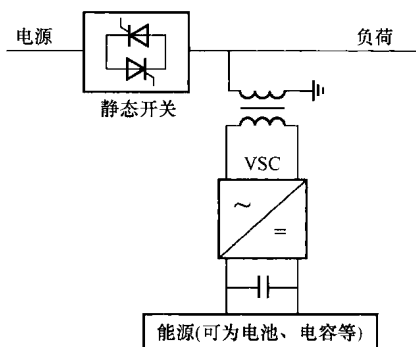


图 1-14 BSES 示意图

(5) 静态转换开关 (Static Transfer Switch, STS)。三相双路供电 STS 主电路如图 1-15 所示。它包括主电源和备用电源侧的两个晶闸管模块,每个晶闸管模块由三个晶闸管单元构成,相应的连接主或备用电源的 A、B、C 三相。每一个晶闸管单元由一对反并联晶闸管组成 (如 PP1/PN1 和 AP1/AN1),以保证正、反向电流通过。旁路机械 Pb 和 Ab 开关分别与晶闸管模块 A 和 P 并联,当晶闸管模块退出运行时,由旁路机械开关给负载供电。隔离开关 M1P/M2P 和 M1a/M2a 分别将两个晶闸管模块从主电路中完全隔离出来,以方便晶闸管的检修、维护和测试。

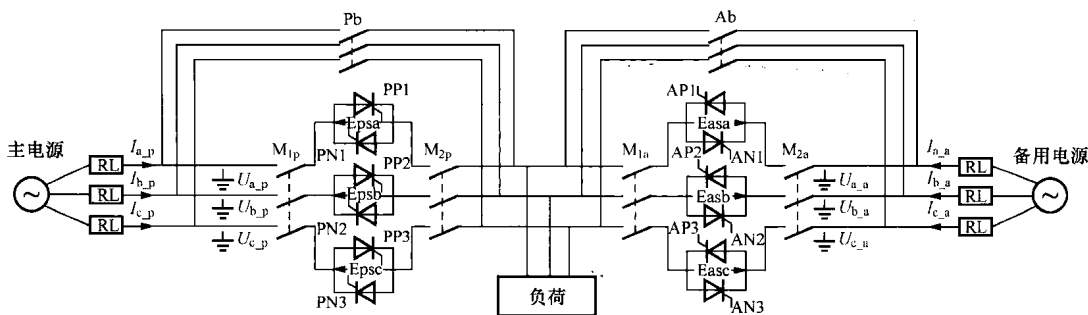


图 1-15 三相双路供电 STS 的主电路图

STS 是串联在电压暂降敏感负荷与主、备用电压之间的装置。正常运行时,主电源通过 STS 的晶闸管模块 P 给敏感负荷供电。当主电源发生电压暂降且电压暂降的幅值超过敏感负载正常运行所能承受的限值时,STS 的控制系统发出切换指令,将敏感负荷切换至备用电源。STS 的控制系统主要由两部分组成,即电压检测和投切控制。产品开发的的关键技术在于快速检测、合理的投切逻辑,并设法降低设备的损耗及造价。

(6) 动态电压恢复器 (Dynamic Voltage Regulator, DVR) 是一种典型的静止串联补偿器,原理图如图 1-16 所示。

DVR 被看作是减轻电压暂降影响的有力措施。通常由能量存储单元、直流电压稳定

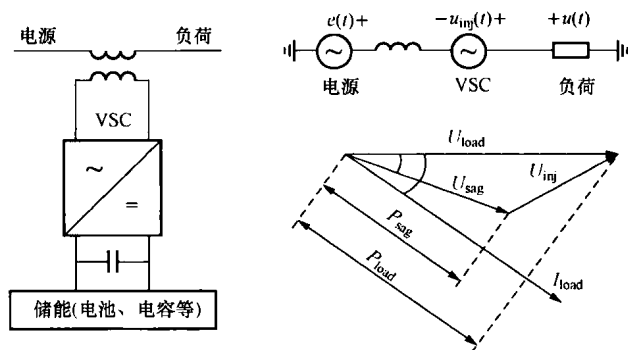


图 1-16 DVR 示意图

与滤波单元、VSC 型全控型逆变器、滤波器及串接变压器、保护与控制等单元组成。能量存储单元可以在电压暂降期间给负载提供有功功率，因而必须具有一定的能量存储与功率交换能力。典型和潜在的储能设备包括电池、超级电容、超导储能及飞轮储能等。滤波单元通常由电容器实现，电压较高时，通过均压控制的电容器组合而成。VSC 型全控型逆变器采用全控器件如 IGBT、GTO 等。近年来，基于双极性与 MOS 工艺相结合的 IGCT 器件技术发展很快，有望在 DVR 逆变器中获得应用。DVR 的滤波器必须能够有效滤除开关谐波，保证基波幅值及相位的不失真传递，还必须确保对低次谐波不放大，通常采用 Γ 型结构来实现。控制单元完成信息的采集、处理、运算及驱动脉冲的产生，可采用 DSP 等高速数字信号处理微控制器实现。保护回路则实现系统短路或过负荷情况下对 DVR 主回路的保护。串联式 DVR 检测到供电电压跌落时，立即产生补偿电压，并通过串联变压器叠加到供电回路中，保证负荷电压的稳定。这种补偿方式直接补偿电压的差值，因而具有补偿容量小（只需提供补偿电压部分相应的功率）、补偿效果与系统阻抗及负荷功率因数无关等特点。由于补偿功率由储能单元提供，若该功率单元足够大，这类 DVR 即便是在供电完全中断时，也可给负载提供所需的功率，保证供电的连续。

六、定制电力园区 (Custom Power Park, CPP)

(一) 基本概念及结构

定制电力园区又称为优质电力园区或电能质量工业园 (Power Quality Park)。

1992 年 5~6 月间，美国电力研究院和西屋公司签订合同，委托其对工业商业电力用户进行调查，目的是要为用户在电力调节设备的采购、安装和运行方面的决策提供准则^[10]。调查结果表明，用户对电能质量所需的改进超过了电力公司所能供应的能力。显然，被询问的用户都希望能由电力公司供应高质量的电力来替代用户自己所采取的措施。此后，作为美国电力研究院定制电力计划的一部分，西屋公司又开发了以电力电子技术为基础的称作“定制电力设备”。“定制电力设备”的开发为电力公司提供了建设定制电力园区的能力，即意味着可以达到用户所要求的电力可靠性和质量。不过，定制电力技术及定制电力园区的概念过了 8 年时间才被大家所接受。

所谓定制电力园区即通过采取各种提高供电可靠性和供电质量的措施（各种定制电力设备的应用），园区客户可以根据自己的需要以及设备的不同需要，选择不同质量的电力供电。

一般来说，优质电力园区的用户一般有以下特点：

- 1) 有可靠性和供电质量改善的需求;
 - 2) 小型、中型工业及商业用户;
 - 3) 愿意为优质电力付出额外费用。
- 提供给用户的定制电力一般具有以下特点:
- 1) 连续供电;
 - 2) 电压暂降、暂升均在用户承受的范围内;
 - 3) 谐波水平在要求的范围内;
 - 4) 三相不平衡度水平在要求的范围内;
 - 5) 闪变水平在要求的范围内。

图 1-17 为小型定制电力园区示意图。

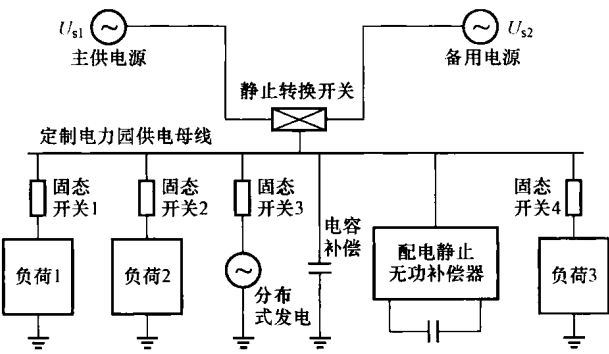
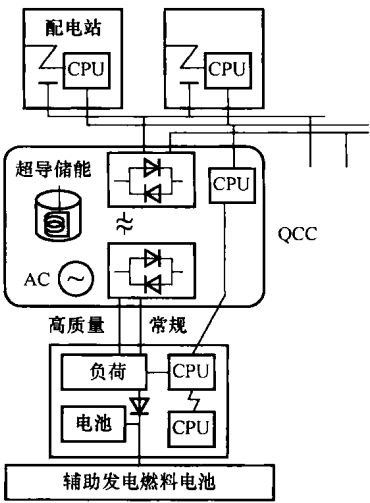


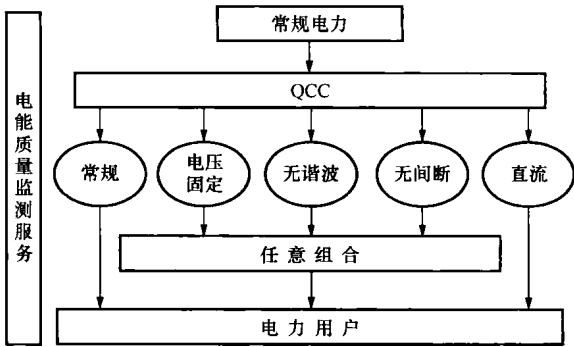
图 1-17 小型定制电力园区示意图

在定制电力园区的用户，可以根据自己的需要通过电能质量控制中心（Quality Control Center, QCC）自主选择用电质量（如图 1-18 所示），QCC 与多个配电站相连，以确保供电可靠性。它提供未经处理直接来自配电站的普通电能，也提供用定制电力技术处理的高质量电能，如常规的、无污染的，甚至是直流。

在 QCC 中备有大量的静止开关以保证高、低电压线路之间的灵活连接。为了运行的可靠性和能源储备，还采用了多种形式的发电系统和能量储备系统，如超导储能系统和燃料电池。



(a)



(b)

图 1-18 QCC 体现的定制电力概念^[11]

(a) QCC 电路结构; (b) 定制电力框图

以下简介两种 QCC 结构。

(1) 基于 UPS 类型的 QCC^[11]。

图 1-19 所示为基于 UPS 类型的 QCC 结构，能提供三种级别的电能质量：普通、优质、特级，其定义参照见表 1-4。普通电能质量（或标准电能质量）通常是指满足国家各项电能质量指标要求的电力供应，优质电能质量指对电压中断次数有限制性要求的电力供应，特级电能质量则是在此基础上又有限制电压凹陷的发生次数和跌落的深度要求。

电网其本身的各项电能指标应满足标准要求，对电压偏差有完全的补偿能力，对电压上升和电压凹陷有部分补偿能力。正常情况下电网直接提供普通水平和优质水平的电力，通过 UPS 的交直交逆变提供特级水平的电力。DG 是燃料电池或直流发电机组，可通过静止断路器 SSB3 向用户提供直流电力。在故障导致电网不能正常供电时，断路器跳闸，DG 通过 PWM1、T1 和 SSB2 提供优质电力，通过 PWM2、T2 提供特级电力。由于 DG 容量有限，这时 SSB1 应断开，停止向使用普通电能质量的用户供电。

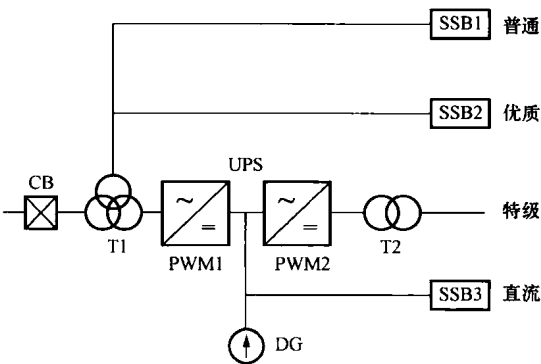


图 1-19 UPS 类型的 QCC 结构

电能质量定义							
项目	普通	优质	特级	项目	普通	优质	特级
电压偏差	A	A	A	闪变	C	C	A
电压凹陷	B	B	A	电压中断	B	A	A
电压上升	B	B	A	不平衡	C	C	B
功率因数	C	C	A	谐波	C	C	A

注 A—完全补偿；B—部分补偿；C—不补偿。

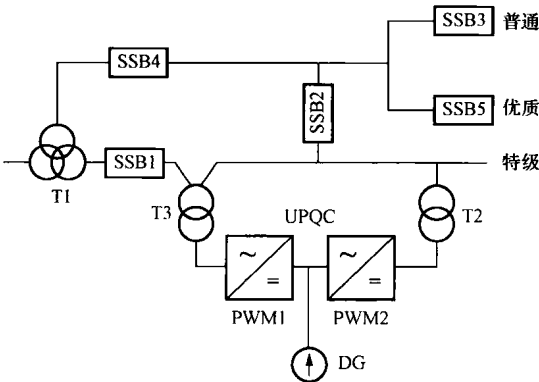


图 1-20 UPQC 类型的 QCC 结构

(2) 基于 UPQC（统一电能质量控制器）类型的 QCC^{[11][12]} 结构。

图 1-20 所示为基于 UPQC 类型的 QCC 结构。在正常情况下 SSB1、SSB3、SSB4 和 SSB5 闭合，SSB2 断开。PWM1 交流侧串联接入电网，补偿电压凹陷、电压上升、闪变和过电压等；PWM2 与负荷端并联，吸收用户的谐波电流，并补偿功率因数。当故障造成电网不能正常供电时，SSB1、SSB3 和 SSB4 断开，SSB2 和 SSB5 闭合，DG 通过 PWM2 和 BBS2 可提供特级和优质电力。

(二) 国内外定制电力园区的建设现状

早在 1999 年，美国电力科学研究院（EPRI）会同美国电力公司（AEP）和西门子电力输配电部（Siemens Power T&D），就着手在美国俄亥俄州的 Delaware 兴建优质电能工业园以满足特别用户的需要。他们在优质电能质量工业园兴建过程中涉及的性能配置、

设施配置和成本控制等方面积累了丰富的经验。在印度 Maharashtra 邦的 Mumbai 城市, BSES 公司为当地的诸多计算机制造公司建设了电能质量工业园。在设计、规划、运营和管理也积累了很多经验。

2009 年 5 月 14 日, 由国家电网公司确定的科技项目——优质电力园区建设方案研究启动会在北京亦庄供电公司顺利召开, 标志着该项目的正式启动。按照项目整体方案, 该项目将对亦庄地区优化配电网、电能质量评估及电能质量的综合治理开展技术研究, 制订优质电力园区实施方案, 并通过各种电能质量治理装置, 达到为开发区内用户提供成本低、干扰性小的可靠电力供应。优质电力园区建设方案主要包括园区位置考察、园区类型划分、用户需求分析、设备调研、设备布置等七个部分。此前, 该项目已完成国内外优质电力园区调研报告及电能质量监测技术报告。

七、电能质量与智能电网建设

目前, 智能电网建设正在逐渐获得社会各界的关注。尽管中国、欧洲、美国智能电网建设的侧重有所不同, 但是, 智能电网建设的根本目标却完全一致, 即进一步提高系统安全稳定运行, 向用户提供可靠、优质、绿色的电力供应。

首先, 智能电网建设中可再生能源份额的增加将使电能质量进一步恶化。国际大电网组织 (CIGRE) 秘书长科瓦尔表示, 可再生能源的发展和提高能效, 被看作是智能电网发展的主要因素。但是, 作为主要的可再生能源发电——风电的并网却带来了许多问题, 由于风电并网过程带来设备和技术复杂化和风能利用效率降低, 最终导致的风电成本大幅提高, 质量问题将进一步恶化。

其次, 智能电网建设中用户侧需求的多样化或将进一步引起电能质量问题。智能电网建设的一个主要内容在于向用户提供实时信息选择, 加强需求侧资源优化管理, 提供用户的多样选择性。也就是说, 满足多样化的需求是智能电网的基本特征之一。但是, 多样化需求蕴含了使电能质量水平进一步恶化的危险。多样化需求使得用户用电特性空前复杂, 各种形式的能量转换、控制技术应运而生, 电能质量问题的内容将会有更多的表现形式, 需要更加深入的进行研究。

实际上, 随着节能技术的进步及需求侧用电的多样性发展, 全方位的电能质量监测与先进的电能质量预测分析专家系统是智能电网电能质量的主要关注方向。

参 考 文 献

- [1] IEC 61000-2-5: 1995, Electromagnetic Compatibility (EMC) —Part2—5: Environment—Classification of electromagnetic environments.
- [2] IEEE Std 1159-1995 IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [3] IEEE Std 1159-2009 IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [4] EN50160-2007 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks.
- [5] IEC/TR 62510 Technical Report, Standardising the characteristics of electricity.
- [6] Measurement Practices for Reliability and Power Quality, Prepared by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831—6285. managed by UT-BATTELLE, LLC for the U. S. Department of Energy under contract DE-AC05-00OR22725.
- [7] Aims and Capabilities of the Power Quality Centre, April 1999, Integral Energy Power

Quality Centre Newsletter.

- [8] 韩民晓. 分布式电源并网相关规范制定探讨. 第四届电能质量(国际)研讨会论文集. 北京: 中国电力出版社, 2008: 368—471.
- [9] 景德炎. 电气化铁路负荷特性分析及供电方案相关问题的建议. 第四届电能质量(国际)研讨会论文集. 北京: 中国电力出版社, 2008: 427—432.
- [10] 陈警众. 定制电力——高质量供电的新技术(一)供用电, 1997, 14(5): 46—48.
- [11] 杨洪耕, 等. 电能质量问题的研究和技术进展(六)——电能质量控制技术进展. 电力自动化设备, 2004, 03.
- [12] 吴彤, 等. 采用定制电力技术解决配电侧电能质量问题. 高电压技术, 第31卷第9期.

非线性负荷及其用电特性

一般来说,非线性负荷是电能质量的主要污染源,研究非线性负荷的用电特性是实现电能质量综合治理的重要内容。首先,控制 EMC 低频传导干扰发射水平是电能质量控制的基本途径,而发射水平的控制需要对负荷用电特性进行充分研究;其次,独立的电能质量控制设备一般靠近污染源负荷设置,此时,非线性负荷用电特性及其生产工艺过程分析是影响控制设备类型、容量、冗余度、控制策略的关键因素。最后,研究非线性负荷用电特性及其干扰传播特性,是提高电力系统整体抗扰水平的基本要求。

当然,在研究干扰源用电特性的同时,还需要研究敏感设备如芯片制造、造纸、ASDs等的用电特性,以便于进一步提高此类敏感设备的抗扰水平;或采取措施,靠近敏感负荷设置补偿设备对其进行保护。

第一节 非线性负荷

正常情况下,对于一个线性负荷 $Z \angle \varphi$ ($Z = \text{常数}$, $\varphi = \text{常数}$),若施加供电电压为纯正弦量,例如 $u_t = A \sin \omega t$,则 $i_t = (A/Z) \sin(\omega t - \varphi)$,其中电流幅值 A/Z 为常量,相位差 Φ 恒定,因此, u_t 、 i_t 具有相同的波形形状,仅幅值、相位上存在差异,如图 2-1 所示。此时,不仅电流波形为完全的正弦波,其从电网吸收的功率也恒定,不存在冲击现象。

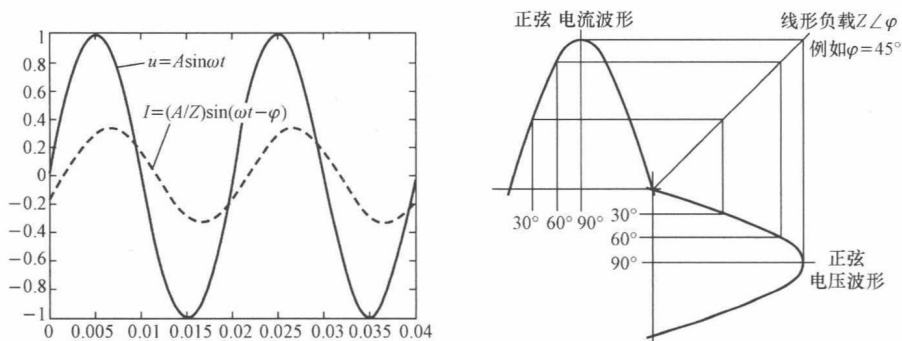


图 2-1 线性负荷的电流波形

如果一个纯正弦电压供电给非线性负荷 $Z(t) \angle \varphi(t)$,也就是说,负荷等值阻抗大小、

角度都随时间在变化，即 $i_t = [A/Z(t)]\sin[\omega t - \varphi(t)] = g(t)\sin[\omega t - \varphi(t)]$ ，可见其负荷电流瞬时值已不再与所施加的正弦波电压瞬时值成比例，其电流波形与供电电压波形存在较大差异，亦即电流的波形发生了畸变，如图 2-2 所示。根据傅里叶变换理论，在近似认为其具有周期性（一小段时间内）特点的情况下（当然也满足狄里赫利条件），其电流波形便分解为基波与一系列谐波的组合，如图 2-3 所示。

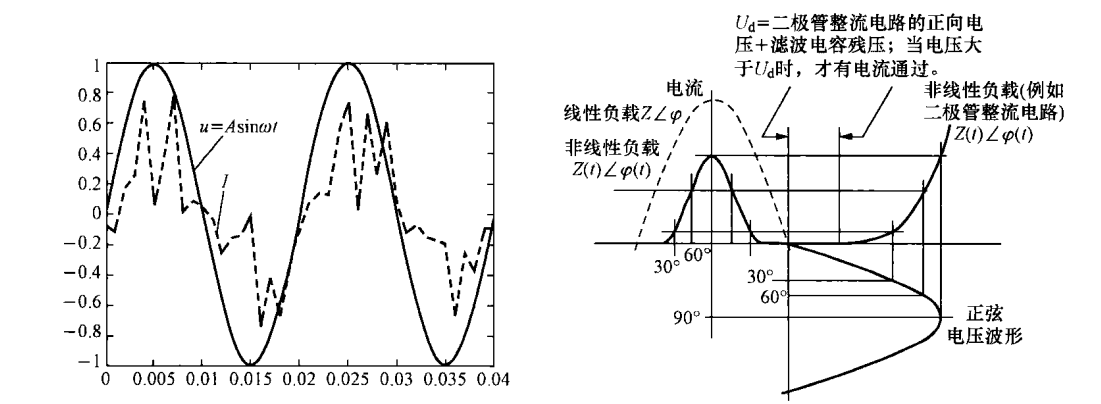


图 2-2 非线性负载的电流波形畸变示意图

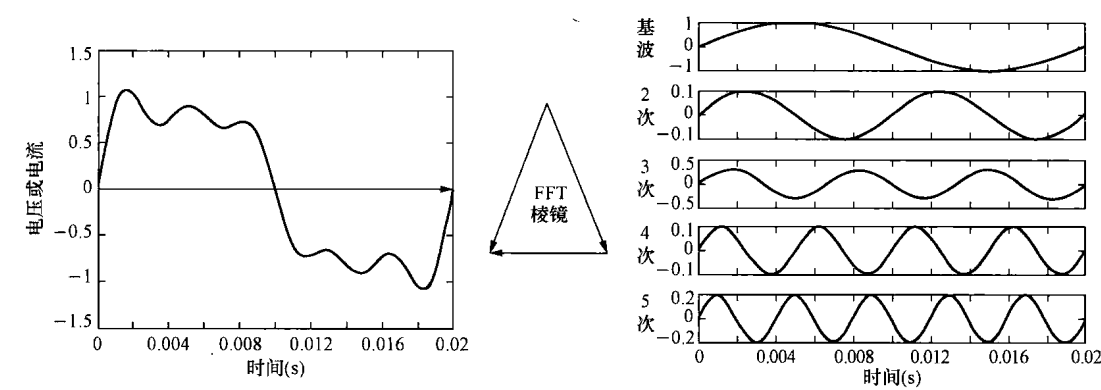


图 2-3 波形的 FFT 分解示意图

第二节 交流电弧炉

在众多非线性负荷中，交流电弧炉属于最复杂、变化随机性最强的一种污染源，它能产生连续频谱的谐波。谐波大小与电弧炉的吨位、冶炼的时段（溶化期、精练期）、电弧炉的控制系统、炉体本身的制造水平以及炉料的倒塌等诸多因素有关。目前，还没有一种较为理想的电弧炉数学模型，一般只能依靠实际连续测量的方式获取其频谱分布规律。

一般而言，在电炉运行的溶化期，电弧极其不稳定，谐波电流水平较高；而在精练期，随着炉料基本溶化为钢水，电弧变得相对稳定。另外，早期相同吨位的国产电炉的谐波含量大于进口电炉，原因在于其制造工艺与控制系统的差异。

交流电弧炉主要产生以下电能质量污染：

- 1) 电压波动、闪变；

- 2) 含有丰富的谐波成分, 频谱几乎连续分布;
- 3) 三相功率吸收不对称;
- 4) 平均功率因数较低 (0.7 左右), 短网功率因数在 0.1~0.2 之间。

一、交流电弧炉的用电特性简析

图 2-4 为分析交流电弧炉的典型模型电路^[1]。图中 U 为电源线电压, $X = X_1 + X_2$, 其中 X_1 为系统阻抗及钢厂降压变压器阻抗, X_2 为电弧炉变压器及引线和电极阻抗, 电弧用一可变电阻 R 表示。

若该电弧炉额定功率为 P , 则有以下式成立:

$$I = \frac{U}{\sqrt{3(R^2 + X^2)}} \quad (2-1)$$

$$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (2-2)$$

$$p = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} I \cos\varphi \quad (2-3)$$

$$q = 3 \frac{E}{\sqrt{3}} I \sin\varphi \quad (2-4)$$

上述参数随电弧电流 (弧阻) 的变化曲线如图 2-5 所示, 图 2-5 中: $P=60\text{MW}$, $X = X_1 + X_2 = 4.04\text{m}\Omega$, 其中 X_2 占 80%, X_1 占 20%, $E=700\text{V}$ 。进一步分析可见, 只有当 $X = R$ 时, 电弧炉功率最大, 此时功率因数为 0.707, 最大有功为 60MW。

分析图 2-5 可见: 当电弧电流过大时, 无功电流成分将占主要部分, 功率因数很低。

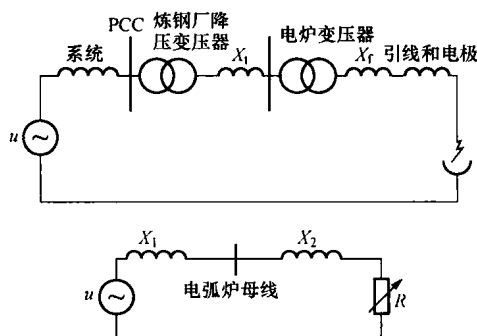


图 2-4 分析交流电弧炉的典型模型电路

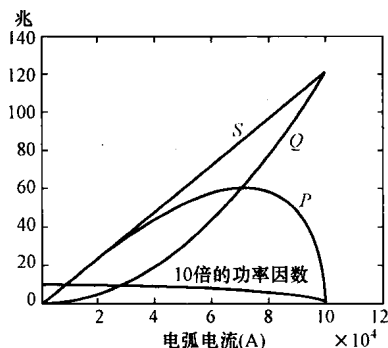


图 2-5 电弧炉运行参数随电弧电流的变化曲线

若将图 2-4 用图 2-6 代替, 可以得到简化的时域电弧炉用电特性的分析模型。时域

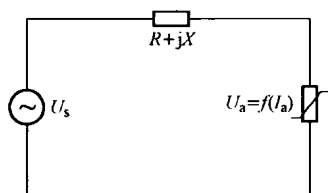
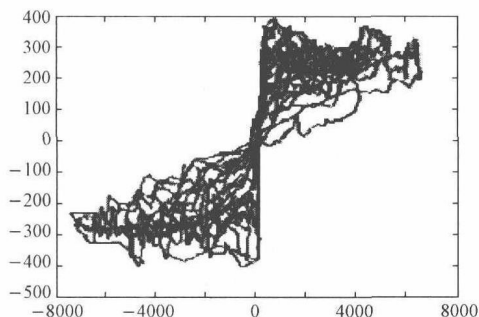
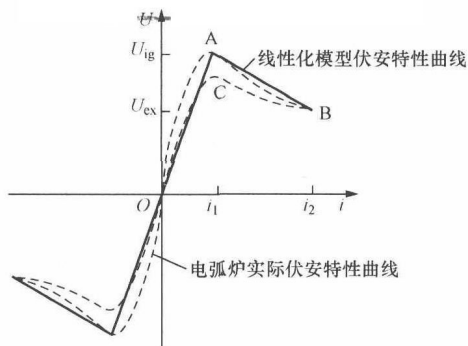


图 2-6 弧压与电弧电流的 $U-I$ 特性分析简化电路图

模型一般从电弧的物理特性出发考察电弧电流电压的伏安特性。实际测试的某一电弧炉的 $U-I$ 曲线如图 2-7 所示, 由图可见, 电弧电压电流特性类似实际的磁化曲线, 表现出“剩磁”现象。

一般工程分析中, 可用图 2-8 的线性化方法简化图 2-7 的实际 $U-I$ 曲线。在电弧起始时电压迅速上升到 U_{ig} , 即电弧的起弧电压, 然后下降到 U_{ex} , 即灭弧电压, 在半周结束时电压又上升, 然后很快下降到零。


 图 2-7 实测电弧炉的 $U-I$ 曲线 (横轴为电流)

 图 2-8 电弧炉 $U-I$ 曲线的线性化简化示意图

二、交流电弧炉的功率特性简析

交流电弧炉供电简化图如图 2-9 所示, 图中 U_0 为电炉空载时供电系统电压, X_0 为 U_0 母线到电弧炉侧的总电抗, R 为包括电弧炉弧阻在内的总电阻。定义电弧炉的短网容量 $S_d = U_0^2 / X_0$, 通过进一步分析, 电弧炉吸收的有功、无功功率理论上满足式 (2-5)

$$P^2 + (Q - S_d/2)^2 = (S_d/2)^2 \quad (2-5)$$

可见: 电弧炉的有功、无功满足图 2-10。

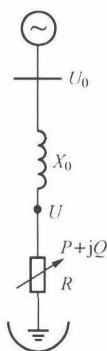


图 2-9 交流电弧炉供电简化图

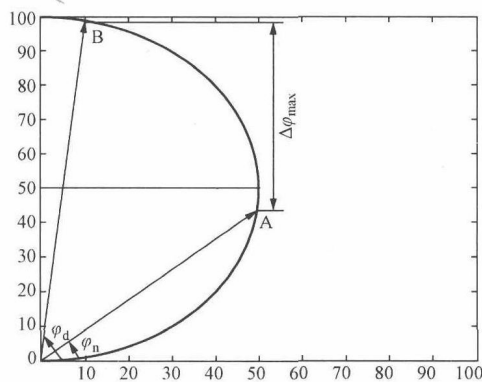


图 2-10 电弧炉的有功、无功关系曲线

设电弧炉短网功率因数为 $\cos \varphi_d$ (图 2-10 中 B 点), 平均功率因数为 $\cos \varphi_n$ (图 2-10 中 A 点), 则图 2-10 中 A、B 之间的距离表示电弧炉运行过程中可能产生的最大无功功率波动, 亦即

$$\Delta Q_{\max} = S_d (\sin^2 \varphi_d - \sin^2 \varphi_n) \quad (2-6)$$

设电网短路容量为 S_N , 则电弧炉运行产生的最大电压变化为

$$\Delta U = \Delta Q_{\max} / S_N \quad (2-7)$$

第三节 直流电弧炉

直流电弧炉只有一根电极, 通过整流装置与电源隔离, 因而其谐波频谱符合整流装置的基本规律, 功率冲击也小得多。

一般而言, 直流电弧炉产生的电压波动与闪变是同容量的交流电弧炉的一半。设整

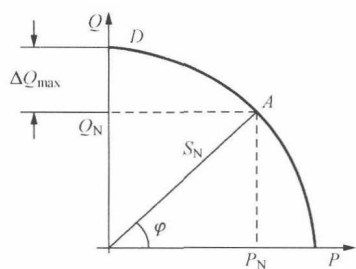


图 2-11 直流电弧炉功率图

流变的额定容量为 S_N ，则直流电弧炉吸收的有功 P 、无功 Q 符合式 (2-8)

$$P^2 + Q^2 = S_N^2 \quad (2-8)$$

图 2-11 为式 (2-8) 示意图。设电弧炉短网功率因数为 $\cos\varphi_d$ (图 2-11 中 D 点)，平均功率因数为 $\cos\varphi_n$ (图 2-11 中 A 点)，则其运行过程中产生的最大无功冲击 (波动) 量为

$$\Delta Q_{\max} = S_n (\sin\varphi_d - \sin\varphi_n) \quad (2-9)$$

第四节 中频感应炉

一、工频感应加热炉

图 2-12 是工频感应加热炉的电源示意图。电炉炉料一般为废钢，在交变磁场作用下，炉料表面产生涡流而形成发热，从而逐渐融化，如图 2-13 所示。工频感应加热炉一般三相用电平衡，无大的功率冲击，也不产生明显的谐波污染。

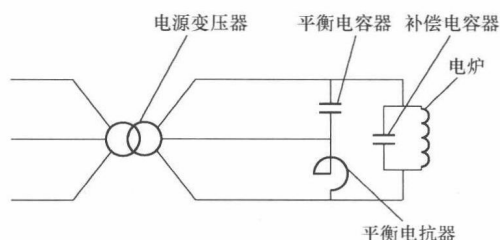


图 2-12 工频感应加热炉电源示意图

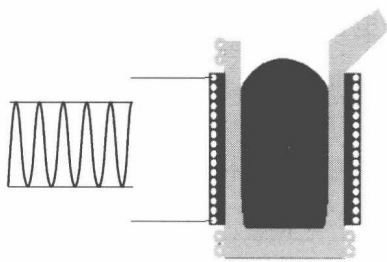


图 2-13 工频感应炉工作示意图

由图 2-12 可见，工频感应炉实际上为单相供电，为了降低三相不平衡度水平，增加了平衡电容器、平衡电抗器，这样，实际运行的电炉可视为三相平衡负荷。其原理为 C. P 斯坦米兹 (C. P. Steinmetz) 理论，下面做一简单介绍。

根据 C. P 斯坦米兹理论，若三相供电电压平衡 (即只有正序电压)，对于一个三角形接线的三相不对称负荷 (Y 接线可以等效成三角形)，将三相负荷以导纳表示，设三相导纳各为

$$\left. \begin{aligned} Y_{ab} &= G_{ab} + jB_{ab} \\ Y_{bc} &= G_{bc} + jB_{bc} \\ Y_{ca} &= G_{ca} + jB_{ca} \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

只要在三相负荷上并联如下电纳，则可做到在等效的 Y 形接线系统中三相负荷完全平衡，且功率因数为 1，如图 2-14 所示，此时

$$\left. \begin{aligned} B'_{ab} &= -B_{ab} + (G_{ca} - G_{bc})/\sqrt{3} \\ B'_{bc} &= -B_{bc} + (G_{ab} - G_{ca})/\sqrt{3} \\ B'_{ca} &= -B_{ca} + (G_{bc} - G_{ab})/\sqrt{3} \end{aligned} \right\} \quad (2-11)$$

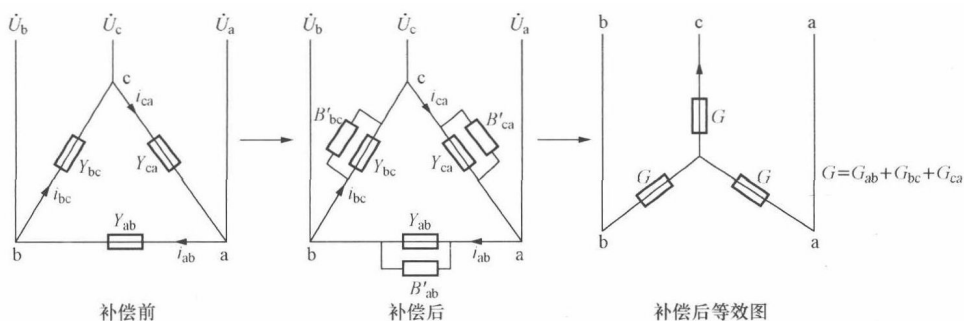


图 2-14 C. P 斯坦米兹理论示意图

二、中频感应加热炉

与工频感应电炉相比，中频炉的工作频率一般为 200~1000Hz，典型值为 500Hz。图 2-15 为其电源示意图，通过电力电子装置的能量转换电路，提供电炉所需频率的交变电源。图 2-16 为其工作示意图。

由于电炉电源频率的不同，与工频炉相比，中频炉有诸多优点，下面分别从电流透入深度、炉料的体积限制、对炉料的电磁力、功率密度等几方面做简单介绍。

1. 电流透入深度

感应电炉是通过电磁感应原理来加热金属的。炉内金属产生的热量取决于感应电流的大小和金属对感应电流的电阻，即

$$Q = 0.24 I^2 R \quad (2-12)$$

式中：\$Q\$ 为感应电流产生的热量；\$I\$ 为感应电流；\$R\$ 为针对感应电流的电阻。

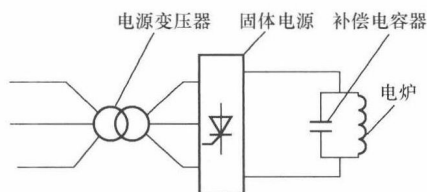


图 2-15 中频炉电源示意图

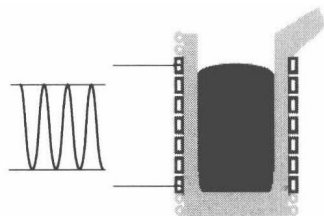


图 2-16 中频炉工作示意图

根据电磁场理论，对于一定大小的金属，感应电流渗透到金属内部的深度与电流的频率有关，可表示为

$$\delta = 5030(\rho/\mu f)^{0.5} \quad (2-13)$$

式中：\$f\$ 为电源频率。

可见，随着电流频率的增加，电流透入深度减小。因此较小的电流透入深度等效于较大的金属表面电阻，从而同样大小的电流产生不同大小的热量，如图 2-17 所示。

2. 炉料体积限制

通过上述分析可见，中频电流可以使较小的金属产生足够的热量而融化，因此中频电炉对炉料的体积没有要求，一般的边角废料都可以放到炉内融化；而工频炉需要大的炉料体积，尤其是从冷态开始熔化时，它通常需要一个不小于 1/5 额定容量的起熔块。在炉料熔化完毕后，工频感应电炉不能将炉料全部倒空，必须留 1/5~1/3 的炉料供下一炉起熔，所以通常采取倒出半炉，再加半炉冷料的作业方式。其作业对比示意如图 2-18 所示。

3. 电磁力作用

受电磁力的作用，融化的炉料会在炉内流动，如图 2-19 所示。因此，炉料从外观上

表现为中间高四周低的形状，称为驼峰。驼峰的高度与频率的平方成反比，因此，中频炉的驼峰较低。

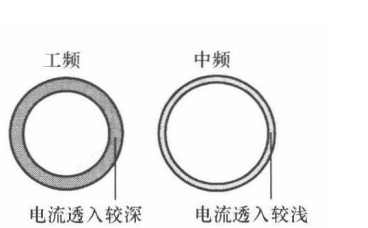


图 2-17 不同频率的电流透入深度示意

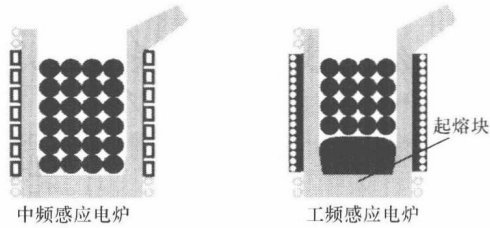


图 2-18 炉料体积限制示意图

驼峰的存在对电炉产生如下影响：驼峰越高说明炉料流动的速度越快，增加了炉料与空气接触的机会，使炉料氧化烧损较大；快速流动的炉料对炉衬产生冲刷，缩短炉衬的使用寿命。

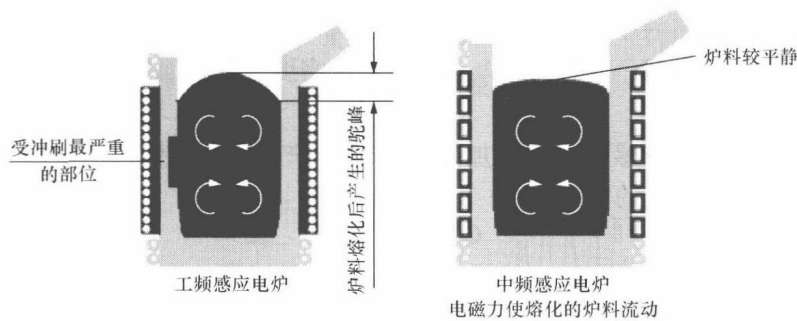


图 2-19 电磁力作用比较

4. 功率密度

相对于中频感应电炉，工频感应电炉功率密度较低，标准配置的工频感应电炉融化一炉的时间一般在 2~2.5h 之间，而中频感应炉融化一炉的时间一般在 1h 左右。

三、中频电炉电源的工作原理简介

图 2-20 为中频电源的原理示意图。设前端整流电炉为三相 6 脉动整流电炉，故其谐波污染为 $6k \pm 1$ (k 为正整数) 次谐波。中频电源的变流过程为负载提供换流电压的换流方式，其关键元件为负载侧并联的电容 C 。

并联谐振的频率 f 即为中频炉工作的频率，图 2-20 中整个负载工作于接近并联谐振状态而略呈容性。负载阻抗大，表现为正弦波形。如图 2-21 所

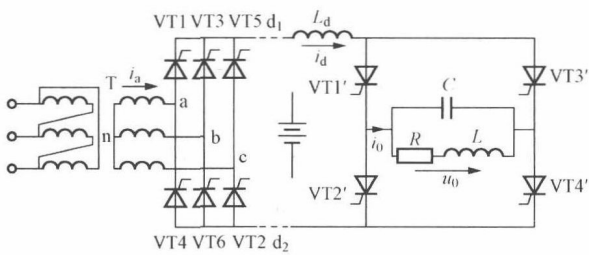


图 2-20 中频电源的原理示意图

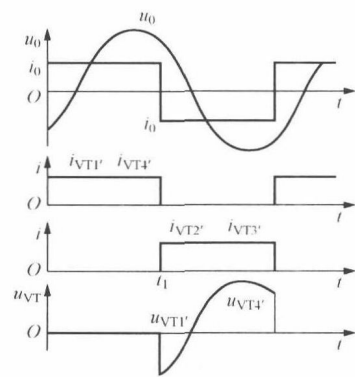


图 2-21 中频电源换流示意图

示, 图中, $VT'2$ 、 $VT'3$ 的触发时刻必须在 U_0 过零点前并留有足够的裕量, 换流才能顺利完成。

第五节 电 石 炉

电石作为有机化工的基本原料, 发达国家于 20 世纪五、六十年代开始用石油化工取代, 但由于我国能源结构的特点, 电石仍然是重要的化工原料。目前电石产量中的 70% 左右用于 PVC 生产, PVC 目前的每年需求增长速度为 20% 左右, 电石也随之增长。

电石 (CaC_2) 属高耗能产品, 是生石灰 (CaO) 和焦炭 (C) 于电石炉内通过电阻电弧热在 $1800\sim 2200^\circ C$ 的高温下反应制得 ($CaO+3C\rightarrow CaC_2+CO$)。电石炉电耗占电石生产成本的 60%~70%。目前国家规定电石炉容量必须大于 5000kVA。

电石炉分为内燃式和全密闭式电石炉, 它们的区别在于: 内燃式电石炉在生产过程中产生的副产品 CO 在炉面上燃烧, 成为含夹带粉尘的 CO_2 的高温尾气排放; 全密闭式电石炉, 生产过程中产生的副产品 CO 经过净化处理后加以回收利用, 正常时应无尾气排放。其生产工艺过程如图 2-22 所示。

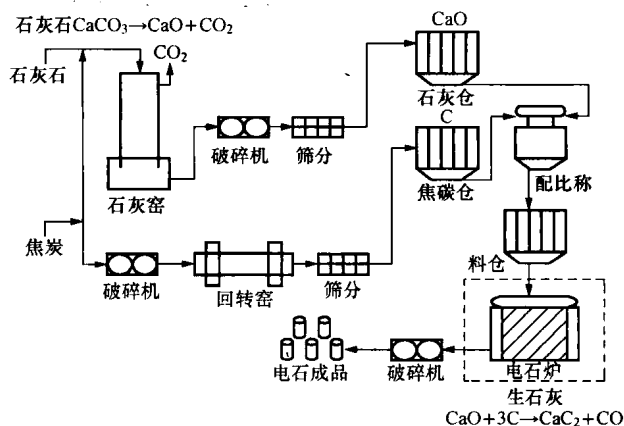


图 2-22 电石的生产工艺流程

电石炉的电弧属于暗弧, 即电阻电弧, 电极埋于炉料中通过电极放电而产生热量。因此, 电石炉电弧不像交流电弧炉电弧 (明弧) 那样剧烈变化。

一般来说, 电石电弧相对比较稳定, 有较小、较慢的电流脉动, 同时含有少量的低次谐波 (含有率一般小于 5%)。当然, 实际运行中也需要关注其三相电流的不平衡情况。

第六节 铁 合 金 电 炉

一、类型

铁合金电炉分为还原电炉和精炼电炉两类。

1. 还原电炉

还原电炉又称埋弧电炉或矿热电炉, 采取电极插入炉料的埋弧操作, 主要生产硅铁、锰铁、铬铁、钨铁、硅锰合金等铁合金。还原电炉有敞口、封闭 (或半封闭) 之分, 炉体有固定、旋转等各种形式 (如图 2-23 所示)。随着环境保护要求的提高和余热利用技

术的发展,对不同产品分别采用封闭式电炉、半封闭式电炉。炉体旋转可以消除悬料、减少结壳“刺火”,使布料均匀、反应区扩大,以利炉况顺行。

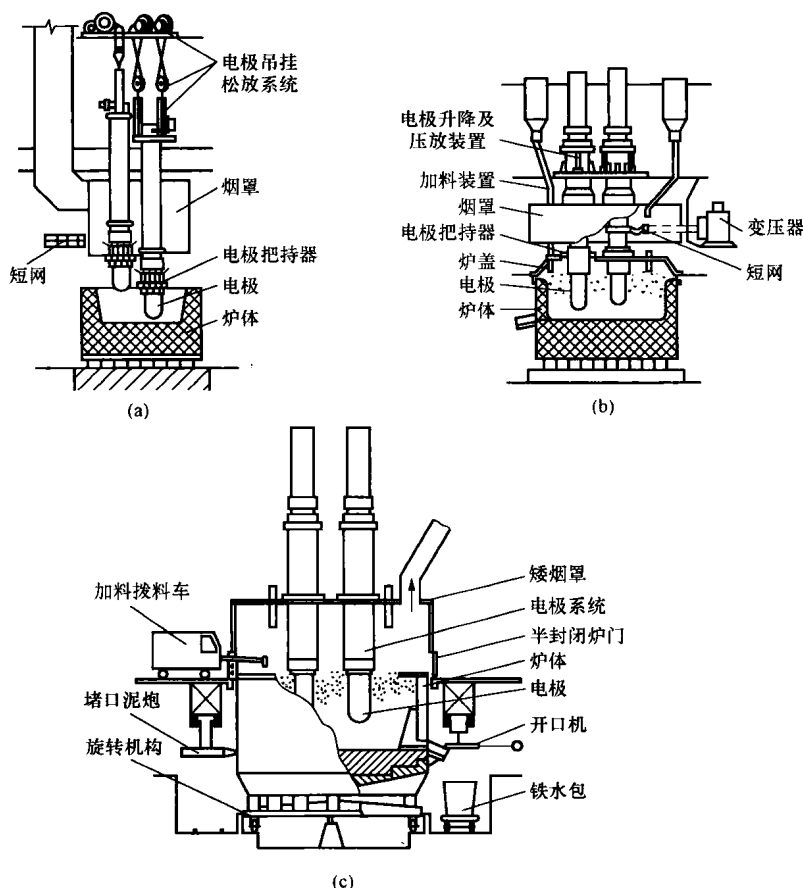


图 2-23 铁合金还原电炉

(a) 轴口固定式电炉; (b) 固定式电炉; (c) 烟罩旋转式电炉

电炉容量(在铁合金生产中指电炉变压器容量,按千伏安计,用以标志电炉能力)在 20 世纪 50 年代以前一般从几百至一万千伏安左右,后来逐渐向大型化发展。70 年代新建电炉一般为 20 000~40 000kVA,最大的封闭式电炉达 75 000kVA,最大的半封闭炉达 96 000kVA。

2. 精炼电炉

用于精炼中碳、低碳、微碳铁合金。电炉容量一般为 1500~6000kVA,采用敞口固定或带盖倾动形式。前者类似还原电炉,可配备连续自焙电极;后者类似电弧炼钢炉,使用石墨或炭质电极。

二、工艺分析

硅石、碳质还原剂(一般为焦炭)、钢屑或铁矿球团是生产铁合金的主要原料。这些原料都要首先形成符合要求的颗粒状,再通过配料称量系统按比例混合。其工作过程简单描述为:采用碳质或镁质耐火材料作炉衬,使用自培电极插入炉料进行埋弧操作,利用电弧的能量及电流通过炉料时因炉料的电阻而产生热量来熔炼金属;冶炼作业连续,过程中陆续加料,间歇式出铁渣。

从变压器低压侧到电极把持器的馈电线路通称为短网，是一段大截面的导体，用以输送大电流至炉内，最大电流可以达到上万安培。大型电炉变压器的二次绕组多数通过短网在电极上完成三角形接线。根据矿热炉的结构特点以及工作特点，矿热炉系统电抗的 70% 是由短网系统产生的，短网的性能决定了矿热炉的性能，正是由于这个原因，铁合金炉的自然功率因数很难达到 0.85 以上，绝大多数炉子的自然功率因数都在 0.7~0.8 之间；同时由于电极的人工控制以及堆料的工艺，导致三相间的电流不平衡加大，最高不平衡度可以达到 20% 以上。

可见，铁合金炉工作过程中将产生无功冲击及谐波，使三相不平衡加剧，平均功率因数降低。

但是，由于铁矿石炉原料的均匀性，决定了其生产过程中无功冲击较小，谐波量也不是很大（一般小于 10%），其相对值略大于电石炉。

第七节 电气化铁道负荷

一、电气化机车的电气特性简析

1. 传统直流机车

电力机车作为电气化铁道的牵引动力，为充分发挥其功率，提高运输能力，要求机车的牵引力和速度均能在宽广的范围内均匀而经济地调节。列车的整个运行过程，情况虽然很复杂，但概括起来可分为启动、调速、制动三种基本的运行状态。

传统的电气化铁道机车类型为直流机车，该电力机车的车内接线如图 2-24 所示。

该类型电力机车将接触网供给的单相工频交流电经机车内部的牵引变压器降压，再经整流装置将交流电转换为直流 1500V，然后向直流牵引电动机供电，从而产生牵引力牵引列车运行。常用机车型号为：国产 SS1 型（非相控）、SS3 型（分段相控）、SS4 型（分段相控）、SS7 型（分段相控）；进口 8G 型（苏联产）、8K 型（法国产）、6K 型（日本产）、6G53 型（法国产）。下面以 SS7 型为例简单描述其工作原理。

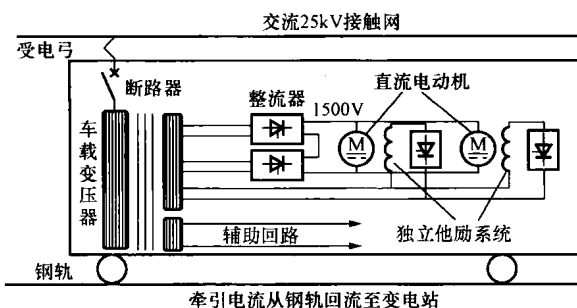


图 2-24 直流机车内部供电示意图

SS7 型整流电路为桥式全波整流，其内部接线原理图如图 2-25 所示。尽管此时变压器二次电压 u_{ab} 为交流正弦波形，但交流电流 i_2 却为正负对称的矩形波，产生了较大的电流波形畸变，如图 2-26 所示。对电流 i_2 进行傅里叶变换分析可知，其特征谐波为 $2k \pm 1$ (k 为正整数)。因此，一般认为，电气化机车为谐波电流源。

实际运行中的机车为了功率调整（阶梯形功率变化）的方便及提高功率因数的原因，其实际电路如图 2-27 所示。进一步分析可知，此时的电流波形仍然为正负半周对称的畸变波形，如图 2-28 所示，特征谐波仍为 $2k \pm 1$ (k 为正整数)。

可见，电气化机车为单相、谐波电流源负荷，机车运行过程中加速、减速等存在功率冲击现象，运行平均功率因数较低。例如，SS 系列部分机车谐波平均测试水平见表 2-1，SS4 型机车功率因数实际测试水平如图 2-29 所示。

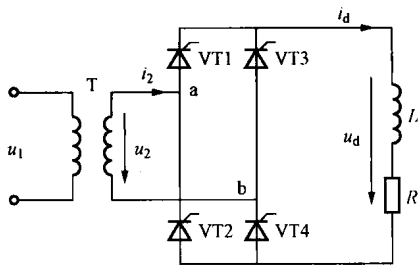


图 2-25 机车原理接线示意图

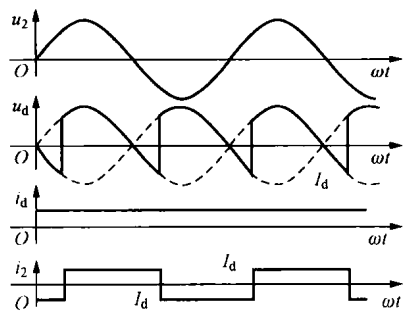


图 2-26 图 2-25 对应的电压电流示意图

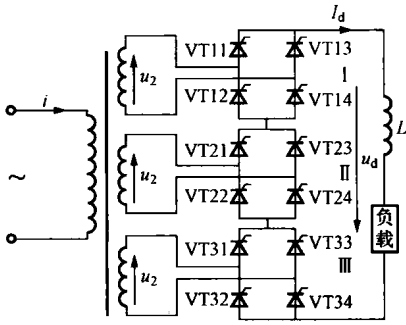


图 2-27 实际运行的机车原理接线示意图

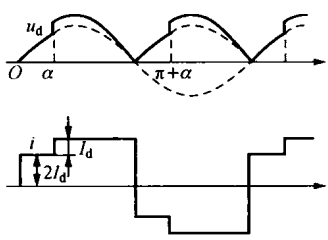


图 2-28 图 2-27 对应的电压电流示意图

表 2-1 SS 系列部分机车谐波平均测试水平^[2] A

车型	负荷率	谐波电流					基波负序电流	基波电流
		I3	I5	I7	I9	I11		
SS1	满载 4.2MW	45	21	11	5.5	2.8	121	206
	半载 2.1MW	26	13	8	4.9	2.7	60.5	103
SS3	满载 4.8MW	50	24	12	6	3.6	134	230
	半载 2.4MW	28	14	8	4	3.2	67	115
SS4	满载 6.4MW	61	32	17	>6	>3.6	176	305
	40%负荷 2.56MW	28	12~18	7.3~10	>3.2	>2.6	70	122

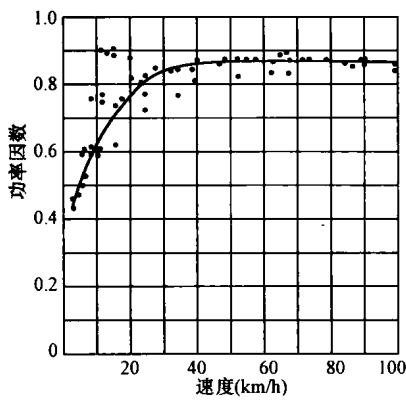


图 2-29 SS4 型机车功率因数实测图

2. 新型交流机车

目前，新型电气化机车均为交流电机，为交直交型供电方式，其原理接线图如图 2-30 所示，均采用 PWM 整流、逆变方式。这一变化带来了较大的电气性能变化，平均功率因数可做到接近 1，理论上不再产生传统的低次谐波，只产生与开关频率相关的高次谐波，谐波频谱可表示为

$$n\omega_c \pm k\omega_r$$

($n = 1, 3, 5, \dots$ 时, $k = 0, 2, 4, \dots$;
 $n = 2, 4, 6, \dots$ 时, $k = 1, 3, 5, \dots$),

式中： ω_c 为载波频率（开关频率）； ω_r 为调制波频率。

图 2-31 所示为某城际高速列车谐波电压实测频谱图。

目前，交流机车的功率较大，例如 HXD₂ 型大功率电力机车功率 10 000kW，有的车需要两列机头；16 辆编组时速 350km 的动车组 20 000kW。350km/h 时速时，若设定 3min 追踪间隔，则对于 30km 的供电臂，变电站的峰值功率超过 120MVA。因此除应该关注其引起的高次谐波之外，更重要的是要关注其引起的三相不平衡度水平。由于牵引变压器一般为单相变压器（一次侧接线电压），因此，其三相不平衡度水平可按式（2-14）预估

$$\delta = \frac{S_{\text{负荷}}}{S_{\text{三相短路容量}}} \times 100\%$$

(2-14)

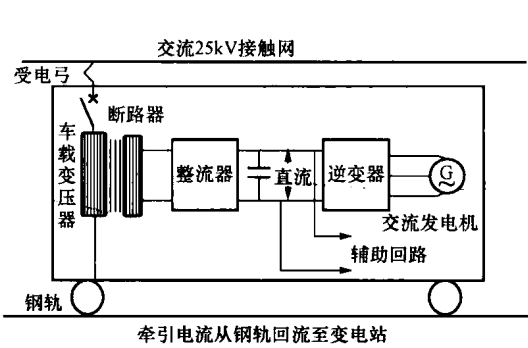


图 2-30 交流机车供电原理图

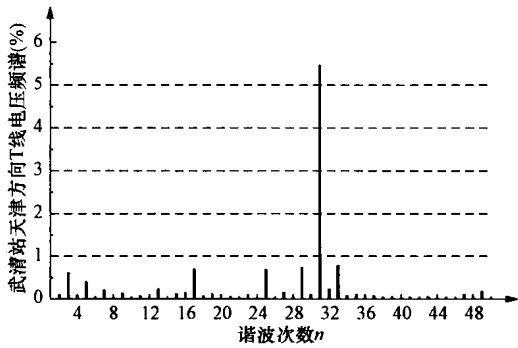


图 2-31 某城际高速列车谐波电压实测频谱图

二、电气化牵引变的电气特征分析

传统的电气化牵引变的主接线一般有三种形式：①Yd11 接线（如图 2-32 所示），变压器高低压为三相能量的交换，变比一般为 $110 \pm 2 \times 2.5\% \text{kV} / 27.5 \text{kV}$ ，低压侧固定 C 相接地，高压侧轮换倒相；②Vv 接线（单相变压器接线为其特殊形式，如图 2-33 所示），变压器高低压为三相能量的交换，变比一般为 $110 \pm 2 \times 2.5\% \text{kV} / 27.5 \text{kV}$ ，低压侧固定 C 相接地，高压侧轮换倒相；③T 形接线（scott）（如图 2-34 所示），高压为三相，低压为两相，变比一般为 110kV/55kV，低压固定相接地，高压轮换。

如前所述，高速列车功率较大，目前一般均采用单相变压器接法，220kV 及以上电压等级供电，如图 2-35 所示。

下面简单分析广泛应用的 Yd11、Vv 接线的负序、谐波水平。

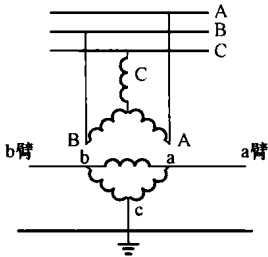


图 2-32 Yd11 接线

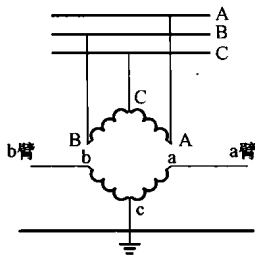


图 2-33 Vv 接线

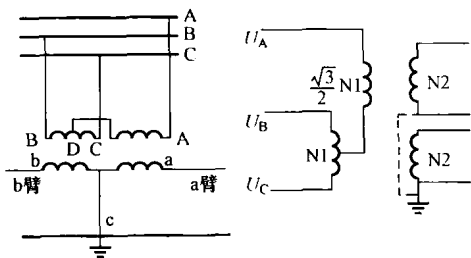


图 2-34 T 形接线 (scott)

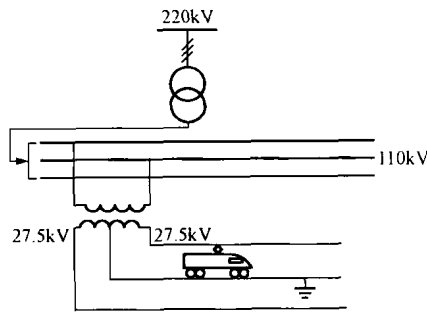


图 2-35 单相变压器接线

1. 负序电流简析

不管是 Yd11 接线还是 Vv 接线，供电系统侧正序、负序电流水平见式 (2-15)、式 (2-16) (假设参考各自供电臂电压的电流初相角相等，大体上符合实际情况)^[3]。

$$I_1 = \frac{1}{\sqrt{3}K} (I_a + I_b) \tag{2-15}$$

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{3}K} (\sqrt{I_a^2 + I_b^2} - I_a I_b) \tag{2-16}$$

式中： I_1 为高压侧正序电流； I_2 为高压侧负序电流； I_a 、 I_b 为 a、b 供电臂的电流； K 为变压器变比。

实际上，受运输组织方式、线路条件、机车操控方式等诸多因素的影响，两段牵引臂的电流变化经常是较大的。因此实际过程中一般以较长时间（一个星期）的 95% 概率大值进行负序电流水平的评估。

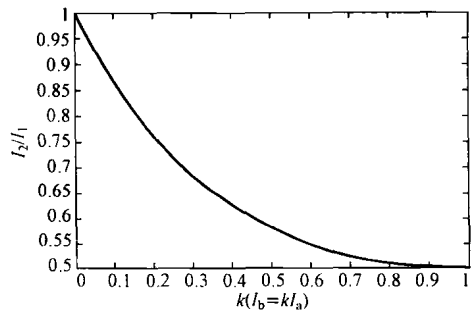


图 2-36 负序电流与正序电流的关系

固定一臂电流（例如 I_a ）为最大，另一臂电流 $I_b = kI_a$ ， k 在 0~1 之间变化，则负序电流与正序电流的关系如图 2-36 所示。一般统计水平表现为 0.5~0.65。

如图 2-36 所示，Yd11、Vv 供电方式负序电流水平与正序电流的变化关系范围若为单相变压器接法，可将其看作 Vv 接法的特殊形式，即只有一个馈电臂的 Vv 接法。因此上述分析方法依然适用。在式 (2-15)、式 (2-16) 中，使一个馈电臂电流为 0，则单相变压器供电方式下正

序、负序电流为

$$I_1 = \frac{1}{\sqrt{3}K} I_a \tag{2-17}$$

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{3}K} I_a \tag{2-18}$$

可见，单相变压器方式下正序电流与负序电流幅值相同，即系统向机车提供正序电流的同时，机车向系统提供了相同幅值的负序电流。

2. 谐波电流简析

对于 Yd11 接线, 变压器一次侧流入系统的谐波电流为^[4]

$$\begin{aligned} I_{Ah} &= \sqrt{4I_{ah}^2 + I_{bh}^2 - 4I_{ah}I_{bh}\cos(\varphi_h - \phi_h + h \times 120)} / \sqrt{3}K \\ I_{Bh} &= \sqrt{I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + 2I_{ah}I_{bh}\cos(\varphi_h - \phi_h + h \times 120)} / \sqrt{3}K \\ I_{Ch} &= \sqrt{I_{ah}^2 + 4I_{bh}^2 - 4I_{ah}I_{bh}\cos(\varphi_h - \phi_h + h \times 120)} / K \end{aligned} \quad (2-19)$$

对于 Vv 接法^[4], 有

$$\begin{aligned} I_{Ah} &= I_{ah}/K \\ I_{Bh} &= I_{bh}/K \\ I_{Ch} &= \sqrt{I_{ah}^2 + I_{bh}^2 - 2I_{ah}I_{bh}\cos(\varphi_h - \phi_h + h \times 120)} / K \end{aligned} \quad (2-20)$$

对于单相变压器接法, 令 Vv 接法中 $I_{ah} = 0$, 即

$$\begin{aligned} I_{Ah} &= 0 \\ I_{Bh} &= I_h/K \\ I_{Ch} &= I_h/K \end{aligned} \quad (2-21)$$

式中: I_{Ah} 、 I_{Bh} 、 I_{Ch} 为高压侧谐波电流; I_{ah} 、 I_{bh} 为两供电臂谐波电流; φ_h 为 a 臂电压电流相位差; ϕ_h 为 b 臂电压电流相位差; I_h 为单相变压器接法一臂谐波电流。

第八节 电化工业大型整流负荷

电化工业主要以大功率的整流负荷为主。下面以电解铝整流负荷为例简单介绍其用电特性。

此类负荷一般通过调整整流变压器低压侧交流电压及整流回路触发角, 控制直流侧电流使其恒定, 进行冶炼作业。例如对于电解铝, 整流变压器低压侧交流电压几百伏左右, 直流侧电压一般也为几百伏 (视串联的槽子多少而定), 每台槽子直流电压一般为几伏。

一、整流系统外特性及其控制

整流回路的外特性等效如图 2-37 所示, 通过调整阀交流侧电压 U 、触发角 α 等手段控制直流电压 U_d , 从而实现定电流控制进行电解铝生产。相关参量如下式所示

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha - d_r I_d \quad (2-22)$$

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U \quad (U \text{ 为相电压})$$

$$d_r = \frac{3\omega L_r}{\pi} \quad (2-23)$$

可见, 可以通过 U_{d0} 及 α 角的控制改变直流电压, 其目标为控制直流电流 I_d 恒定, 实现正常生产。

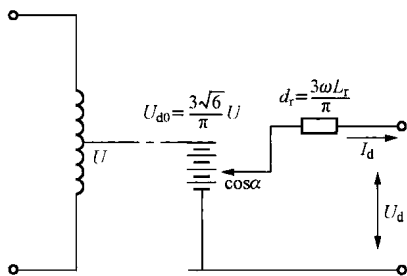


图 2-37 整流回路的外特性等效电路图

此时, 交流侧基波电流为 $I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$, 单一整流模块的谐波电流为 $I_n = \frac{1}{n} I_1$ ($n = pk \pm 1$, p 为脉动数, k 为正整数)。

二、功率因数

整流负荷本身的功率因数受触发角、换相角的影响较大, 特别在深度控制情况下功

率因数更低。一般来说,对于同样的负荷水平,在不考虑换相角影响前提下,不可控整流比可控整流功率因数高。

实际上,电解铝负荷功率因数低的原因还在于整流变压器消耗的无功,特别在变压器的短路阻抗达到 100% 以上的情况下,此时消耗的无功更大;同时整流阀交流侧自饱和电抗器(为了控制交流电压)的存在进一步降低了功率因数。

近似地,换流装置的功率因数角 $\varphi = \alpha + \gamma/2$,更精确的可用下式求取其功率因数

$$\cos\varphi = \frac{1}{2}[\cos\alpha + \cos(\alpha + \gamma)] \quad (2-24)$$

三、谐波特征

1. 单台 12 脉整流电路

在大型的电化学或电冶金用直流电源系统中,同相逆并联 12 脉波整流机组是组成 24 相、36 相、48 相整流系统的基本组成单元。因此,分析基本的 12 脉单元整流电路回路对于分析其谐波特征有着非常重要的意义。

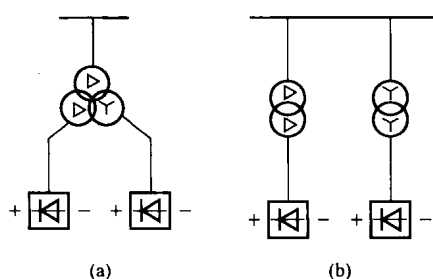


图 2-38 12 脉整流机组接线方式

(a) 单机组 12 脉波整流电路; (b) 等值 12 脉波整流电路

12 脉波整流机组主电路的连接型式有两种方式(如图 2-38 所示):一种是由一台整流变压器与两台整流装置组成的单机组 12 脉波整流电路(简称“单机组 12 脉波整流电路”);另一种是由置于同一油箱内的两台完全独立的整流变压器与两台整流装置组成的双机组等值 12 脉波整流电路(简称“等值 12 脉波整流电路”)。上述两种连接方式的整流电路,对 12 脉波整流输出电压(电流)波形的对称性以及网侧谐波电流的影响是不同的。

(1) 两种连接方式对谐波电流的影响。理想情况下,12 脉波整流电路运行过程中,不会在网侧产生 5 次和 7 次谐波电流。但对于单机组 12 脉波整流电路,由于变压器两个阀侧绕组的输出电压和阻抗很难做到绝对一致,导致运行时存在着严重的负荷分配不均的问题。需要通过晶闸管相控或饱和电抗器的励磁调节来纠正这种偏差,从而导致两个三相桥晶闸管导通的相位差不能严格地保持 30° ,使得网侧仍然存在 5 次和 7 次谐波电流。对于等值 12 脉波整流电路,由于变压器两个阀侧绕组的输出电压和阻抗容易做到一致,一般不会破坏 12 脉波的对称性。

(2) 绕组之间负荷电流分配不均的问题。一般来说,对于单机组 12 脉波整流电路,变压器二次电抗数值越小,负荷分配相差就越大。采用饱和电抗器进行细调,能较好地解决二者负荷电流分配不均问题,但也是有代价的。饱和电抗器占用的空间大、制造成本增加,本身的电耗和对功率因数的影响等都是不能忽略的。

对于等值 12 脉波整流电路来讲,就不存在因 Δ 、 γ 连接引起负荷电流分配不均的问题。

(3) 造价的比较。单机组 12 脉波整流电路的变压器只有一个器身,一台调压开关,铁芯利用率高,有造价低、体积小的优点。

等值 12 脉波整流电路的整流变压器为双器身结构,需要两台调压开关,相当于化整为零,铁芯利用率也低。所以,有造价高和体积相对较大的缺点。

2. 谐波水平实例分析

下面以单台 12 脉整流器移相构成的 36 脉整流装置一台机组故障停机状况下的谐波水平分析为例, 介绍此类负荷不同工况、组合情况下的谐波分析方法, 便于实际系统中灵活运用。

3 台 12 脉阀交流侧移相 10° , 构成 36 脉动 (如图 2-39 所示), 特征谐波 $36k \pm 1$ 。各次谐波序特性见表 2-2, 在 3 台整流变同时运行情况下, 单台 12 脉整流回路产生的谐波情况分析如下, 分析中以图 2-39 中 1 号变压器二次侧电压 U_0 为参考进行。一次侧、二次侧匝数比设定为 1。

表 2-2 谐波正负零序参考表

谐波次数	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	35	37	41
正负序	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
-: 负序													
+: 正序													

(1) 1 号变压器。1 号变压器一次侧、二次侧相位相同, 以二次侧电压 U_0 为参考, 一次侧电流为

$$i_1 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\sin\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t + \frac{1}{23} \sin 23\omega t + \frac{1}{25} \sin 25\omega t + \frac{1}{35} \sin 35\omega t + \frac{1}{37} \sin 37\omega t + \dots \right)$$

(2) 2 号变压器。2 号变压器二次侧电压滞后 1 号变压器 10° , 则其二次侧电流为

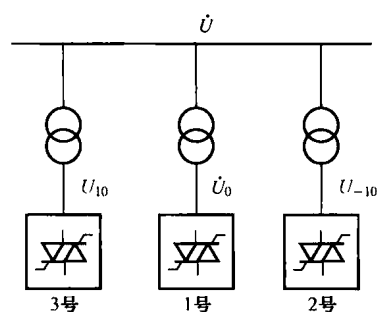


图 2-39 36 脉动运行谐波分析图

$$\begin{aligned} i'_2 &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\sin(\omega t - 10) + \frac{1}{11} \sin 11(\omega t - 10) + \frac{1}{13} \sin 13(\omega t - 10) + \frac{1}{23} \sin 23(\omega t - 10) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{25} \sin 25(\omega t - 10) + \frac{1}{35} \sin 35(\omega t - 10) + \frac{1}{37} \sin 37(\omega t - 10) + \dots \right] \\ &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\sin(\omega t - 10) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t - 110) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t - 130) + \frac{1}{23} \sin(23\omega t - 230) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{25} \sin(25\omega t - 250) + \frac{1}{35} \sin(35\omega t - 350) + \frac{1}{37} \sin(37\omega t - 370) + \dots \right] \end{aligned}$$

2 号变压器一次侧电压与 1 号变压器相同, 故超前 2 号变压器二次侧 10° , 即正序超前 10° , 负序滞后 10° , 因此 2 号变压器一次侧电流为

$$i_2 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\sin\omega t + \frac{1}{11} \sin(11\omega t - 120) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t - 120) + \frac{1}{23} \sin(23\omega t - 240) + \frac{1}{25} \sin(25\omega t - 240) + \frac{1}{35} \sin(35\omega t - 360) + \frac{1}{37} \sin(37\omega t - 360) + \dots \right]$$

(3) 3 号变压器。3 号变压器二次侧电压超前 1 号变压器 10° , 则其二次侧电流为

$$i'_3 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\sin(\omega t + 10) + \frac{1}{11} \sin 11(\omega t + 10) + \frac{1}{13} \sin 13(\omega t + 10) + \frac{1}{23} \sin 23(\omega t + 10) \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{25} \sin 25(\omega t + 10) + \frac{1}{35} \sin 35(\omega t + 10) + \frac{1}{37} \sin 37(\omega t + 10) + \dots \Big] \\
 = & \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \Big[\sin(\omega t + 10) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t + 110) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t + 130) + \frac{1}{23} \sin(23\omega t + 230) \\
 & + \frac{1}{25} \sin(25\omega t + 250) + \frac{1}{35} \sin(35\omega t + 350) + \frac{1}{37} \sin(37\omega t + 370) + \dots \Big]
 \end{aligned}$$

3号变压器一次侧电压与1号变压器相同,故滞后3号变压器二次侧 10° ,即正序滞后 10° ,负序超前 10° ,因此其一次侧电流为

$$\begin{aligned}
 i_3 = & \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \Big[\sin \omega t + \frac{1}{11} \sin(11\omega t + 120) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t + 120) + \frac{1}{23} \sin(23\omega t + 240) \\
 & + \frac{1}{25} \sin(25\omega t + 240) + \frac{1}{35} \sin(35\omega t + 360) + \frac{1}{37} \sin(37\omega t + 360) + \dots \Big]
 \end{aligned}$$

(4) 3台变压器各次谐波序量图。3台变压器各次谐波序量图如图2-40所示。

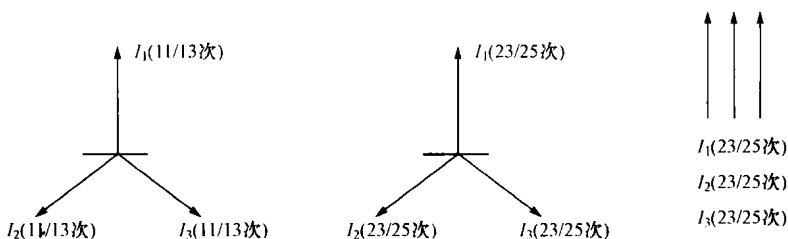


图 2-40 等效 36 脉 3 台 12 脉整流变合成谐波序量图

(5) 结论。上述分析可见,对称、负荷均等情况下,仅剩 $36k \pm 1$ 次谐波,构成等效 36 脉动;当一台设备故障情况下,11、13、23、25 次合成谐波等于单台 12 脉负荷产生的谐波,但基波、 $36k \pm 1$ 次频谱量为单台的两倍。

可见,对于设计的 $36k \pm 1$ 次特征谐波,由于运行方式的调整变化,运行过程中将存在相当数量的 $12k \pm 1$ 次谐波。因此滤波器设计分析中应充分考虑不同生产工艺过程对谐波频谱、量值的影响。

当然,也要考虑由于参数的不对称及触发角的差别引起的非特征谐波。

第九节 节能电器及变频设备

随着全社会节能意识的加强,各类电力电子节能电路得到广泛应用。虽然单台负荷不大,但是由于此类负荷数量众多,其引起的电能质量污染就需要认真对待。下面以单相电路为例对部分电路进行简单分析。

1. 单相调压电路

图 2-41 为典型的单相调压电路。通过在交流电源 u_1 的正负半周控制反并联晶闸管 VT1、VT2 的触发脉冲可以方便地改变电路的输出电压 u_0 。设负载的阻抗角为 $\varphi = \arctan(\omega L/R)$,则触发角 α 的移相范围为 $\varphi \leq \alpha \leq \pi$ 。该类型电路产生谐波的特征频次为 $2k \pm 1, k$ 为正整数。该电路的功率因数较低,小于自然功率因数 $\cos \varphi$ 。

值得一提的是,纯电阻负载下谐波含量大于阻感负载,阻抗角 φ 越大,谐波含量

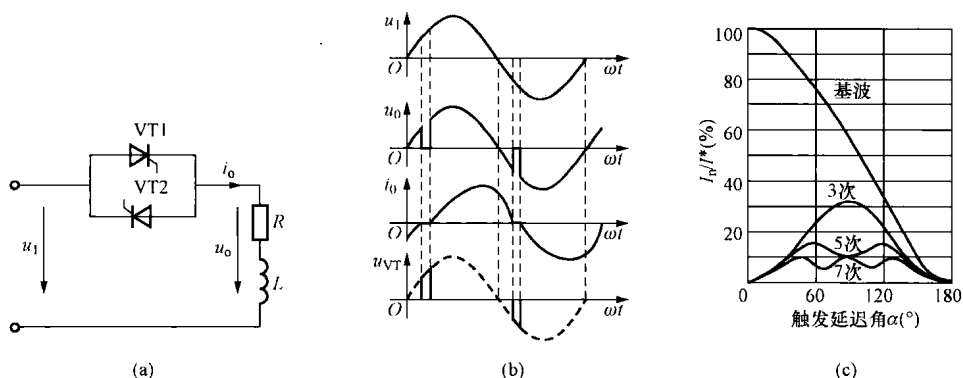


图 2-41 单相调压电路

(a) 电路；(b) 对应波形；(c) 典型谐波含量

越小。

2. 斩控式交流调压电路

应用全控型器件可以设计图 2-42 所示的斩控式交流调压电路。图中 VT1、VT2、VT3、VT4 为全控器件，VD1~VD4 为二极管。在交流电源 u_1 的正半周，用 VT1 进行斩波控制，VT3 给负载提供续流通路；在交流电源 u_1 的负半周，用 VT2 进行斩波控制，VT4 给负载提供续流通路。

图 2-43 为纯电阻负载时的负载电压电流波形，可见，其基波功率因数等于自然功率因数；进一步分析表明：电路不产生低次谐波电流，只产生与开关频率相关的高次谐波。

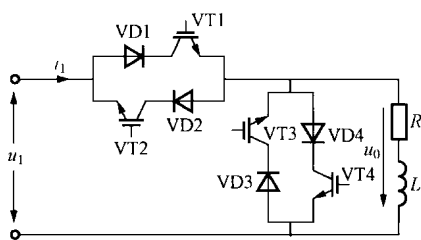


图 2-42 斩控式交流调压电路

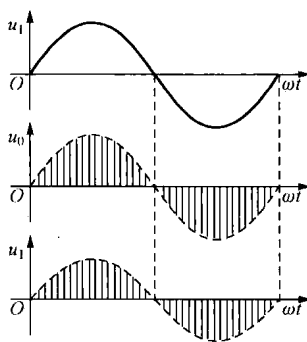


图 2-43 纯电阻负载时的负载电压电流波形

3. 交流调功电路

交流调功电路与交流相控调压电路形式一样，只是控制方式不同。交流调功电路不是在每个电源周期都对电压波形进行控制，而是将负载与电源接通几个工频整周波，再断开几个工频整周波，从而调节负载所消耗的平均功率。

设控制周期为 M 倍的工频电源周期，其中晶闸管在前 N 个周期导通，后 $M-N$ 个周期关断，以纯电阻负载为例，其电压、电流波形如图 2-44 (a) 所示（图中， $M=3$ ， $N=2$ ），其对应频谱如图 2-44 (b) 所示。可见，此时的谐波电流频谱为 $50/M$ 的整数倍。

4. 交交变频电路

图 2-45 为典型的单相交交变频电路原理图及输出电压、电流波形。电路由 P 组和 N

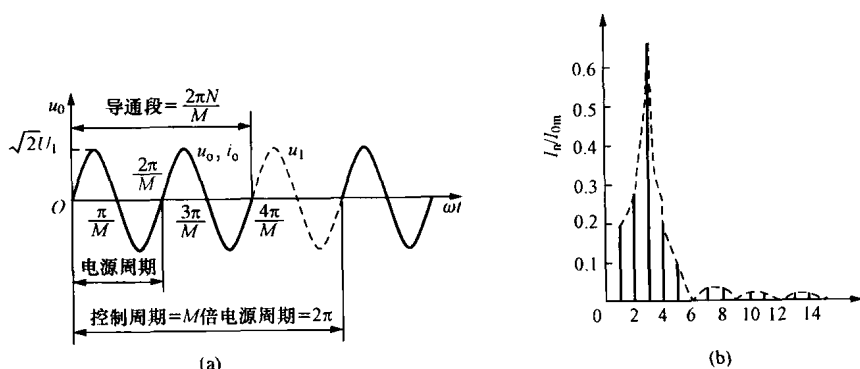


图 2-44 交流调功电路输出波形示意图

(a) 交流调功电路; (b) 电流频谱图 ($M=3$ 、 $N=2$)

组反并联的晶闸管变流电路构成。变流器 P 和 N 都是相控整流电路, P 组工作时, 负载电流 i_0 为正, N 组工作时, 负载电流 i_0 为负。

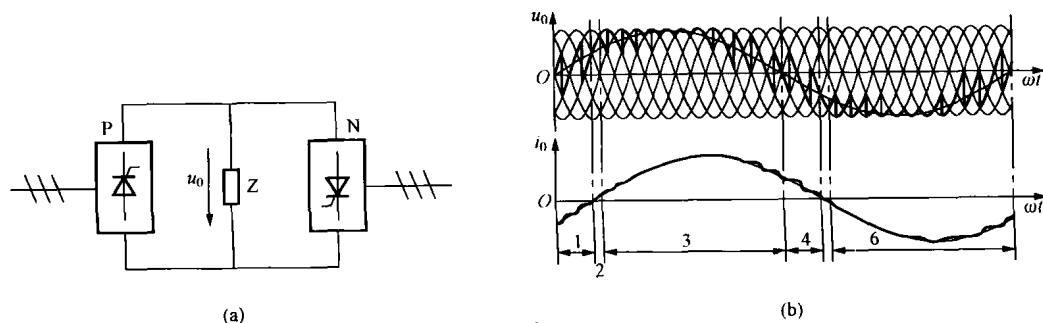


图 2-45 单相交交变频电路及其输出波形

(a) 电路图; (b) 输出波形

改变两组变流器的切换频率, 就可以改变输出频率 ω_0 ; 改变变流电路工作时的控制角 α 就可以改变交流输出电压的幅值 u_0 。

下面进一步分析图 2-45 电路的输出波形, 该波形包含了 P 组、N 组整流、逆变的不同运行状态。设一组变流器工作时, 另一组变流器封锁, 则图示输出电流波形可分为 6 小段: 第 1 段 $i_0 < 0, u_0 > 0$, 为 N 组逆变状态; 第 2 段电流过零死区; 第 3 段, $i_0 > 0, u_0 > 0$, 为 P 组整流状态; 第 4 段 $i_0 > 0, u_0 < 0$, 为 P 组逆变状态; 第 5 段电流过零死区; 第 6 段, $i_0 < 0, u_0 < 0$, 为 N 组整流状态。

一般来说, 交交变频电路的输出频率不高, 电压波形畸变以及由此产生的电流波形畸变和转矩脉冲是限制输出频率提高的主要因素。就常用的 6 脉波三相桥式电路而言, 一般认为输出上限频率不高于电网频率的 $1/3 \sim 1/2$ 。

交交变频电路的负载电流相位总是滞后于其输入电压的, 不论负载自然功率因数是超前还是滞后, 输入电路的无功功率总是滞后的; 负载自然功率因数越低, 输入电路的功率因数也越低; 输出电压比 (输出电压与整流电路空载电压的比值) 越小, 输入电路的功率因数也越小; 即使负载自然功率因数为 1, 输出电压比为 1, 电路输入功率因数也小于 1, 此时一般稍大于 0.8。

交交变频电路的输入电流波形和晶闸管整流电路的输入波形类似，但是其幅值和相位均按正弦规律被调制。采用三相桥式电路的交交变频电路的输入电流频率为

$$f_{in} = |(6k \pm 1)f_i \pm 2lf_0|$$
$$f_{in} = f_i \pm 2kf_0$$

式中： $k=1、2、3、\cdots$ ； $l=0、1、2、\cdots$ 。

第十节 敏感负荷及其用电特性^[5]

事实上，所谓敏感负荷是指对电能质量敏感的某些电气元件（设备）。这些电器元件功能的丧失将引起整个生产流程的中断，从而产生较大的经济损失。下面主要以电压暂降为例分析部分电气元件（设备）的抗扰度水平，表 2-3 为电压暂降对部分设备（器件）的影响统计。

设备名称	造成的影响
制冷电子控制器	当电压低于 80%时，控制器切除制冷电机，导致很大损失
芯片制造设备	当电压低于 85%时，芯片被毁，测试仪停止工作，内部电子电路主板故障
PLC	当电压低于 90%持续几个周波，I/O 设备切除，低于 81%时 PLC 停止工作
精密机械工具	机器人控制操作的精密加工过程，当电压低于 90%持续 2~3 个周波，其工作过程中断
直流电机	当电压低于 80%时，电机保护跳闸
调速电机（VSD）	当电压低于 70%，持续时间超过 6 个周波，VSD 被切除；一些精密加工业的电机，当电压低于 90%持续时间超过 3 个周波，电机跳闸退出运行
交流接触器	电压低于 50%持续时间超过 1 个周波，接触器就会脱扣，有时电压低于 70%接触器就会脱扣
计算机	当电压低于 60%持续 12 个周波，计算机工作将受到影响，数据可能丢失

一、几类敏感负荷

1. 接触器

无论是交流接触器还是直流接触器，对电压暂降均比较敏感。接触器不仅对电压暂降的幅值及其持续时间敏感，同时，暂降发生的时刻以及暂降过程发生的相位跳变对接触器能否跨越暂降均有较大的影响。一般来说，电压 0°发生暂降时，接触器线圈存储的能量较大，因此，容易躲过暂降，当电压 90°发生暂降时则容易脱扣。图 2-46 为实验室测试的某型号接触器的电压暂降抗扰度水平。

一般来说，当电压幅值降到 60%及以下，持续时间超过一个工频周波（20ms）时，大多数交流接触器将会动作。

值得一提的是，直流接触器抗电压暂降的能力比交流接触器强，因此采用直流接触器可以提高接触器的电压暂降抗扰度水平（如图 2-47 所示），此时暂降发生的时刻及其相位跳变的影响已经不大。

2. 感应电动机

工业生产中有众多恒转矩负荷由感应电动机带动。电压暂降将会影响此类负荷的安

全生产。

图 2-48 为正常运行及暂降过程中电动机转矩的变化曲线。由于电动机转矩 $T \propto v^2$ ，因此电压暂降对于感应电动机的影响较大。特别地，对于图中曲线 3 的深度暂降，此时电磁转矩小于负荷转矩，电动机将停止运转。若短时间后电压恢复，电动机重新供电，由于

线圈中的剩余能量此时衰减较慢，此时将会产生较大的启动电流，同时电机转矩将出现短时间的脉动，甚至产生负转矩（如图 2-49 所示）^[6]，可能对负荷产生不利影响，甚至产生机械上的损坏。

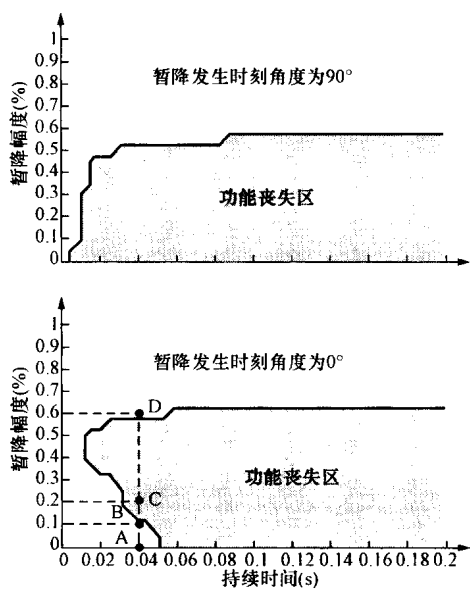


图 2-46 某型号的接触器的电压暂降抗扰度水平

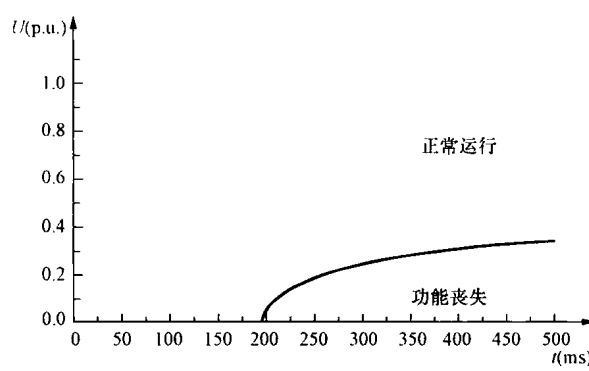


图 2-47 直流接触器抗电压暂降测试水平

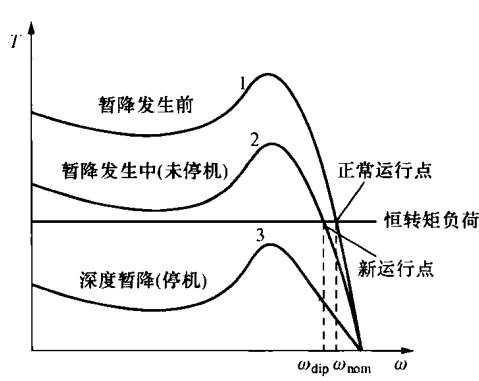


图 2-48 正常运行及暂降过程中电动机转矩的变化曲线

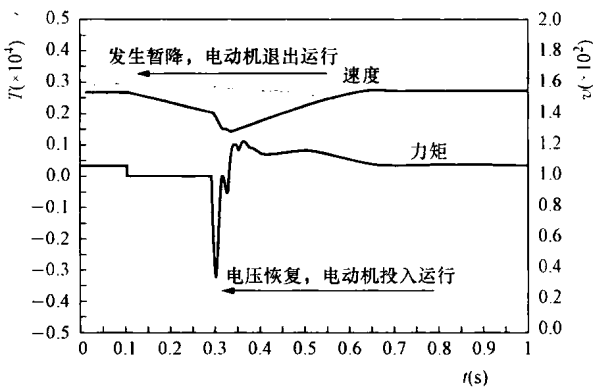


图 2-49 剩磁通引起的转矩脉动（负转矩）

3. 变频调速驱动 (ASDs)

变频器是利用电力半导体器件的通断作用将工频电源变换为另一频率的电能控制装置。目前广泛采用的变频器主要采用交直交方式 (VVVF 变频或矢量控制变频)，即先把工频交流电源通过整流器转换成直流电源，然后再把直流电源转换成频率、电压均可控制的交流电源以供给电动机。变频器的电路一般由整流、中间直流环节、逆变和控制 4 个部分组成。整流部分为三相桥式不可控整流器，逆变部分为 IGBT、GTR 三相桥式逆变

器,且输出为 PWM 波形,中间直流环节为滤波、直流储能和缓冲无功功率。现代变频器一般均有内部直流母线端子,如图 2-50 所示为典型的变频调速驱动电路。

变频器的控制一般都是以直流母线电压恒定为前提来进行的。一旦直流母线电压降低,除导致转速、转矩、功率变化导致变频器性能下降之外,还可能导致电力电子器件过电流而发热增加。由于电力电子器件的最大弱点在于发热,要解决短时发热问题势必

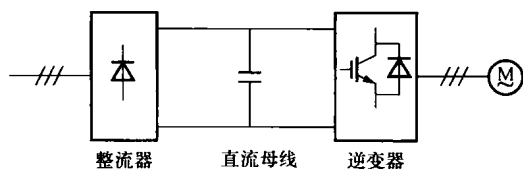


图 2-50 典型的变频调速驱动电路

须要增加器件的裕度,裕度的增加势必增加器件成本。因此,一般的变频器都具有过压、失压和瞬间停电的保护功能。变频器的逆变器件为 GTR 时,一旦失压或停电,控制电路将停止向驱动电路输出信号,使驱动电路和 GTR 全部停止工作,电动机将处于自由制动状态;逆变器件为 IGBT 时,在失压或停电后,将允许变频器继续工作一个短时间 t_d ,若失压或停电时间 $t_0 < t_d$,变频器将平稳运行;若失压或停电时间 $t_0 > t_d$,变频器自我保护停止运行。一般 t_d 都在 15~25ms。

4. 晶闸管控制电路

晶闸管控制电路多采用 PLL 技术控制触发脉冲。电压暂降及其相位跳变将影响控制脉冲的正确性。

5. 可编程控制器 (PLC)

PLC 一般包括电源环节、中央处理单元 CPU、I/O 模块等。

PLC 电源一般均为开关电源,供电给 CPU 及模拟、数字 I/O。可见,电源的变化直接关系到 I/O 的逻辑关系,进而影响整个控制过程。因此,系统将连续不断地监测其输入电源及开关电源的输出,以便在相应深度的暂降下有序地关闭系统。

图 2-51 为实验室测量的批量 PLC 电源的电压暂降抗扰度曲线。图中曲线 1 针对电压暂降较敏感者,曲线 2 为平均水平,曲线 3 为抗扰度水平较高者。

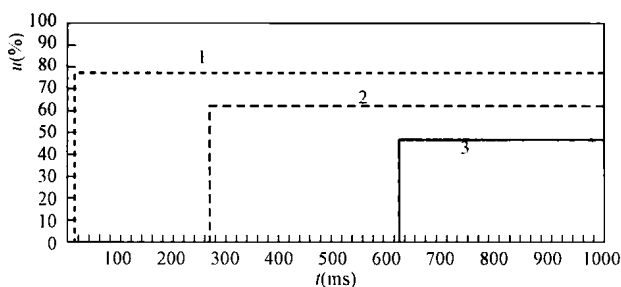


图 2-51 实验室测量的批量 PLC 电源的电压暂降抗扰度曲线

6. 个人计算机

个人计算机的电源为开关电源。电压暂降发生时,个人计算机将经历不同的“故障”过程,包括读/写操作锁定、操作系统锁定、关机/重启动。

一般个人计算机对电压暂降的抗扰度水平以是否关机/重启动来衡量。实际上,这是一种误导,因为在关机/重启动之前,还有两个过程被锁定,此时的计算机已经处于不能正常工作状态。图 2-52 为实验室测定的个人计算机的电压暂降抗扰度水平曲线。

二、信息工业设备抗扰度曲线

1. CBEMA 曲线

CBEMA 曲线是美国计算机商用设备制造协会针对计算机商用设备对电压暂降的反应,通过大量的试验获取的电压暂降、暂升、短时中断抗扰度水平曲线,如图 2-53 所示。

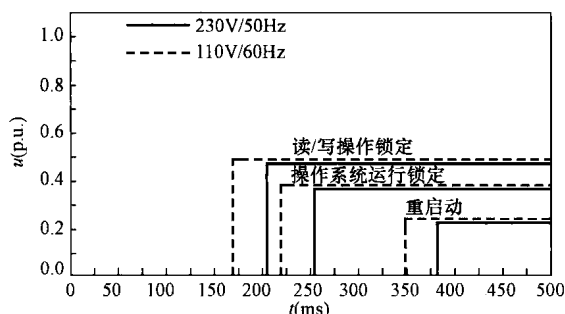


图 2-52 实验室测定的个人计算机的电压暂降抗扰度水平曲线

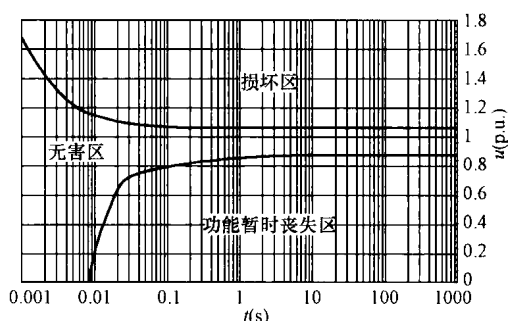


图 2-53 CBEMA 曲线

2. ITIC 曲线

ITIC 曲线是在 CBEMA 曲线的基础上发展起来的,是在大量试验数据的支持下,根据计算机等信息工业设备 (ITE: Information Technology Equipment) 对暂态电能质量 (主要是电压暂降、暂升、短时中断) 的抗扰水平形成的,被 IEEE 引用为美国标准 (IEEE 446)。

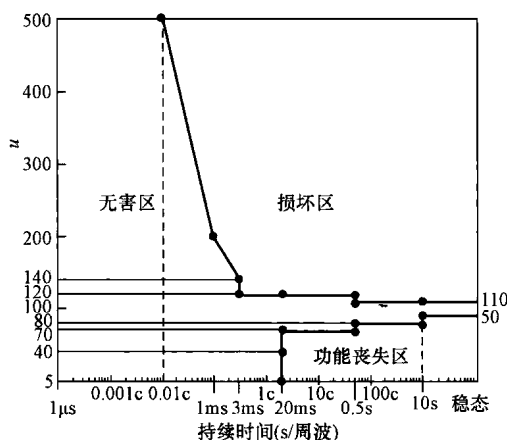


图 2-54 ITIC 曲线

该曲线基于计算机及信息工业对系统供电电压的敏感程度,描述了 7 类典型事件,即电压稳态容限、电压暂升、暂降、短时中断、暂态过电压和瞬态过电压,将 $U-t$ 平面分为 3 大部分,即无害区、功能丧失区、损坏区,如图 2-54 所示。

无害区由下述 7 类事件包围的区域构成,电压在此区域设备性能均能正常发挥,这七类事件包括:

(1) 稳态电压变化: 稳态电压变化一般在额定电压的 $\pm 10\%$ 范围内波动,不至于对设备的性能产生任何危害,属于正常的电压变化范围。

(2) 电压暂升 (swell): 设备可忍受的条件为: 电压有效值上升到额定值的 120% , 持续 $0.5s$ 时间 (一般在大负荷切除或其他新电源供电时出现)。

(3) 低频衰减振荡 (Low frequency decaying ringwave): 当功率因数校正电容投入系统时发生。振荡频率范围一般为 $200\sim 5000Hz$ (与交流配电系统的谐振频率有关), 其暂态幅度一般表示为额定电压峰值的百分数, 该暂态过程一般在电压峰值附近发生, 出现

后半周波衰减结束。幅值从 200Hz 时的 140% 振荡到 5000Hz 时的 200%。

(4) 高频冲击：一般由雷电引起，参见第九章。

(5) 电压暂降 (sag)：曲线描述了两类电压暂降事件，暂降幅度以有效值表示。一般因电力系统不同节点大负荷的投入、故障等引起；下跌到 80% 额定电压时 ITE 设备可忍受的典型持续时间为 10s，下跌到 70% 额定电压时为 0.5s。

(6) 电压暂时中断 (dropout)：一般包括严重的电压暂降及完全的电压中断两类事件。ITE 设备可忍受的持续时间可达 20ms。

1) 功能丧失区：该区域在容忍曲线的下部，此时设备的正常功能将不能保证发挥，但不至于对设备自身构成损坏。

2) 禁止区 (设备损坏区)：处于容忍曲线的上部，一旦到达该区域，ITE 设备将损坏。

3. SEMI 47 曲线

SEMI (the Semiconductor Equipment and Materials International Group) 即半导体设备及材料国际工作组，1988 年，该组织针对电压暂降对半导体制造业的影响，给出了 SEMI 47 曲线，如图 2-55 所示。

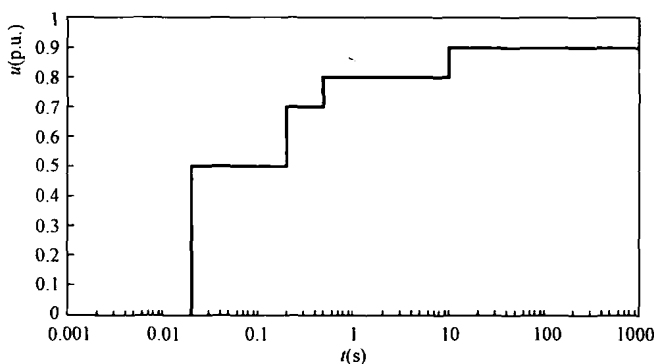


图 2-55 SEMI 47 曲线

参 考 文 献

- [1] T.J.E. 米勒, 胡国根, 译. 电力系统无功功率控制. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [2] 张直平. 城市电网谐波手册. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [3] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电压电流频率和电能质量国家标准应用手册. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [4] 吴竞昌. 供电系统谐波. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [5] Voltage Dip Immunity of Equipment and Installations, CIGRE/CIREU/UIE Joint Working Group C4. 110.
- [6] M. D. McCulloch, The effect of voltage dips on induction motors. http://www.measurlog-ic.com/Resources/PowerQuality_book.pdf

等效冲击电流分析法

电能质量现象是通过由负荷的用电特性确定的干扰源作用到供电网络而表现出来的。负荷用电的干扰源特性与供电网络的电能质量响应特性是电能质量问题的两个方面，二者是分析电能质量问题的有机整体。因此，分析供电网络的电能质量响应特性对于正确分析电能质量现象、确定经济合理的控制措施至关重要。

本章介绍一种适合工程应用的电能质量等效冲击电流分析法，便于对不同电能质量干扰源进行系统分析风险评估、控制措施验证评价等。

第一节 供电网络谐波固有特性分析

对于一个确定的供电网络，其对不同谐波频谱的响应特性是固定不变的。当谐波源施加到网络上时，这种特性就直观地表现出来；否则，这种特性只是一种“隐”特性而不为人所觉察。

分析电网谐波特性一般包含两层意思：①对于确定的拓扑结构，即运行方式不变，电气设备参数不变，此时研究外加谐波激励源施加到电网时电网的谐波响应特性，如图 3-1 所示；②外界激励源未发生变化，网络拓扑发生了变化，如图 3-2 所示。

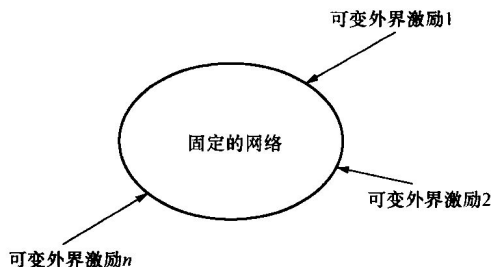


图 3-1 外界激励型谐波特性研究

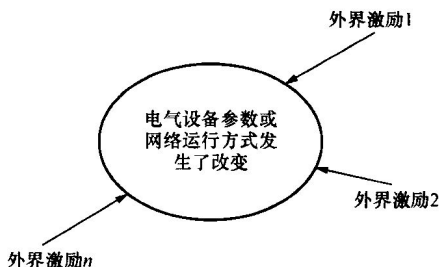


图 3-2 网络特征改变后的谐波特性分析

一般来说，要研究网络的谐波特性，离不开外界激励源，但是实际过程中不可能频繁地将一个谐波源施加到一个实际运行的网络上进行分析研究，一般多通过仿真的方法予以实现。

实际上，谐波状况下网络的固有谐波特征就包含在网络的导纳矩阵之中。对于给定

的节点 i ，可研究下述情况下节点导纳矩阵的变化，从而研究节点 i 的固有谐波（谐振）特性，即这种变化在固定的激励源情况下是否会诱发谐振，谐振点在什么地方，与改变前有什么样的变化等。

通常，导致节点导纳矩阵变化的主要操作包括：

- 1) 倒闸操作，改变潮流流向及其分布；
- 2) 变电站运行方式的改变，例如两台并列运行的变压器分裂运行；
- 3) 短路容量的变化；
- 4) 无功补偿装置的投切；
- 5) 串联电抗参数的变化；
- 6) 变压器的更换导致参数的变化。

一、谐波谐振的基本原理

下面以一个简单供电网络为例（如图 3-3 所示）简述谐波谐振特性。为了使问题更加直观，分析过程中省略电阻的影响（电阻的作用在于阻尼谐振的幅度，阻碍谐波的传播范围）。

在图 3-3 (a) 中，E 代表系统，T 为一变压器， I_n 为一谐波电流源，C 为与谐波源同母线的并联电容；为了分析网络对谐波源 I_n 的响应特性，将系统阻抗（包括 E、T）用一等效电抗表示，如图 3-3 (b) 所示。那么，从谐波源 I_n 点向系统看进去的等值阻抗为

$$Z_n = \frac{X_n X_{cn}}{X_n + X_{cn}} \quad (3-1)$$

谐波源 I_n 在母线产生的谐波电压为

$$U_n = I_n Z_n \quad (3-2)$$

式中： X_n 为从谐波源母线向系统看进去的谐波电抗（不包括母线电容）； X_{cn} 为并联电容谐波电抗； Z_n 为谐波源母线谐波总阻抗； I_n 为谐波源谐波电流； U_n 为谐波源谐波电流在母线上产生的谐波电压。

式 (3-1)、式 (3-2) 说明：对于相同的 I_n ，在母线上产生的谐波电压 U_n 是随着 Z_n 而改变的，而 Z_n 又是谐波次数 n （即谐波频率）的函数，当 $X_n + X_{cn} = 0$ 时，即 $n = \omega \sqrt{1/Lc}$ 时， U_n 达到最大值，此时电网发生并联谐波谐振。

在谐振状况下，谐波源母线的谐波电压最大，忽略电阻的理论值为 ∞ ，这一谐波电压又在电网的其他地方产生谐波电流。

当然，实际电网中由于电阻的存在， Z_n 不可能为零， U_n 也不可能为无穷大。同样，实际电网结构绝非像图 3-3 那样简单，必须进行复杂的计算机分析才能得到完整的谐波谐振特性曲线。

二、谐波特性的计算机仿真方法

谐波特性是针对某一节点进行分析的。对于相同的激励，不同的节点有着不同的响应特性。实际上，就 n 次谐波而言，对于特定的节点 i ，决定其主要特性的是其自导纳 Y_{ii} ，一般来说，距离该结点较远的节点的变化对节点 i 的影响是比较小的，距离越远，这种影响越小。

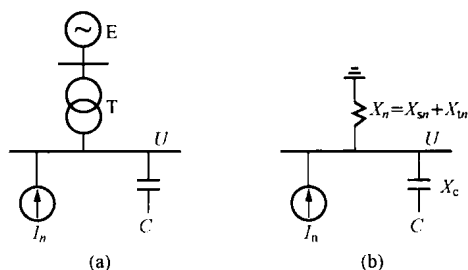


图 3-3 谐振分析原理图



对于一个 N 节点的网络, 在获取了各元件谐波阻抗及其拓扑关系后, 对于某 n 次谐波其谐波导纳矩阵为

$$Y_n = \begin{bmatrix} Y_{n11} & \cdots & Y_{n1i} & \cdots & Y_{n1N} \\ \vdots & & & & \\ Y_{ni1} & \cdots & Y_{nii} & \cdots & Y_{niN} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{nN1} & \cdots & Y_{nNi} & \cdots & Y_{nNN} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

式中: $n \in HH$, $HH = f_1 H / \Delta f$ (H 为最高谐波分析次数), f_1 为基波频率, Δf 为频率扫描间隔 (一般 $\Delta f = 5\text{Hz}$), Δf 的确定对于发现与诊断间谐波谐振现象至关重要。

根据上节分析, 要分析某节点 i 的谐波 (谐振) 响应特性, 可以对该节点注入谐波电流 I_n , 从而获取该节点的谐波电压, 其中 I_n 为

$$I_n = \underbrace{[0 \quad \cdots \quad i_n \quad 0 \quad 0]^T}_N, i_n \text{ 所处的位置为第 } i \text{ 个}$$

根据上述思路获取谐振特性分析的数学模型如下

$$I_n = Y_n U_n \quad n \in HH \quad (3-4)$$

解方程组 (3-4) 即可获取对应于节点 i 的谐波电压 $u_{n,i}$, 当 $i_n = 1$ 时, $u_{n,i}$ 也就是节点 i 的第 n 次谐波阻抗。

反复上述过程 HH 次, 可获取对应节点 i 的各次谐波阻抗

$$Z_{n,i} = [u_{n,i}], n \in HH$$

可通过图 3-4 直观地表示其谐波谐振点。

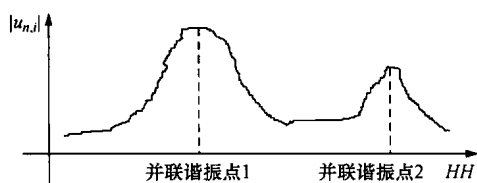


图 3-4 谐振特性直观展示

谐波分析中的导纳矩阵不仅具有常规导纳矩阵的基本特征 (稀疏性), 同时又有其特殊性。因为导纳矩阵的参数对于不同频率的谐波, 其参数各不相同; 同时由于谐振分析过程中经常需要对不同电网运行方式进行对比, 因此不同运行方式下导纳矩阵的阶数也不相同。

为了提高分析的速度, 对于复数的导纳矩阵应根据矩阵分析的方法转化为实数性质的矩阵。虽然这样增大了矩阵的阶数, 但考虑到矩阵的稀疏性, 采取稀疏算法技巧能够得到比较快的计算速度。采用稀疏技巧, 可以将一个 $N \times N$ 阶的矩阵用一个 $1 \times M$ 阶的矩阵代替, 其中 M 等于 N 阶矩阵中非零非对角元素, 并记录其行号与列号; 可用另外一 $1 \times N$ 阶矩阵存储上述矩阵的对角元素。在复数矩阵向实数矩阵的转化中, 为了避免出现对角元素为零或很小的情况影响计算的收敛性, 程序应自动进行行、列调整。

显然, 谐振分析中元件的数学模型的正确与否是决定分析结果是否有价值的关键; 而谐波状况下系统元器件数学模型的建立是谐波理论的一大难点, 本章不涉及这些模型的研究, 读者若感兴趣, 可阅读相关参考文献 [1] [2] [3]。

三、网络的谐波特性分析举例

本算例仅涉及电力系统经常发生的几种操作行为, 通过分析让读者对谐波谐振特性的变化有一个直观的印象。

某电力系统基波时的等值电路如图 3-5 所示, 各线路长度分别为: $l_{23} = 90\text{km}$, $l_{24} =$

120km, $l_{34}=90\text{km}$, 线路单位长度基波阻抗为 $z_{01} = 0.13 + j0.41\Omega/\text{km}$, $y_{01} = j2.78 \times 10^{-6}\text{S}/\text{km}$; 节点 1、节点 4 为等值发电机, 基波负序电抗为: $X_1 = 0.3554$, $X_4 = 0.539$; 节点 3 为等值负荷, 等值基波阻抗为: $Z_3 = 0.708 + j0.6192$; 变压器变比为 1.1 : 1, 折算到低压侧阻抗为 $j0.25$ (上述参数均为以 110kV, 100MVA 为基准的标么值)。节点 2 为谐波源负荷, 下面对该节点进行谐振特性分析。

1. 线路充电电容对谐波谐振特性的影响

谐波分析中不考虑线路充电电容的影响可能引起较大的误差, 特别在线路较长或电压等级较高的系统中, 不考虑充电电容将可能导致错误的分析结果。对于本例, 考虑充电电容与不考虑充电电容节点 2 的谐振特性曲线对比如图 3-6 所示。

图 3-6 中横坐标表示谐波次数, 纵坐标表示谐波阻抗, 上图为本运行工况的谐波特性曲线, 曲线上的数据为本工况与前一工况比较的放大倍数; 下图为前一工况的谐波特性曲线 (到图 3-13 均为同样情况)。例如对于图 3-6, 上部分为考虑充电电容的影响情况下的谐振特性, 下部分为不考虑线路充电电容影响情况下的谐振特性。

分析图 3-6, 不考虑线路充电电容情况下节点 2 频率阻抗特性表现为电感性, 随着谐波次数的增加, 其阻抗呈线性变化特性; 若考虑充电电容的影响, 系统谐波阻抗已经表现为非线性变化趋势, 并且在 7 次谐波附近出现了典型的谐波谐振现象。

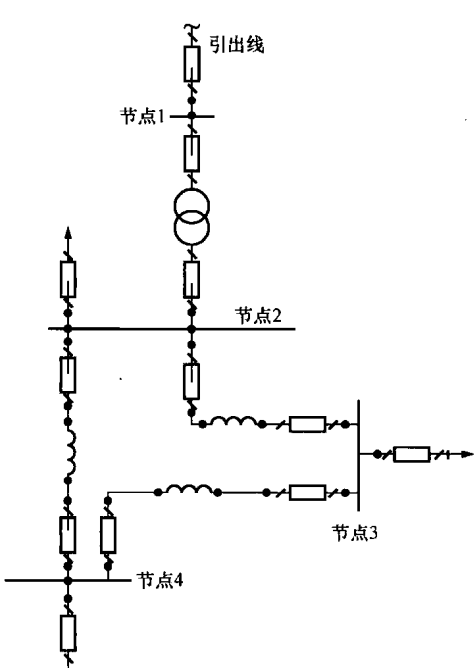


图 3-5 谐波特性分析算例接线图

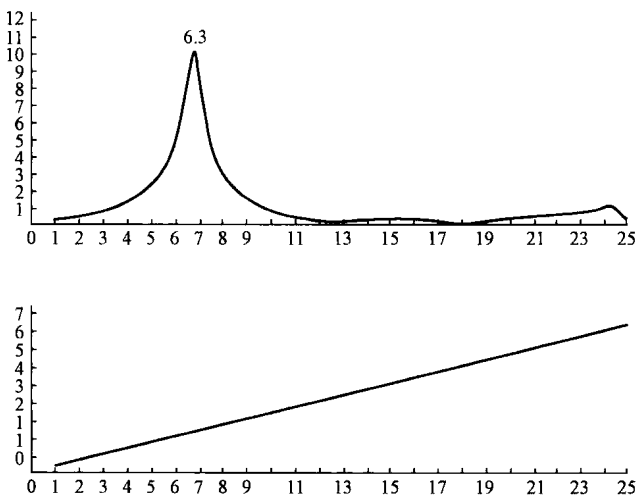


图 3-6 充电电容影响分析

2. 系统短路容量的变化对谐振特性的影响

对于电力系统某节点, 存在最小设计短路容量与最大设计短路容量两种运行方式,

对于电力系统某节点, 存在最小设计短路容量与最大设计短路容量两种运行方式,



正常情况下, 其实际运行短路容量处于二者之间。

但是在系统实际运行过程中, 由于设备检修、运行方式改变、系统扩建等原因导致短路容量发生较大变化, 以下分析短路容量的改变对谐波谐振特性的影响。

对于本例, 改变节点 1 (系统) 等值发电机功率, 若等效阻抗由原来的 $X_1 = 0.3554$ 变化为 $X_1 = 0.1777$, 即短路容量增加一倍。比较这种改变对 2 号节点谐振特性的影响如图 3-7 所示 (均考虑充电电容, 本节下同)。分析图 3-7 可见, 节点 1 短路容量增加一倍后, 节点 2 的谐振点向右侧 (高次谐波侧) 移动, 谐振点发生了变化。同样的分析表明, 当节点 1 短路容量减小时, 谐振点将向左侧 (低次谐波方向) 移动。

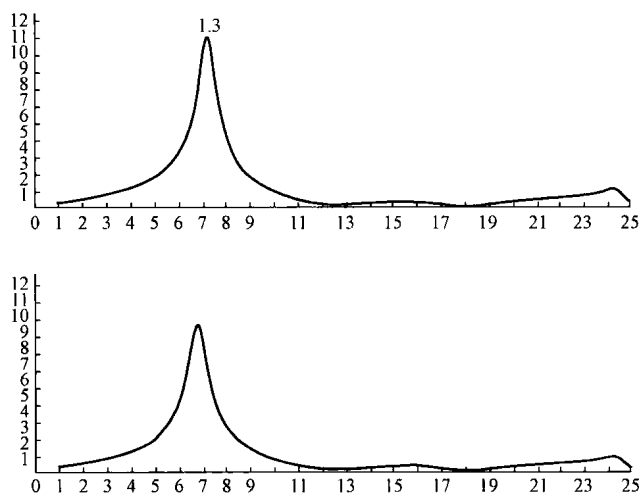


图 3-7 短路容量的变化对谐波特性的影响

3. 变压器参数或运行方式的变化对谐振特性的影响

电力变压器广泛存在于各级电力系统的变电站中。在很多情况下, 当某台变压器发生损坏不能运行时, 需要新的变压器进行更换, 两台变压器的参数可能存在一定的差别, 同样, 在实际系统中往往有多台变压器, 有时几台变压器并列运行 (即分段母线并列运行), 有时由于检修或运行方式的要求, 一台变压器退出运行或几台变压器分裂运行 (即母联开关断开)。以下分析这些改变对于谐振特性又有怎样的影响呢?

图 3-8 是变压器参数改变对谐振特性的影响仿真。分析中变压器变比由原来 1.1 : 1 变为 1.15 : 1, 折算到低压侧阻抗由原来 $j0.25$ 改变为 $j0.2$ 。

图 3-9 为变压器运行方式的变化对谐振特性的仿真分析结果。分析中假设原来节点 1、节点 2 之间有两台相同的变压器, 另外一台检修完成后投入运行, 两台变压器并列运行 (当然也可分裂运行)。

分析图 3-8、图 3-9 可见, 由于变压器参数的改变或运行方式的改变, 将导致谐波谐振特性发生变化。变压器越靠近所分析的节点, 这种影响越大。因此实际运行中, 当更换变压器时或运行方式发生变化时, 最好针对新参数对所连接母线进行一次谐振特性分析仿真。

实际上, 这两种情况均相当于增大了母线的短路容量, 因此, 仿真结论与图 3-7 相同。

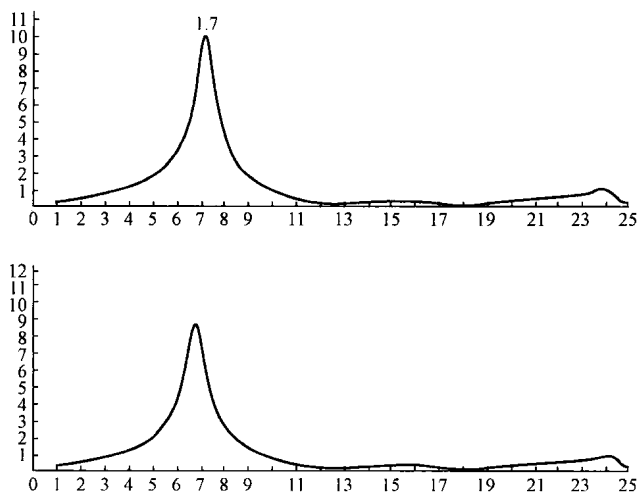


图 3-8 变压器参数变化的影响分析

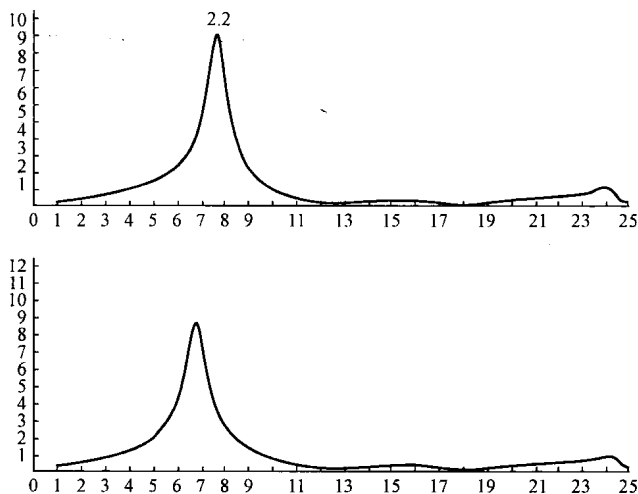


图 3-9 变压器运行方式变化的影响分析

4. 并联电容补偿装置对谐振特性的影响

电容装置与谐波存在较大的相互影响关系,实际运行中 70% 的谐振影响事故是由于电容器的影响。本例中在节点 2 投入并联补偿装置,其参数为 $X_c = -j1.25$,则并联补偿装置运行前后节点 2 的谐振特性变化如图 3-10 所示;若该电容器设置在节点 4,则并联补偿装置运行前后节点 2 的谐振特性变化如图 3-11 所示。

分析图 3-10、图 3-11 可知,电容器对谐振点的影响非常大,实际生产中只要有电容补偿装置投切操作,应至少对相近的母线节点进行谐振特性仿真分析。另外,设计并补装置时,应结合各母线的背景谐波频谱进行谐振特性仿真,切忌在特征谐波处出现并联谐波谐振现象。

5. 并联补偿装置串联电抗对谐振特性的影响

为了减小电容装置合闸过程中的涌流影响,电容补偿装置一般均串联一定百分比的电抗,通常串抗率为 4.5%、6%、12%、13%,那么串联电抗的存在对谐振点的影响怎

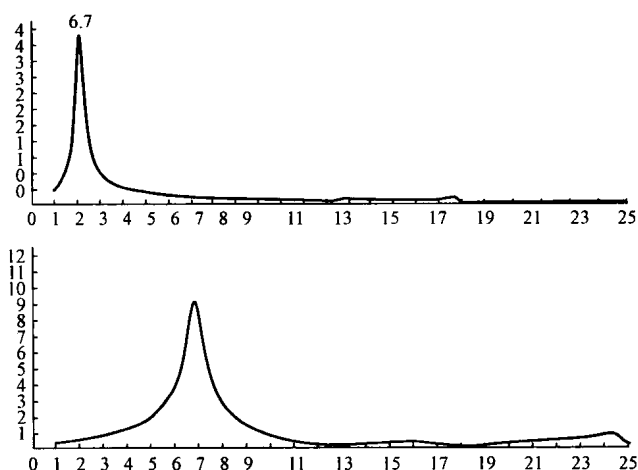


图 3-10 电容器影响分析 (装置运行在节点 2)

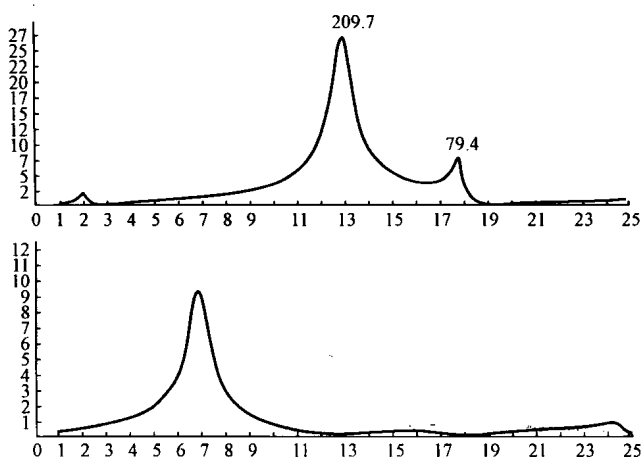


图 3-11 电容器影响分析 (装置运行在节点 4)

样呢？是否可通过串联电抗调节谐振点呢？以下逐一分析。

设在节点 2 有并联补偿装置容抗为： $X_c = -j1.25$ ，串联电抗分别为 6% 和 12%，则并补投入前后节点 2 谐振特性变化如图 3-12、图 3-13 所示。

对照分析图 3-12、图 3-13 可知，串联电抗能够方便改变谐振点。串联 6% 电抗有效改善了 4 次谐波附近的谐波水平，而 12% 电抗有效改善了 3 次谐波附近的谐波水平。在这层意义上，该补偿支路具有无源滤波的特性。因此实际运行中，应充分发挥串联电抗的这种特点，合理选择串抗百分数，有效降低母线特征谐波水平。

值得注意的是，串联电抗支路在改善某次谐波水平的同时，可能将谐振点偏移到其他次谐波，应避免这种现象。

同时应注意到，串联电抗改善谐波是将谐波电流吸收到了该并补装置中，因此，实际运行中应充分考虑这种改善效应对补偿回路的影响，确保装置有足够的谐波过负荷能力，否则将出现电容器过负荷等其他事故。

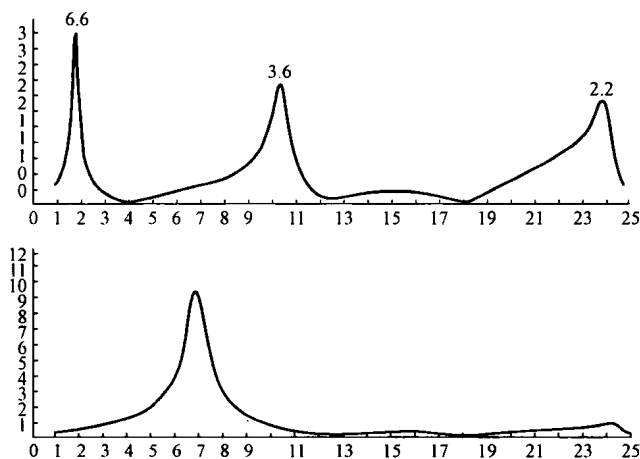


图 3-12 串联 6%电抗

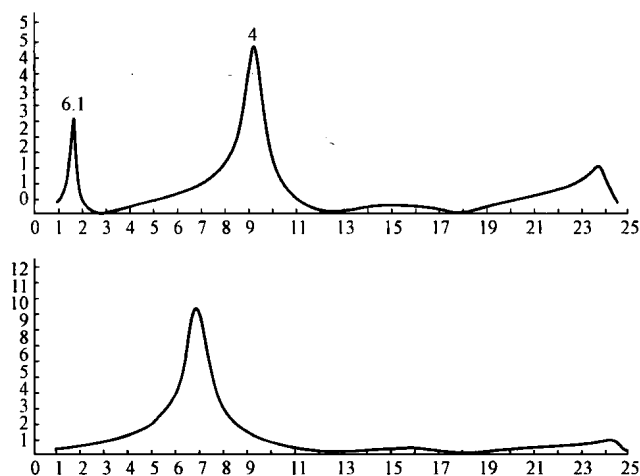


图 3-13 串联 12%电抗

第二节 干扰源传播特性分析

电压波动、闪变、电压暂降（暂升）及三相不平衡度等干扰的传播分析与谐波分析方法类似，可定义为统一的等效冲击电流分析法，通过计算机仿真进行分析实现。分析的关键在于确定作用于网络节点的等效冲击电流，例如谐波潮流分析中等效冲击电流等于节点注入谐波电流，谐波（谐振）特性分析中作用于节点的等效冲击电流等于 1。

实际分析中，可依据下述步骤进行分析：

- (1) 通过非线性负荷的用电特性，分析计算电压波动干扰源的波动功率、不平衡度负荷的不平衡功率、暂降干扰的冲击功率；
- (2) 将干扰功率折合成等效单相电流，称为等效冲击电流；
- (3) 简化等效该干扰源所作用的单相网络，等效过程中，电压源短路，电流源开路；
- (4) 将等效冲击电流作用于该等效基波网路，建立 $I = YU$ 模型（式中 I 为等效冲击

电流, Y 为 I 所作用的网络的节点导纳矩阵, U 为 I 作用于 Y 的结果, 可称为等效电压);

(5) 计算节点等效电压;

(6) 根据各干扰的定义应用等效电压计算对应的波动水平 (电压变化水平)、电压暂降 (暂升) 水平、不平衡度水平;

(7) 将该计算水平视为各干扰源在各节点产生干扰的 95% 概率大值, 并依据相关标准、法规进行危害性定量评估; 同时设计相应的治理方案。

一、电压波动干扰的等效冲击电流的确定

电压波动的仿真分析是以某一个典型的电压变动为目标进行分析的。

电压变动 d 一般是以电压变动特性曲线上相邻极值电压之差 Δu 相对于系统标称电压 U_N 表示的, 即

$$d = \frac{\Delta u}{U_N} \times 100\% \quad (3-5)$$

进行电压变动计算时, 一般要注意式 (3-5) 中 Δu 与 U_N 相序的一致性, 即若 Δu 为相电压的变化, 则 U_N 应为相电压的标称值; 反之, 若 Δu 为线电压的变化, 则 U_N 应为线电压的标称值。下面分析不同类型负荷情况下的等效冲击电流。

1. 三相波动性负荷

对于不对称三相波动负荷, 计算时一般以对称方式处理, 以单相等值电路进行分析。这样做在实际应用中符合统计规律, 在工程上是可行的。其计算公式为

$$d \approx \frac{\Delta S}{S_{sc}} \times 100\% \quad (3-6)$$

$$d = \frac{R_L \Delta P + X_L \Delta Q}{U_N^2} \times 100\% \quad (3-7)$$

$$d \approx \frac{\Delta Q}{S_{sc}} \times 100\% \quad (3-8)$$

式 (3-6) 将电网以 S_{sc} (三相短路容量) 等效, 但没有区分三相功率变化 ΔS 中有功部分与无功部分的不同作用。该式各量容易获取, 在一般性预测中获得了广泛应用。

式 (3-7) 将电网以 $R_L + jX_L$ 描述, 同时区分了 ΔS 中有功、无功的成分, 误差仅仅在于忽略了引起电压相位偏移的分量。该式相对比较精确, 但是各物理量的获取比较困难。

式 (3-8) 一般应用在高压电网中, 是式 (3-7) 的简化式。

2. 接于相间的单相负荷

设波动负荷接于图 3-14 所示网络。图中 Z_s 代表系统阻抗, Z_L 代表波动负荷阻抗, I_L 为其负荷电流。若以 S_d 表示 PCC 点三相短路容量, U_{pha} 代表相电压, U_{phaN} 代表单相标称电压, U_{line} 代表线电压, 则对于负荷电流变化 ΔI

$$Z_s = \frac{U_{line}^2}{S_d} \quad (3-9)$$

$$\Delta S = U_{line} \Delta I \quad (3-10)$$

$$\Delta U_{pha} = Z_s \Delta I = \frac{\Delta S}{U_{line}} \times \frac{U_{line}^2}{S_d} = \frac{\Delta S}{S_d} U_{line} \quad (3-11)$$

$$d = \frac{\Delta U_{pha}}{U_{phaN}} \times 100\% = \frac{\Delta S}{S_d} \times \frac{U_{line}}{U_{phaN}} \times 100\%$$

$$=\sqrt{3} \frac{\Delta S}{S_d} \times \frac{U_{\text{pha}}}{U_{\text{phaN}}} \times 100\% \approx \sqrt{3} \frac{\Delta S}{S_d} \times 100\% \quad (3-12)$$

3. 三相四线制中接于相与中性线之间的单相负荷

设单相波动负荷接于如图 3-15 所示电路中, 各参数意义与图 3-14 相同, 则对于负荷电流变化 ΔI , 有

$$Z_s = \frac{U_{\text{line}}^2}{S_d} \quad (3-13)$$

$$\Delta S = \Delta I U_{\text{pha}} \quad (3-14)$$

$$\Delta U_{\text{pha}} = \Delta I Z_s = \frac{\Delta S}{U_{\text{pha}}} \times \frac{U_{\text{line}}^2}{S_d} \quad (3-15)$$

$$\begin{aligned} d &= \frac{\Delta U_{\text{pha}}}{U_{\text{phaN}}} \times 100\% = \frac{\Delta S}{S_d} \times \frac{U_{\text{line}}^2}{U_{\text{pha}} \times U_{\text{phaN}}} \times 100\% \\ &= 3 \times \frac{\Delta S}{S_d} \times \frac{U_{\text{pha}}}{U_{\text{phaN}}} \times 100\% \approx 3 \frac{\Delta S}{S_d} \times 100\% \end{aligned} \quad (3-16)$$

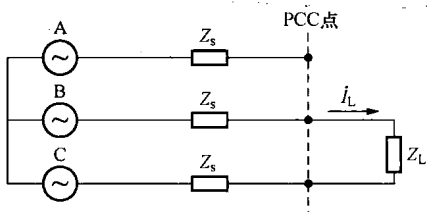


图 3-14 接于相间的单相波动负荷示意图

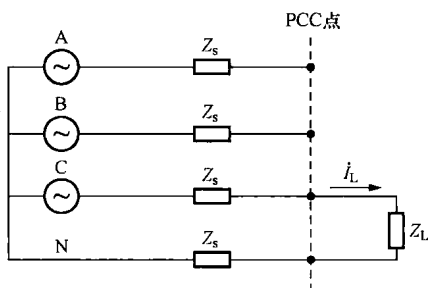


图 3-15 接于相与中性线之间的单相波动负荷示意图

4. 等效冲击电流的确定

通过上述分析可见, 等效单相功率变动如下。

(1) 三相负荷

$$\Delta S_{\text{pha}} = \Delta S_{3, \text{pha}} / 3 \quad (3-17)$$

式中: ΔS_{pha} 为等效单相功率变动; $\Delta S_{3, \text{pha}}$ 为三相功率变动 (ΔS 或 ΔQ 或 $\Delta P + \Delta Q$)。

(2) 相间单相负荷

$$\Delta S_{\text{pha}} = \frac{\sqrt{3} \Delta S}{3} \quad (3-18)$$

式中: ΔS_{pha} 为等效单相功率变动; ΔS 为负荷功率变动。

(3) 三相四线制单相负荷

$$\Delta S_{\text{pha}} = \Delta S \quad (3-19)$$

式中: ΔS_{pha} 为等效单相功率变动; ΔS 为负荷功率变动。

至此, 在获取上述不同情况下等效单相功率变动后, 采用式 (3-20) 获取等效冲击电流

$$I = \frac{\Delta S_{\text{pha}}}{U_{\text{pha}}} \quad (3-20)$$

在此基础上, 求解 $[I] = [Y][U]$, 得到各节点电压变化量 u_i , 其对应的节点电压变动为



$$\delta_i = \frac{u_i}{U_{\text{phaN}}}, \quad u_i \in U \quad (3-21)$$

二、闪变等效冲击电流的确定

(一) 波动负荷闪变水平的确定

采用下述几种方法分析计算干扰源的闪变水平。

1. 直接测试

一般说来,系统电流小于等于 75A 的负荷均可采用在标准网络中实测的方法获取其闪变发射水平;系统电流大于 75A 设备,及中压、高压负荷一般也可采取实测的方式,结合闪变的叠加规律计算其闪变发射水平,一般分为下述两个步骤:

- 1) 待测设备未运行情况下实测 PCC 点的闪变水平 P_{st1} ;
- 2) 待测设备投入运行情况下实测 PCC 点的闪变水平 P_{st2} 。

则该设备(负荷)的闪变发射水平为

$$P_{\text{st}} = \sqrt[3]{P_{\text{st2}}^3 - P_{\text{st1}}^3} \quad (3-22)$$

2. 数值仿真算法

当波动负荷引起电压变动的特征已知时(通过负荷电气特性仿真获取),可依据 GB 12326—2000《电能质量电压波动和闪变》或 IEC 61000-4-15 给出的闪变模型(如图 3-16 所示),通过数值计算的方法计算负荷的闪变发射水平,其仿真结果的准确性取决于负荷特性的数学模型。

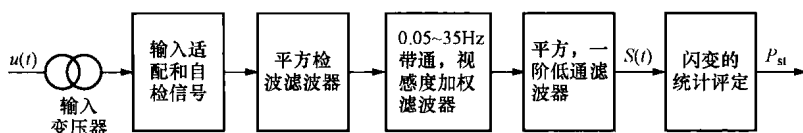


图 3-16 IEC 推荐的闪变仪框图

3. 单位闪变曲线法

单位闪变曲线的应用是建立在下述理论基础上的:

- 1) 短时闪变、长时闪变与同频度的电压波动成正比;
- 2) 对于产生同样强度闪变水平的某波形形状(例如周期性等间隔正弦波、周期性非等间隔正弦波等)的电压波动与同频度周期性等间隔矩形波(或阶跃波)电压波动之间存在一种等价规律,亦即波形系数。

波形系数虽然被标准广泛引用,但没有给出定义与解释。一般来说,对于产生同样强度的闪变水平(例如 $P_{\text{st}} = 1$),波形系数定义如下

$$F = \frac{\text{同频度的某波形电压波动}}{\text{同频度等间隔的矩形(阶跃波)电压波动}} \quad (3-23)$$

基于上述规律,此时该波动特征的闪变发射水平为

$$P_{\text{st}} = F \frac{d}{d_{\text{lim}}} \quad (3-24)$$

式中: F 为波形系数,可依据 GB 12326—2000 中图 3 的 $F-r$ 曲线获取(r 为波动频度,下同),也可依据该标准图 4、5、6 的 $F-T$ 曲线获取; d_{lim} 为已知频度的周期性等间隔矩形波(或阶跃波)电压波动特征下 $P_{\text{st}} = 1$ 时对应的波动水平,依据 GB 12326—2000 图 2 的 $d-r$ 曲线获取。

应用该方法时,一般归纳为下述几种类型:

(1) 周期性等间隔矩形波(或阶跃波)、正弦波、三角波波动特征。此类特征波形如图 3-17 所示,一般已知频度 r 、波动幅度 d ,依据 GB 12326—2000 图 3、图 2 进行。

(2) 其他波形特征。如图 3-18 所示,该类波动特征一般已知波动频度 r 、最大波动幅度 d_{\max} 及波形特征周期 T ,依据 GB 12326—2000 图 4~图 6 及图 2 进行。

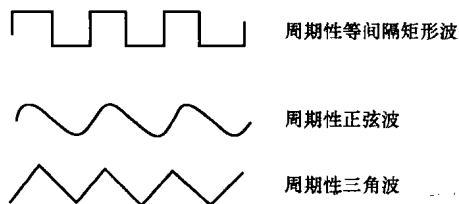


图 3-17 周期性特征波动波形

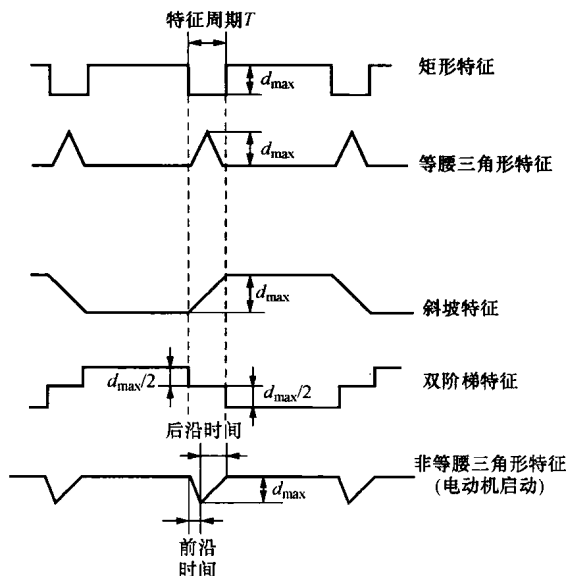


图 3-18 常见的波动特征波形

4. 闪变时间分析法

闪变时间分析法是利用单位闪变曲线进行闪变分析的。单位闪变曲线是在 $P_{st} = 1$ 的情况下绘制的 $d-r$ 曲线,如果将该曲线以 $d-t_f$ [8] 参数绘出(定义 $t_f = 1/r$ 为闪变时间),则可通过解析法获取 t_f 与 d 的数值关系,见式 (3-25),考虑到 P_{st} 与 d 的线性关系,从而求出相应的闪变发射水平。

$$t_f = 2.3 \times (Fd_{\max})^3 \quad (3-25)$$

式中: F 为波形系数, d_{\max} 为最大波动幅度。

应注意,式 (3-25) 成立的条件是 $d-t_f$ 曲线的直线部分,即 $t_f \geq 1s$ 时方能成立。

由式 (3-25) 获取闪变时间后,可应用式 (3-26) 由闪变时间获取闪变发射水平,该式是建立在 $P_{st} \propto d \propto \sqrt[3]{t_f}$ 关系基础上的

$$P_{st} = \sqrt[3]{\frac{\sum t_f}{600}} \quad (3-26)$$

(二) 闪变等效冲击电流的确定

闪变在网络中的传输等效于注入冲击电流引起的电压变动在系统的传输。因此,仍可考虑采用等效冲击电流的方法评估分析各节点的闪变水平。其基本方法与电压变动的方法完全一致,下面介绍闪变等效冲击电流的确定以及计算完成后各节点闪变值的回归。

设仅存在单一干扰负荷接于电网 a 节点,其产生的闪变水平为 P_{st} ,则设定其等效冲击电流为 1,该冲击电流注入节点 a 后计算各节点的等效电压 u_i ($i = 1 \sim N$, N 为网络节点数)。则各节点闪变水平为

$$P_{st,i} = \frac{u_i}{u_a} P_{st} \quad (3-27)$$

若系统存在多个闪变源,作用于某供电网络,则其共同作用后各节点的闪变水平计

算方法如下。

(1) 方法一：各闪变源单独作用于网络时各节点闪变水平可以通过式 (3-27) 方便地计算出来，多闪变源作用的共同效果可采用闪变合成的原则，分别对每一个节点 i 进行合成。其合成公式为

$$P_{st.i} = \sqrt[m]{\sum_j (P_{st.i,j})^m} \quad (3-28)$$

应用式 (3-28) 时，一般情况下，闪变合成遵循立方叠加的规律，取 $m = 3$ ，但是在波动源引起电压变动重叠率较高的情况下，或针对交流电弧炉负荷的闪变合成时，应选择尽可能接近的 m 值。例如，对于交流电弧炉， $m = 2、3、4$ 的情况可能会经常遇到。

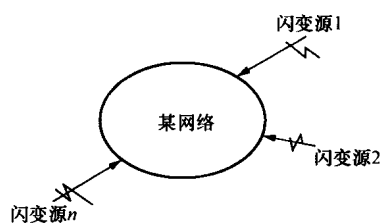


图 3-19 闪变作用的广义节点示意

(2) 方法二：如图 3-19 所示，多闪变源作用于某网络，可将该网络看成一个“广义节点”，例如有 3 个闪变源分别作用于节点 a、b、c，各闪变源在其作用节点单独引起的闪变为： $P_{st.a}$ 、 $P_{st.b}$ 、 $P_{st.c}$ ，同时设定其共同作用于该“广义节点”的等效冲击电流为 1，则对应于闪变 $P_{st.a}$ 、 $P_{st.b}$ 、 $P_{st.c}$ 的等效冲击电流分配系数 x 为

$$x = \frac{1}{\sqrt[3]{P_{st.a}^3 + P_{st.b}^3 + P_{st.c}^3}} \quad (3-29)$$

则，各节点 a、b、c 对应的等效冲击电流为 $xP_{st.a}$ 、 $xP_{st.b}$ 、 $xP_{st.c}$ 。

将上述各节点对应的等效冲击电流同时作用于网络，计算该冲击电流对应的各节点的等效电压 u_i ($i = 1 \sim N$, N 为网络节点数)，定义等效电压闪变系数 f 为

$$f = P_{st}/u \quad (3-30)$$

式中： P_{st} 为该节点的闪变水平； u 为对应于 P_{st} 的等效电压。考虑到“广义节点”的闪变水平 $\sqrt[3]{P_{st.a}^3 + P_{st.b}^3 + P_{st.c}^3}$ 由所对应的等效电压 u_a 、 u_b 、 u_c 确定，其对外闪变水平应保持不变，因此，该“广义节点”的等效电压闪变系数 f 为

$$f = \frac{\sqrt[3]{P_{st.a}^3 + P_{st.b}^3 + P_{st.c}^3}}{\sqrt[3]{u_a^3 + u_b^3 + u_c^3}} \quad (3-31)$$

则各闪变源共同作用引起的各节点的闪变水平通过式 (3-32) 计算

$$P_{st.i} = fu_i \quad (3-32)$$

三、电压暂降的分析

由负荷引起的电压暂降的等效冲击电流计算方法同电压波动的等效冲击电流计算方法，即由冲击功率计算等效冲击电流，再由等效冲击电流计算对应的电压暂降。

一般来说，系统中大多电压暂降来源于电网短路。此时，可采取短路电流计算的方法，设短路点冲击电流为 1，计算对应的电压暂降、暂升量值。此时由于采用严格的序量分析方法，应注意变压器的不同接法对序量合成的影响。

四、不平衡等效冲击电流的确定

对于不平衡负荷，需首先根据负荷的用电特性计算三相不对称功率，从而求出三相不对称电流，再应用对称分量法计算出负荷注入系统的负序电流，此电流即为不平衡等效冲击电流，再施加于对应的序网（类似于短路电流计算）。

例如，接于相间的单相负荷，其电流为 I 时，根据对称分量法，其负序电流为： $I_2 =$



$I/\sqrt{3}$, 此电流即为等效冲击电流; 同样, 单相对地负荷, 其电流为 I 时对应的等效冲击电流为 $I_2 = I/3$ 。

第三节 电能质量等效冲击电流法的统一建模思路

通过前两节的分析可见, 不管是电网的谐波特性分析、谐波潮流分析, 还是电压波动闪变、电压暂降及三相不平衡度的传播分析, 均可应用等效冲击电流法进行分析。其主要步骤如下:

(1) 根据分析的不同目标对象, 确定等效冲击电流。例如谐波特性分析时等效冲击电流为: $I_i = 1$ (i 为所分析的节点, 其余节点冲击电流为 0); 谐波潮流分析中等效冲击电流即为各节点的谐波电流注入水平。

(2) 根据分析的不同对象建立该干扰作用下网络对应的电路模型, 形成对应的导纳矩阵。

(3) 应用式 (3-33) 求出对应的各节点等效电压为

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_k \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{iN} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{N1} & \cdots & Y_{Ni} & \cdots & Y_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_k \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} \quad (3-33)$$

(4) 根据分析对象应用节点等效电压计算需求信息。

最后必须指出, 等效冲击电流法是一种适用于工程应用的近似方法, 是一种估算。实际应用中应根据等效冲击电流的近似程度考虑适当的工程余度系数。

参 考 文 献

- [1] 吴竞昌. 供电系统谐波. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 张直平. 城市电网谐波手册. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [3] 宋文南, 刘宝仁. 电力系统谐波分析. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [4] 孙树勤. 电压波动与闪变. 北京: 中国电力出版社, 1999.

电能质量监测及其数据评估方法

由于电能质量指标具有时变性，需要对其指标进行较长时间的监测，并采用科学的方法对这些海量的监测数据进行评估，以便于从技术、经济两方面给出综合治理的方案。

第一节 电能质量指标的监测方法

一、稳态电能质量指标的监测

稳态电能质量参数描述了电力系统稳态运行方式下的运行状态，主要包括电压偏差、频率偏差、三相不平衡度、谐波、间谐波、电压波动闪变 6 类电能质量指标。目前，就稳态电能质量监测的数学方法而言，我国一系列关于电能质量的国家标准、IEC 61000-4-30: 2003、IEEE Std 1159 (Tm) -2009、EN50160: 2007 等标准均没有差别。以谐波监测为例，规定如下：

- 1) 基于离散傅里叶变换进行谐波分析；
- 2) 采样窗宽度：50Hz 系统中 10 周波；
- 3) 窗形状：同步状态下选择矩形窗；
- 4) 基础监测数据获取要求：每 10 周波获取一组谐波数值，共 15 个这样的数值（基本等于 3s 时间间隔）采用方均根的办法形成一个有效记录，即

$$U_h = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (U_{hk})^2}$$

关于稳态电能质量监测的基本方法，相关参考书籍讲述较细，本书不再赘述。实际上，稳态电能质量监测的主要问题在于采样窗的宽度及其数据简约方法，下面予以简单分析。

（一）采样窗问题

基于傅里叶变换，以谐波监测为例分析采样窗问题。

对于波形函数， $X(t) = 1 \times [1 + 0.125 \times \cos(2\pi \times 10t)] \times \cos(2\pi \times 50t)$ （即用 10Hz 信号对 50Hz 信号进行调制），其理论波形、频谱图如图 4-1 所示，其频谱理论值见表 4-1，采样窗分别取 1、2、4、8、10、16、32 周波，应用傅里叶进行谐波分析，其结果见表 4-2。

2) 要精确测试信号的频谱及其含量, 只有当信号所包含的各频谱频率与傅里叶变换的最小分辨频率的比值等于整数时才有可能 (例如本例中 10 周波采样窗对应的最小频率分辨为 5Hz, 实际信号包含 60Hz、50Hz、40Hz 三种频谱, 因此, 选 10 周波采样窗应用傅里叶方法可以准确测量)。除此之外, 均会引起测量误差。

但是在现实生活中, 各类波动负荷的用电特性千变万化, 难以准确预测信号所包含的各频谱成分, 因而就不可能提前预置监测设备的最小分辨频率 (即提前预置采样窗宽度)。只有两个方法: ①加大分析窗口宽度, 尽可能减小傅里叶变换的最小分辨频率, 但太大的窗口不仅大大增加监测设备的成本, 指数倍增加数据的容量, 且获取的大多数数据是没有实际意义的; ②选择一合理采样窗宽度, 获取相对准确的测量结果。

实际上, 采样窗宽度不仅影响谐波、间谐波的测量结果, 同样影响电压偏差、三相不平衡度的测量结果。因为一般总是应用傅里叶变换的结果计算电压偏差及三相不平衡度水平。

GB/T 24337—2009《电能质量 公用电网间谐波》和 IEC 61000-4-7: 2002 还介绍了谐波评估能量集合的概念, 其理论基础在于时域的能量等于频域的能量, 便于对基波之外的频谱能量进行集合, 可在相关方面 (例如电磁兼容方面) 应用。但是在谐波控制领域, 不管是采用有源滤波还是无源滤波, 笔者认为均不应推荐能量集合的概念, 主要原因在于该概念忽略了频谱的具体特征, 可能引发滤波器设计环节的潜在缺陷或引起实际运行中的谐振现象。

(二) 稳态电能质量监测的数据简约方法

必须指出, 数据简约不是数据压缩, 也不是简单的数据简化。数据简约是针对海量数据, 依据其将来的实际用途, 采取科学合理的方法, 保留适用其用途分析所规定条件的、必要的、非失真的有效数据。良好的数据简约方法不仅能够节约监测数据的存储空间、减小数据传输量、大大提高系统智能分析的性能, 同时又不至于产生错误的结论或诱导。

目前, 相关标准对监测数据的数据简约方法的规定不统一, 同时, 也没有说明这些规定的原因, 使得在实际应用中出现了众多分歧。下面就相关问题展开论述, 便于读者进一步领会。

(1) 相关标准对数据简约方法的规定。

1) IEC 电磁兼容标准。

关于数据简约, IEC 61000-4-30 指出, 一个记录的时间间隔分 3 种情况, 即

- a) 很短时间 (very short), $T_{vs}=3s$;
- b) 短时间 (short), $T_{sh}=10min$;
- c) 长时间 (long), $T_l=2h$ 。

除频率、闪变之外的记录数据简约方法均采用方均根的方法, 即 10min 内的一个记录由该时间段内的 3s 记录取方均根获得; 2h 内的一个记录由该时间段内的 10min 记录取方均根获得。采用方均根的简约方法的原因, 以谐波为例, 查找 IEC 61000-4-7: 1991、GB/T 17626.7—1998 标准, 对数据简约方法的选择是这样提出的:

- a) 如果要分析瞬态效应, 则应选择该时间段的最大值记录;
- b) 如果评估谐波的长期效应 (热效应), 则应采用方均根的方法。

IEC 61000-4-30: 2003 和 IEC 61000-4-7: 2002 从电磁兼容角度考虑, 选取了长期效应(热效应)的数据简约方法。

2) 欧洲标准。EN50160 标准规定的数据简约方法为平均值方法。标准规定: 在一周的评估时间内, 各次谐波 10min 记录的 95% 概率大值不超过标准值, 可见, EN50160 的数据简约方法不同于 IEC 61000-4-30。

3) 中国限值标准。我国电能质量限值国家标准对稳态电能质量监测的数据简约方法给出了不同的规定, 分述如下:

a) GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》: 谐波电压(或电流)测量应选择: ①电网正常供电时可能出现的最小运行方式下, 且谐波源工作周期中产生的谐波量最大的时间段内进行; ②谐波测量的数据应取测量时段内各相实测量值的 95% 概率大值中最大的一相值, 作为判断谐波是否超过允许值的依据; ③当测量点附近安装有电容器时, 应在电容器组的各种运行方式下进行测量; ④为了区别暂态现象和谐波, 对负荷变化快的谐波, 每次测量结果可为 3s 内所测值的平均值。推荐采用下式计算:

$$U_h = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (U_{hk})^2} \quad (m \geq 6)$$

但该标准未给出谐波测量数据的简约方法。

b) GB/T 15543—2008《电能质量 三相电压允许不平衡度》中相关测量内容: ①测量条件为: 测量应在电力系统正常运行的较小方式下, 不平衡负荷处于正常、连续工作状态下进行, 并保证不平衡负荷的最大工作周期包含在内; ②每个不平衡度的测量间隔可为 1min 的整数倍, 采用平均值的简约方法; ③仪器记录周期为 3s, 按方均根取值。电压输入信号基波分量的每次测量取 10 个周波的间隔。对于离散采样的测量仪器推荐按下式计算:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (\epsilon_k)^2} \quad m \geq 6$$

c) GB/T 12326—2008《电能质量 电压波动和闪变》中相关测量内容: ①测量条件: 电力系统正常运行的较小方式下, 波动负荷处于正常、连续工作状态; ②以一天(24h)为测量周期, 并保证波动负荷的最大工作周期包含在内; ③取最大值作为评判的依据。

d) GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》给出电压偏差的条件: ①可以根据具体情况选择 4 个不同类型的时间长度: 3s、1min、10min、2h; ②连续测量并计算电压有效值的平均值, 最终计算获得供电电压偏差值。

e) GB/T 24337—2009《电能质量 公用电网谐波》标准: ①间谐波的评估测量要求在系统正常运行的最小方式下, 间谐波发生最大的情况下测量; ②间谐波的测量可以在 3s 测量结果的基础上, 综合出 3min、10min 或 2h 的测量值。综合方法为取所选时间间隔内(例如 3min)所有 3s 测量结果的平方算术和平均取平方根, 例如 3min 的测量值为

$$U_{\text{th}} = \sqrt{\frac{1}{60} \sum_{k=1}^{60} u_{\text{th},k}^2_{(3s)}}$$

式中: 60 是 3min 内包含 3s 的测量次数。

通过上述分析可见：GB 限值标准对电能质量指标监测数据的简约方法进行了各自不同的规定，有最大值、方均根值、平均值三种方法。

4) 中国监测设备标准。GB/T 19862—2005《电能质量监测设备通用要求》规定了统一的电能质量数据简约方法，标准对于基本记录、简约周期及数据简约方法采取了下述规定：

a) 记录：记录分为基本记录与存储记录两种（闪变除外）。

对于谐波、三相不平衡度、电压偏差，首先，一个完整的采样周期内获取的测量值为一个观测值；其次在一个基本记录周期内对诸多观测值方均根后形成一个基本记录；对于频率偏差，在一个基本记录周期内形成一个基本记录；最后，在一个保存记录周期内由基本记录形成保存记录。

b) 记录周期及保存记录的取值方法。规定：一个基本记录周期为 3s，主要在于考虑了频率偏差、电压偏差、三相不平衡度、谐波限值国标及 IEC 电磁兼容标准的内容，便于测量取值的规范统一。

存储记录周期规定 3min，取 3min 内 60 个基本记录（3s 记录）的最大值作为一个保存记录。主要有几方面考虑：①保存所有 3s 记录数据量过于庞大，实际上也没有这样的必要；②注意到目前几乎所有国内外标准关于 3s 记录的取值方法均相同，因此，考虑采用 3s 记录进行电能质量限值评估，其方法参考 IEC 61000-3-6 的基本思想：在最小的一周评估时间内，记录每天 3s 记录的 95% 概率大值，选取一周 7 天最大的一个 95% 概率大值作为与标准的比较值；同时，为了避免极端现象的发生，每周 7 天所有 3s 记录的最大值不得超过标准值的 1.5~2 倍。因此，考虑以 3min 作为记录保存的时间周期，按“最大”的取值方法，既减少了数据量，又可以实现上述 IEC 评估方法的基本思想，比较合理。

5) 数据简约方法的总结。通过上述分析可见，无论是 IEC、EN50160，还是我国国家标准，给出的数据简约方法均不相同，汇总见表 4-3，主要差别在于：

- a) IEC 采取长期热效应思路，规定方均根值的简约方法，但简约周期有多种选择；
- b) EN50160 规定平均值的简约方法，简约周期仅规定 10min 时间间隔；
- c) 我国国家标准限值标准要求系统在正常运行的最小方式下进行测量，并针对不同的指标规定了最大值、平均值、方均根值的数据简约方法，同时规定了多个简约周期；
- d) 我国国家标准监测设备通用要求采用了最大值的简约方法，简约周期仅规定了 3min 时间间隔。

表 4-3 数据简约方法对比表

指标参数	基本记录间隔			数据简约记录间隔			数据简约方法		
	IEC 标准	GB 限值	GB 监测	IEC 标准	GB 限值	GB 测量	IEC 标准	GB 限值	GB 测量
频率偏差	10s	1s/3s/10s	3s	—	—	3min	—	—	最大值
电压偏差	3s	3s 1min 10min 2h	3s	10min 2h	3s 1min 10min 2h	3min	方均根	平均值	最大值

续表

指标参数	基本记录间隔			数据简约记录间隔			数据简约方法		
	IEC 标准	GB 限值	GB 监测	IEC 标准	GB 限值	GB 测量	IEC 标准	GB 限值	GB 测量
闪变	10min(P_{st}) 2h(P_{lt})	2h(P_{lt})	10min(P_{st}) 2h(P_{lt})	—	24h	—	—	最大值	—
电压不平衡度	3s	3s	3s	10min 2h	1min 的整数倍	3min	方均根	平均值	最大值
谐波	3s	3s	3s	10min 2h	—	3min	方均根	—	最大值
间谐波	3s	3s	3s	10min 2h	3min 10min 2h	3min	方均根	方均根	最大值

(2) 不同数据简约方法的仿真分析。标准差是一种常用的离散指标，它直接地、平均地描述了一组数据差异的大小，是最重要、最常用，也是比较精确的一种差异量数。在同一个指标下，标准差越大，表明这组数据的差异程度越大，数据分布越分散，平均数的代表性就越差；标准差越小，表明这组数据的差异程度越小，数据分布越集中，平均数的代表性越大。因此采用标准差的变化描述简约数据周期内数据的波动水平，采用最大值、平均值、方均根值、概率大值（50%、95%、99%）等数据简约方法，观察其结果的差异性。

考虑到 IEC、EN50160、我国国家标准所规定的各种简约周期一般在 1~10min 之间，且公共连接点电能质量的稳态指标在此简约周期内数据的波动性一般不会很大，假设其标准差在 0.1~1 之间变化；同时，取数据简约周期为 5min，基本记录周期为 3s 进行分析，则 5min 简约周期内样本数为 100 个。表 4-4 为平均值控制在 4（当然也可以是其他数值），标准差在 0.1~1 时对所对应的 100 个样本采取各种数据简约方法的结果对比表，分析时控制每组 100 个样本的数据符合正态分布，图 4-2、图 4-3 分别为第一组和最后一组数据的正态分布曲线，可以观察随着标准差的变化，数据的波动性及其差异性分布的变化。

表 4-4 均值为 4、标准差在 0.1~1 之间变化情况下各种数据简约方法的结果对比表

组 方法	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
标准差	0.1102	0.2094	0.3042	0.3626	0.4661	0.6318	0.6780	0.8324	0.8683	1.0462
最小	3.6954	3.4468	3.2394	3.2329	2.8577	2.3240	2.5510	1.8140	1.7697	1.5389
最大	4.2810	4.5268	4.7443	5.0200	5.1880	5.8521	6.1268	5.8502	6.5328	6.2683
平均	4.0082	4.0339	3.9600	4.0156	4.0283	3.9725	4.0502	4.0659	3.9996	3.8286
方均根	4.0097	4.0393	3.9716	4.0318	4.0549	4.0219	4.1060	4.1494	4.0919	3.9676
50%概率大值	4.0108	4.0366	3.9353	4.0204	4.0467	3.9553	4.0780	4.0901	3.9715	3.7753
95%概率大值	4.1959	4.4015	4.4751	4.5729	4.8009	4.9364	5.1349	5.6145	5.3161	5.6885
99%概率大值	4.2573	4.5259	4.7194	4.9696	5.1474	5.5681	5.7674	5.7937	6.1646	6.1857

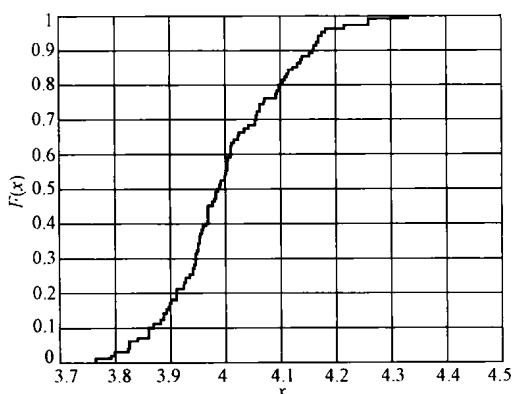


图 4-2 标准差为 0.1 时正态分布曲线

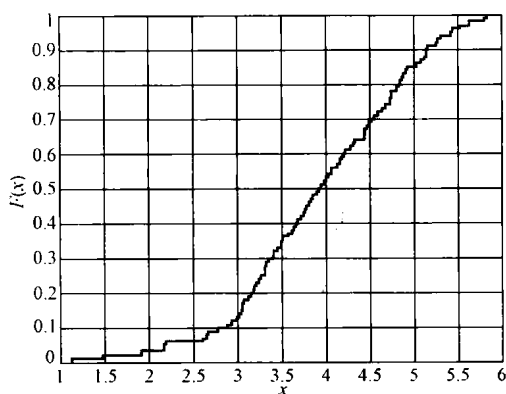


图 4-3 标准差为 1.0 时正态分布曲线

分析表 4-4 数据可见,标准差在 0.1~1 变化的情况下,方均根值、均值、50%概率大值三种方法的数据结果差别不大,说明在此期间有 50%的时间超过简约结果值;最大值在标准差小于 0.5 情况下接近 95%概率大值,当标准差大于 0.5 后最大值约为 95%概率大值的 1.2 倍,当然接近 99%概率大值。

基于上述分析,考虑到电能质量问题涉及:国家限值标准测量条件的苛求性(电网正常运行的最小方式、干扰源最大周期测量),电力系统安全稳定运行,用户生产工艺的正常连续运行和电磁兼容环境,应考虑采取最大值的数据简约方法,这样才可能真正满足空间上 100%,时间上 95%的评估方法。当然,99%的评估方法也值得采纳。

二、暂态电能质量指标的监测

随着精细工业的快速发展以及传统工业自动化水平的提高,暂态电能质量已成为影响最大的电能质量指标之一。目前,以有效值衡量的暂态电压扰动主要指电压暂降、暂升、电压短时中断。据统计,暂态电能质量事件中,75%左右的扰动影响都是由电压暂降引起的,因此,电压暂降是暂态电能质量的主要问题。

目前,我国正在起草有关电压暂降、暂升及电压短时中断的国家标准;IEC 电磁兼容系列标准对其定义、特征指标及其监测方法等均进行了规范,但没有涉及特征指标的限值;IEEE 无论从定义、还是从定量分析、综合评估等方面均做了广泛的研究,并在起草相应标准;EN50160 给出了宽泛的约束,但仅仅从规定时间周期内事件发生的频度角度进行限制,也没有从特征指标方面进行约束。

一般来说,暂态电能质量指标的危害具有如下特征:①实时结果性:是否产生危害立刻能表现出来。②强烈的个体差异性:不同类型的负荷对单一事件的反应存在较大的差异,即使同样的负荷在不同的运行过程中对同一事件的反应也不尽相同。如对计算机而言,事件发生时计算机处于读写操作状态还是处于操作系统空载运行状态,就存在较大的功率需求差异,因而其反应可能就迥然不同,或者跨越这一事件甚至关机。③社会危害性:单一事件的经济危害性已经众所周知,有时甚至产生一定的社会影响。

因此,暂态电能质量事件的基本特征决定了目前要规定一个统一的暂态电能质量限值标准较为困难。其折中的方法是首先通过试验建立广泛的敏感设备暂态事件抗扰度专

家库,同时完整记录事件过程中主要的特征指标,再进行相关危害性分析,控制措施论证、控制设备技术参数设计等系列工作。

(一) 事件的特征指标分析

暂态电能质量事件中应该监测、把握哪些特征指标呢?这要从其危害性方面进行分析。

上述计算机事例足以说明,暂态事件过程中设备的最小功率需求与此时电网可提供的功率是矛盾的,电压、电流有效值是必备的特征指标。

有些设备的工作状态与事件发生时设备所储存的储能器件的能量大小有关,电容、电感在某时刻的储能与其供电电压的瞬时相位有关,例如电感在电流 90° 时存储的瞬时能量就比 0° 时大,因此,若电压 0° 发生电压暂降,则此时存储的能量可能使设备足以抵抗某一事件(电流滞后电压),但若电压 90° 发生暂降,设备功能可能就会丧失。可见,暂态事件的发生时刻也是需要考虑的特征指标之一。

同样,不管是靠储能还是靠惯性,其支撑设备持续运行的能力与事件的持续时间有关,因此,事件的持续时间也是一个重要的特征指标。

试验结果表明:有些设备的工作与事件发生前及其过程中的电压相位跳变有关,因此,相位跳变也是一个值得考虑的特征指标。

实际上,完整获取上述指标也无法复原暂态事件的全貌,即使特征指标完全相同的两个事件对同一设备可能造成的影响也不尽相同。可见,暂态事件对设备正常运行的影响还有待进一步研究。

(二) 暂态事件的监测方法

以下主要以 IEC 61000-4-30 提供的监测方法为基础进行相关分析。

1. IEC 61000-4-30 的方法

IEC 61000-4-30 规范了电压暂降、暂升、电压短时中断的监测方法,其基本思路简析如下。

(1) 特征指标:剩余电压及事件持续时间。这一定义将事件用两个指标进行表征,其出发点在于将事件简化为矩形形状的变化过程。这一简化丢失了事件过程的诸多信息,特别是事件的发生及其结束信息,不利于对纷繁复杂的负荷用电特性进行事件危害性分析,因此实际应用中应该考虑增加其他辅助特征进行完善。

(2) 检测方法:IEC 61000-4-30 对事件过程中电压有效值的计算规定为:在一个周期内计算其有效值,每 $1/2$ 周期更新一次。据此规定,其计算公式可表示为

$$U_{\text{rms}(k)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1+k\frac{N}{2}}^{(k+2)\frac{N}{2}} u(i)^2}$$

式中: N 为一周波采样点数; $k=0, 1, 2, \dots$ 。

分析这一方法可见,就检测方法隐含的缺陷而言,事件开始的定位时刻误差可达到 $1/2$ 周波,对 50Hz 系统即 10ms。10ms 的误差对于短时间的危害分析已经相当可观。

2. IEC 1/2 周期更新方法的改进

上述方法的主要缺陷在于有效值监测的更新周期为 $1/2$ 周波,因此,可考虑提高更新周期。例如更新周期提高到与采样频率同步,即 T/N (T 为工频周期, N 为每周波采样点数) 时间更新一次,则事件发生时刻的确定误差仅仅为 T/N ,大大提高了事件危害分

析的准确性,同时能够较详细地记录事件过程电压有效值的变化细节,便于进一步研究分析。

该改进算法描述如下:设每周波采样 N 次,那么在某采样时刻 k 的电压有效值为

$$U_k = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_{(k-n)}^2}$$

亦即 $U_k^2 = \frac{1}{N} [N \times U_{k-1}^2 - u_{(k-N)}^2 + v_k^2]$, 设 $U_k'^2 = \sum_{n=0}^{N-1} v_{(k-n)}^2$, 则 $U_k'^2 = U_{k-1}'^2 - u_{(k-N)}^2 + v_k^2$, 采用数字信号分析方法,引入 z 变换,则

$$U_k'^2 = z^{-1} U_{k-1}'^2 - z^{-N} v_k^2 + v_k^2$$

即

$$\frac{U_k'^2}{v_k^2} = \frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-1}}$$

从而快速地实现电压有效值的实时更新。

3. 关于采样率问题

电压暂降、暂升、短时中断仍然是从有效值范围角度进行分析的关心的问题。其有效值不仅包括基波分量,同时包括相关直流、谐波分量。因此,传统的基于变电站综合自动化需求的采样,如每周波 32 点甚至 64 点稍嫌不足,但是每周波 128 或者 256 点的采样速率已经足以描述此类事件,无需更高的采样速率。

以 128 点/周波为例,此时谐波分量已包含到 64 次谐波(理论上),采用上述改进算法时间分辨率已经达到 $156\mu\text{s}$,大大高于 IEC 61000-4-30 给出的 20ms 误差的要求。

4. 几种监测方法的仿真比较

以下给出不同有效值监测方法下暂态事件有效值的变化曲线,便于直观展示各种检测方法的细微区别。仿真中采样率为 128 点/周波。

图 4-4~图 4-7 为不同有效值监测方法的简单对比,其主要区别在于事件发生、结束剧烈变化发展阶段及事件发展过程的记录细致程度不同。对于上述矩形事件,表现为梯形(图 4-4)、腰部细致刻画梯形(图 4-5)、矩形(图 4-6、图 4-7)三种不同的图形,从而对事件发生、结束时刻的判断,特别是事件发生阶段的研究有着较大的影响。

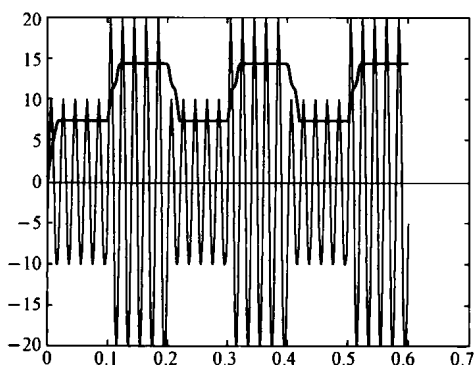


图 4-4 1/2 周波更新有效值方法

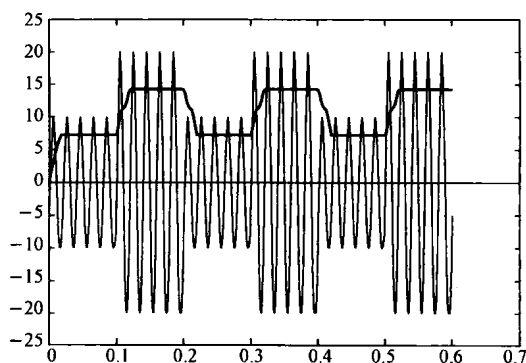


图 4-5 与采样同步更新有效值方法

一般来说,增加有效值的更新频度有利于暂态事件的分析研究,但是一般不要用 1/2

周期有效值监测方法，原因在于其受偶次谐波及直流量的影响比较大。

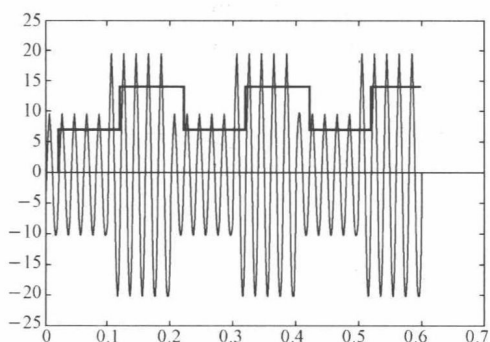


图 4-6 每周波更新有效值方法

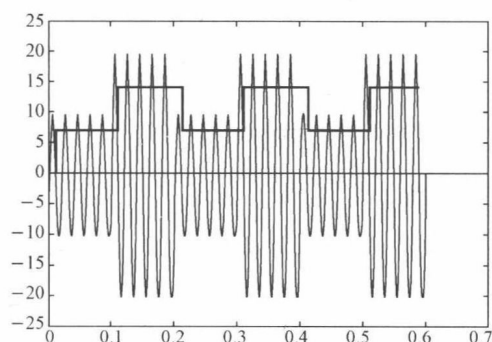


图 4-7 1/2 周期有效值监测方法

(三) 暂态电能质量事件的分析研究方法

一般来说，暂态电能质量事件的分析方法为由点及面。所谓点分析即单一监测点时间轴线的事件集合分析；所谓面分析即由单维时间轴线扩展为时间、空间两维范围内的事件集合分析。现阶段，暂态事件足以危害到传统意义的可靠性指标，因而可应用可靠性相关指标或加以扩展修改进行分析，本书暂不涉及。

就单一事件的分析而言，包括静态的事件危害性分析和事件的传播特性分析。下面主要分析其危害性所谓事件的静态危害分析即实验室条件下模拟孤立事件，分析其对研究对象的影响，因此是约束条件最少、电磁环境最单一的事件分析，但却是其他各类环境条件下分析的基础。

一般来说，就单一的简单事件而言（单一准矩形事件），其静态分析应关注 3 个主要阶段：①事件前后（稳定状态情况下）设备状态、运行指标参数的描述；②事件发生、结束剧烈变化阶段设备状态、运行指标参数的描述；③事件持续过程中设备状态、运行指标参数的描述。单一准矩形事件的分析关注点如图 4-8 所示。

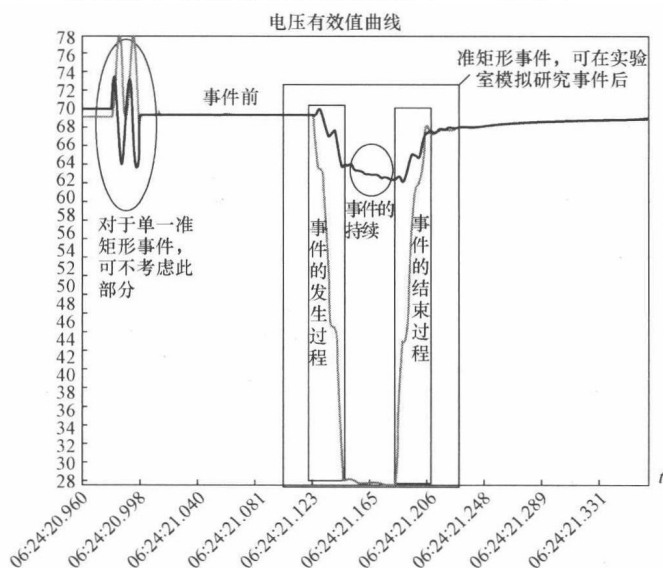


图 4-8 单一准矩形事件的分析关注点

实际上,事件的分析总是针对某一电气设备、生产工艺过程而言的,因此,熟悉待研究对象的用电特性、控制原理至关重要。在此基础上,科学解释事件各个环节中设备、生产工艺过程运行状态及其运行参数的变化,进而控制试验的相关环节(例如有效值变化幅度、相位跳变、事件发生时刻设定、事件的幅值—时间面积变化等),最终给出其抗扰度曲线才是分析研究的最终目标。此抗扰度曲线将可作为实际运行中事件危害评价的主要依据。

第二节 电能质量监测系统的选择

目前,电能质量在线监测系统已经获得了广泛应用,以下简要分析实际应用中选择电能质量在线监测系统应该注意的问题。

一、电能质量监测系统的基本结构

如今的电能质量监测系统已经形成了类似变电站综合自动化 SCADA 系统的模式。多功能、全数字化的面向对象的检测单元将各类电能质量实时信息全天候地通过庞大的网络系统汇集至电能质量数据中心,各职能部门通过 Internet 浏览的方式对自己所关心的数据进行分析应用,其典型结构如图 4-9 所示。

1. 系统结构

电能质量 SCADA 系统结构与变电站综合自动化 SCADA 系统的模式相似,都是充分利用现有的网络资源及通信资源,采用远端监控设备实时数据的分布式数据库管理模式,达到监控数据的充分共享,并充分利用电力 MIS 系统的资源进行数据发布应用。

2. 监控中心结构

一般来说,监控中心由数据库服务器、通信服务器、管理工作站、Web 服务器、打印机及相关附属设备所组成。数据库服务器、通信服务器、管理工作站、Web 服务器可根据组网规模合并在一台或分散在几台计算机上,物理位置不受限制。示意图如图 4-10 所示。

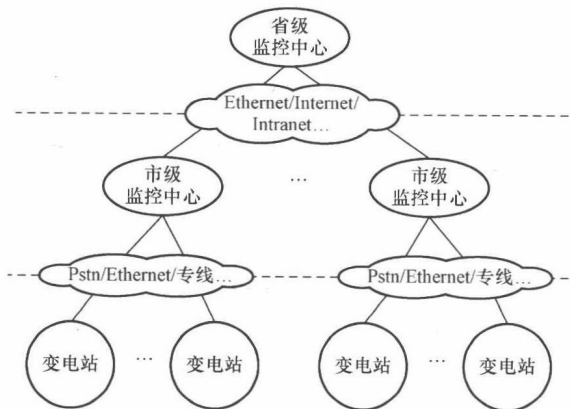


图 4-9 电能质量 SCADA 系统拓扑结构

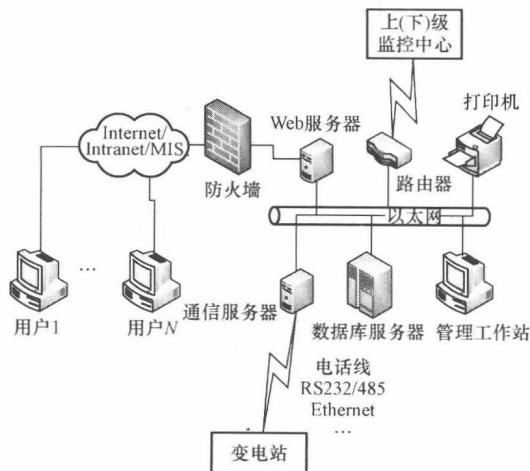


图 4-10 监控中心结构示意图

监控中心主要负责对各变电站所监控单元的监测数据进行自动、人工存取,并对监

控单元进行远程维护与设置操作，也可实现实时数据监测；在多级系统中，上级监控中心可实现对下级监控中心单元的数据统计分析，并可通过下级监控中心对监控单元下达监控命令。

3. 变电站监测单元

每个变电站由多台检测单元按照面向对象的监测思路配置。检测单元与监控中心的通信可通过电话线、光纤、以太网实现，其组网结构如图 4-11 所示。

目前，主流的监测单元一般应用 DSP、嵌入式计算机等主要器件，采用大容量 FLASH 作为存储器件，具有 RS 232/485、以太网、USB 等多种接口。

二、电能质量监测设备的选择

目前，电能质量监测领域的规范化工作还需要不断完善，特别是设备选择、设计、运行管理等方面还需要更多经验的积累。下面简单介绍电能质量监测设备选择过程中应该注意的相关问题。

1. 电能质量监测设备通用要求

GB/T 19862—2005《电能质量监测设备 通用要求》从监测设备的基本功能、性能要求、安全性及其电磁兼容要求等方面做出了较详细的规范，这些要求是在广泛的经验及分析研究的基础上给出的，可作为监测设备选择的基本要求。

例如，具有同样功能的两款设备由于其结构的差异，可能在安全性、电磁兼容性等方面存在较大差异，从而在实际运行现场有着不同的表现；同样功能与精度的两款设备，若不考虑波峰系数，则相当于没有考虑实际运行现场可能出现的各类信号的随机叠加，会导致实际运行现场产生较大的误差等。因此，监测设备的选择应首先根据 GB/T 19862—2005。

2. 关注的技术焦点

关于稳态电能质量的监测，除应考虑采样窗、数据简约方法等问题之外，还应考虑下述问题。

(1) 采样频率问题：对于谐波监测，设计、运行、采购部门可不考虑这一指标，只要规定所检测谐波的最高频谱（例如 25 次谐波或 50 次谐波）及测量精度要求（A 级或 B 级）即可。

对于暂态电能质量的监测，128 点/周波、256 点/周波的采样频率均满足要求。

(2) 通信规约及数据格式：与其他监测控制系统一样，通信协议是监控设备、系统互相识别的唯一规约，但是目前国际范围内还没有一个普遍接受的电能质量监测系统通信规约。

电能质量 SCADA 系统的通信规约应该充分吸收变电站综合自动化、调度信息系统、继电保护信息系统、计量信息系统、负控系统的优点，同时结合电能质量 SCADA 系统的具体特点设计。

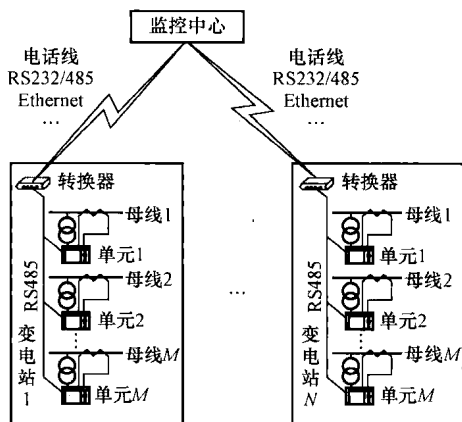


图 4-11 变电站组网结构



作为安装在变电站的监控装置,电能质量监测装置与其他监控装置例如 RTU 等有许多共同特点。因此,基于 IEC 61850 的电能质量监测通信协议是值得研究的。IEC 61850 是能够实现变电站内设备互操作、无缝通信的国际标准,之所以能实现互操作,一个主要的原因是标准采用面向对象的思想,抽象出了一般的逻辑节点模型,并通过设定相应的逻辑参数与数据类,制定了抽象通信服务接口^[1]。通过面向设备抽象建模的运用,使过去面向点的协议方式(IEC 60870-5)过渡到面向对象。如果要将 IEC 61850 标准运用到实际装置中,首先要根据标准来抽象其逻辑节点以及涉及的通信服务,并建立抽象的通信服务模型。据悉,IEC TC57 正在考虑对 IEC 61850-5、IEC 61850-7-4 进行修改,修改的主要原因在于考虑电能质量监测数据的通信。因此,基于 IEC61850 的电能质量监测通信协议是大势所趋。

目前广泛流行的 PQDIF (Power Quality Data Interchange Format) 格式^[2]是 IEEE 制定的一种电能质量数据交换格式。PQDIF 是一种平面记录链表结构,由一系列逻辑相关的记录链接而成,它有物理层和逻辑层两层结构。物理层定义了纪录头和记录体的结构,并不关心实际存储的内容;逻辑层根据物理层定义的结构采用特定的标签来详细描述文件中的元素。通过标签分离数据的物理属性和逻辑属性是 PQDIF 的主要特征。作为不同平台(监测、计算仿真、限值应用、试验等)之间数据的交换,这种格式有它的特点;但是对于电能质量在线监测系统海量数据,该数据格式的应用值得进一步商榷。目前国内采用 PQDIF 为数据交换的电能质量监测系统均遇到了不同程度的问题,随着监测系统监测单元的增加,这种数据格式的缺陷将会更加突出。

三、影响谐波监测的信号取样源

要获取电网的谐波水平或负荷的谐波发射水平,必须在条件允许的条件下采用实时监测的手段^[3]。在进行谐波监测时,要注意监测设备的硬件回路频率特性、监测方法、评估方法等,同时还要关注监测设备从什么地点、什么样的信号取样源获取原始谐波源信号,信号取样源频率特性如何等问题。当然从谐波的发生源(负荷)到信号的接受源(监测设备)之间的网络的频率特性研究也是至关重要的。这一流程如图 4-12 所示。

因此谐波测试问题事实上应该是图 4-12 所示四个流程的统一体。

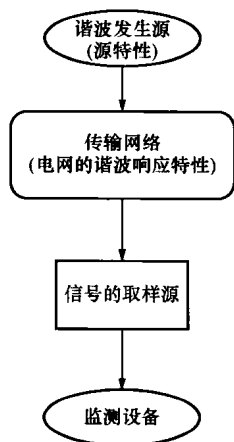


图 4-12 谐波分析流程图

1) 谐波源特性的认识主要帮助把握应该选择什么样的测试设备,例如波动性负荷(电弧炉)将产生间谐波,因而要求选择能够测试间谐波的测试设备。

2) 电网的谐波响应特性的认识在于了解谐波从其发生源到取样源之间的过程中到底发生了怎样的变化,以利于对测试数据进行正确的分析与理解。例如谐波通过传输网络若生了谐波放大现象,则测试数据可能已经不是谐波源负荷的真实谐波发生水平。

3) 谐波信号的取样源频率特性的认识主要在于分析其能否正确反映谐波的实际水平,会引起什么样的误差等。

4) 谐波测试设备是对谐波进行最后的量化手段,其采样电路、抗干扰措施、监测方法、评估方法等都是至关重要的。

以下仅对 3) 进行相关分析,以帮助读者更好地把握谐波

的测试。

1. 电流互感器

一般电流互感器采用电磁原理进行电流变换。其电气原理图如图 4-13 所示^[4]：图中 I_p 为一次侧电流， I_b 为二次侧电流，虚线内为 1。N 为理想变压器， Z_p 为一次侧阻抗， Z_s 为二次侧阻抗（均折算到二次侧）， Z_b 为电流互感器负载， Z_e 为激磁阻抗， C_s 为一次、二次侧绕组间及匝间、杂散电容。

$$\text{根据电路原理, } \frac{I_p/N}{I_b} = \left| 1 + \frac{Z_s + Z_b}{Z_{cs}} + \frac{Z_s + Z_b}{Z_e} \right|。$$

可见，决定电流互感器精度及其频率特性的主要参数为二次侧参数，与一次侧阻抗无关。只要做到在一定的频带（例如 1250Hz）范围内，互感器工作点远离磁饱和区域，则 Z_s 值很低， Z_e 值很大，则其精度可以接受；分析证明^[4]，只要 C_s 限制在 10^{-9} 数量级，则在一般情况下 $\frac{I_p/N}{I_b}$ 接近 1，谐波测量误差较

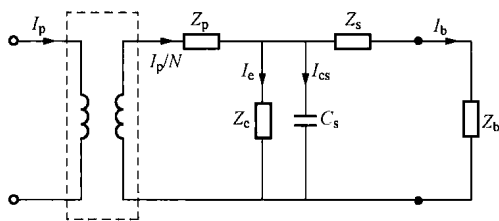


图 4-13 电流互感器谐波情况下电气原理图

小，基本能正确反映实际的谐波水平。GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》指出，电流互感器适用于 2500Hz 及以下频率的谐波测量。

事实上，决定电流互感器误差的主要因素是励磁电流 I_e ，尽可能地减小励磁电流，增加励磁阻抗是减小其误差的主要途径。但是由于高频谐波的存在，其磁路趋于饱和，因而对于不同的谐波成分其对应励磁阻抗均不相同，二次漏抗也不相同，并且随频率呈非线性关系，因而影响其谐波测量精度。因此，谐波测量的电流互感器尽可能选用高磁导材料。

在 10kHz 范围内，电磁式电流互感器用于谐波测量的误差一般不大于 3%。^[3]

一般情况下，电流互感器谐波测量的误差在 1250Hz 以下为 3% 左右，2500Hz 以下为 5%~6%，可用于非研究性谐波测量。

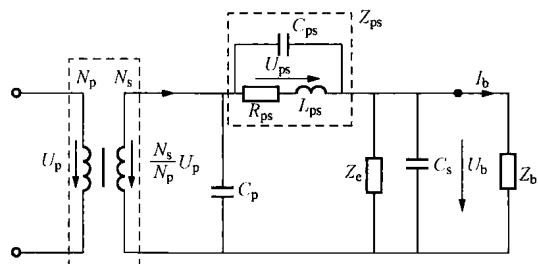


图 4-14 电磁式互感器谐波情况下等效电路图

抗， Z_b 为负载阻抗。

与电流互感器相同的分析方法，如下式：

$$\frac{(N_s/N_p)U_p}{U_b} = \left| 1 + Z_{ps} \left(\frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_e} + \frac{1}{Z_{cs}} \right) \right|$$

可见，电磁式电压互感器的误差不仅与二次侧参数有关，同时也与一次侧阻抗有关。为降低电压互感器的误差，除制造方面控制上述参数之外，使其工作在 85% 额定负载的

2. 电磁式电压互感器

电磁式电压互感器的工作原理与变压器类似。其等效电路图如图 4-14^[4]所示。图中 N_p 、 N_s 为一次、二次匝数， U_p 为一次侧电压， U_b 为负荷侧（二次侧）电压， Z_{ps} 为一次、二次等效漏抗之和及匝间漏电容形成的总等效阻抗（折算到二次侧）， C_p 、 C_s 为一次、二次对地电容， Z_e 为励磁阻

情况下有助于增大负载阻抗 Z_L 。

大多数电磁式电压互感器在 5kHz 范围内误差一般为 3% 左右, 可以用于谐波的测试^[3]。其频率—误差曲线如图 4-15 所示。

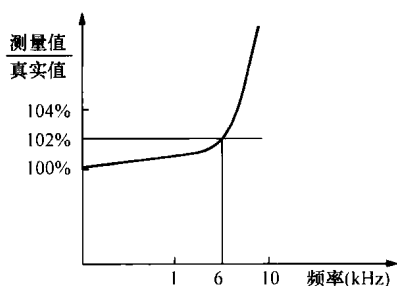


图 4-15 电磁式电压互感器频率特性示意图

低压电压互感器可用于 2500Hz 及以下频率的谐波测量, 6~110kV 电磁式电压互感器可用于 1000Hz 及以下谐波测量。

特别值得指出的是, 小电流接地系统中大量 10kV、35kV TV 中性点加装消谐电阻 (目的是为了抑制铁磁谐振现象), 消谐电阻的增加, 严重改变了计量装置 TV 的零序回路, 但是, 谐波具有固有的序特性, 在具有消谐电阻的 TV 上测量到的谐波电压水平是不可信的, 尤其是零序性谐波量误差较大^[5]。

3. 电容式电压互感器

电容式电压互感器基本上是一个调谐到 50Hz 的装置, 一般只能使用在以 50Hz 为中心的有限频率范围内, 不适用于测量含谐波的电压^[4]。电容式电压互感器不能用于谐波测量, 特别的, 在频率不大于 200Hz 的频带内容易发生谐振现象^[2]。GB/T 14549—1993 的附录 D.7 指出, 在没有确切的频率响应误差曲线时, 电容式电压互感器不能用于谐波测量。

电容式电压互感器之所以不能用于谐波测量, 主要是由其结构确定的频率特性决定的。图 4-16 为其原理结构图。可见, 电容式电压互感器是由一台电容分压器和一台电磁式电压互感器组成的。根据上面电磁式电压互感器的误差—频率特性公式可见, 电磁式电压互感器的误差与一次侧阻抗有关。电磁式电压互感器一次侧除电磁式互感器自身绕组漏抗之外, 增加了电容 C_0 。而正是由于 C_0 的引入, 严重地改变了其频率特性, 使得在低于 200Hz 的频率范围内存在多处谐振点, 从而无法反映真实的一次谐波电压。

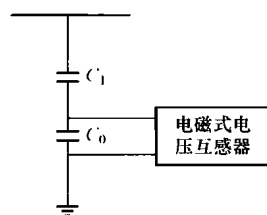


图 4-16 电容式电压互感器原理结构图

四、高压电网谐波测量的局限性

谐波国家标准适用于 50Hz、110kV 及以下的公用电网及其供电的电力用户。对于 220kV 电网及其供电的用户, 可参照相关标准对 110kV 电网的规定执行^[4]。主要原因在于:

1) 220kV 电网的谐波电压直接受 330kV 或 500kV 电网谐波的影响, 目前运行经验还不够, 国外也没有明确的规定。

2) 220kV 电网输电线路的充电无功功率较大 (25MVA/100km), 而且输电潮流的变化较大, 控制 220kV 电网的谐波, 目前还没有成熟的经验。

3) 直接用 220kV 电压供电的用户不多。

4) 220kV 电网电容式电压互感器无法进行谐波电压测量。

考虑到电力系统稳态谐波源主要为谐波电流源这个特性, 也即谐波问题主要是由非线性用户产生的, 而直接用户主要集中在 110kV 及以下电网, 只要控制住了 110kV 及以下电网及其用户的谐波水平, 也就控制住了 110kV 以上电网的谐波水平。因为谐波电流总是由低电压等级向高电压等级渗透的。从这个意义上说, 监测高电压等级的谐波水平

意义不是很大。真正重要的问题在于研究高电压等级电网的谐波传输特性。当然,研究与分析 220kV 及以上谐波问题对于防止保护误动、拒动具有很大的现实意义。

五、系统接地方式与 TV 的不同接线方式对电能质量监测的影响

电压互感器接线方式的选择与电网的接地方式有关。当电网中性点为非有效接地方式时,广泛采用两台接于线电压的 Vv 接线。当电压互感器兼做计量和接地监测用时,也可采用三台单相电压互感器组成的星形接线或一台三相五柱式电压互感器。当电网中性点为有效接地方式时,广泛采用三台接于相电压的 YNyn 接线。

值得指出的是,虽然电能质量国家标准许多指标是针对相电压给出的,但是实际上许多负载施加的电压为线电压,因此,此时线电压的质量指标才是真正意义上的电能质量指标。

1. Vv 接线

图 4-17 所示为两个单相电压互感器接成的 Vv 接线形式,该接线形式广泛应用于中性点非有效接地系统,无法测量相电压参数。通过线电压测量还原相电压将带来很大的误差,单相接地情况下无法还原相电压,正常运行方式下还原的相电压谐波参数将会存在较大的零序性误差。

2. 三台单相电压互感器组成的星形接线

图 4-18 为三台单相电压互感器组成的星形接线示意图。在中性点直接接地系统中,该种方式可有效监测相电压指标参数;在中性点非直接接地系统中,虽然可用来监测相电压参数,但原理上仍有一定的误差。

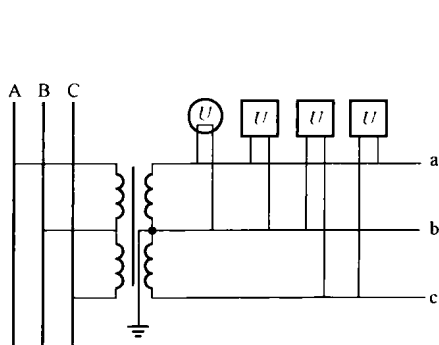


图 4-17 Vv 接线

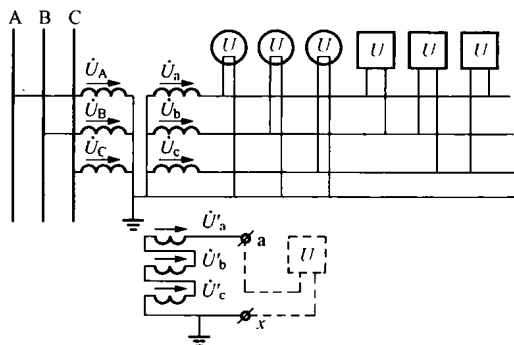


图 4-18 三台单相电压互感器组成的星形接线示意图

3. 三相三柱式及五柱式电压互感器

图 4-19 为三相三柱式电压互感器的接线示意图,图 4-20 为三相五柱式电压互感器的接线示意图。该接线形式广泛应用于中性点非直接接地系统,可以有效监测相电压参数。

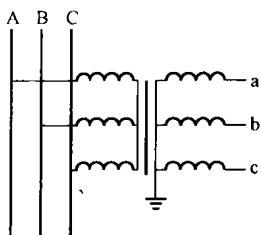


图 4-19 三相三柱式电压互感器接线示意图

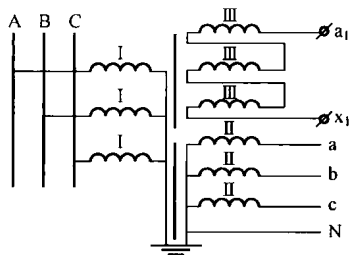


图 4-20 三相五柱式电压互感器接线示意图



第三节 电能质量监测数据的评估方法

电能质量监测数据的评估是指：对约定时间段内、某点（区域）的电能质量监测数据，采用科学合理的方法，获取其可与相关标准进行比较的待定义数据。可见，最终的待定义数据与时间段、区域、评估方法均有着直接的关系，即使对于同样的数据对象，采用的方法不一样，最终获取的与标准限值进行比较的定义值也不一样。

一般的，对于稳态电能质量指标，评估的基本思路为

- 1) 确定统计时间段：月、季度、年。可以通过月指标获取季度、年指标。
- 2) 确定统计区域：某点、某小区域（市级）、某大区域（省级）。
- 3) 统计方法：点的指标统计考虑某一时间段的 95% 概率大值，小区域（市级供电局）的统计可对点 95% 概率大值求取算术平均值（或对各点的 95% 概率大值采取 95% 大值统计），大区域（省级电力公司）可利用各小区域（市局）的数据采取算术平均方法计算。

同样，暂态电能质量指标的评估主要考虑下述因素：

- 1) 统计时间段：以年为统计单位。
- 2) 统计区域。
- 3) 单一事件过程的维持电压及持续时间。
- 4) 事件发生的频度。
- 5) 区域评价方法。

评估结果可采用报表、图形曲线、分级（污染级别）汇总等方式记录。

一、稳态电能质量指标的评估方法

1. 某一点某一指标某时间段指标评估——概率大值法

某一点某一指标的时间跨度评估可沿用概率大值的干扰统计方法。概率大值即某百分位数对应的目标值：设第 $x\%$ 位数的目标值为 P_x ，它将全部观察值分成两个部分，其中有 x 个观察值小于 P_x ， $(100-x)\%$ 个观察值大于 P_x 。它主要用来描述一组数据在各个百分位置上的水平，用一组百分位数如 P_5 ， P_{25} ， P_{50} ， P_{75} ， P_{95} ， P_{99} 、 P_{100} 表示。

2. 某一区域某一指标某时间段指标评估——平均值法

算术平均值即描述统计对象的整体规模和水平作趋势，是表征数据集中趋势的一个统计指标。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

算术平均值在统计学上的优点是它较中位数、众数更少受到随机因素影响，缺点是它更容易受到极端数影响。考虑到区域样本数量较小（在一个区域中监测点还不够密集），同时稳态电能质量的具体测量方法及某点统计方法已经对各类瞬态极端情况进行了弱化，因此，某一区域某一指标某一确定时间段的指标评估采用算术平均值有较好的优势。

为了直观显示该区域中所包含点（单位、变电站）供电质量的优劣差异，采用算术平均数方法时，需要同时给出标准差指标，定义为

(3) 第三步，省电力公司 10kV 电压等级月指标形成：给出各供电公司指标的平均值及标准差。一般一个省的市级供电局不超过 10 个，因此采用平均值指标较为合理。表 4-7 为××省电力公司××年××月稳态电能质量指标一览表。

表 4-7 ××省电力公司××年××月稳态电能质量指标一览表

指标数值		各市局指标的平均值	标准差	污染级别
指	标			
谐波	电压总畸变率 (%)			
	奇次 (%)			
	偶次 (%)			
三相不平衡度 (%)				
闪变	短时			
	长时			

注 总样本（点数）为××个点（目的在于了解市级供电局数目）。

(4) 第四步，季度指标形成，年度指标（方法与月度指标形成相同）：最后将评估结果以柱状图形式直观表示出来，如图 4-21 所示。

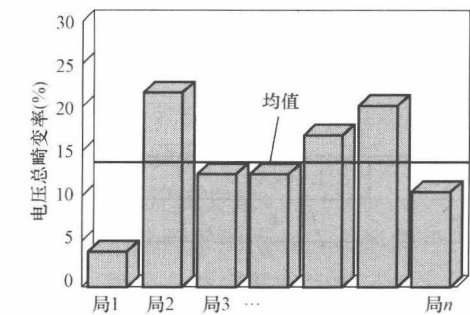


图 4-21 电能质量指标柱状示意图
(以谐波电压为例)

二、暂态电能质量指标的评估方法

暂态电能质量没有统一的限值标准，一般根据敏感负荷的具体特征和不同的门槛值进行分析评估。一般包含下述内容：

- 1) 对单一事件进行评估；
 - 2) 对某一点事件集合进行评估；
 - 3) 对一个系统（区域）事件集合进行评估。
- 以下分别介绍。

1. 单一事件的评估分析

单一事件分析主要针对事件发生过程的实时波形进行分析，如图 4-22 所示，可分析事件发生、结束的时刻及其相位变化；分析事件发生过程的相位、幅值变化，如图 4-23 所示；分析不同门槛值下的事件残压及持续时间；依据 ITIC 曲线、SEMI 曲线（或各类敏感设备的抗扰度曲线）对事件进行危害性分析，如图 4-24 所示，以评估该事件的危害程度等。可通过图示、报表给出结果。

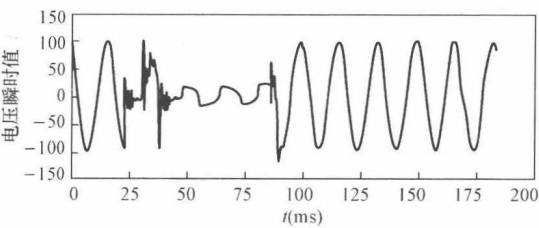


图 4-22 事件过程实时波形示意图

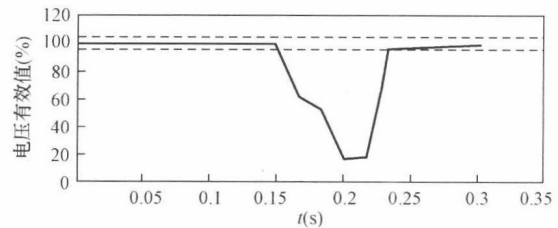


图 4-23 事件过程有效值变化示意图

2. 对某一点事件集合进行评估

在某一评估周期内，某点事件集合是在该评估周期内由该点捕捉到的单个事件组成

的集合。对这一特定时间段的事件集合进行分析评估的方法简介如下。

(1) SARFI 法。SARFI 法即 System Average RMS variation Frequency Index，通过与经典的可靠性分析指标 SAIFI (system average interruption frequency index) 相比较可见，SARFI 法也就是一种用来描述 RMS 变化频度的方法。

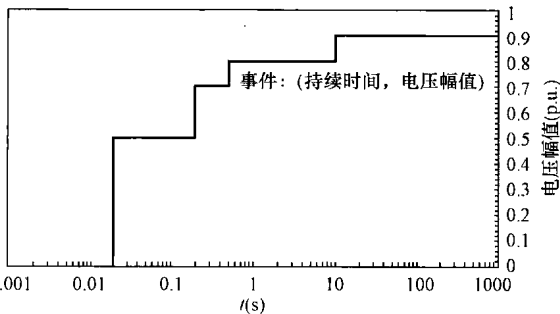


图 4-24 事件的 SEMI 47 抗扰度分析

SARFI 法一般有两种类型的表示法，即 SARFI-X、SARFI-Curve。

1) SARFI-X。

例如，SARFI-90 指事件过程中电压低于 0.9p. u. 或 90%额定电压的次数；SARFI-110 指电压高于 1.1p. u. 或 110%额定电压的次数。

采用 SARFI-X 方法分析如下：

- a) 事件统计期为 2000 年 7 月 1 日~2000 年 10 月 1 日共 92 天；
- b) 事件汇总表见表 4-8。

表 4-8 某点事件汇总表

时 间	最小电压 (%)	持续时间
7-01-2000 09 : 48 : 52	73	9cycles
7-01-2000 09 : 50 : 16	73	9cycles
7-07-2000 14 : 20 : 12	0	82cycles
7-10-2000 15 : 55 : 23	13	100cycles
7-21-2000 09 : 48 : 52	0	2.6seconds
8-08-2000 07 : 35 : 02	49	34cycles
9-02-2000 08 : 30 : 28	0	41seconds
9-08-2000 10 : 30 : 40	59	40cycles

c) SARFI-X 分析结果见表 4-9。

表 4-9 表 4-8 事件集合的 SARFI-X 分析结果

索 引	数 量	事件个数/30 天
SARFI-90	8	2.61
SARFI-70	6	1.96
SARFI-50	5	1.63
SARFI-10	3	0.98

例如对于 SARFI-90 来说，统计期内发生了 8 次低于 90%额定电压的事件，则 30 天的平均发生频度为 $30 \times (8/92) = 2.61$ 。

2) SARFI-Curve。

这里以 SARFI-ITIC 曲线为例进行分析。该方法一般需要对事件集合进行重构，重构

的原则是：60s 内不管发生了几次事件都视为一个事件，选择一个残压最严重的作为代表。然后再应用 SARFI-ITIC 法对重构后的事件集合进行分析。

表 4-10 为某点事件集合，表 4-11 为重构后的事件集合，应用 ITIC 曲线对该表进行分析，分析结果如图 4-25 所示。

时 间	维持电压 (p. u.)	持续时间 (s)
05/02/2000 09 : 39 : 55	0.694	0.25
05/02/2000 09 : 39 : 58	0.878	0.1
05/08/2000 08 : 22 : 45	0.631	0.25
05/08/2000 08 : 22 : 48	0.858	0.15
05/08/2000 08 : 22 : 50	0.459	0.1
05/08/2000 08 : 23 : 11	0.853	0.117
05/08/2000 08 : 23 : 14	0.542	0.517
05/08/2000 08 : 23 : 37	0.552	0.483
05/08/2000 08 : 36 : 12	0.772	0.033
05/08/2000 08 : 45 : 24	0.838	0.167
05/08/2000 08 : 45 : 54	0.545	0.233
05/08/2000 08 : 46 : 00	0.47	0.133
05/08/2000 08 : 46 : 19	0.892	0.15
05/08/2000 08 : 46 : 24	0.545	0.483
05/08/2000 08 : 46 : 42	0.861	0.117
05/14/2000 08 : 03 : 00	0.831	0.067
05/14/2000 09 : 06 : 59	0.828	0.05
05/17/2000 14 : 39 : 05	0.891	0.067
05/29/2000 03 : 33 : 54	0.013	0.2
05/29/2000 03 : 34 : 17	0.068	0.133
05/29/2000 03 : 34 : 42	0.008	0.067
05/30/2000 07 : 53 : 14	0.721	0.067
05/30/2000 07 : 53 : 18	0.76	0.1
05/30/2000 08 : 00 : 09	0.684	0.033
05/30/2000 13 : 15 : 03	0.763	0.033

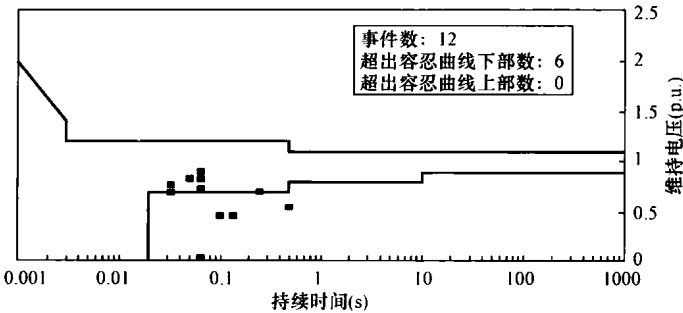


图 4-25 表 4-11 的 ITIC 曲线分析结果

表 4-11

表 4-10 重构后的 60s 事件集合

时 间	电压 (p. u.)	持续时间 (s)
05/02/2000 09 : 39 : 55	0.694	0.25
05/08/2000 08 : 22 : 45	0.459	0.1
05/08/2000 08 : 36 : 12	0.772	0.033
05/08/2000 08 : 45 : 24	0.47	0.133
05/08/2000 08 : 46 : 24	0.545	0.483
05/14/2000 08 : 03 : 00	0.831	0.067
05/14/2000 09 : 06 : 59	0.828	0.05
05/17/2000 14 : 39 : 05	0.891	0.067
05/29/2000 03 : 33 : 54	0.008	0.067
05/30/2000 07 : 53 : 14	0.721	0.067
05/30/2000 08 : 00 : 09	0.684	0.033
05/30/2000 13 : 15 : 03	0.763	0.033

(2) 报表统计分析法。报表统计分析主要以事先定义的表结构及其参数对事件进行统计,可形成一段时间内某一点、某一个区域的事件分析列表。目前,典型的报表主要有下述三种。

1) UNIPED (国际电力企业联合会) 推荐报表。该报表 (表 4-12) 适合于对简单的矩形事件进行描述。请注意,这里的事件统计指事件过程中电压处于此维持电压区间的事件个数,并不是处于和小于此维持电压的事件个数。

表 4-12

UNIPED (国际电力企业联合会) 推荐报表

持续时间 维持电压	<20ms	20~100ms	100~150ms	0.5~1s	1~3s	3~20s	20~60s	60~180s	>180s
85%~90%									
70%~85%									
40%~70%									
10%~40%									
<10%									

2) EPRI-Electrotek 报表。该报表 (表 4-13) 适合于矩形及非矩形事件 (如图 4-26 所示),比 UNIPED 报表更具有普遍性。它是根据不同的事件门槛值对事件进行统计分析,灵活方便,得到了普遍应用。该表的持续时间到 60s,与 IEEE Std 1159 (TM) — 2009 的定义一致。

3) IEC 61000-4-11 推荐报表。表 4-14 为 IEC 61000-4-11^[6]推荐报表,与 EPRI-Electrotek 报表类似,区别在于:①暂降分析的门槛值划分不同;②暂降事件的持续时间一般不超过 1s。请注意,该报表主要用来评价敏感设备暂降抗扰度水平。

表 4-13 EPRI-Electrotek 报表

持续时间 维持电压	0.5cycle~60s	0.5cycle~0.5s	0.5sec~3s	3sec~60s
<90%				
<80%				
<70%				
<50%				
<10%				

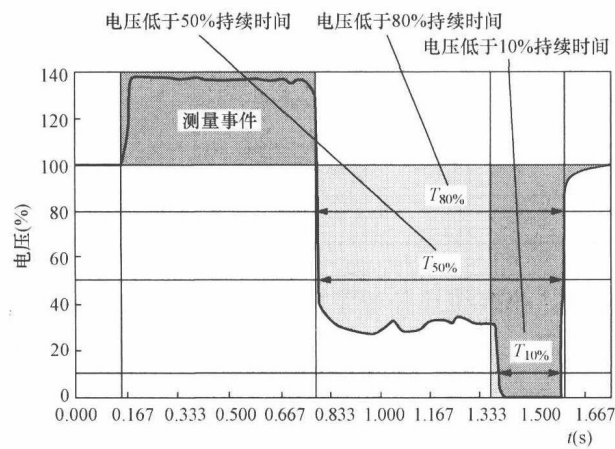


图 4-26 非矩形事件示意

表 4-14 IEC 61000-4-11 推荐报表

持续时间 (ms) 维持电压	10	20	100	200	500	1s
70%						
40%						
1%						

3. 对某一系统进行暂态事件评估分析

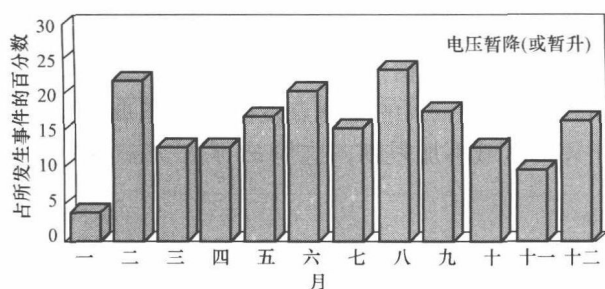
这里的一个系统可以是一个市级电力公司或一个省级系统。上述针对一个点事件集合的分析方法也可适用于对系统进行事件分析。

系统事件分析还可以采用下述方法进行分析、评估、发布。

(1) SARFI- x 方法。仍然采取 SARFI- x 的分析思路，主要从事件发生的频度方面评估一个系统的暂态事件。对于某一门槛 x ，SARFI $_x$ 定义为

$$\text{SARFI}_x = \frac{\sum N_i}{N_T}$$

式中： x 为事件门限，可能的值为 140，120，110，90，80，70，50 和 10（%），其中 140，120，110 针对电压暂升事件下对信息工业的影响，90，80，70：针对电压暂降事件

图 4-29 年 ∞ 月事件发生趋势分布示意

参 考 文 献

- [1] 采用 IEC61850 标准的电能质量监测系统的初步研究, 刘东晖等. 第三届电能质量国际研讨会论文集. 中国标准出版社.
- [2] IEEE P1159. 3/D9 Draft: Recommended Practice for the Transfer of Power Quality Data.
- [3] IEEE Std 519 (TM) — 1992 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [4] 吕润餘. 电力系统高次谐波. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [5] 吴竞昌. 供电系统谐波. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [6] Yao Xiao, Problems of Voltage Transducer in Harmonic Measurement, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, vol. 19, No. 3, JULY 2004.
- [7] IEC61000-4-11 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4—11: Testing and measurement techniques, Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests.

电能质量问题分析的基本步骤及难点

本章将在前面几章叙述的基础上，总结电能质量问题分析的基本步骤。同时，根据电能质量问题的差异性及其实践性，分析具体应用过程中的一些难点问题。

第一节 电能质量问题分析的基本步骤

电能质量问题分析的一般步骤分析如下。

1. 问题的提出及其背景分析

电力事故、用户投诉、产品线中断、产品质量下降等均可能是电能质量问题的表现。此阶段应尽可能进行现场调查，了解详细的背景信息，广泛收集相关资料，详细记录所发生的现象、危害等。

若有电能质量在线监测系统，需要调阅近一段时间的监测数据进行分析；若没有监测系统，在可能的情况下对背景指标进行补充测量。

2. 源特性分析

根据背景资料信息，结合负荷用电特征的具体内容，分析引起电能质量问题的可能原因，并对污染源水平进行量化预估，必要时可结合实际测试进行分析。

3. 供电网响应特性分析

针对引起这些问题对应的不同电能质量指标，分析供电网络响应特性。即分析污染源的干扰经过供电网后发生了哪些变化，是如何传播的，在所关注的节点上量值水平如何等。

4. 危害性分析

上述干扰量化体系建立后，对干扰的危害进行分析（定性及定量），给出危害分析的量化指标，科学地解释事件的起因、发生、发展的过程。

5. 控制措施及其方案论证

根据上述危害的量化指标，提出控制的基本方案，并进行充分论证。

在上述系列步骤过程中，两个问题是整个过程的难点：①电能质量指标危害的量化评估，它是科学合理解释事件发生过程的关键，也是控制目标确定的基础；②电能质量控制的实时响应特性，控制设备只有实时跟踪所控制指标的变化并及时补偿，才能满足所要求的补偿、控制性能。

下面就上述两个问题举例分析说明，其目的在于抛砖引玉，以期就电能质量危害的量化分析引起广泛的关注与研究。

第二节 电能质量指标危害的量化评估

电能质量指标危害的量化评估历来是一个难点，今后相当长的时间内仍将是这一领域的难点及技术焦点。只有在大量的理论分析与实践经验的基础上，才能建立相对全面的危害量化评估体系。就像 ITIC 曲线、SEMI 曲线一样，有时需要建立量化危害试验体系以获取试验条件下的量化危害曲线。

本节以电网背景谐波电压对电容器的量化危害分析^[1]为例，介绍一种背景谐波对电容器运行危害的量化评估方法。

一、电容器运行规程所规定的电压、电流耐受水平

据统计，谐波造成电器设备损坏的事故中，电容补偿装置占总事故率的 70%左右。可见谐波，对电容补偿装置的安全可靠运行是一个较大的威胁，应认真对待。

电容器装置是由一系列元件串并联形成的。概括而言，电容器的安全运行受两个条件的制约：一是电压，包括电压有效值及其峰值；二是电流。GB 3983—1989《并联电容器》对电容器的运行参数有四项：过电压、过电流、过载容量和谐波过电压，其中谐波过电压是以峰值作为约束条件的。

1. 过电压限值

表 5-1 规定了电容器的工频过电压、谐波加工频过电压约束。

表 5-1 电容器的工频过电压、谐波加工频过电压约束

工频电压有效值 (U_N)	1.0	1.1	1.15	1.2	1.3
允许时间	长期	长期*	30min/24h	5min	1min
谐波加工频电压	不超过电容器过电流规定				

* GB/T 11024.1—2001 的规定为：8h/24h。

2. 电容器的过电流能力

电容器过电流能力规定：电容器在额定频率、额定正弦波电压下，其有效值电流不大于 1.3 倍额定电流。即 $f=f_N$ 、 $U=U_N$ 时 $I\leq 1.3I_N$ 。

电容器的过电流受过热条件的限制，检验其过热能力的试验是温升试验，该试验是在工频正弦波条件下进行的。基本约束条件为： $f=f_N$ 、 $C\leq 1.1C_N$ 、 $U\leq 1.1U_N$ 、 $I\leq 1.3I_N$ ，此时其工频试验容量为 $Q\leq 1.58Q_N$ ，对应的工频试验电压为 $U_S=1.26U_N$ ，试验时间持续 48h。

谐波电流 I_h 的等效基波发热电流为： $I'_h=d_hI_h$ ($d_h>1$ 为第 h 次谐波电流等值基波发热系数，简称谐波电流等值系数)。因此，包含各次谐波电流的等效基波发热电流为 $I' =$

$\sqrt{I_1^2 + \sum_{h\geq 2} (d_hI_h)^2}$ ，虽然该电流不是实际存在的，但却是实际发热的等效电流。实际存在电流为 $I = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h\geq 2} I_h^2}$ 。

通过上式分析可见，电容器过电流能力中 $I\leq 1.3I_N$ 的理解是：等值基波发热电流

$I' = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h \geq 2} (d_h I_h)^2} \leq 1.3 I_N$, 而不是工频加谐波电流 $I = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h \geq 2} I_h^2} \leq 1.3 I_N$ 。因为一般情况下, $I' > I$ 。

3. 电容器的过载容量

电容器的过载容量规定为: 在不超出过电流规定的条件下, 最大容量不大于 $1.35 Q_N$ 。也就是说, 其过载容量受过载电流的约束, 同样受谐波电流水平及其频谱的约束。

4. 谐波过电压

谐波过电压的规定为: 工频加谐波电压峰值不大于 $1.2\sqrt{2}U_N$ 。可见, 电容器运行约束不仅要从有效值角度进行定义, 同时要分析波形的形状。相同有效值的谐波电压可以有不同的形状, 从而影响波形的峰值水平。

实际运行中, 许多电容器损坏是由于局部放电不能熄灭造成的。局部放电试验要求, 在电压下降到 $1.2U_N$ 时应熄灭。但是在电容器运行一段时间后, 其耐压水平本身有所下降, 在有谐波存在的场合, 更容易发生局部放电而击穿元件, 使整个电容器退出运行。

通常在分析谐波过电压进行时, 一般取基波与各次谐波的算术和 (由于不知道谐波相位, 最好进行实测获取实际峰值分析), 从而转化为有效值约束, 即 $U_1 + \sum_{h \geq 2} U_h \leq 1.2U_N$ 。

总结上述分析, 电容器运行的约束条件可归纳为表 5-2。谐波环境下约束条件的意义主要表现在:

(1) 电容器的各种约束条件均受到过电流条件的制约, 谐波的存在使得过电流约束变得更加复杂。

(2) 谐波对电容器的危害不仅表现于谐波的幅值, 还表现于波形的形状, 即峰值水平及谐波频谱。

(3) 考虑到谐波的等效基波热电流效应, 谐波状况下电容器的综合过电流水平普遍下降。

(4) 谐波对电容器危害的实际表现为: 元件损坏、电容器鼓肚、合上电容开关随机跳闸、电容器爆炸等。

(5) 谐波谐振存在的情况下电容器的运行环境急剧恶化。

表 5-2 电容器运行约束条件一览表

指 标	描 述	限 值
S	视在功率	$1.35 S_{\text{rated}}$
U_{rms}	电压有效值	$1.1 U_{\text{rms, rated}}$
U_{peak}	电压峰值	$1.2 U_{\text{peak, rated}}$
I_{rms}	电流有效值	$1.3 I_{\text{rms, rated}}$

二、谐波对电容器危害分析

谐波的存在劣化了电容器的运行环境, 甚至发生谐波谐振现象。任何一台电容器及其安装点的电网均可等效为如图 5-1 所示电路。

图 5-1 中, 戴维南等效电路开路等效电压 E 、开路阻抗 Z_{sys} 可通过系统分析获取, 也可通过背景测试获取。

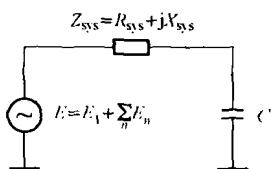


图 5-1 谐波对电容器危害的戴维南等效电路

设: $E = E_1 + \sum_n E_n$, $E_n = a_n E_1$, 其中 a_n 为各次谐波电压含有率。则电容器投入运行后基波电压、电流为

$$I_{C1} = E_1 Y_1 \quad (5-1)$$

$$U_{C1} = \frac{I_{C1}}{\omega C} = \frac{E_1 Y_1}{\omega C} \quad (5-2)$$

式中: Y_1 为补偿电容与电源开路阻抗共同作用(串联)的导纳。同样, 当谐波次数 $n > 1$ 时, 电容器谐波电压、电流为

$$I_{Cn} = E_n Y_n \quad (5-3)$$

$$U_{Cn} = \frac{I_{Cn}}{n\omega C} = \frac{E_n Y_n}{n\omega C} \quad (5-4)$$

Y_n 同样为补偿电容与电源开路阻抗共同作用(串联)的谐波导纳, 即

$$Y_n = \left| \frac{1}{Z_{sys(n)} + Z_{cap(n)}} \right| = \left| \frac{1}{R_{sys(n)} + jX_{sys(n)} - j\frac{1}{n\omega C}} \right| \quad (5-5)$$

显然, 当 $X_{sys(n)} = \frac{1}{n\omega C}$ 时, 存在谐波谐振现象, 此时, $Y_n = Y_{n,max} = \frac{1}{R_{sys(n)}}$ 。

实际上, 系统中只要存在电容补偿装置, 均存在谐波谐振隐患。那么, 实际问题是: 对于给定的背景谐波电压, 电容器组是否可以投入运行? 若存在危害, 会引起什么样的危害呢? 即使发生了谐波谐振现象, 到底会对电容器的安全运行带来多大的危害呢?

依据电容器的运行约束, 在谐波环境下, 电容器的电压有效值、电压峰值、电流有效值、视在功率约束可用下列公式表示

$$U_{rms} = \sqrt{U_{C1}^2 + \sum_n U_{Cn}^2} = \frac{1}{\omega C} \sqrt{(E_1 Y_1)^2 + \sum_n \left(\frac{E_n Y_n}{n} \right)^2} \quad (5-6)$$

$$U_{peak} = \sqrt{2} U_{C1} + \sum_n \sqrt{2} U_{Cn} = \frac{\sqrt{2}}{\omega C} \left[E_1 Y_1 + \sum_n \left(\frac{E_n Y_n}{n} \right) \right] \quad (5-7)$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_{C1}^2 + \sum_n I_{Cn}^2} = \sqrt{(E_1 Y_1)^2 + \sum_n (E_n Y_n)^2} \quad (5-8)$$

$$S = U_{rms} I_{rms} = \frac{1}{\omega C} \sqrt{(E_1 Y_1)^2 + \sum_n \left(\frac{E_n Y_n}{n} \right)^2} \times \sqrt{(E_1 Y_1)^2 + \sum_n (E_n Y_n)^2} \quad (5-9)$$

设上述参数的额定值为

$$U_{res, rated} = U_{C1} = \frac{E_1 Y_1}{\omega C}; \quad U_{peak, rated} = \sqrt{2} U_{C1} = \frac{\sqrt{2} E_1 Y_1}{\omega C}$$

$$I_{res, rated} = I_{C1} = E_1 Y_1$$

$$S_{rated} = U_{C1} I_{C1} = \frac{(E_1 Y_1)^2}{\omega C}$$

考虑到电容器运行的下述约束条件 $S \leq 1.35 S_{rated}$, $U_{res} \leq 1.1 U_{res, rated}$, $U_{peak} \leq 1.2 U_{peak, rated}$,

$I_{res} \leq 1.30 I_{res, rated}$, 若设 $\gamma_n = \frac{Y_n}{Y_1}$, 并定义其为等效谐波阻抗, 则谐波环境下的电容器约束

可表述为

$$\sqrt{1 + \sum_n \left(\frac{a_n}{n} \gamma_n \right)^2} \sqrt{1 + \sum_n (a_n \gamma_n)^2} \leq 1.35 \quad (5-10)$$

$$\sqrt{1 + \sum_n \left(\frac{a_n}{n} \gamma_n \right)^2} \leq 1.1 \quad (5-11)$$

$$1 + \sum_n \left(\frac{a_n}{n} \gamma_n \right)^2 \leq 1.2 \quad (5-12)$$

$$\sqrt{1 + \sum_n (a_n \gamma_n)^2} \leq 1.30 \quad (5-13)$$

下面将依据式(5-10)~式(5-13)进行电容器谐波抗扰度分析。其结论在工程上有较大的应用价值。

1. 分析某一次谐波起主导作用时的 r_n - n 曲线

为了简化分析,假设背景谐波中只有某一次谐波 n 较为明显,且其背景谐波含有率 a_n 已知(通过测试或通过谐波潮流计算等手段获取),其余谐波水平较低。

此时上述约束条件变为

$$\sqrt{1 + \left(\frac{a_n}{n} \gamma_n \right)^2} \sqrt{1 + (a_n \gamma_n)^2} \leq 1.35 \quad (5-14)$$

$$\sqrt{1 + \left(\frac{a_n}{n} \gamma_n \right)^2} \leq 1.1 \quad (5-15)$$

$$1 + \left(\frac{a_n}{n} \gamma_n \right)^2 \leq 1.2 \quad (5-16)$$

$$\sqrt{1 + (a_n \gamma_n)^2} \leq 1.30 \quad (5-17)$$

满足上述约束的 γ_n - n 曲线如图 5-2 所示(分析实例中 a_n 设定为 $a_n \leq 3.2\%$)。该曲线直观地揭示了谐波条件下电容器约束量化效果,表现为:

1) 电流有效值约束条件在谐波状况下表现为恒定约束,不以谐波次数的增加而改变(实际上,由于不同频谱的电流热效应效果不同,会有一定的变化)。

2) 电压有效值约束、电压峰值约束与具体系统的结构有较大的关系。

3) 在 4、5 次谐波附近,电压峰值约束与容量约束相交,随后,容量约束随着谐波次数的增加几乎没有变化。

4) 在频谱低于 4、5 次谐波的约束中,电压峰值起主要作用,之后容量约束起主要作用。

上述约束条件下的无害区域如图 5-2 所示,主要由电压峰值、容量约束决定。可见,在一个地方安全运行的电容器,移动到即使背景谐波特征完全相同的地方,由于电网的结构不同也可能出现安全隐患。因此,结合具体的背景谐波水平及其网络结构对待设定电容器装置进行抗扰度评估非常重要。

2. 分析多次谐波起主导作用时的 γ - n 关系

假设背景谐波中有多个频谱分量含有率较大,为了便于分析,设各次谐波的 γ_n 相同,均等于 γ (这样的假设不影响分析结果的应用),则式(5-10)~式(5-13)可以简化为

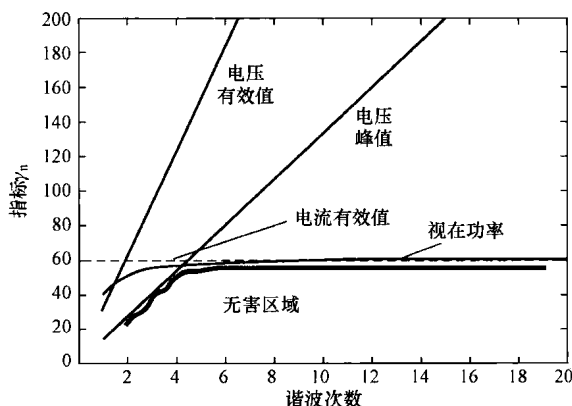


图 5-2 某一次谐波起主导作用时 γ_n - n 曲线示意图

$$\sqrt{1+\gamma^2 \sum_n \left(\frac{a_n}{n}\right)^2} \sqrt{1+\gamma^2 \sum_n (a_n)^2} \leq 1.35 \quad (5-18)$$

$$\sqrt{1+\gamma^2 \sum_n \left(\frac{a_n}{n}\right)^2} \leq 1.1 \quad (5-19)$$

$$1+\gamma^2 \sum_n \left(\frac{a_n}{n}\right)^2 \leq 1.2 \quad (5-20)$$

$$\sqrt{1+\gamma^2 \sum_n (a_n)^2} \leq 1.30 \quad (5-21)$$

考虑到一般系统中总是存在几个较大的谐波次数,可以只考虑2种、3种谐波次数的组合进行分析。例如对于整流性负荷,在5、7、11、13次谐波中选取两种主要谐波组合进行分析。结果见表5-3(分析中各次谐波含有率按3.2%考虑)。

表 5-3 5、7、11、13 两两谐波组合起主导作用时的 γ

谐波频谱 1 \ 谐波频谱 2	5	7	11	13
5	—	19.5222	19.6213	19.6407
7	19.5222	—	19.7863	19.8065
11	19.6213	19.7863	—	19.9127
13	19.6407	19.8065	19.9127	—

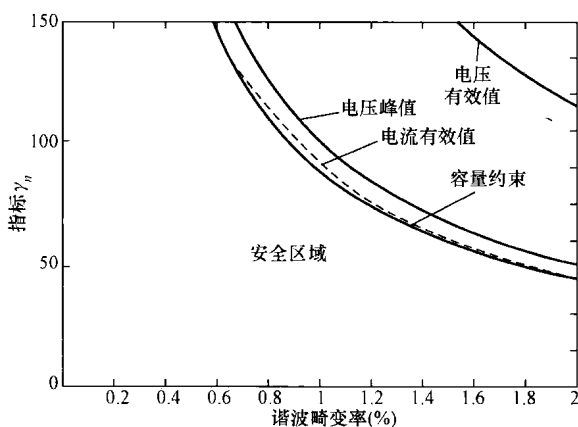


图 5-3 5 次谐波起主导作用时的 γ_n - a_n 曲线

3. 容限特性 γ_n - a_n 分析

以下变换一种角度分析 γ_n 、 a_n 的关系。

如果某一次谐波起主导作用,让其含有率进行变化,此时 γ_n - a_n 曲线如图 5-3 所示(图中以 5 次谐波为例)。分析此图可见,谐波约束中可采用容限约束进行谐波危害的量化评估,对于特定谐波次数 n ,当 γ_n - a_n 处于图示安全区域时,电容器将安全稳定运行。

当背景谐波中多次谐波其主导作用时, γ_n - a_n 曲线如图 5-4 所示(图中只给出了容限约束)。

4. 容限曲线 γ_n - a_n 的实际应用

实际工程中, γ_n - a_n 曲线有很大的实用价值,其步骤为:

选取表 5-3 中的最小 γ 值为约束条件进行电容器背景谐波抗扰度评估,即当 $\gamma \leq 19.5$ 时,上述谐波次数任意两两组合,不管是否发生谐振,对电容器危害不大。

同样的分析,当主要谐波为 5、7、11 次时, $\gamma \leq 16$;当主要谐波为 5、7、11、13 次时, $\gamma \leq 14$ 。可见,作用的谐波次数越多,要求各次谐波对应的等效谐波阻抗越小,否则电容器的安全运行将受到威胁。

- 1) 获取系统的等效谐波阻抗;
- 2) 获取背景谐波中起主导作用的谐波频谱及其含有率;
- 3) 获取待接入的电容器参数;
- 4) 绘制 γ_n - a_n 曲线;
- 5) 应用 γ_n - a_n 曲线分析对应背景谐波水平频谱、水平下电容器的运行点是否在容限曲线的安全区域。

举例分析如下：某系统电路图如图 5-1 所示，已知电容器接入点母线为 138kV 系统，补偿电容容量为 27Mvar。图 5-4 多次谐波其主导作用时， γ_n - a_n 曲线示意取基准功率为 100MVA，系统谐波阻抗实测值见表 5-4。

表 5-4 系统谐波阻抗实测值

谐波次数	1	5	7	11	13
系统阻抗	$0.038+j0.086$	$0.137+j0.224$	$0.061+j0.451$	$0.093+j0.653$	$0.110+j0.280$

通过实测背景谐波测试发现，主要频谱为 $6k\pm1$ ，其中各次谐波电压含有率中最大值为 1.5%。分析电容补偿装置接入后是否存在潜在危险。

按照上述步骤，计算出各次谐波的等效谐波阻抗 γ_n 见表 5-5。

表 5-5 等效谐波阻抗 γ_n

谐波次数	1	5	7	11	13
考虑电容后的谐波危害系数	1	6.7676	36.5078	10.9737	32.8574

上述谐波（5、7、11、13 次）不同组合下 γ_n - a_n 容限曲线如图 5-5 所示。

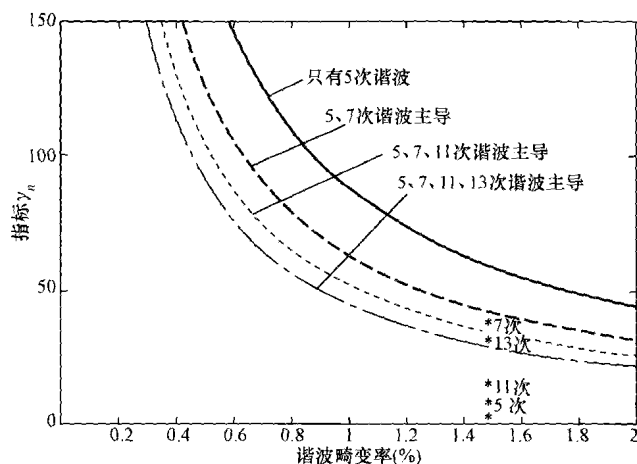


图 5-5 γ_n - a_n 分析结果示意

考虑背景谐波含有率最大 1.5%，通过分析图 5-5 γ_n-a_n 曲线可见：

- 1) 任何一个单次谐波起主导作用都不会造成对电容器的危害；
- 2) 任何两次谐波起主导作用不会造成对电容器的危害；
- 3) 7 次、13 次与其他一次谐波的组合起主导作用将危及电容器的安全运行。

第三节 电能质量控制的实时响应特性

量化危害确定后，技术、经济双重约束下的控制方案成为问题的主要方面。在所有的控制方案中，响应特性是方案成败的最关键因素之一。

基于电力电子器件控制的电能质量控制器的特点在于此类设备能够根据被控制参数的变化动态调整控制器的运行，从而改善电能质量。应该说，实现这样一种原理的跟随控制并不难，而主电路的响应速度才是控制效果、性能是否良好的关键。下面以 SVC 改善闪变为例加以分析。

SVC 能够依据所监测的信号及其控制目标快速地改变其总回路对外无功电流的大小及极性，目的在于控制给定母线的电压或平衡某特定节点的无功功率。一般来说，工业场合应用的 SVC 均安装在距负荷中心较近的地方，其主要作用在于抑制电压波动、限制闪变水平、提高三相平衡度。

响应特性是表征 SVC 系统性能的最重要指标之一，直接关系到 SVC 系统实现其目标的最终效果。实际工程中 SVC 响应特性一般有两种表述方法，一种是其系统响应时间；另一种是控制系统的响应时间。

SVC 系统响应时间可以用图 5-6 进行说明^[2]。从控制信号（阶跃信号）输入开始，当系统电压达到其预期调整水平的 90% 时所经历的时间规定为 SVC 的系统响应时间。

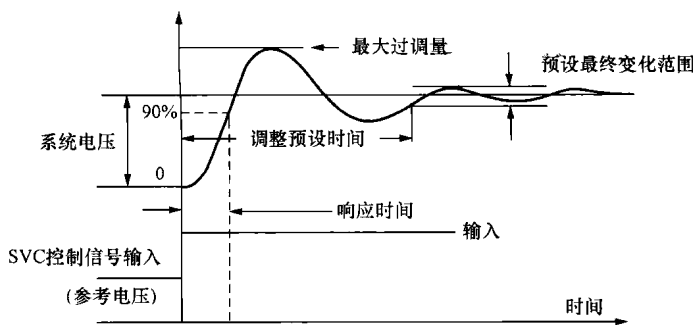


图 5-6 SVC 系统响应特性示意图

SVC 控制系统的响应时间一般表述为：从控制信号输入开始，SVC 控制器完成控制信号的采样、分析、计算，直至控制器发出触发信号所经历的时间。控制系统响应时间不等同于 SVC 系统响应时间。

一、SVC 的响应特性分析

1. 单一频率的正弦特征无功波动^[3]

设非线性负荷无功波动具有正弦波特征，波动频率为单一的 ω_m ，则无功波动表示为

$$\Delta Q_t = \Delta Q_s \sin \omega_m t \quad (5-22)$$

若 SVC 的响应跟随负荷无功功率的波动特征，仅滞后 θ （单位为 rad）

$$\Delta Q_{\text{rt}} = C \times \Delta Q \times \sin(\omega_m t - \theta)$$

(5 - 23)

其中式 (5 - 22)、式 (5 - 23) 中 ΔQ 为无功波动幅度, C 为容量补偿度, $0 \leq C \leq 1$, 则补偿后剩余的无功波动为

$$Q_s = \Delta Q_t - \Delta Q_{\text{rt}}$$

(5 - 24)

定义波动改善比为

$$F = \left| \frac{\Delta Q_t}{Q_s} \right|$$

(5 - 25)

则补偿后的波动改善比为

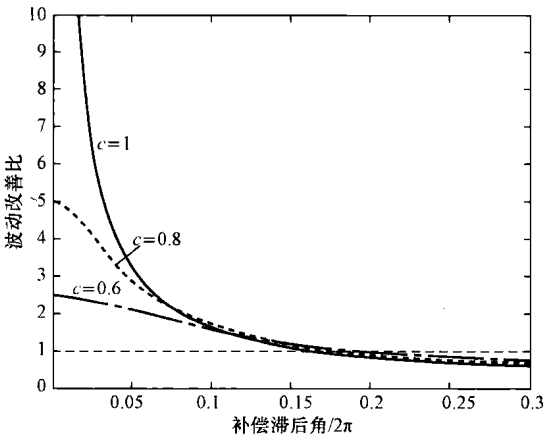
$$F = \frac{1}{\sqrt{1 + C^2 - 2C\cos\theta}}$$

(5 - 26)

补偿后波动改善比与补偿滞后角的关系如图 5 - 7 所示。

分析图 5 - 7 可以看出, 具有正弦波动特征的单一波动频率下, 波动改善的效果仅与 SVC 的滞后响应时间及其容量补偿度有关。值得一提的是, 不管容量补偿度为多少, 当滞后角 $\theta \geq \pi/3$ 时, SVC 的运行实际上对波动的改善几乎没有效果, 甚至产生相反的效果。

根据闪变的概念, 在上述单一波动频率的假设下, 波动改善比实际上等同于闪变改善比, 因此上述分析结论适用于闪变的分析。



将上述滞后角转化为滞后响应时间, 图 5 - 7 补偿后波动改善比与补偿滞后角的关系进一步研究其响应时间与波动频率关系。分析时假设 $c=1$, 要求闪变改善比等于 2, 其响应时间与波动频率关系见表 5 - 6, 对应曲线如图 5 - 8 所示。

表 5 - 6 $c=1$ 闪变改善比等于 2 时响应滞后时间的最大值

ω_m (rad/s)	f_m (Hz)	F	θ	响应时间 (s)
12.5664	2	2	$\pi/6$	41.6667
50.2655	8	2	$\pi/6$	10.4167
55.2920	8.8	2	$\pi/6$	9.4697
62.8319	10	2	$\pi/6$	8.3333
94.2478	15	2	$\pi/6$	5.5556
219.9115	35	2	$\pi/6$	2.3810

分析图 5 - 8 可见, 对于不同频率的无功波动, 当对其波动 (闪变) 改善比提出具体要求时, SVC 所应具有的最大响应时间是各不相同的。对于典型的对闪变贡献较大的 5~15Hz 波动, 要想闪变改善 50%, 响应时间不得大于 20ms。

如果固定波动频率恒定,则响应时间与闪变改善比的关系如图 5-9 所示,分析此图可见,当响应时间大于 15ms 时,SVC 对于 10Hz 的波动没有改善效果。

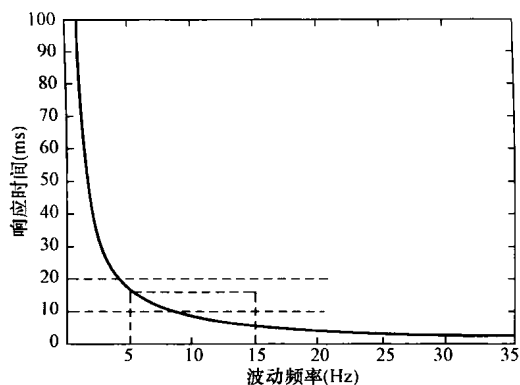


图 5-8 响应时间与波动频率

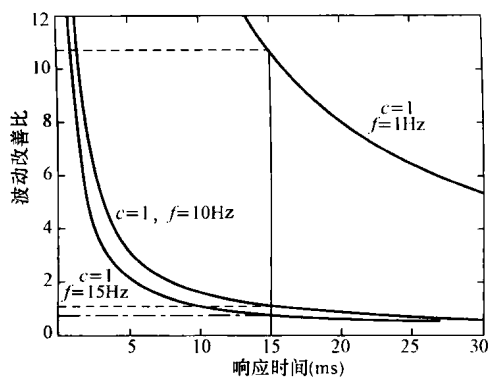


图 5-9 响应时间与闪变改善比

2. 多频率的正弦特征无功波动分析

实际生活中,经常发生这样的现象,有时应用在负荷侧的 SVC 较好地改善了电压波动现象,但对闪变的改善却效果不大,这是为什么呢?

对非线性负荷无功波动进行频谱分析,一般包含多个波动频率分量(为了分析方便,假设初相角均为 0),即

$$\Delta Q_t = \sum_{m=1}^M \Delta Q_m \sin \omega_m t \quad (5-27)$$

仍然假设 SVC 的响应与负荷无功功率的波动特征一致,仅滞后 θ_m 角度,即

$$\Delta Q_{rt} = \sum_{m=1}^M C_m \Delta Q_m \sin(\omega_m t - \theta_m) \quad (C_m \text{ 为容量补偿度}, 0 \leq C_m \leq 1) \quad (5-28)$$

设对应于 ω_k 的波动幅度 ΔQ_k 最大,其他频率的波动幅度是其幅度的 α_m ($0 \leq \alpha_m \leq 1$),则

$$\Delta Q_t = \Delta Q_k \sum_{m=1}^M \alpha_m \sin \omega_m t \quad (5-29)$$

$$\Delta Q_{rt} = \Delta Q_k \sum_{m=1}^M C_m \alpha_m \sin(\omega_m t - \theta_m) \quad (5-30)$$

总波动幅度为

$$|\Delta Q_t| = \Delta Q_k \sqrt{\sum_{m=1}^M \alpha_m^2} \quad (5-31)$$

波动改善比为

$$F = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^M \alpha_m^2}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \alpha_m^2 (1 + C_m^2 - 2C_m \cos \theta_m)}} \quad (5-32)$$

下面以含有 3 种波动频率 i 、 j 、 k 为例分析响应时间与波动改善比的关系,分析中假设 $C_i = C_j = C_k = C$,同时假设 $\theta_i = \theta_j = \theta_k = \theta$,详细参数见表 5-7,对应的响应时间与波动改善比的关系如图 5-10 所示。

表 5-7 多波动频率参数

序号	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>
波动频率	$f_i=10\text{Hz}$	$f_j=15\text{Hz}$	$f_k=1\text{Hz}$
波动幅度	$\alpha_i=0.2$	$\alpha_j=0.4$	$\alpha_k=1$

分析图 5-10 可见：对于 15ms 的响应时间，当 $C=1$ 时总波动降低了一半；对比图 5-9 可见，在多波动频率下，SVC 对波动的改善是综合对各次波动频率分量作用的共同结果。进一步分析，其共同作用的效果满足式 (5-33)。

$$F_{\Sigma} = \frac{\sqrt{\sum \alpha_m^2}}{\sqrt{\sum \left(\frac{\alpha_m}{F_m}\right)^2}} \quad (5-33)$$

对式 (5-33) 稍加分析可以看出：在多波动频率下，波动改善比并不等同于闪变改善比，只有当各频度的波动对闪变的作用相同时二者才相等，但根据视感度加权系数的试验结果可知，这是不可能的。此时的闪变改善比为

$$F_{\Sigma f} = \frac{\sqrt{\sum (\alpha_m f_m)^n}}{\sqrt{\sum \left(\frac{\alpha_m f_m}{F_m}\right)^n}} \quad (5-34)$$

式中： f_m 为对应频度的视感度加权系数， n 遵循多闪变源合成的取值原则。

可见，对于特定响应特性的 SVC，只有其所改善的主要电压波动的频度对闪变有较大贡献时，SVC 对闪变的效果才能显示出来；否则，即使改善了这一频度的波动水平，却对闪变的改善没有效果。因此，SVC 对闪变的改善是有条件的。

值得一提的是，上述分析方法同样适用于 APF、STATCOM 等的响应特性分析。

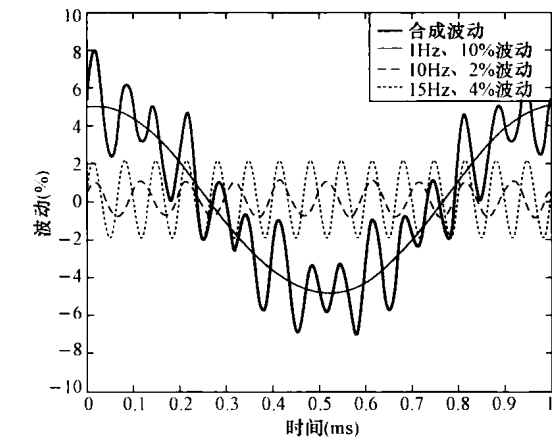


图 5-11 多波动频率的闪变分析

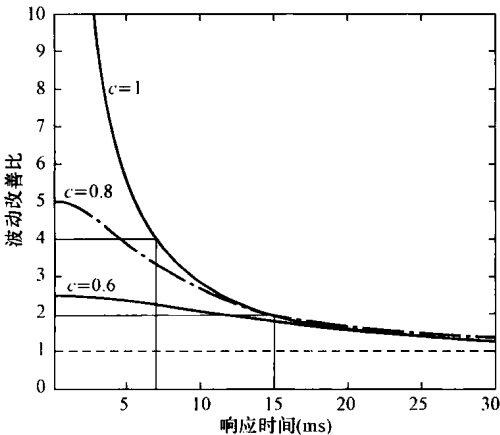


图 5-10 多波动频率下波动改善比与响应时间的关系

注：含三种频率，以 $f=1\text{Hz}$ 为主，同时含有 20% 10Hz 波动及 40% 15Hz 波动（以 1Hz 为基准）。

二、基于 IEC 61000-4-15 闪变测量方法的验证^[4]

仍以表 5-7 为例进行分析。设 1Hz 波动为 10%，同时近似认为无功波动等于电压波动，则没有 SVC 补偿之前的电压波动曲线如图 5-11 所示。

分析图 5-11 可见，未补偿前总波动最大幅度为 16%，波动起决定作用的主要频度特征为 1Hz。根据 IEC 61000-4-15 及 GB/T 12326—2008《电能质量 电压波动和闪变》中闪变测量的基本方法，各波动频率及其合成产生的电压闪变见表 5-8。

分析表 5-8 闪变的合成规律，其遵守了下述公式：

$$P_{st} = \sqrt[m]{\sum P_{st,n}^m}$$

式中： $m=2$ 。

表 5-8 合成闪变及各自频度产生的闪变

波动频率	$f_i=10\text{Hz}$	$f_j=15\text{Hz}$	$f_k=1\text{Hz}$	合成闪变 P_{st}
波动幅度	$\alpha_i=0.2$	$\alpha_j=0.4$	$\alpha_k=1$	
闪变	5.5	6.57	5.1	

如果用 100%补偿度、响应时间为 15ms 的 SVC 进行补偿，则，补偿后电压波动如图 5-12 所示。可见，补偿后 1Hz 电压波动几乎完全补偿，但 10Hz 波动几乎没有变化，15Hz 波动甚至更加恶化。此时总体波动水平明显下降（最大波动幅度为 8%，波动主要频度为 15Hz）。

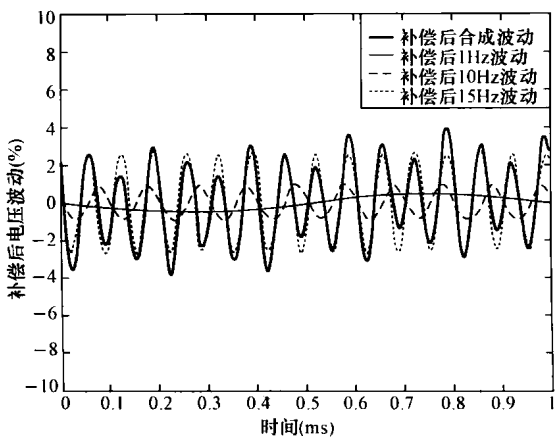


图 5-12 补偿后电压波动变化

SVC 补偿后闪变变化见表 5-9。可见，补偿虽然大幅度改善了电压波动水平，但是此时对闪变几乎没有作用。

表 5-9 SVC 补偿后闪变的变化

$f_i=10\text{Hz}$	$f_j=15\text{Hz}$	$f_k=1\text{Hz}$	合成闪变 P_{st}
$\alpha_i=0.2$	$\alpha_j=0.4$	$\alpha_k=1$	
5.05	8.54	0.48	

参 考 文 献

[1] Zhenyu Huang, Member, IEEE, Wilsun Xu, Senior Member, IEEE, V. R. Dinavahi, Member, IEEE, "A Practical Harmonic Resonance Guideline for Shunt Capacitor Applications"

[2] IEEE Guide for the Functional Specification of Transmission Static Var Compensators, IEEE Std 1031.

[3] T. J. E. 米勒. 电力系统无功功率控制. 胡国根, 译. 北京: 水利电力出版社, 1990.

[4] IEC 61000-4-15-2003 electromagnetic compatibility (EMC) — part 4: Testing and measurement techniques-section 15: flickermeter-functional and design specifications.

非线性负荷接入电网的危害性 评估及对策

本章以电气化铁道负荷接入系统实际工程为例，分析在实际工作中如何对一个非线性负荷的接入进行评估。

一般来说，非线性负荷电能质量分析评估包含下述几部分基本内容：①背景及相关原始资料信息；②干扰源用电特性分析；③危害分析；④依据相关标准进行量化评估；⑤解决问题的对策。

第一节 背景及原始资料

一、背景

根据铁道部的决定，拟建设××电气化铁路，该工程已于2007年5月1日正式开建，计划2011年建成投运。××电气化铁路线路全长335km，全线牵引变电站共9座，其中A、B、C、D四座牵引站接入某电网。根据设计，2020年用电量将达到6.52亿kWh。

众所周知，电气化铁道机车负荷属于典型的电能质量污染源，其运行过程中将产生较大的谐波、负序、电压波动闪变等电能质量污染，危及电网的安全稳定运行。为此，需要对××电气化铁路建成后对某电网的影响进行综合分析评估，并提出对策。

二、电气化牵引变接入系统供电方式

目前，接入某电网的牵引变拟采用110kV供电，牵引变压器采用Vv接线方式。每座牵引变由两路独立的电源供电。其供电方案有以下几种。

1. A、B牵引站供电方案

A、B牵引站供电方案采用110kV电压等级供电。具体方案为：从4号220kV变电站引双回110kV线路至A牵引站，该线路T接双回110kV出线至B牵引站。具体接线示意图如图6-1所示。

2. C、D牵引站供电方案

C、D牵引站供电方案同样采用110kV电压等级供电。具体方案为：从3号220kV变电站引双回110kV线路至C牵引站，该线路T接双回110kV出线至D牵引站。具体接线示意图如图6-2所示。

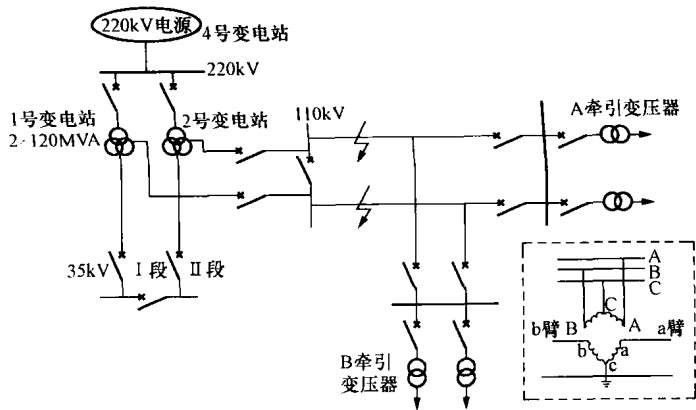


图 6-1 A、B 牵引站供电方案示意图

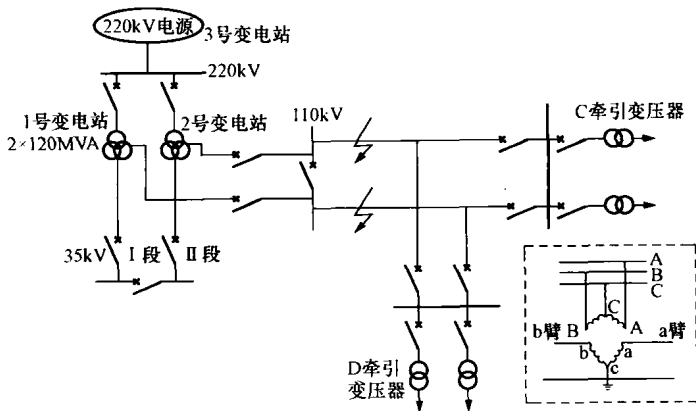


图 6-2 C、D 牵引站供电方案示意图

三、牵引变电站相关电气参数

- 1. 牵引网供电方式
采用带回流线的直接供电方式（AT）。
- 2. 牵引变电站分布
新建的 A、B、C、D 4 座牵引变电站分别位于 A、B、C、D 车站附近。
- 3. 牵引变电站进线电压等级
A、B、C、D 牵引变电站采用 110kV 电压供电。
- 4. 牵引变电站主变压器类型、容量及馈线数
牵引变压器采用三相 Vv 接线变压器，各牵引变电站主变压器容量见表 6-1。

表 6-1 牵引变电站主变压器容量及馈线数

变电站名称	A	B	C	D
主变压器容量 (MVA)	2 × (31.5 + 25)	2 × (20 + 20)	2 × (20 + 16)	2 × (16 + 31.5)
并补容量 (kvar)	3600 + 2400	2800 + 2400	2800 + 2000	1600 + 3600

表 6-3 220kV 3 号变电站电气参数

220kV 短路阻抗	大方式 (p. u. 标么值)		0.485 14
	小方式 (p. u. 标么值)		1.934 06
110kV 短路阻抗	大方式 (p. u. 标么值)		0.991 74
	小方式 (p. u. 标么值)		2.766 83
主变压器 (120MVA)	短路阻抗	高中 (%)	10.55
		高低 (%)	33.43
		中低 (%)	20.73
	空载损耗 (kW)		42.99
35kV 电容器补偿	电容器容量 (Mvar)	2×15	
	串抗单相容量 (kvar)	300	

表 6-4 220kV 4 号变电站电气参数

220kV 短路阻抗	大方式 (p. u. 标么值)		0.429
	小方式 (p. u. 标么值)		1.4518
110kV 短路阻抗	大方式 (p. u. 标么值)		1.071 42
	小方式 (p. u. 标么值)		4.230 24
主变压器 (120MVA)	短路阻抗	高中 (%)	10.64
		高低 (%)	33.6
		中低 (%)	21.42
	空载损耗 (kW)		39.8
35kV 电容器补偿	电容器容量 (Mvar)	2×12	
	串抗单相容量 (kvar)	240	
35kV 电抗器补偿 (kvar)	5000		

第二节 电气化铁路负荷的电能质量危害定性分析

电气化铁道负荷的典型用电特征表现为：

- (1) 具有典型的整流负荷特征。产生谐波污染，其频谱特征为 $2k \pm 1$ (k 为正整数)。
 - (2) 具有典型的冲击负荷特征。因而产生电压波动、闪变等电能质量污染。
 - (3) 三相用电不对称。因而向电网注入负序电流，引起三相平衡度恶化。
- 目前，传统机车用电特性中，谐波、三相不平衡度属于最主要的两个危害。

一、对电力系统运行的安全危害描述

稳态电能质量指标与系统运行的关系主要表现在其指标下降可能导致事故，以及事故的发展可能造成更大的系统安全稳定问题。

谐波对于电网安全性、稳定性、可靠性的影响主要表现在引起电网谐波谐振、造成正常的电网供电中断、事故范围扩大、电网解列等；对设备的危害主要从发热、振动噪声（负序效应）、绝缘（峰值）、过零点问题等方面危及电机、变压器、开关、保护、自

动装置的安全稳定运行,主要表现在:

- 1) 造成电力电容器的过负荷和损坏,甚至群爆;
- 2) 引起旋转电机和电力变压器的发热(增加损耗)并造成容量降低;
- 3) 导致电力电缆的容量降低;
- 4) 导致长距离输电线路单相重合闸失败(延缓了电弧的熄灭时间);
- 5) 影响了开关的开断容量;
- 6) 影响到避雷器的安全运行;
- 7) 导致电压互感器的损坏;
- 8) 引起自动装置、继电保护误动作;
- 9) 影响电子仪表和通信系统的正常工作。

波动闪变的危害主要表现在对用户自身及其他周边用户的正常生产、生活。另外,闪变对系统及其设备的危害还具有间谐波的主要特征。

三相不平衡度对系统安全稳定运行的威胁首先在于对发电机、电动机的威胁,其次在于引起含负序启动元件或类似元件的保护误动、拒动。

二、对电力系统经济运行的影响描述

在保障电力系统安全稳定运行的前提下,电力系统运行的首要控制目标在于保证电能质量指标,在此基础上力求运行的经济性。网损最小属于经典的经济运行控制指标。实践经验及理论分析证明:电能质量指标恶化对网损有着较大的影响。

1. 电压偏差、频率偏差与系统经济运行

在给定的网络结构及负荷配置、负荷特征情况下,系统运行损耗主要由系统电压、频率变化特性决定。系统稳态运行情况下,传统负荷的数学模型一般采用其静态特性模型描述,式(6-1)为这种模型的一种表示^[1],式中 a_P 、 b_P 、 c_P 、 a_Q 、 b_Q 、 c_Q 对不同节点取值不同,代表了节点总负荷中恒定阻抗负荷、恒定电流负荷、恒定功率负荷的比例; k_P 、 k_Q 对不同节点取值也不同,代表了节点功率在稳态运行点对频率变化的响应。

$$\left. \begin{aligned} P_L &= (a_P U_L^2 + b_P U_L + c_P)(1 + k_P \Delta f) \\ Q_L &= (a_Q U_L^2 + b_Q U_L + c_Q)(1 + k_Q \Delta f) \end{aligned} \right\} \quad (6-1)$$

可见,随着电压、频率的变化,负荷吸收的有功、无功也随之变化;反过来,这种变化又影响到系统电压、频率的变化。当然,电压、频率的变化同样影响到网损的变化。

另外,基于电力电子技术控制的恒功率负荷在低电压情况下将会造成较大的网络损耗,随着这类负荷比重的迅速增加,不仅是低电压下损耗问题,此时的电压稳定问题也应得到足够重视。

2. 三相不平衡度与系统经济运行

对于平衡电源及平衡网络结构的供电系统,若三相负荷不平衡,则电网中三相电流也是不平衡的。在给定功率的情况下,分析平衡负荷与不平衡负荷对网损的影响?

设平衡电源及平衡网络结构的供电系统中,三相负荷对称平衡,其相电流有效值为 I ,系统等值正序阻抗为: $Z_1 = R_1 + jX_1$,负序阻抗为: $Z_2 = R_2 + jX_2 = R_1 + jX_1$,零序阻抗为: $Z_0 = R_0 + jX_0 = k_R R_1 + jk_X X_1$,此时网损为: $3I^2 R_1$ 。对同样的基波负荷,在三相分配中若不平衡,设: $I_A = k_A I$, $I_B = k_B I$, $I_C = k_C I$,并且: $k_A + k_B + k_C = 3$,则依据对称分量法,三个序电流分量为

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C) = \frac{1}{3}I(k_A + k_B + k_C) = I \quad (6-2)$$

$$I_2 = \frac{1}{6}(2k_A - k_B - k_C)I + j\frac{\sqrt{3}}{6}(k_B - k_C)I \quad (6-3)$$

$$I_0 = \frac{1}{6}(2k_A - k_B - k_C)I - j\frac{\sqrt{3}}{6}(k_B - k_C)I \quad (6-4)$$

可见, 只有 $k_A = k_B = k_C$ 时, 才有 $I_2 = I_0 = 0$, 网损才与平衡负荷相等, 否则对于不平衡负荷, 此时不仅有相同的正序损耗 $3I^2R_1$, 还将增加由负序、零序电流在各自序网络产生的损耗。

3. 谐波与系统经济运行

不管谐波是由用户流入系统, 还是系统流入用户, 只要有谐波流动, 就必然会在系统谐波阻抗上产生网络损耗。在 10kV 供电系统中, 在用户谐波电流注入水平及供电公共连接点谐波电压总畸变率均满足 GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》的条件下, 谐波损耗占用户基波用电量的 0.29%,^[2]在谐波超标情况下此比例将更高。

除谐波流动造成的网损之外, 根据谐波源功率流向与其所吸收的基波反方向的观点, 电力系统供电给谐波源用户, 将少计量一部分功率。

4. 电压波动闪变与系统经济运行

电压波动实际上是一种连续的电压冲击现象。由于电网中电感电容的存在, 使得 Ldi/dt 、 $1/C \cdot du/dt$ 随之波动变化, 因而与正常平稳负荷 (有效值定义) 相比, 附加网损增加。据通用电气公司的《Technical Data》(互联网资料), 一条 120V 的电路中, 电流为 15A, 波动发生的频率为 40 000 次/h, 持续的时间为 100 μ s, 在这样一个简单的电路中, 研究人员发现, 波动导致了 8.05% 的线路电耗增加。

第三节 电气化机车运行产生的谐波污染定量分析

先解释原始资料表 6-2 中相关参数的基本含义, 这对于本项目的分析至关重要。

1) 馈电臂平均电流: 全天 24h 负荷电流的平均值。

2) 馈电臂有效电流: 全天 24h 负荷电流的方均根值。

3) 馈电臂短时最大电流: 即 95% 概率大值电流, 也就是考虑节假日等不利组合的追踪间隔情况下, 馈电臂电流的 95% 概率大值。

一、谐波电流的合成

(1) GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》给出的谐波合成原则。根据 GB/T 14549—1993, 谐波合成的原则如下:

1) 当知道谐波相位角时, 合成原则为

$$I_h = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h2}^2 + 2I_{h1}I_{h2}\cos\theta_h}$$

式中: I_{h1} 为谐波源 1 的第 h 次谐波电流, A; I_{h2} 为谐波源 2 的第 h 次谐波电流, A; θ_h 为谐波源 1 和谐波源 2 的第 h 次谐波电流之间的相位角。

2) 当相位角不确定时, 合成原则为

$$I_h = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h2}^2 + K_h I_{h1} I_{h2}}$$

式中: K_h 系数按表 6-5 选取。

表 6-5 K_h 系 数

h	3 次	5 次	7 次	11 次	13 次	9 次	>13 次	偶次
K_h	1.62	1.28	0.72	0.18	0.08	0	0	0

(2) 铁道部门常用的谐波电流合成规律。若一个牵引站对应的馈线内同时带电运行的列车数为 m ，根据电铁列车谐波初相角的分布特性，馈线谐波电流含有率与单台机车谐波电流含有率之比是随 m 的增多而减少的，该比值对 3 次谐波为 $1.2/\sqrt{m}$ ，对其他各次谐波为 $1/\sqrt{m}$ 。

二、单机车产生的谐波电流

表 6-6 为典型电气化机车产生谐波电流统计表，表 6-7 为铁道部门常用的 SS 型单台电力机车谐波电流含有率水平。

表 6-6 典型电气化机车产生谐波电流统计表

型号	牵引功率 (kW)	满载时谐波含有率 (%)				
		3 次	5 次	7 次	9 次	11 次
SS1	4200	23	12	7	4	3
SS3	4800					
SS4	6400					
SS7	4800					
8G	6400					

表 6-7 铁道部门常用的 SS 型单台电力机车谐波电流含有率水平

谐波次数 畸变率	谐波电流含有率				
	3 次	5 次	7 次	9 次	11 次
无 PFC 的 HRI_h (%)	23.9	13.9	10.0	3.7	5.2
有 PFC 的 HRI_h (%)	10.0	13.2	9.5	3.7	5.2

三、谐波水平预估

(1) 单台电力机车谐波电流含有率的确定。考虑到牵引变运行中并补装置的损坏(该装置一般对 3 次谐波有一定的滤波效果)，同时考虑到谐波合成过程的众多不确定因数，采取稍严格的评估策略，暂不考虑 PFC 的投入，单台电力机车谐波电流含有率按表 6-7 计算(无 PFC)。

(2) 总负荷水平。总负荷水平按 95% 概率大值上行负荷水平考虑，依据表 6-2，最终评估采纳值见表 6-8。

表 6-8 95% 概率大值负荷水平

牵引站	A		B		C		D	
供电臂	a 臂	b 臂	a 臂	b 臂	a 臂	b 臂	a 臂	b 臂
95% 概率大值负荷水平 (A)	1276.82	1089.54	981.708	983.354	998.123	682.158	798.955	1275.27
可能的机车数量	3	3	2	2	2	2	2	3

(3) 合成后各馈电臂电流。SS7 双机头满载功率为 $2\times 4800\text{kW}$ ，供电臂电流为 400A 左右，以此计算，考虑到表 6-8 中 95% 概率大值负荷水平，各牵引站供电臂可能同时存在的机车数目见表 6-8（取整数）。

依据 GB 14549—1993 谐波合成原则，按相位角不确定合成获得的谐波含有率比例明显高于按铁道部门常用的谐波电流合成规律获取的数值，结合大量实际测试经验，决定谐波的合成。按铁道部门的合成规律，其 95% 概率大值负荷下各馈电臂谐波电流水平见表 6-9。

表 6-9 95% 概率大值负荷水平下各馈电臂谐波电流

牵引站	A		B		C		D	
馈电臂	a 臂	b 臂	a 臂	b 臂	a 臂	b 臂	a 臂	b 臂
95% 概率大值 负荷水平 (A)	1276.82	1089.54	981.708	983.354	998.123	682.158	798.955	1275.27
可能的机车数量	3	3	2	2	2	2	2	3
3 次 (A)	211.4210	180.4104	199.088	199.422	202.417	138.340	162.026	211.1643
5 次 (A)	102.4670	87.4374	96.4900	96.6517	98.1034	67.0478	78.5276	102.3426
7 次 (A)	73.7172	62.9046	69.4176	69.5339	70.5783	48.2361	56.4949	73.6277
9 次 (A)	27.2729	23.2726	25.6884	25.7314	26.1179	17.8500	20.9063	27.2398
11 次 (A)	38.3046	32.6862	36.1023	36.1628	36.7060	25.0864	29.3816	38.2581

(4) 110kV 侧谐波电流水平。考虑到牵引变压器变比为 $K=110/27.5=4$ ，依据式 (2-20)，110kV 侧谐波电流 95% 概率大值水平见表 6-10（分析过程中视馈电臂 a、b 同次谐波相位相同）。

表 6-10 110kV 侧谐波电流 95% 概率大值水平

牵引站	A		B		C		D	
馈电臂	a 臂	b 臂	a 臂	b 臂	a 臂	b 臂	a 臂	b 臂
95% 概率大值 负荷水平 (A)	1276.82	1089.54	981.708	983.354	998.123	682.158	798.955	1275.27
可能的机车数量	3	3	2	2	2	2	2	3
3 次 (A)	A 相	52.8552		49.7721		50.6043		40.5066
	B 相	45.1026		49.8556		34.5851		52.7911
	C 相	7.7527		0.0888		16.0193		12.2845
5 次 (A)	A 相	25.6168		24.1225		24.5258		19.6319
	B 相	21.8593		24.1629		16.7619		25.5857
	C 相	41.1584		41.8164		35.9664		39.2725
7 次 (A)	A 相	18.4293		17.3544		17.6446		14.1237
	B 相	15.7262		17.3835		12.0590		18.4069
	C 相	29.6104		30.0839		25.8752		28.2537

续表

牵引站		A	B	C	D
9 次 (A)	A 相	6. 8182	6. 4221	6. 5295	5. 2266
	B 相	5. 8182	6. 4329	4. 4625	6. 8099
	C 相	1. 0001	0. 0107	2. 0670	1. 5834
11 次 (A)	A 相	9. 5762	9. 0256	9. 1765	7. 3454
	B 相	8. 1715	9. 0407	6. 2716	9. 5645
	C 相	15. 3860	15. 6459	13. 4571	14. 6864

根据 GB/T14549—1993 国家标准，选取表 6 - 10 中三相最大的一相作为该牵引站谐波电流的待评估值，则各牵引站 110kV 系统侧谐波电流 95%概率大值预估水平见表 6 - 11。

表 6 - 11 各牵引站 110kV 系统侧谐波电流 95%概率大值预估水平

牵引站	A		B		C		D	
馈电臂	a 臂	b 臂	a 臂	b 臂	a 臂	b 臂	a 臂	b 臂
95%概率大值 负荷水平 (A)	1276. 82	1089. 54	981. 708	983. 354	998. 123	682. 158	798. 955	1275. 27
可能的机车数量	3	3	2	2	2	2	2	3
3 次 (A)	52. 8552		49. 8556		50. 6043		52. 7911	
5 次 (A)	41. 1584		41. 8164		35. 9664		39. 2725	
7 次 (A)	29. 6104		30. 0839		25. 8752		28. 2537	
9 次 (A)	6. 8182		6. 4329		6. 5295		6. 8099	
11 次 (A)	15. 3860		15. 6459		13. 4571		14. 6864	

由于 A 牵引站、B 牵引站电源均接入 4 号站 110kV 母线，C 牵引站、D 牵引站接入 3 号站 110kV 母线，因此，按照 GB 14549—1993 的谐波合成原则，在不知道相位角的情况下，依据表 6 - 5 合成系数进行合成，故流入 4 号站 110kV 母线、3 号站 110kV 母线的谐波电流水平见表 6 - 12。

表 6 - 12 4 号站 110kV 母线、3 号站 110kV 母线的谐波电流水平

谐波次数	4 号站 (A)	3 号站 (A)
3 次	97. 7147	98. 3639
5 次	75. 1374	68. 1462
7 次	49. 2259	44. 6561
9 次	9. 3739	9. 4345
11 次	22. 9097	20. 7932

四、谐波水平评估依据及其条件

1. 评估依据

GB/T 14549—1993 适用于交流额定频率为 50Hz，标称电压为 110kV 及以下的公用电网。其谐波电压（相电压）限值见表 6 - 13；公共连接点的全部用户向该点注入的谐波电流（方均根值）限值见表 6 - 14。

表 6-13 公用电网谐波电压（相电压）限值

电网标称电压（kV）	电压总谐波畸变率（%）	各次谐波电压含有率（%）	
		奇次	偶次
110	2.0	1.6	0.8

表 6-14 注入公共连接点的谐波电流允许值

标称电压（kV）	基准短路容量（MVA）	谐波次数及谐波电流允许值（A）											
		2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次	11次	12次	13次
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2	2.4	4.3	2.0	3.7
		14次	15次	16次	17次	18次	19次	20次	21次	22次	23次	24次	25次
		1.9	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9

由于 PCC 点的短路容量不同于表 6-14 中的基准短路容量，应按照 GB 14549—1993 附录 B 进行换算，换算公式如下

$$I_h = \frac{S_{k1}}{S_{k2}} I_{hp}$$

(6-5)

式中： S_{k1} 为公共连接点的最小短路容量，MVA； S_{k2} 为基准短路容量，MVA； I_{hp} 为公共连接点第 h 次谐波电流允许值，A； I_h 为短路容量为 S_{k1} 时的第 h 次谐波电流允许值，A。

按 GB 14549—1993 附录 C 的要求，公共连接点处第 i 个用户的第 h 次谐波电流注入允许值按下式进行换算：

$$I_{hi} = I_h (S_i / S_t)^{1/\alpha}$$

(6-6)

式中： I_h 为该公共连接点第 h 次谐波电流允许值，A； S_i 为第 i 个用户的用电协议容量，MVA； S_t 为公共连接点的供电设备容量，MVA； α 为相位叠加系数，按表 6-15 取值。

表 6-15 相位叠加系数

谐波次数	3次	5次	7次	11次	13次	9次	>13次	偶次
α	1.1	1.2	1.4	1.8	1.9	2	2	2

2. 系统运行方式

GB 14549—1993 要求待评估数据必须在谐波发生量最大的情况下、系统运行在正常最小短路容量下进行。因此，在上述获取谐波电流 95% 概率大值的情况下，选取系统运行的最小方式进行评估。此时某电网提供的短路水平见表 6-16。

表 6-16 短路水平

电压等级	运行方式	3号站阻抗（p.u. 标么值）	4号站阻抗（p.u. 标么值）
220kV	大方式	0.485 14	0.429
	小方式	1.934 06	1.4518
110kV	大方式	0.991 74	1.071 42
	小方式	2.766 83	4.230 24

五、4号站谐波分析评估

1. 最小短路容量下95%概率大值谐波电流

(1) 110kV 母线谐振特性分析。由于谐波源在 110kV 公共连接点，谐波源母线的谐振特性非常重要，能够判断是否存在潜在的谐波谐振危险，谐振频谱的位置等。经过计算机仿真分析，4 号站 110kV 母线谐振特性如图 6 - 4 所示。分析此图可见，针对电气化铁道的特征频谱，该站 110kV 母线不产生谐波谐振。

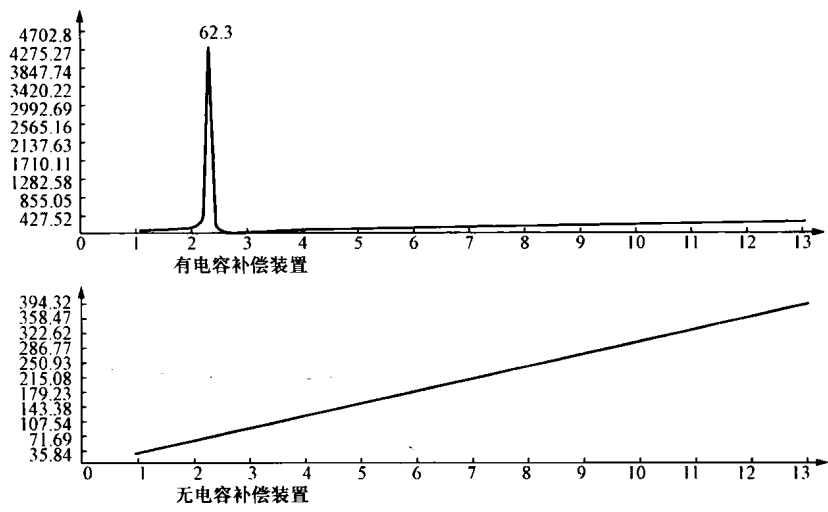


图 6 - 4 最小方式下 110kV 母线谐振特性

(2) 110kV 谐波电流、电压水平。通过谐波潮流分析，该站 35kV 母线电容器运行、未运行情况下 110kV 母线谐波水平见表 6 - 17、表 6 - 18。

表 6 - 17 35kV 母线电容器运行情况下 110kV 母线谐波水平

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电流标准 (A)	谐波电流 (A)
3	1.60	3.43 *	2.90	97.71 *
5	1.60	10.69 *	2.90	75.14 *
7	1.60	10.54 *	2.05	49.23 *
9	1.60	2.64 *	0.97	9.37 *
11	1.60	7.99 *	1.30	22.91 *
总计	2.00	17.55	—	—

* 超标。

表 6 - 18 35kV 母线电容器未运行情况下情况下 110kV 母线谐波水平

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电流标准 (A)	谐波电流 (A)
3	1.60	13.79 *	2.90	97.71 *
5	1.60	17.67 *	2.90	75.14 *
7	1.60	16.21 *	2.05	49.23 *

续表

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电流标准 (A)	谐波电流 (A)
9	1.60	3.97 *	0.97	9.37 *
11	1.60	11.85 *	1.30	22.91 *
总 计	2.00	30.35	—	—

* 超标。

分析表 6-17、表 6-18 可见，最小短路方式下，95%概率大值谐波电流注入电网，4 号站 110kV 母线谐波电流注入水平大大超过国家标准，谐波电压水平也大大超过国家标准。

(3) 35kV 电容器回路谐波。对比表 6-17、表 6-18 可见，由于 35kV 母线电容器的调谐作用，35kV 母线电容器运行情况下 110kV 母线谐波电压畸变水平大大降低，经计算此时 35kV 母线谐波电压以及流入 35kV 电容器支路的谐波电流见表 6-19。

表 6-19 35kV 母线谐波电压以及流入 35kV 电容器支路的谐波电流

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电容支路谐波电流 (A)
3	2.40	4.33 *	115.37
5	2.40	5.46 *	46.65
7	2.40	6.30 *	27.03
9	2.40	1.65	4.91
11	2.40	5.09 *	11.74
总 计	3.00	10.81	

* 超标。

分析表 6-19 可见，此时将有总畸变率 10%左右的谐波电压施加于电容器，同时有较大的谐波电流注入电容器回路，实际运行中应密切关注电容器的过负荷水平。

(4) 220kV 母线谐波水平。经计算，220kV 母线谐波电压以及注入 220kV 系统的谐波电流水平见表 6-20。

表 6-20 220kV 母线谐波电压以及注入 220kV 系统的谐波电流水平

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电流标准 (A)	谐波电流 (A)
3	1.60	2.11 *	3.16	12.15 *
5	1.60	6.57 *	3.16	22.73 *
7	1.60	6.48 *	2.24	16.01 *
9	1.60	1.63 *	1.05	3.12 *
11	1.60	4.91 *	1.42	7.72 *
总 计	2.00	10.79	—	—

* 超标。

分析表 6-17~表 6-20 可见，即使 4 号站新增另外一台主变压器，即两台主变压器运行，假设此时 110kV 母线短路容量增加一倍，按列车平均运行电流考虑（是 95%概率大值电流的 1/6），电气化铁道运行引起的谐波污染仍有一定程度的超标。

2. 最大短路水平下 95% 概率大值谐波电流

采用 95% 概率大值谐波电流，在最小短路水平下进行谐波评估是国家标准要求的评估条件。但是实际上，95% 概率大值谐波电流情况下，电网往往并非运行在最小方式下，若系统运行接近最大方式，此时 110kV 母线谐振特性及其注入 110kV 母线的谐波电流水平又该如何呢？

(1) 110kV 母线谐振特性。图 6-5 所示为系统运行接近最大方式下 110kV 母线的谐波谐振特性，同样也不发生与电气化机车特征频谱相关的谐波谐振现象。

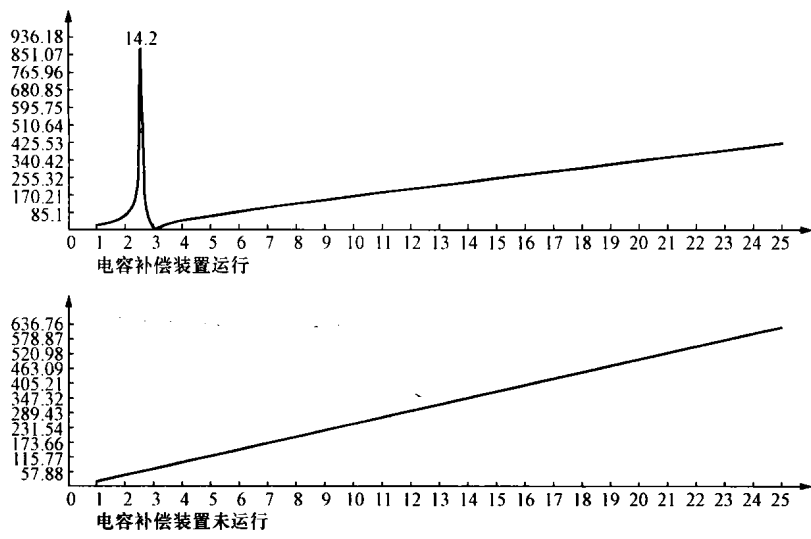


图 6-5 最大方式下 110kV 母线谐振特性

(2) 110kV 母线的谐波电压及谐波注入电流。表 6-21 为最大运行方式、35kV 电容器注入 110kV 母线的谐波水平。可见，此时的谐波电压畸变水平、谐波电流注入水平仍超标。但若是以平均电流为目标（即谐波电流水平缩小 6 倍），则 110kV 母线谐波电压、谐波电流水平均处于标准限值附近。

表 6-21 最大运行方式、35kV 电容器注入 110kV 母线谐波水平

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电流标准 (A)	谐波电流 (A)
3	1.60	0.68	11.43	97.71*
5	1.60	5.00*	11.43	75.14*
7	1.60	4.85*	8.09	49.23*
9	1.60	1.21	3.81	9.37*
11	1.60	3.63*	5.12	22.91*
总 计	2.00	7.98	—	—

* 超标。

(3) 流入 35kV 电容器回路的谐波电流。表 6-22 为最大方式下 35kV 电容器回路谐波水平。可见，电容器回路将流入较大的 3 次谐波电流，应密切关注电容器的谐波过负荷问题。

表 6-22 最大方式下 35kV 电容器回路谐波水平

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电容支路谐波电流 (A)
3	2.40	6.52*	173.76
5	2.40	3.38*	28.87
7	2.40	3.63*	15.56
9	2.40	0.93	2.76
11	2.40	2.83*	6.52
总 计	3.00	8.72	—

* 超标。

(4) 220kV 母线的谐波水平。表 6-23 为最大短路方式下 220kV 母线谐波电流水平。可见，此时 3 次谐波电流的很大部分流入 35kV 电容器回路，因此流入 220kV 系统的 3 次谐波电流已经很小，不超标。虽然其他次谐波电压、电流仍超标，但是考虑到若是采取平均电流水平，则 220kV 系统谐波水平将不超标。

表 6-23 最大短路方式下 220kV 母线谐波电流水平

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电流标准 (A)	谐波电流 (A)
3	1.60	0.33	10.69	6.43
5	1.60	2.43*	10.69	28.38*
7	1.60	2.35*	7.58	19.66*
9	1.60	0.59	3.56	3.81*
11	1.60	1.76*	4.79	9.38*
总 计	2.00	3.87	—	—

* 超标。

六、3 号站谐波水平分析

1. 最小短路方式下 95% 概率大值谐波电流

(1) 110kV 母线谐振特性分析。经过计算机仿真，3 号站 110kV 母线谐振特性如图 6-6 所示。可见，针对电气化铁道的频谱特征，该站 110kV 母线不发生特征谐波谐振现象。

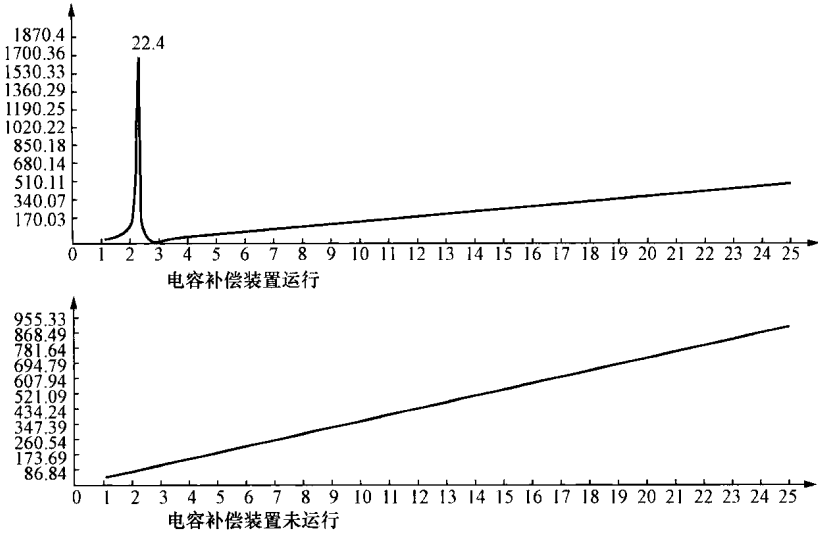


图 6-6 最小方式下 3 号站 110kV 母线谐振特性

(2) 110kV 母线谐波电流电压水平。35kV 母线电容器运行、未运行情况下 3 号站 110kV 母线谐波水平见表 6-24、表 6-25。此时 3 号站 110kV 母线谐波电流注入水平大大超过国家标准，谐波电压也大大超过国家标准。

表 6-24 35kV 母线电容器运行情况下 3 号站 110kV 母线谐波水平

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电流标准 (A)	谐波电流 (A)
3	1.60	4.19 *	4.42	98.36 *
5	1.60	10.28 *	4.42	68.15 *
7	1.60	10.21 *	3.13	44.66 *
9	1.60	2.85 *	1.47	9.43 *
11	1.60	7.77 *	1.98	20.79 *
总 计	2.00	17.20	—	—

* 超标。

表 6-25 35kV 母线电容器未运行情况下 3 号站 110kV 母线谐波水平

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电流标准 (A)	谐波电流 (A)
3	1.60	16.81 *	4.42	98.36 *
5	1.60	19.41 *	4.42	68.15 *
7	1.60	17.81 *	3.13	44.66 *
9	1.60	4.84 *	1.47	9.43 *
11	1.60	13.03 *	1.98	20.79 *
总 计	2.00	34.21	—	—

* 超标。

(3) 35kV 电容器谐波水平。对比表 6-24 和表 6-25 可知，由于 35kV 母线电容器有调谐作用，使得 110kV 母线谐波电压畸变水平大大降低（降低 1 倍）。此时 35kV 母线谐波电压以及流入 35kV 电容器支路的谐波电流见表 6-26。

表 6-26 35kV 母线谐波电压以及流入 35kV 电容器支路的谐波电流

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电容支路谐波电流 (A)
3	2.40	3.48 *	116.07
5	2.40	4.72 *	50.41
7	2.40	5.59 *	29.95
9	2.40	1.64	6.09
11	2.40	4.58 *	13.19
总 计	3.00	9.45	—

* 超标。

可见，此时将有谐波电压总畸变率 9.45%左右的谐波电压施加于电容器之上，同时

有较大的谐波电流注入电容器回路，因此，应密切关注电容器的过负荷问题。

(4) 220kV 母线谐波水平。最小短路容量下 220kV 母线谐波电压以及注入 220kV 系统的谐波电流水平见表 6-27。

表 6-27 220kV 母线谐波电压以及注入 220kV 系统的谐波电流水平

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电流标准 (A)	谐波电流 (A)
3	1.60	2.83 *	2.37	12.25 *
5	1.60	6.95 *	2.37	18.03 *
7	1.60	6.90 *	1.68	12.80 *
9	1.60	1.93 *	0.79	2.78 *
11	1.60	5.26 *	1.06	6.20 *
总 计	2.00	11.63	—	—

* 超标。

分析表 6-24~表 6-27，即使 3 号站新增另外一台主变压器，即两台主变压器运行，假设此时 110kV 母线短路容量增加 1 倍，按列车平均运行电流考虑（是 95% 概率大值电流的 1/6），电气化铁道运行引起的谐波污染仍超过国家标准。

2. 最大短路方式下 95% 概率大值谐波电流

(1) 110kV 母线谐振特性。图 6-7 为最大短路方式下 110kV 母线的谐波谐振特性。可见，此时也不发生与电气化机车特征频谱相关的谐波谐振现象。

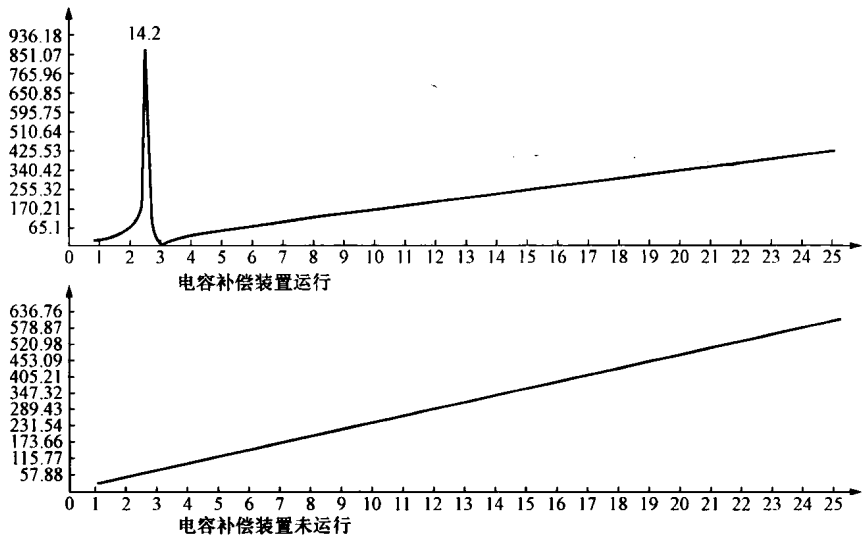


图 6-7 最大方式下 3 号站 110kV 母线谐振特性

(2) 110kV 母线的谐波电压及谐波电流注入水平。表 6-28 为最大短路方式、35kV 电容器运行情况下 110kV 母线谐波电压及注入 110V 母线的谐波电流水平。

可见，此时的谐波电压畸变水平、谐波电流注入水平仍超标；若是以平均电流为目标（即谐波电流水平的 1/6），则 110kV 母线谐波电压、谐波电流水平均处于标准限值附近。

表 6 - 28 最大短路方式下注入 3 号站 110kV 母线的谐波电流水平

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电流标准 (A)	谐波电流 (A)
3	1.60	0.43	12.34	98.36*
5	1.60	4.58*	12.34	68.15*
7	1.60	4.48*	8.74	44.66*
9	1.60	1.24	4.11	9.43*
11	1.60	3.37*	5.53	20.79*
总 计	2.00	7.36	—	—

* 超标。

(3) 35kV 电容器回路的谐波水平。表 6 - 29 为 35kV 电容器回路谐波水平。可见，电容器回路将流入较大的 3 次谐波电流，应密切关注电容器的谐波过负荷问题。

表 6 - 29 最大短路方式下注入 3 号站 35kV 电容器回路的谐波电流水平

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电容支路谐波电流 (A)
3	2.40	4.28*	142.58
5	2.40	2.89*	30.82
7	2.40	3.17*	16.98
9	2.40	0.91	3.37
11	2.40	2.50*	7.19
总 计	3.00	6.61	—

* 超标。

(4) 注入 220kV 母线的谐波电流水平。表 6 - 30 为最大短路方式下 220kV 母线谐波水平。可见，此时 3 次谐波电流的很大一部分流入 35kV 电容器回路，因此流入 220kV 系统的 3 次谐波电流已经很小。虽然其他次谐波电压、电流仍超标，但是考虑到采取平均电流水平，220kV 系统谐波水平不超标。

表 6 - 30 最大短路方式下注入 3 号站 220kV 母线的谐波电流水平

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电流标准 (A)	谐波电流 (A)
3	1.60	0.22	9.46	3.82
5	1.60	2.34*	9.46	24.27*
7	1.60	2.29*	6.70	16.93*
9	1.60	0.63	3.15	3.65*
11	1.60	1.72*	4.24	8.11*
总 计	2.00	3.76	—	—

* 超标。

七、谐波造成的计量损失

电气化铁道是一个不可忽视的谐波污染源，因此，其运行过程中造成的计量损失广受关注，下面结合本章所举例工程进行相关评估分析。

正弦交流电路中，有功功率按下式计量

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u_{(t)} i_{(t)} dt = \frac{1}{T} \int_0^T p_{(t)} dt$$

式中： T 为电压和电流的周期。

有功电量是有功率对时间的积分，即

$$W = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p_{(t)} dt = \int_{t_1}^{t_2} u_{(t)} i_{(t)} dt$$

实际电能表实现上述过程时，采用离散数学算法，即

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^m u_{(k)} i_{(k)}, \quad W = \sum_{k=1}^m u_{(k)} i_{(k)} \Delta t$$

式中： N 为每周期采样点数， Δt 为采样间隔。

对于上述实现过程，在波形畸变情况下进行仿真，基波分量为 $u_1 = \sqrt{2} \times 10 \sin(2\pi \times 50t)$ ， $i_1 = \sqrt{2} \times 8 \sin(2\pi \times 50t - \pi/6)$ ，若包含 3 次谐波，其电压电流为： $u_3 = \sqrt{2} \times 5 \sin(3 \times 2\pi \times 50t - \pi/2)$ ， $i_3 = \sqrt{2} \times 4 \sin(3 \times 2\pi \times 50t - \pi/6)$ 。当总的信号为 $u = u_1 + u_3$ ， $i = i_1 + i_3$ 时，信号波形及其频谱如图 6-8 所示。

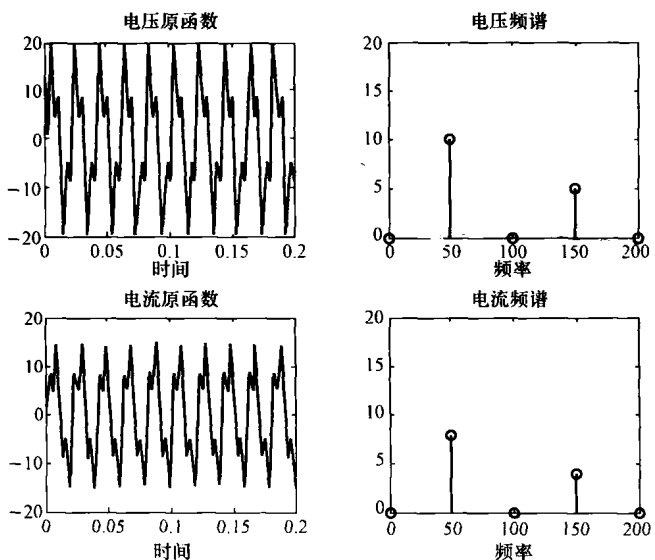


图 6-8 信号为 $u = u_1 + u_3$ ， $i = i_1 + i_3$ 时信号波形及其频谱示意

当总的信号为 $u = u_1 + u_3$ ， $i = i_1 - i_3$ 时，信号波形及其频谱如图 6-9 所示。

上述谐波潮流与基波同相及反相两种情况下，电能表计量数值见表 6-31。

表 6-31 谐波潮流与基波同相及反相情况下电能表计量数值

信号	电能表计量的功率	基波功率	3 次谐波功率
$u = u_1 + u_3, i = i_1 + i_3$	79.2820	69.2820	10.0000
$u = u_1 + u_3, i = i_1 - i_3$	59.2820	69.2820	-10.0000

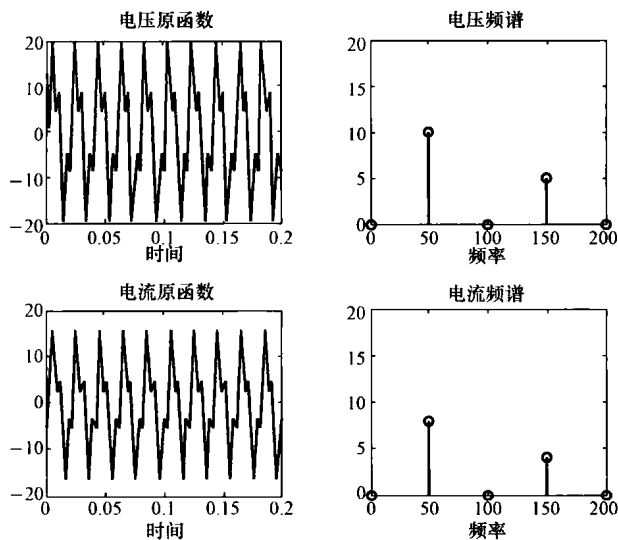


图 6-9 信号为 $u=u_1+u_3$, $i=i_1-i_3$ 时波形及其频谱示意

通过表 6-31 分析可见，虽然两种情况下电压、电流的有效值相同，但是由于谐波流向与基波方向的差异，当对谐波源进行计量时，实际得到的电量小于系统供给负荷的基波电量。

因此，对于电气化铁道这种大型的谐波源负荷，其谐波是注入系统的，与基波的流向相反，用现在的电子式计量装置无法正确计量系统供给负荷的基波功率。

对于该评估项目，即使按最大运行方式下的平均电流计算，以 3 号站为例，其注入 110kV 的谐波电流及其引起的谐波电压见表 6-32。

表 6-32 最大运行方式平均电流情况下注入 3 号站 110kV 的谐波电流及其引起的谐波电压

次 数 (次)	电压标准 (%)	畸变率 (%)	电流标准 (A)	谐波电流 (A)
3	1.60	0.07	12.34	* 16.67
5	1.60	0.77	12.34	11.50
7	1.60	0.72	8.74	7.20
9	1.60	0.20	4.11	1.50
11	1.60	0.57	5.53	3.50
总 计	2.00	1.22	—	—

* 超标。

若有功率计算公式为 $P=\sqrt{3}u_ni_n$ ，则： $P_3=\sqrt{3}\times110\times0.07/100\times16.67=2.2232(\text{kW})$ ； $P_5=\sqrt{3}\times110\times0.77/100\times11.50=16.8710(\text{kW})$ ； $P_7=\sqrt{3}\times110\times0.72/100\times7.2=9.8768(\text{kW})$ ； $P_9=\sqrt{3}\times110\times0.2/100\times1.5=0.5716(\text{kW})$ ； $P_{11}=\sqrt{3}\times110\times0.57/100\times3.5=3.8010(\text{kW})$ 。

因此，总计量误差 $\Delta P=33.3436\text{kW}$ ，则年损失电费至少： $2.9209\times10^5\text{kWh}$ ，考虑到 3 号站几乎相同，因此两座变电站年损失电费至少 600 000kWh。

当然,上述仿真是在谐波发生最轻微的情况下进行的,实际工程应用还需做进一步分析。

八、谐波评估结论

通过谐波评估分析可以得出下述结论:

(1) 95%概率大值谐波电流水平下,根据国家标准评估要求,在系统最小短路方式下,则无论是3号站还是4号站,电气化铁道负荷注入110kV PCC点的谐波电流均大大超过国家标准;110kV母线谐波电压也大大超过国家标准;其结论同样适用220kV母线;因此,应密切关注节假日高峰列车情况下的谐波污染现象(尽管时间较短)。

同样条件下,即使3号站、4号站另外一台新变压器投入运行(正在新建),各站均两台主变压器运行,此时110kV母线最小短路容量最大增加一倍,即使按列车平均运行电流考虑(比95%概率大值电流缩小6倍),电气化铁道运行引起的谐波污染仍超过国家标准。

也就是说,系统最小短路容量下,电气化铁道运行过程中注入110kV公共连接点(PCC)的谐波电流超过国家标准,110kV母线3、5、7、9、11谐波电压含有率及谐波电压总畸变率也超过国家标准,应密切关注其对周围电容器设备、继电保护设备的影响。

(2) 95%概率大值谐波电流水平下,按照电网运行在接近最大运行方式考虑,同样,无论是3号站还是4号站,电气化铁道负荷注入110kV PCC点的谐波电流均大大超过国家标准;110kV母线谐波电压也大大超过国家标准;其结论同样适用220kV母线。

考虑到若是以平均电流为目标(即谐波电流水平的1/6),则此种运行方式下110kV母线谐波电压、谐波电流水平均处于国家标准限值附近,而此时的220kV母线谐波水平已经处于国家标准范围内,特别是3次谐波水平已经很低的情况下。

(3) 35kV电容器,吸收了大量的3次谐波电流;但是,由于电容补偿装置的设计目的在于基波无功补偿,未考虑谐波的滤除作用,因此谐波电流的流入将大大危机电容器的安全稳定运行,极有可能产生过负荷而损坏,运行中应密切关注。

(4) 由于大量谐波电流的注入,考虑到谐波的序效应,应密切关注零序3次谐波、负序5次谐波的序效应危害。

(5) 由于电气化铁道负荷典型的谐波源特性,因此,实际运行过程中要特别关注电能计量误差问题。

第四节 三相不平衡度危害分析

电气化铁路负荷也属于典型的负序污染源。负序分量可能会引起附近的发电机组异常发热和振动,也会造成三相异步电动机运行条件恶化、产生制动转矩、启动困难等。超标的负序分量还可能引起保护误动。

GB 755—2008《旋转电机 定额和性能》规定了同步电机的不平衡运行条件。标准规定:同步电机承受不平衡负载的能力为:任一相电流均不超过额定电流 I_N 时, I_2/I_N 值以及在故障时 $(I_2/I_N)^2 t$ 的允许值(t 为时间,s)不得超过规定数值。对电动机 I_2/I_N 值最大不超过0.1,对发电机最大不超过0.08; $(I_2/I_N)^2 t$ 值最大不超过20。

国际电工委员会(IEC)关于旋转电机标准(IEC PUB 34—1)中同步电机的不平衡

运行条件规定和 GB/T15543—2008《电能质量 三相电压不平衡》的完全相同，对交流电动机，在运行条件中规定：电压不平衡度 $\epsilon_U \leq 1\%$ 时可以长期运行，在几分钟短时间内 $\epsilon_U \leq 1.5\%$ 。

电气化铁路对电力系统的负序干扰的程度取决于负序容量占系统容量的比例。负序容量不但与牵引负荷水平相关，还与牵引变电站的主接线密切相关。

GB/T 15543—2008 规定，电力系统公共连接点电压不平衡度限值为：电网正常运行时，负序电压不平衡度不超过 2%，短时不得超过 4%；标准要求得评估条件为在电力系统正常运行的最小方式（或较小方式）下、不平衡负荷最大的生产（运行）周期中所引起的电压不平衡度的实测值；接于公共连接点的每个用户引起该点负序电压不平衡度允许值一般为 1.3%，短时不超过 2.6%。设公共连接点的正序阻抗与负序阻抗相等，则负序电压不平衡度为

$$\epsilon_{u2} = \frac{\sqrt{3}I_2U_L}{1000S_K} \times 100\%$$

(6 - 7)

式中 I_2 ——负序电流值，A；
 S_K ——公共连接点的三相短路容量，MVA；
 U_L ——线电压，kV。

一、工况分析

根据 Vv 变压器接线负序产生的特点，当两臂负荷均衡时负序电流最小，为正序的 50%，随着供电臂负荷的不均衡，负序含量逐步增大，当一臂有负荷，另一臂空载时，负序与正序相等，含量达到最大。因此考虑分析下述 5 种运行工况：①牵引变两供电臂均带平均电流；②牵引变一供电臂带平均电流，另一供电臂接近空载；③牵引变两供电臂均带短时最大电流；④牵引变一供电臂带短时最大电流，另一供电臂接近空载；⑤牵引变一供电臂带短时大电流，另一供电臂带平均电流。

上述运行工况①、②会经常出现，运行工况③、④、⑤属于 95% 概率大值出现几率。

二、三相不平衡度定量分析

应用第二章式（2-15）、式（2-16），工况①~⑤各牵引站负序电流、注入 110kV 母线负序电流、各种运行方式下 110kV 三相不平衡度水平见表 6-33。

表 6-33 三相不平衡度分析列表

牵引站			A		B		C		D	
供电臂			a 臂	b 臂	a 臂	b 臂	a 臂	b 臂	a 臂	b 臂
95%概率大值负荷水平（A）			1276.82	1089.54	981.708	983.354	998.123	682.158	798.955	1275.27
供电臂平均电流			220.71	147.68	123.96	109.66	110.91	91.052	106.79	200.92
工 况 ①	各牵引站	I_1	53.1725		33.7201		29.1507		44.4141	
	负序电流（A）	I_2	28.1098		16.9546		14.7852		25.1316	
	注入 110kV 站	I_1	86.8926				73.5648			
	负序电流（A）	I_2	45.0644				39.9168			
	三相不平衡 度（%）	大方式	0.96				0.79			
		小方式	3.8				2.2			

续表

牵引站			A	B	C	D
工 况 ②*	各牵引站 负序电流 (A)	I_1	31.8567	17.8921	16.0085	29.0003
		I_2	31.8567	17.8921	16.0085	29.0003
	注入 110kV 站 负序电流 (A)	I_1	49.7488		45.0088	
		I_2	49.7488		45.0088	
	三相不平衡 度 (%)	大方式	1.06		0.89	
		小方式	4.19		2.48	
工 况 ③	各牵引站 负序电流 (A)	I_1	341.5546	283.6323	242.5277	299.3886
		I_2	172.3744	141.8163	127.5336	161.1003
	注入 110kV 站 负序电流 (A)	I_1	625.1869		541.9163	
		I_2	314.1907		288.6339	
	三相不平衡 度 (%)	大方式	6.71		5.7	
		小方式	26.46		15.91	
工 况 ④*	各牵引站 负序电流 (A)	I_1	184.2931	141.9349	144.0666	184.0694
		I_2	184.2931	141.9349	144.0666	184.0694
	注入 110kV 站 负序电流 (A)	I_1	326.2280		328.1360	
		I_2	326.2280		328.1360	
	三相不平衡 度 (%)	大方式	6.96		6.48	
		小方式	27.48		18.09	
工 况 ⑤*	各牵引站 负序电流 (A)	I_1	205.6089	159.8272	157.2089	199.4832
		I_2	174.6137	133.8885	137.9658	176.8669
	注入 110kV 站 负序电流 (A)	I_1	365.4361		356.6921	
		I_2	308.5022		314.8327	
	三相不平衡 度 (%)	大方式	6.58		6.22	
		小方式	25.98		17.36	

* 取较大电流臂。

** 取不利组合。

分析表 6-33 可见,运行工况①、②小方式条件下,三相不平衡度均超标;运行工况③、④、⑤无论在系统大方式还是小方式下,其三相不平衡度指标均超标。运行中应密切关注负序的危害,必要条件下采取相关抑制措施,如加装 SVC 装置。

第五节 电能质量问题的主要对策

一、电能质量检测

依据上述分析可见,电气化铁道负荷运行过程中将产生较严重的谐波、负序污染。实际上,还将产生电压波动闪变、电压暂降等其他电能质量事件。考虑到铁路调配的复杂性、机车组合运行的不确定性、机车载重的不可预知性,为了确保电网的安全稳定运行,需要建立实时在线的电能质量在线监测系统,以获取电气化机车运行的实时数据,

并进行分析。

根据此工程实际情况，初期可先监测电力系统与电气化铁道供电连接点（PCC点）的电质量指标。其监测点设置如图6-10所示。

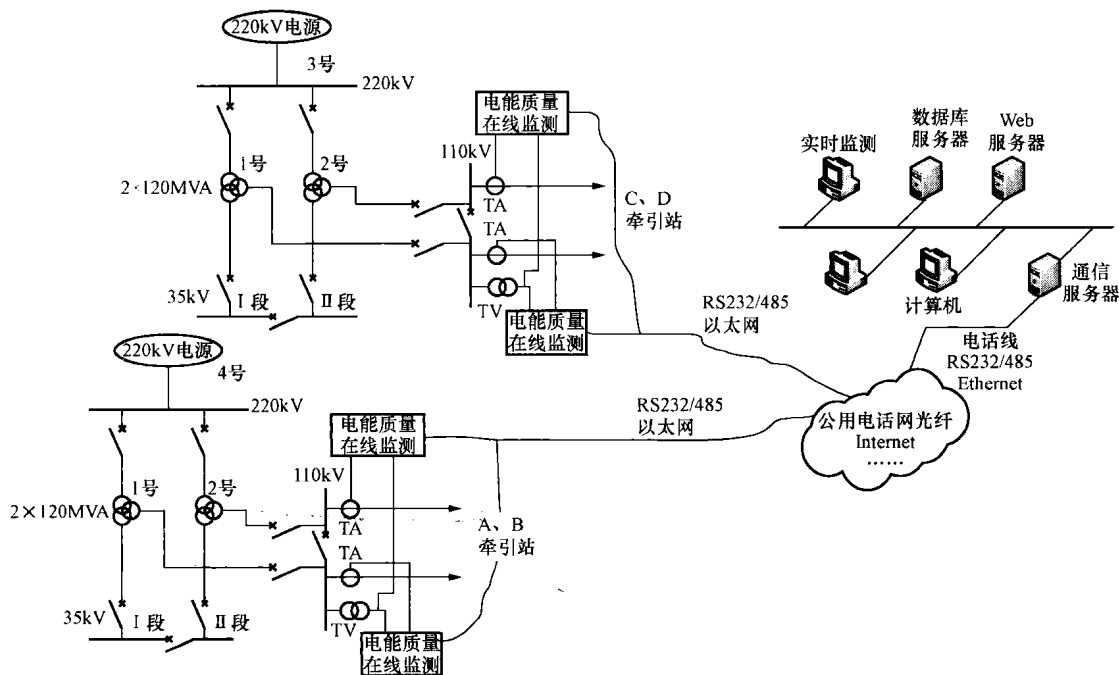


图 6-10 监测点设置示意图

二、谐波污染的控制措施

从工作原理上看，滤波装置分为以下两种：一种为有源滤波器，即利用电力电子技术，滤波装置本身为一谐波源，其大小与负荷产生的谐波相等，但方向相反，正好抵消了用户产生的谐波，从而达到了治理的目的。另一种为无源滤波器，它是利用电容电感谐振的原理达到吸收谐波的目的，从而限制进入公用电网的谐波，使得公用电网的谐波电压畸变水平维持在较低的水平。

1. 有源滤波技术

实际上，有源滤波是一个动态的补偿过程（原理图如图6-11、图6-12所示），其基本理论支持为瞬时无功功率理论，其实用技术支持为脉宽调制技术（PWM）的发展，真正的实用推广在于现代电力电子技术的发展特别是可关断晶闸管（GTO）、电力晶闸管

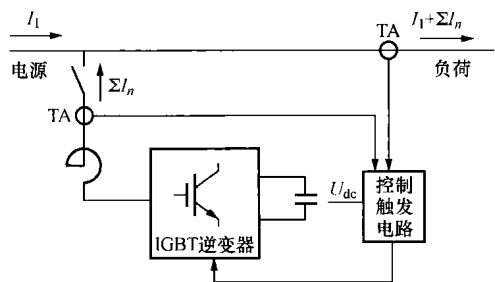


图 6-11 有源滤波器工作原理图

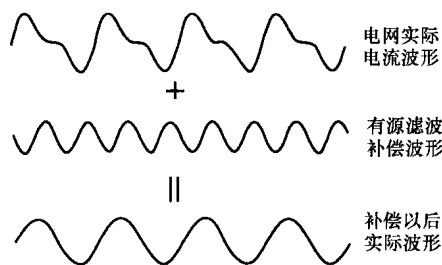


图 6-12 有源滤波器抑制谐波的原理解释

(GTR)、绝缘栅双极晶闸管(IGBT)和静电感应晶闸管(SIT)等新型快速电力电子器件的应用。目前,有源滤波装置主要应用在 380V 电压等级。补偿谐波电流由几十到几百安培。值得一提的是,有源滤波与无源滤波的结合将会是未来发展的方向。

决定有源滤波器应用、性能的主要因素为

- 1) 可关断电力电子器件的发展;
- 2) 瞬时无功理论的进一步完善与发展、矢量控制算法的进一步完善与发展、自适应算法的进一步完善与发展;
- 3) 控制系统中性能优良的滤波器设计。

2. 无源滤波器

由于无源滤波装置在技术上的成熟性与经济上的优越性,从而得到了广泛的使用。可以说,在谐波综合治理方面,无源滤波装置在世界各国仍然占主要位置。

从原理上来说,无源滤波装置分为单调谐、双调谐和高通三种类型,下面分别做一介绍。

(1) 单调谐滤波器。单调谐滤波器属于交流滤波装置的最基本组成单元。它是由 R 、 L 、 C 串联组成,仅对某一次谐波进行吸收,对其他次谐波呈现高阻抗特性。

图 6-13 所示为单调谐滤波器的原理示意图,设某负荷产生 n 次谐波电流为 I_n , $R_n + jX_n$ 为从负荷端看进去的 n 次谐波系统等值阻抗。

设单调谐滤波器的阻抗为

$$Z_n = R_n + j\left(n\omega L - \frac{1}{n\omega C}\right)$$

式中: n 为谐波次数, ω 为基波角频率。

则当 L 、 C 参数的选择满足 $n\omega L = 1/n\omega C$ 时,支路阻抗达到最小值(图 6-14 为其阻抗频率曲线),即 $Z_{\min} = R_n$ 。根据电流分配定律,此时单调谐滤波器阻抗与系统阻抗并联分配谐波电流 I_n ,将有很大一部分谐波电流被单调谐滤波器吸收,从而限制了进入公共电力系统的谐波电流,达到了滤除谐波的目的。

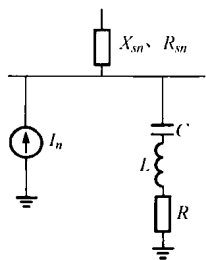


图6-13 单调谐滤波器原理示意图

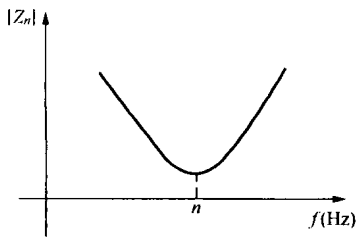


图 6-14 单调谐滤波器阻抗频率曲线

(2) 双调谐滤波器。双调谐滤波器在阻抗频域范围内有两个谐振点,对某两个谐波次数同时呈现出较低的阻抗,对其他次数的谐波呈现出高阻抗。该类型滤波器广泛应用于直流输电得滤波器工程。

(3) 高通滤波装置。常用的高通滤波装置接线如图 6-15 所示。由图可见,由于电阻 R_b 的旁路作用,在一个很宽的频带具有低阻抗性,因而具有吸收某一频带内的谐波的作用。

3. 该项目的抑制措施分析

具体到该项目,前述分析可知,其主要谐波 3、5、7 次均比较严重,实际运行时对

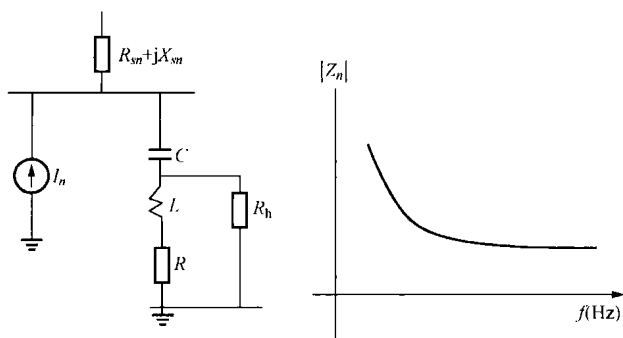


图 6-15 单调谐带高通滤波装置接线图

35kV 电容补偿装置构成了较大的威胁,很可能造成电容器频繁损坏的现象。针对此情况,可考虑下述谐波抑制对策。

(1) 牵引变内部设置滤波装置。根据《关于印发国家电网公司电气化铁路供电工作管理规定(试行)》(国家电网发展〔2009〕1088号)的通知,“对于电气化铁路产生的电力系统电能质量污染,应由铁路部门进行治理”的基本精神,铁路部门应在牵引变 27.5kV 侧设置 3、5、7 次滤波支路,使得电气化铁路负荷运行过程中产生的谐波污染不超过国家标准。

(2) 对 3 号站、4 号站 35kV 并补装置实行改造。电气化铁路运行后,3 号站、4 号站将出现较严重的背景谐波,为了确保 35kV 并补装置安全可靠运行,需要对其实行改造或更换。其原因在于该并补装置在以前设计时并没有电气化铁道存在,因此未考虑严重的背景谐波。

见于上述分析,有必要针对电气化铁道的实际运行情况,结合电能质量在线监测的数据分析,考虑背景谐波情况下重新对 35kV 并补装置进行设计。

三、三相不平衡度的控制措施

通过本项目分析可见,电气化铁道负荷将产生严重的负序电流,引起 PCC 点三相不平衡度超标,需要采取措施予以解决。

实际上,电气化铁道负荷还将引起电压波动和闪变,其影响程度需要借助电能质量在线监测系统进行分析,当超标时,也需要采取措施进行治理。

目前,不管是负序问题(三相不平衡度问题)还是电压波动闪变问题,其抑制的主要措施还是 SVC 装置,同时 STATCOM 也在试运行过程中。

(一) SVC 组成及其工作原理

SVC 即静止无功补偿装置,它是一种并联连接的静止无功发生器或吸收器,通过对其感性或容性电流的调整来维持或控制其与电网连接点的某种参数(典型情况为控制母线电压)。静止无功补偿装置包括晶闸管控制电抗器(Thyristor Controlled Reactor, TCR)、晶闸管投切电容器(Thyristor Switched Capacitor, TSC)、晶闸管控制变压器(Thyristor Controlled Transformer, TCT)、晶闸管投切电抗器(Thyristor Switched Reactor, TSR)等,一般与机械投切无功补偿装置构成静止无功补偿系统。

一般情况下,一套完整的静止无功补偿系统由 TCR、TSC、机械投切的无功补偿装置(电容器组、电抗器)、耦合变压器(又叫连接变压器,视具体情况可不需要)、冷却

系统、控制系统等环节组成。如图 6-16 所示。

这些设备一般接在 35kV 及以下系统母线，当被控母线电压高于 35kV 时，一般需要降压耦合变压器。当有谐波指标要求时，固定电容器补偿设计为滤波器，除提供基波无功功率之外，还起到滤除谐波的作用；TCR 提供可变的感性无功，TSC 提供可变的容性无功；通过相关电压、电流量的采集，控制器根据控制目标发出晶闸管触发与关断的正确信号。实际运行中的 TCR 电抗器一般连接为三角形，除为了保护电抗器的安全运行之外，还有抑制 3 次谐波的作用，如图 6-17 所示。下面简单介绍各主要组成部分。

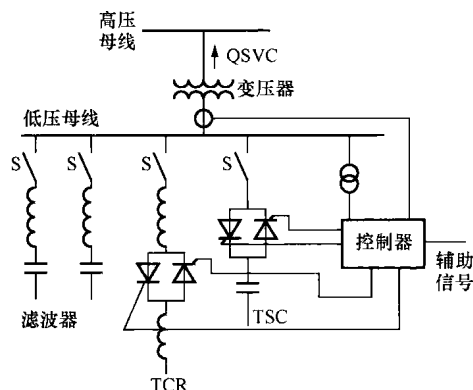


图 6-16 SVS 组成示意图

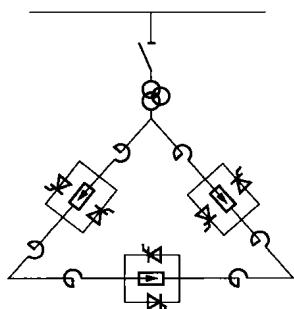


图 6-17 TCR 接线示意图

(1) 晶闸管阀。对于常用的 TCR、TSC 装置，阀是最重要的组件之一。一般 TCR/TSC 阀体的基本组成示意图如图 6-18 所示，阀组主要由晶闸管元件、阻尼电阻、阻尼电容、散热器、晶闸管电子板等组成。

- 1) 该阀为 TCR 型阀体的一相示意图，图中未画出晶闸管的触发电路。
- 2) L_1 、 L_{1a} 为两台主电抗器，分别接在阀体两侧。将电抗器分为两部分的原因在于：

①一台电抗器损坏短路时，另一台可以限制短路电流；②保护晶闸管在某种电气故障时不至于损坏。

3) 晶闸管级：阀的最小组合，包括一对反并联的晶闸管及其邻近的触发、保护、均压/阻尼元件。

4) RC 振荡器：每个电压级上并联一个由 R 、 C 组成的振荡电路。其目的在于晶闸管开关关断时限制在晶闸管开关两端产生的暂态过电压；另外，工频时，该电路可使电压沿各个晶闸管均匀分布。

5) R_{D1} 、 R_{D2} 、 R_{Dn} ：静态均压电阻串。

6) $A1$ 、 $A2$ 、 \dots 、 A_n ：晶闸管状态指示灯。晶闸管损坏后相当于短

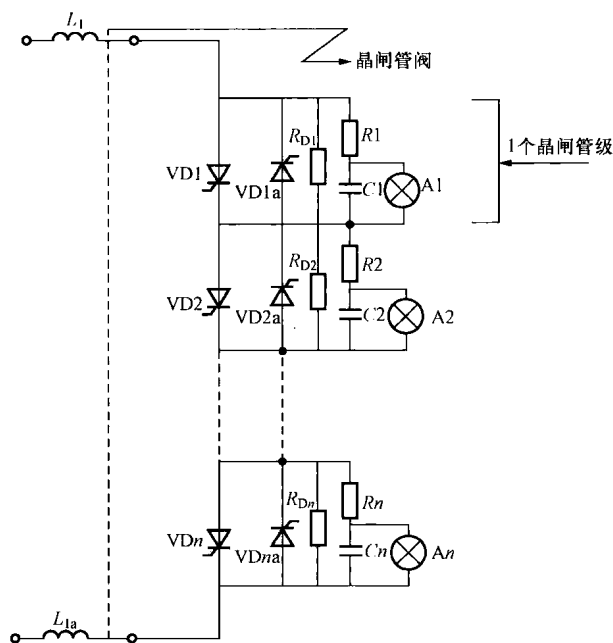


图 6-18 晶闸管阀体的基本组成示意图

路, 这样将增大其余晶闸管承受的电压。因此, 应该对晶闸管的状态进行监视。一般允许 10% 以下的损坏率 (冗余度指标)。正常时状态灯亮, 当晶闸管损坏后, 灯则熄灭。

(2) TCR 主电抗。TCR 主电抗 (相控电抗器), 一般为干式空芯电抗器。

(3) 电容器组 (滤波器组)。TCR 要稳定母线电压, 平衡节点无功功率, 必须有容性无功电源的配合。这一无功源一般为固定电容器组。应用于工业环境的 SVC 为了滤除非线性负荷产生的谐波, 一般将固定电容器组设计为滤波器。

(4) 冷却系统。晶闸管阀元件的结温是影响其安全运行的关键参数, 因而阀体的冷却设备属于 SVC 系统中重要的组成部分。一般冷却系统有水冷、风冷、热管冷却等几种类型, 可根据实际应用场合进行选择。

(5) 控制器。依据 SVC 的不同应用场合, 根据其功能特性要求采用不同的控制策略。目前, 国产 SVC 控制器已经实现了全数字化, 采用 DSP (数字信号处理技术) 及嵌入式计算机, 最大限度地满足实时监测、复杂运算的要求。

1. TCR/TSC 的工作原理

图 6-19 为 TCR/TSC 的等效工作原理图。图中 TCR、TSC 支路所连母线电压为 $u = U_m \sin \omega t$, 波形如图 6-20 (a) 所示, L 为 TCR 主电抗, C 为 TSC 回路电容。

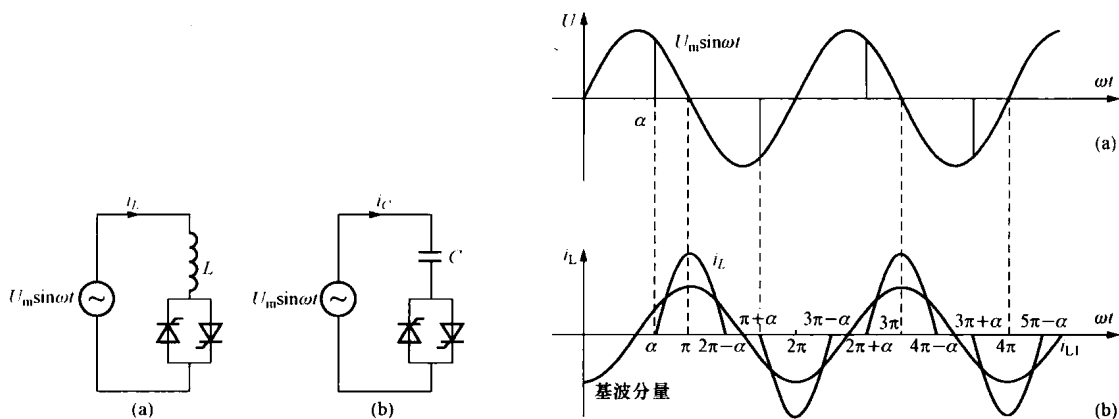


图 6-19 TCR/TSC 等效原理图

(a) TCR; (b) TSC

图 6-20 TCR 波形图

(a) TCR 电压波形; (b) TCR 电流波形

晶闸管的导通需要在满足导通条件的基础上施以触发脉冲。对于 TCR 支路, 设从晶闸管阀可以被导通到实际发出触发脉冲而导通的这段时间所对应的电角度称为触发延迟角 α , 亦即触发角。一般触发角的范围为 $\alpha \in [\pi/2, \pi]$ 。若忽略电抗器的电阻, 在阀导通期间, 电感电流满足以下方程

$$L \frac{di_L}{dt} = U_m \sin \omega t \quad (6-8)$$

式中: L 为电抗器的电感; U_m 为系统电压的幅值。考虑到阀触发时刻电感电流为零等边界条件, 可得电感电流

$$i_L = \frac{U_m}{\omega L} [\cos \alpha - \cos \omega t] \quad (6-9)$$

由式 (6-9) 可见, 当 $\omega t = 2\pi - \alpha$ 时, 电感电流重新回到零。因此, 阀的导通期为 $\omega t \in [\alpha, 2\pi - \alpha]$, 电感电流的波形图如图 6-20 (b) 所示。电感电流波形宽度为 $2(\pi - \alpha) =$

δ , δ 定义为导通角。

可见, $\alpha = \pi/2$ 时, 阀全部导通, 此时相当于没有晶闸管的控制作用, 电抗器可视为直接并联在系统中。当触发角 α 从 $\pi/2$ 逐渐增大时, 阀的导通区间宽度随之减小, 当 $\alpha = \pi$ 时, 阀处在截止状态, 此时相当于将电抗器退出运行。

由式 (6-9) 或图 6-20 (b) 波形图可见, 由于晶闸管阀的控制作用, 电抗器中流过的电流发生畸变而不再是正弦量, 调整触发角 α 的大小即可改变电流的峰值和导通区间的宽度。

将式 (6-9) 所表示电流进行傅里叶分解, 其基波分量的幅值为

$$I_{L1} = \frac{U_m}{\pi\omega L} (\delta - \sin\delta) \quad (6-10)$$

则基波分量瞬时值为

$$i_{L1} = I_{L1} \cos\omega t = \frac{U_m}{\pi\omega L} (\delta - \sin\delta) \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (6-11)$$

这样, TCR 支路的等值基波电抗为

$$X_L(\delta) = \frac{\pi\omega L}{\delta - \sin\delta} \quad \delta \in [0, \pi] \quad (6-12)$$

由式 (6-12) 可见, TCR 支路的等值基波电抗是导通角 δ 或说是触发角 α 的函数。由于触发角 α 在 $\pi/2 \sim \pi$ 之间可以连续调整, 因而 TCR 支路的等值基波电抗即并联在系统母线上的等值电抗可以平滑地而不是离散地调整。

TCR 从系统中吸收的无功功率为

$$Q_L = \frac{\delta - \sin\delta}{\pi\omega L} U^2 \quad (6-13)$$

由于 TCR 仅有吸收系统无功的作用, 因此要达到平滑调节无功的目的, 真正的 SVC 系统一般还包括固定电容器补偿或 TSC 支路。

TSC 支路中阀类似于开关的作用, 其状态为导通或关闭, 没有调节的作用。之所以采用晶闸管代替常规的开关, 一是动作速度快, 二是可频繁动作, 三是便于在精确的时刻投切, 减小电容器投切过程的暂态冲击。

切除投运状态的电容器比较简单, 只要停止对阀进行触发即可。注意, 阀从导通状态到自然关断时刻所对应的阀电流即电容电流为零, 则此时电容电压为峰值, 即为电源电压峰值。因此, 停止对阀进行触发而在阀自然关断之后, 忽略电容器的泄漏电流, 电容电压将保持这个峰值。将电容器投入系统则应注意投入时刻的选择。选择触发时刻的原则是减小电容器投入时刻电容器中的冲击电流。注意到电容器上的电压初值, 显然应在电源电压与电容电压相等的时刻, 根据电压初值的正负触发两阀中对应的阀。这样, 当电容器被投入之后电容电流的暂态分量为零。在电容器投入系统之后, 为使在任何时刻总有一个阀是导通状态, 则需触发角 $\alpha = \pi/2$ 。

电容器在接通期间, 向系统注入的无功功率为

$$Q_C = \omega C U^2 \quad (6-14)$$

式中: C 为电容器的电容。

这样, 由式 (6-13) 和式 (6-14) 两式可得 TCR、TSC 组成的 SVC 补偿系统注入的无功功率为

$$Q_{\text{SVC}} = Q_{\text{C}} - Q_{\text{L}} = \left(\omega C - \frac{\delta - \sin \delta}{\pi \omega L} \right) U^2 \quad (6-15)$$

可见当 $\delta \in [0, \pi]$ 时, SVC 向系统注入的无功功率可以连续平滑地调节。为了扩大 SVC 的调节范围, 根据补偿容量的需要, 一个 SVC 中可以采用多个 TSC 支路。

由式 (6-15) 可以看出, SVC 系统的等值电抗为

$$X_{\text{SVC}} = \frac{\pi \omega L}{\delta - \sin \delta - \pi \omega^2 LC} \quad (6-16)$$

SVC 系统的等值伏安特性由 TCR 和 TSC 组合而成。由式 (6-16) 可见, 在 δ 从零增加到 π 的过程中, X_{SVC} 将从容性最大值连续地变为感性最大值。图 6-21 为一 SVC 系统阻抗变化趋势图, 其中 TCR 容量 20Mvar, 固定电容器补偿 10Mvar。

2. 静止无功补偿装置的补偿原理

如图 6-22 所示, 待补偿母线电压为 U , 负荷为 $P + jQ$, SVC 无功补偿量以 jQ_{r} 表示, $Z_{\text{s}} = R_{\text{s}} + jX_{\text{s}}$ 表示系统阻抗, $P_{\text{s}} + jQ_{\text{s}}$ 为系统提供的功率, S_{d} 代表母线短路容量。

补偿器 SVC 未投入时, 系统负载特性曲线如图 6-23 所示。随着负载吸收无功的增加, 节点电压呈现下降的趋势, 对于高压输电系统, 其 $U-Q_{\text{s}}$ 关系可近似表示为

$$U = E(1 - Q_{\text{s}}/S_{\text{d}}) \quad (6-17)$$

母线电压随无功功率变化率为

$$\mathrm{d}U/\mathrm{d}Q = \mathrm{d}U/\mathrm{d}Q_{\text{s}} = -E/S_{\text{d}} \quad (6-18)$$

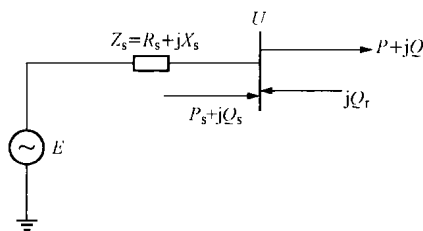


图 6-22 SVC 补偿原理图

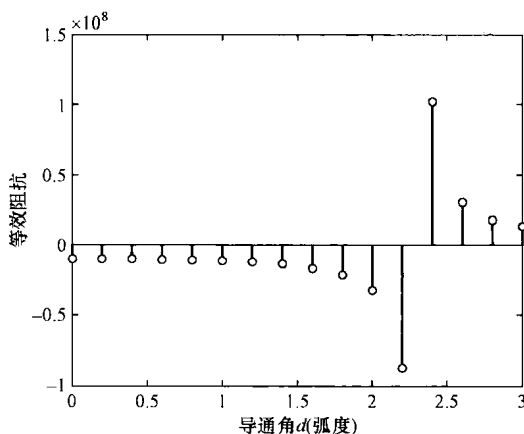


图 6-21 SVC 系统阻抗变化趋势图

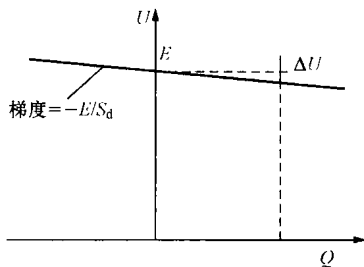


图 6-23 系统负载特性曲线

补偿器投入运行后, 通过 TCR/TSC 工作原理可知, TCR+TSC (可用为固定电容补偿) 型 SVC 系统类似于一台调相机, 其作用可以做到使式 (6-17) 中的 Q_{s} 保持不变或在一定范围内维持在一定的变化水平, 即

$$Q_{\text{s}} = Q + Q_{\text{r}} = \text{常数} \quad (6-19)$$

从而维持母线电压 U 不变或在一个事先设定的范围。

可见, 维持母线电压的作用是通过补偿器 Q_{r} 实现的, 由于负荷的功率在波动, 因而补偿器的补偿容量 Q_{r} 应随之波动, 否则起不到应有的作用。

既然电压 U 的稳定是通过 Q_{r} 实现的, 那么 $U-Q_{\text{r}}$ 亦即 $U-I_{\text{r}}$ 的理想特性应该是满足式

(6-19) 的补偿器特性曲线, 如图 6-24 所示。

分析图 6-24 可知, 在补偿电流 $I_{r\max}$ 决定的 $Q_{r\max}$ 补偿范围内, $dU/dI_r=0$, 也就是说, 补偿器无功功率针对系统电压的变化为 $K_r=dQ_r/dU=\infty$ 。因此上述曲线可表示为

$$U = U_k + I_r/K_r = U_k \quad (6-20)$$

实际上, 图 6-24 即为理想补偿器的 $U-I$ 特性曲线, 它是以恒电压控制为目标的。考虑到实际的补偿器容量的限制以及系统运行稳定性的要求, 实际运行中的补偿器 $U-I$ 特性曲线如图 6-25 所示。图中曲线随着补偿器电流的增加一上翘的特性, 即 $U-I$ 特性曲线的斜率 dU/dQ_r 不为 0, 这一斜率一般介于 $0\% \sim 10\%$ 之间, 典型取值为 $2\% \sim 5\%$ 。以标幺值表示 (基准容量为 $Q_{r\max}$) 的 $U-I$ 特性表征为

$$U = U_k + jX_r I_r \quad (-I_{r\max} < I_r < I_{r\max}) \quad (6-21)$$

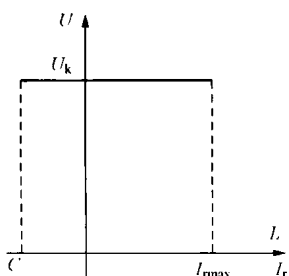


图 6-24 理想的补偿器 $U-I_r$ 曲线

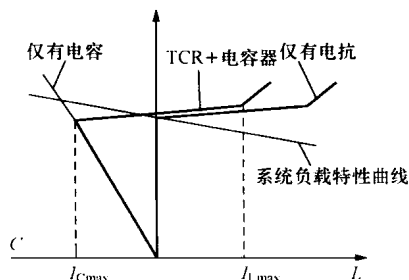


图 6-25 补偿器 $U-I$ 特性曲线

式中: X_r 即为 $U-I$ 特性曲线的斜率, 明显地, 这一斜率具有电抗的特性, 习惯上称为斜率电抗; 当 $I_r=0$ 时的系统电压 U_k 定义为参考电压: 即在 SVC 装置 U/I 特性曲线上, 总无功输出为零 (既不吸收无功, 也不发出无功) 点的电压。

式 (6-21) 表明, 当系统电压在 SVC 的控制范围内变化时, SVC 可以看成电源电压为 U_k 和内电抗为 X_r 的同步调相机。

进一步分析可知, 补偿器运行后, 系统电压对负荷无功功率的变化梯度变为

$$dU/dQ = -(E/S_d)/(1 + K_r \times E/S_d) \quad (6-22)$$

对比式 (6-18) 与式 (6-22) 可知, 补偿器的运行使得电压随负荷无功的变化敏感度下降, 从而达到稳定母线电压的目的。

考虑到 SVC 系统中 TSC 的投切控制, 包含 TSC 的 SVC 系统的 $U-I$ 特性曲线如图 6-26 所示。

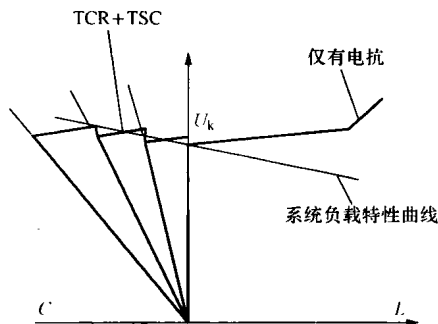


图 6-26 TCR 与 TSC 组成的补偿系统特性曲线

3. 抑制三相不平衡度的原理

(1) 补偿原理简述。SVC 对于抑制电气化铁道系统的三相不平衡度有良好的效果, 国内有成功的应用先例。考虑到某电网较弱, 三相不平衡度可能是一个表现突出的问题, 在此对 SVC 抑制三相不平衡的控制策略做一简析。

分相调节是 TCR 的特点之一, 可以改善系统三相不平衡度水平。其控制理论是由 C. P 斯坦米兹 (C. P. Steinmetz) 提出的, 如图 6-27 所示, 解

释如下:

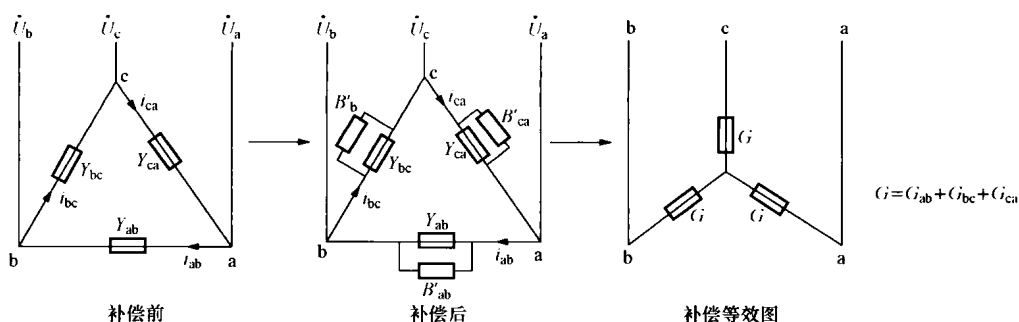


图 6-27 C. P 斯坦米兹 (C. P. Steinmetz) 理论示意图

1) 任何不平衡的、线性的、不接地三相负荷都可经过补偿变成一个三相平衡的有功负荷,并不会改变电源与负荷间的有功交换。

2) 补偿网络可以是纯无功的。

3) 若负荷是变化的,则补偿导纳也应该随之变化。若补偿前网络表示为 $Y_{ab}=G_{ab}+jB_{ab}$, $Y_{bc}=G_{bc}+jB_{bc}$, $Y_{ca}=G_{ca}+jB_{ca}$, 则只要在三相负荷上并联如下电纳,即可做到在等效的 Y 形系统中三相负荷完全平衡,且功率因数为 1: $B'_{ab}=-B_{ab}+(G_{ca}-G_{bc})/\sqrt{3}$; $B'_{bc}=-B_{bc}+(G_{ab}-G_{ca})/\sqrt{3}$; $B'_{ca}=-B_{ca}+(G_{bc}-G_{ab})/\sqrt{3}$ 。

4) 如果不要求做到负荷的完全平衡度补偿,可以只对负荷的无功电流进行平衡,而对有功电流不进行平衡,这样也可大大减小三相不平衡度,而且比较容易实现,此时: $B'_{ab}=-B_{ab}$, $B'_{bc}=-B_{bc}$, $B'_{ca}=-B_{ca}$ 。

5) 补偿器对负荷的变化应该有比较苛刻的响应速度,这直接关系到补偿效果及补偿器的整体性能。

应该注意到,分相控制下 TCR 产生的谐波比正常情况下复杂得多,应认真分析对待。

(2) 实现方法分析。上述理论分析中将负荷以导纳的形式来表示,但是,在实际应用中,负荷的导纳是很难测量的,即使能够测量,也很不精确。所以,必须寻求能够方便准确测量的对象如电压、电流等作为控制的基础,从而以这些电量参数表示导纳,从而对补偿器进行快速准确的控制。

对于平衡的三相系统电压 (Y 形) 供电给三角形接法的负荷,各相对中性点电压为

$$\dot{U}_a = U, \quad \dot{U}_b = h^2 U, \quad \dot{U}_c = h U$$

$$\text{式中: } h = e^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

考虑到负荷为三角形接线表示,因此负荷电压为

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b = (1 - h^2)\dot{U}$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c = (h^2 - h)\dot{U}$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a = (h - 1)\dot{U}$$

考虑到 $I=YU$ 的关系 (I 电流, U 电压, Y 导纳),则负荷电流为

$$\dot{I}_{ab} = Y_{ab} \dot{U}_{ab} = Y_{ab} (1 - h^2) \dot{U}$$

$$\dot{I}_{bc} = Y_{bc} \dot{U}_{bc} = Y_{bc} (h^2 - h) \dot{U}$$

$$\dot{I}_{ca} = Y_{ca} \dot{U}_{ca} = Y_{ca} (h - 1) \dot{U}$$

则电源侧线路电流为

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$$

依据对称分量法, 有

$$\dot{I}_0 = (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) / \sqrt{3}$$

$$\dot{I}_1 = (\dot{I}_a + h\dot{I}_b + h^2\dot{I}_c) / \sqrt{3}$$

$$\dot{I}_2 = (\dot{I}_a + h^2\dot{I}_b + h\dot{I}_c) / \sqrt{3}$$

即

$$\dot{I}_0 = 0$$

$$\dot{I}_1 = \sqrt{3} \dot{U} (Y_{ab} + Y_{bc} + Y_{ca})$$

$$\dot{I}_2 = -\sqrt{3} \dot{U} (h^2 Y_{ab} + Y_{bc} + h Y_{ca})$$

同样, 三角形接法的补偿器引起的电源侧线电流为 (下角 γ 代表补偿器)

$$\dot{I}_{0\gamma} = 0$$

$$\dot{I}_{1\gamma} = j\sqrt{3} \dot{U} (B_{ab\gamma} + B_{bc\gamma} + B_{ca\gamma})$$

$$\dot{I}_{2\gamma} = -j\sqrt{3} \dot{U} (h^2 B_{ab\gamma} + B_{bc\gamma} + h B_{ca\gamma})$$

补偿的目标是补偿器补偿后使得负荷与补偿器的总体效应成为对称的三相负荷, 即:

1) 总的负序电流为 0

$$\dot{I}_{loadn} + \dot{I}_{corn} = 0$$

式中: \dot{I}_{loadn} 为负荷负序; \dot{I}_{corn} 为补偿器负序。

2) 功率因数为 1, 正序电流的虚部为 0

$$\text{Im}(\dot{I}_{loadp} + \dot{I}_{comp}) = 0$$

式中: \dot{I}_{loadp} 为负荷正序; \dot{I}_{comp} 为补偿器正序。

当然如果不要总的功率因数为 1, 例如为 $\cos\varphi$, 则可用下面的公式作为约束

$$\tan[\arccos(\cos\varphi)] = \frac{\text{Im}(\dot{I}_{loadp} + \dot{I}_{comp})}{\text{Re}(\dot{I}_{loadp} + \dot{I}_{comp})}$$

根据以上分析可以求出以负荷电流正序、负序表示的补偿器导纳表示式, 考虑到对称分量法的反变换, 最后得到以负荷电流表示的补偿器的电纳信号为

$$B_{ab\gamma} = -\frac{1}{3U} (\text{Im}\dot{I}_a + \text{Im}h\dot{I}_b + \text{Im}h^2\dot{I}_c) \quad (6-23)$$

$$B_{bcy} = -\frac{1}{3U}(\text{Im}h\dot{I}_b + \text{Im}h^2\dot{I}_c - \text{Im}\dot{I}_a) \quad (6-24)$$

$$B_{cay} = -\frac{1}{3U}(\text{Im}h^2\dot{I}_c + \text{Im}\dot{I}_a - \text{Im}h\dot{I}_b) \quad (6-25)$$

式(6-23)~式(6-25)便是以负荷电流表示的补偿导纳。实际应用中,补偿电纳的计算采取负荷电流、电压的瞬时值计算,有两种方式——采样法和平均法。

1) 采样法:即用瞬时电流、电压求所需的补偿电纳。

设 A 相电压为 $u_a = \sqrt{2}\cos\omega t$, 电流为

$$i_a = \sqrt{2}I\cos(\omega t + \varphi) = \sqrt{2}(I\cos\varphi\cos\omega t - I\sin\varphi\sin\omega t) = \sqrt{2}[\text{Re}(I)\cos\omega t - \text{Im}(I)\sin\omega t]$$

在电流表达式中,当 $\cos\omega t = 0$, $\sin\omega t = -1$ 时, $i_a = \sqrt{2}\text{Im}(I)$, 此时,电流的虚部将可以用瞬时值表示,便于采样测量。当然,满足 $\cos\omega t = 0$, $\sin\omega t = -1$ 的时刻也就是 $u_a = 0$, $\frac{du_a}{dt} > 0$ 的时刻。因此,实际监测时,可以以 $u_a = 0$, $\frac{du_a}{dt} > 0$ 为条件采样瞬时电流,该瞬时电流满足: $i_a = \sqrt{2}\text{Im}(I)$, 如图 6-28 所示。

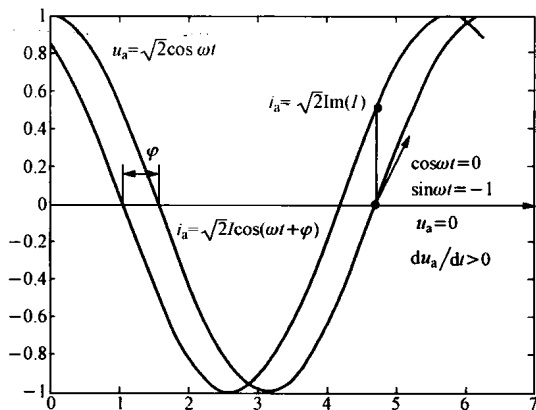


图 6-28 瞬时电流测量的 $\text{Im}(I)$ 表示方法示意

这样,以电流瞬时采样值表示的补偿电纳表示为

$$B_{aby} = -\frac{1}{3\sqrt{2}U}[i_a(u_a = 0, du_a/dt > 0) + i_b(u_b = 0, du_b/dt > 0) - i_c(u_c = 0, du_c/dt > 0)]$$

$$B_{bcy} = -\frac{1}{3\sqrt{2}U}[i_b(u_b = 0, du_b/dt > 0) + i_c(u_c = 0, du_c/dt > 0) - i_a(u_a = 0, du_a/dt > 0)]$$

$$B_{cay} = -\frac{1}{3\sqrt{2}U}[i_c(u_c = 0, du_c/dt > 0) + i_a(u_a = 0, du_a/dt > 0) - i_b(u_b = 0, du_b/dt > 0)]$$

2) 平均法:平均法即用有功或无功功率的平均值表示所需要的补偿电纳。

利用: $\text{Im}(\dot{U}\dot{I}^*) = \frac{1}{T} \int_T [u(-\pi/2) \times i] dt$, 式右端为无功功率, $u(-\pi/2)$ 为电

压 u 在基波下移相 $-\pi/2$; 同时考虑到: $\dot{U}_{ab} = -j\sqrt{3}\dot{U}_c$, $\dot{U}_{bc} = -j\sqrt{3}\dot{U}_a$, $\dot{U}_{ca} = -j\sqrt{3}\dot{U}_b$ 。亦即: $u_a(-\pi/2) = u_{bc}/\sqrt{3}$, $u_b(-\pi/2) = u_{ca}/\sqrt{3}$, $u_c(-\pi/2) = u_{ab}/\sqrt{3}$, 则,所需电纳表示为

$$B_{aby} = \frac{1}{3\sqrt{3}U^2} \times \frac{1}{T} \int (u_{bc}i_a + u_{ca}i_b - u_{ab}i_c)$$

$$B_{bcy} = \frac{1}{3\sqrt{3}U^2} \times \frac{1}{T} \int (u_{ab}i_c + u_{ca}i_b - u_{bc}i_a)$$

$$B_{aby} = \frac{1}{3\sqrt{3}U^2} \times \frac{1}{T} \int (u_{ab}i_c + u_{bc}i_a - u_{ca}i_b)$$

4. SVC 补偿的简单总结

(1) 静止无功补偿装置可以做到分相调节。

(2) 分相调节可以不要求功率因数为 1, 可以进行有限的三相平衡, 即不使三相做到完全平衡为控制目标对补偿器进行控制。

(3) 可以单独进行负荷无功的平衡, 也可单独进行负荷有功的平衡, 应根据具体的实际要求确定。

(4) 在实际应用过程中应该确定补偿器是以电压调整为目的, 功率因数补偿为目的, 或三相不平衡度补偿为目的, 或者三种目的兼有, 这直接关系到补偿器控制系统的要求以及补偿容量的确定。

(5) 实际工程确定目标时要根据实际情况出发, 一概追求全面的补偿是不经济的, 从技术上也太苛刻。

(6) 分相调节控制器控制过程的实现可以用瞬时电压、电流采样法完成, 也可以采用电压电流在一段时间内积分的方式完成。

(7) 响应速度应根据补偿对象(电网、负荷)来实际确定, 一般而言, 电网的变化相对较慢, 而负荷的变化相对较快。

(8) 应该考虑不平衡运行情况的补偿器的其他特殊情况(如非特征谐波等)。

(二) STATCOM 的组成及其工作原理

与晶闸管控制的电抗器(TCR)与晶闸管投切的电容器(TSC)相比, STATCOM 是一种电压源逆变器, 一般均应用可关断电力电子器件(GTO、IGBT、IGCT), 依据无功总是由电压高的地方流向电压低的地方的原理来控制逆变器的电压幅值, 以达到向电网输出或吸收无功功率的目的。与阻抗改变型 SVC 相比, STATCOM 接入电网不改变电网的阻抗特性, 与 SVC 相比其无功调节范围更大, 响应速度更快。

当然, 与 SVC 相比, STATCOM 实际应用的历史要短得多, 还需要积累更多的经验。

1. STATCOM 的基本结构

图 6-29 为 STATCOM 的系统结构原理图, 主要由高压开关站、阀厅、控制室等组成。功能上主要由连接变压器、断路器、电压源逆变器、储能设备、控制器、冷却系统等组成。可见, 与 SVC 相比, 除没有大量的电容器、相控电抗器之外, 其基本组成相同。当然, 由于组成电压源逆变器的电力电子器件不同于晶闸管, 因而这儿的阀厅与晶闸管阀相比体积要小得多。图 6-30 为某 500kV 变电站 ±50Mvar 的 STATCOM 装置。

2. STATCOM 的补偿原理

STATCOM 的工作原理如图 6-31 所示。图中 E_d 表示储能电容器的直流电压(可直接从电网获取), U_i 为逆变器输出电压, U_s 为电网电压, 逆变器通过变压器与电网连接,

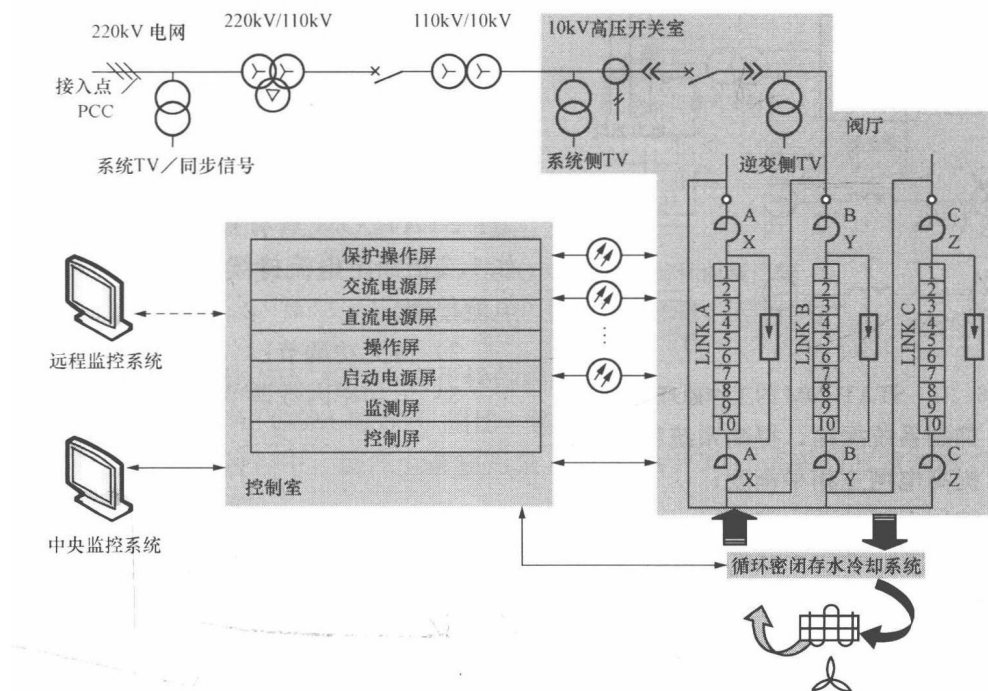


图 6-29 STATCOM 的系统结构原理图

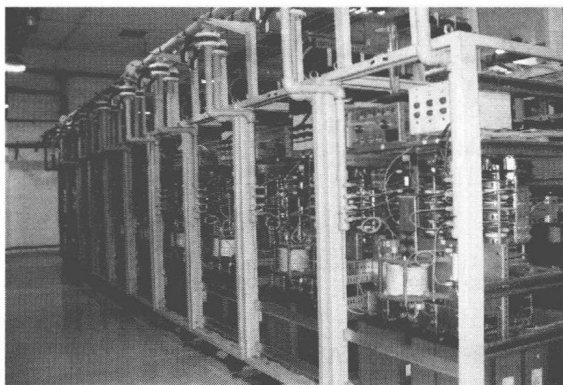


图 6-30 某 500kV 变电站 ±50Mvar 的 STATCOM 装置

其漏抗 X 可限制回路中故障情况下的电流变化。

忽略变压器电阻及回路电阻，STATCOM 从系统吸收的无功功率为

$$Q = \frac{U_s - U_1}{X} U_s \quad (6-26)$$

控制逆变器输出电压，当：

- 1) $U_1 = U_s$ 时, $Q=0$, 即逆变器无输出。
- 2) 当 $U_1 < U_s$ 时, $Q > 0$, 即逆变器从电网吸收无功, 相当于电感的作用。
- 3) 当 $U_1 > U_s$ 时, $Q < 0$, 即逆变器向电网输出无功功率, 相当于电容的作用。

实际运行中的 STATCOM 与系统存在无功交换。由于连接变压器、逆变器、储能电容器等的运行需要消耗有功功率, 因此逆变器的输出电压相角总是滞后于电网的电压,

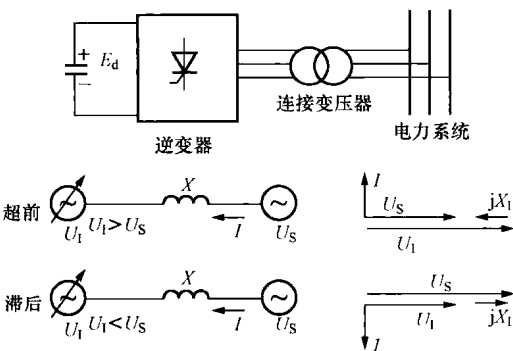


图 6 - 31 STATCOM 的工作原理示意图

- 4) 抑制系统振荡，提高系统稳定性；
- 5) 提高电网三相平衡度；
- 6) 抑制电压波动、闪变。

可见，STATCOM 实现的功能与 SVC 基本类似，但是其补偿效果、动态性能比 SVC 要优越许多。图 6 - 32 为国内某工程±50MVAR STATCOM 样机恒无功功率控制的测试结果。

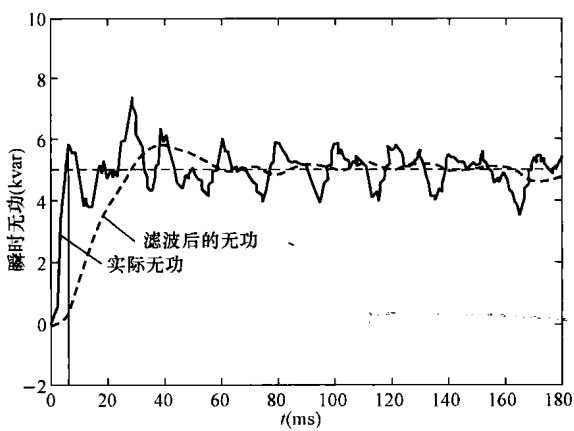


图 6 - 32 STATCOM 动态响应特性

(三) STATCOM 与 SVC 的简单比较

从主电路结构与工作原理上比较，STATCOM 和 SVC 属于完全不同的两种补偿设备。STATCOM 属于一种电压源逆变器，其补偿效果受电网电压的影响较小，因而其 U - I 特性曲线具有较大的调节范围；SVC 属于一种阻抗变化型补偿装置，其补偿效果受电网电压的限制较大，因而其 U - I 特性曲线调节范围较窄。两种装置的比较如图 6 - 33 所示。

与 SVC 相比，STATCOM 还具有下述优点：

- 1) STATCOM 可双向调节；而 SVC 双向调节时，需要等容量的电容器及电抗器。
- 2) SVC 中电容器的无功出力随系统电压的降低平方降低，而 STATCOM 除电压太低外，受系统电压的影响较小，并有短时过载能力，这点对于故障期间保持电压稳定非常有利，对于防止电压崩溃也作用明显。

以获取需要的有功能量。

3. STATCOM 的控制

控制系统主要实现下述控制策略：

- 1) 自动电压调节。采用经典的 PID 控制理论，根据电网电压变化调节其无功出力；STATCOM 具有短时过负荷能力，例如 1.2 倍额定电流持续 10s，之后可转入恒电流控制。
- 2) 恒无功调节；
- 3) 恒功率因数调节；

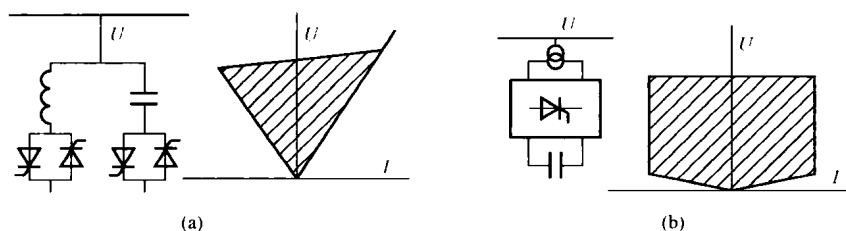


图 6-33 SVC 与 STATCOM 的 $U-I$ 特性曲线比较

(a) 静止无功补偿器 SVC; (b) 静止同步补偿器 STATCOM

3) STATCOM 比 SVC 相比具有更快的响应速度。

4) 同容量的 STATCOM 与 SVC 相比, 体积小。

5) TCR 在运行过程中, 会产生谐波污染, 而 STATCOM 可采用多重逆变技术, 可以将谐波污染降到最低。

正是由于 STATCOM 优越的特点, 世界各国都在开展 STATCOM 方面的研究工作。

(四) 本项目的技术措施

结合上述分析及本工程的实际情况, 电气化牵引变电站宜设置 SVC 装置, 其主要功能要求如下:

(1) 分相调节控制, 满足三相不平衡度国家标准, 110kV PCC 点三相不平衡度指标不得超过 2%。

(2) 当电压波动引起投诉或对电力系统安全运行构成威胁时, SVC 控制策略需考虑电压波动目标要求; 但是闪变的控制目标应酌情考虑。

参 考 文 献

[1] 王锡凡. 现代电力系统分析. 北京: 科学出版社, 2003.

[2] 吴竞昌. 供电系统谐波. 北京: 中国电力出版社, 1998.

电能质量事故分析及其控制方案设计

电能质量的事故分析能够针对事故时的电能质量指标，依据被危害对象的抗扰度水平进行量化分析；或定性地对事故的现象给出合理解释。

电能质量控制方案的设计涉及诸多工程经验，一般步骤包括：

- 1) 原始资料收集，包括系统拓扑结构及参数、污染源信息、危害现象等；
- 2) 控制目标确定；
- 3) 技术方案论证；
- 4) 技术参数设计；
- 5) 技术参数验证；
- 6) 控制保护设置；
- 7) 布置。

本章依据某实际工程案例，介绍电能质量事故分析及其控制方案设计的基本思路、方法。

第一节 事故及其分析

一、事故背景描述及原始信息

1. 事故背景

A 供电局下辖某 110kV 变电站接线原理如图 7-1 所示。其中 110kV 线路 6 回，其中 4 回出线和周边的 5 个牵引变电站相连；10kV 侧有两组集合式并联电容器，负荷为线性负荷，且容量较小。35kV 供非线性负荷。变电站主设备参数如下。

(1) 主变压器。

容量：20MVA；

电压：110/38.5/10.5kV；

短路电压(%)：高-中 10.14，高-低 17.81，中-低 6.61；

空载电流：0.37；

空载损耗：27.12；

短路损耗（高对中）：125.696kW；

短路损耗（中对低）：103.771kW；

短路损耗（高对低）：125.806kW。

(2) 并补电容装置。

电容器型号：BAMH 11/1.732-

2100-3W；

电抗器型号 CKGKL-42-10-6；

铭牌上电抗：3.89Ω。

(3) 各母线短路容量见表 7-1。

表 7-1 母线短路容量一览表

电压等级(kV)	110	35	10
短路容量(MVA)	789.80	158.34	100.02

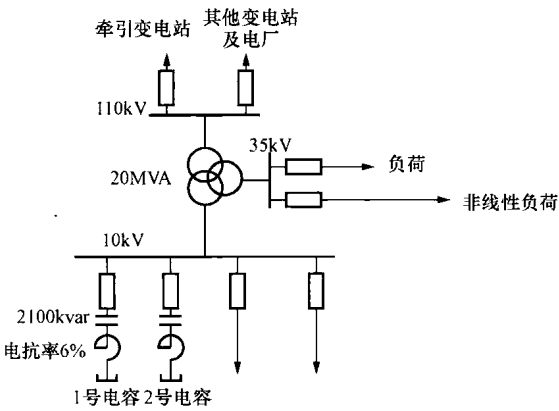


图 7-1 某 110kV 变电站接线原理图

2006~2007 年以来，该站 10kV 侧电容器组频繁出现损坏情况，无法投运。该项目需要解决的问题是：分析电容器频繁损坏的原因，提出解决的具体方案并实施。

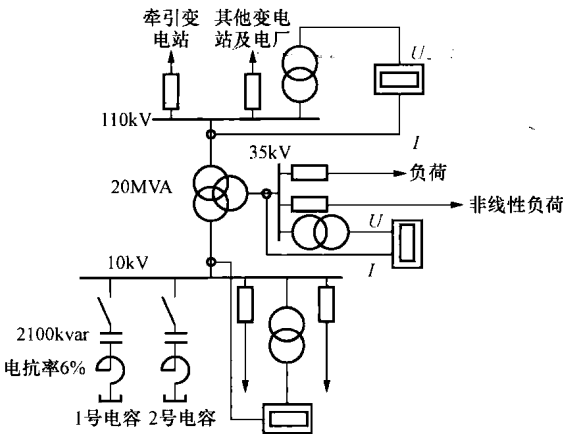


图 7-2 监测点示意图

2. 谐波水平实际测试数据

为了查找电容器损坏的原因，对该站电能质量实际水平进行了测试，发现了较大的背景谐波水平。因此怀疑电容器的损坏与谐波有关。

由于 10kV 电容器已经损坏，所以测试条件下 10kV 电容器未投入运行，测试点如图 7-2 所示。

(1) 110kV 谐波测试水平。测试负荷水平下该站 110kV 母线 1~25 次谐波电压含有率、谐波电压总畸变率及各次谐波电流水平见表 7-2、表 7-3。

表 7-2 110kV 测试点谐波电流水平 A

谐波次数 (次)	A 相		B 相		C 相		对应短路水平下 国标限值
	最大值	95%概率值	最大值	95%概率值	最大值	95%概率值	
基波	69.02	66.59	68.29	66.58	69.93	66.11	
2	2.89	1.74	1.86	1.29	2.38	1.34	12.6
3	1.23	0.94	1.72	1.18	2.17	1.35	10.1
4	0.59	0.30	0.72	0.35	0.61	0.35	6.3
5	7.65	7.33	7.79	7.26	7.61	7.20	10.1
6	0.79	0.44	0.79	0.38	0.93	0.42	4.2
7	3.41	3.20	3.49	3.16	3.94	3.58	7.2
8	0.42	0.27	0.37	0.21	0.39	0.23	3.2
9	1.31	1.07	1.14	0.84	1.37	1.09	3.4

续表

谐波次数 (次)	A 相		B 相		C 相		对应短路水平下 国标限值
	最大值	95%概率值	最大值	95%概率值	最大值	95%概率值	
10	0.21	0.16	0.20	0.15	0.20	0.14	2.5
11	2.16	1.77	1.67	1.50	1.90	1.69	4.5
12	0.21	0.14	0.15	0.10	0.18	0.11	2.1
13	1.42	1.30	1.43	1.36	1.38	1.30	3.9
14	0.12	0.10	0.16	0.09	0.19	0.07	1.8
15	0.65	0.52	0.70	0.51	0.71	0.48	2.0
16	0.19	0.09	0.16	0.09	0.13	0.08	1.6
17	0.63	0.56	0.65	0.57	0.73	0.59	2.9
18	0.09	0.06	0.08	0.05	0.07	0.05	1.4
19	0.49	0.42	0.48	0.44	0.51	0.45	2.6
20	0.11	0.06	0.07	0.06	0.12	0.05	1.3
21	0.31	0.25	0.27	0.22	0.30	0.23	1.5
22	0.08	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	1.2
23	0.38	0.32	0.32	0.26	0.40	0.28	2.2
24	0.05	0.03	0.05	0.02	0.04	0.02	1.1
25	0.33	0.30	0.33	0.30	0.31	0.27	2.0

表 7-3

110kV 母线各次谐波电压含有率及谐波电压总畸变率

%

谐波次数 (次)	A 相		B 相		C 相		国际限值
	最大值	95%概率值	最大值	95%概率值	最大值	95%概率值	
基波(kV)	68.060	67.640	68.150	67.890	68.220	67.910	
2	1.97	1.57	1.39	0.96	1.86	1.14	0.8
3	1.91	1.63	3.66	3.06	4.25	3.23	1.6
4	0.65	0.37	0.59	0.33	0.66	0.43	0.8
5	4.02	3.55	3.50	2.97	3.60	3.10	1.6
6	1.17	0.59	0.72	0.42	1.13	0.51	0.8
7	3.56	2.92	3.71	2.99	3.16	2.65	1.6
8	0.79	0.48	0.54	0.38	0.71	0.46	0.8
9	3.07	2.53	2.83	1.99	3.43	2.75	1.6
10	0.65	0.49	0.62	0.50	0.56	0.46	0.8
11	3.04	2.54	2.71	2.26	3.73	2.79	1.6
12	0.52	0.33	0.38	0.24	0.52	0.28	0.8
13	2.43	1.81	2.66	1.57	2.08	1.63	1.6
14	0.31	0.20	0.53	0.17	0.50	0.13	0.8
15	2.63	2.12	2.44	1.98	2.36	1.57	1.6

续表

谐波次数 (次)	A 相		B 相		C 相		国际限值
	最大值	95%概率值	最大值	95%概率值	最大值	95%概率值	
基波(kV)	68.060	67.640	68.150	67.890	68.220	67.910	
16	0.64	0.35	0.40	0.20	0.34	0.24	0.8
17	1.92	1.68	1.34	1.08	1.87	1.28	1.6
18	0.31	0.19	0.19	0.13	0.23	0.13	0.8
19	1.68	1.21	1.00	0.83	1.06	0.83	1.6
20	0.31	0.19	0.22	0.12	0.31	0.12	0.8
21	1.54	1.08	0.87	0.65	0.92	0.74	1.6
22	0.27	0.15	0.15	0.09	0.18	0.10	0.8
23	1.02	0.80	0.58	0.43	0.76	0.58	1.6
24	0.21	0.10	0.10	0.05	0.16	0.08	0.8
25	0.79	0.56	0.30	0.25	0.66	0.43	1.6
THD _V (%)	6.27	5.17	5.6	4.98	6.38	6.27	2

(2) 35kV 谐波电压电流水平。35kV 母线谐波电流、谐波电压水平见表 7 - 4、表 7 - 5。分析测试数据可见，该母线非线性负荷具有典型的 6 脉波整流负荷特征，其中 5、7、11、13 次谐波水平均比较严重，超过国家标准。

表 7 - 4

35kV 测试点谐波电流水平

A

谐波次数 (次)	A 相		B 相		C 相		对应短路水平下 国际限值
	最大	95%	最大	95%	最大	95%	
基波电流	166.34	160.18	166.04	162.01	167.41	160.17	
2	0.29	0.20	0.47	0.39	0.54	0.45	9.5
3	1.68	1.28	2.13	1.62	2.01	1.32	7.6
4	0.38	0.29	0.44	0.38	0.36	0.27	4.9
5	20.24	19.37	20.78	19.61	19.69	19.09	7.6
6	0.41	0.31	0.32	0.18	0.37	0.32	3.2
7	9.32	8.93	9.88	9.52	10.15	9.66	5.6
8	0.37	0.28	0.38	0.24	0.28	0.21	2.4
9	1.39	1.12	1.17	0.90	1.70	1.29	2.6
10	0.16	0.11	0.20	0.13	0.19	0.13	2.0
11	4.52	4.23	4.15	3.92	4.52	4.16	3.5
12	0.17	0.14	0.13	0.09	0.18	0.16	1.6
13	3.41	3.20	3.65	3.36	3.48	3.34	3.0
14	0.14	0.12	0.18	0.16	0.12	0.08	1.4
15	0.47	0.37	0.74	0.47	0.64	0.52	1.6
16	0.10	0.07	0.17	0.13	0.14	0.11	1.2
17	1.53	1.42	1.55	1.45	1.63	1.44	2.3

表 7-5

35kV 母线各次谐波电压含有率及谐波电压总畸变率

%

谐波次数 (次)	A 相		B 相		C 相		国际限值
	最大值	95%概率值	最大值	95%概率值	最大值	95%概率值	
基波(kV)	22.440	22.247	22.898	22.738	21.765	21.624	
2	0.07	0.04	0.12	0.05	0.14	0.04	1.2
3	1.30	1.04	2.84	2.44	1.75	1.39	2.4
4	0.05	0.04	0.08	0.07	0.09	0.08	1.2
5	5.19	4.88	5.43	4.91	5.12	4.52	2.4
6	0.10	0.08	0.06	0.05	0.12	0.11	1.2
7	3.14	2.78	3.46	3.24	3.23	2.88	2.4
8	0.14	0.11	0.19	0.14	0.19	0.15	1.2
9	0.90	0.73	0.84	0.60	1.23	0.89	2.4
10	0.24	0.23	0.31	0.28	0.30	0.27	1.2
11	2.54	2.24	2.16	1.91	2.46	2.11	2.4
12	0.08	0.06	0.06	0.05	0.11	0.08	1.2
13	1.37	1.23	1.75	1.59	1.63	1.49	2.4
14	0.07	0.07	0.11	0.10	0.07	0.05	1.2
15	0.71	0.60	0.71	0.62	0.97	0.58	2.4
16	0.12	0.08	0.12	0.07	0.21	0.06	1.2
17	0.84	0.74	0.75	0.67	0.94	0.79	2.4
THDv (%)	7.00	6.378	7.69	6.932	7.21	6.26	3

(3) 10kV 谐波电压电流水平。10kV 母线没有典型谐波源负荷，其背景谐波水平具有 110kV、35kV 母线谐波源的共同特征。10kV 测试点谐波电流、谐波电压水平见表 7-6、表 7-7。

表 7-6

10kV 测试点谐波电流水平

A

谐波次数 (次)	A 相		B 相		C 相		对应短路水平下 国标限值
	最大	95%概率值	最大	95%概率值	最大	95%概率值	
基波	121	117.1	123.5	119.35	122.7	118.9	
2	10.1	6.3	4.5	3.6	7.4	5	26.0
3	4.9	3.7	5.8	4.4	6.2	4.85	20.0
4	3.1	2	3	2	3	2.35	13
5	6.4	5.8	7.5	5.6	7.6	5.6	20
6	3.7	2.75	4.1	2.6	3.8	2.7	8.5
7	12.2	9.8	10.5	9.5	11.1	9.2	15
8	1.2	0.8	1.1	0.7	1.1	0.8	6.4
9	3	2.2	3.4	2.65	3.5	2.65	6.8
10	0.9	0.55	0.7	0.6	0.8	0.6	5.1

续表

谐波次数 (次)	A 相		B 相		C 相		对应短路水平下 国标限值
	最大	95%概率值	最大	95%概率值	最大	95%概率值	
11	6.2	5.5	6.6	6	7.2	6.45	9.3
12	0.5	0.4	0.9	0.5	1.3	0.6	4.3
13	5.8	4.35	7.7	6.3	6.8	5.3	7.9
14	0.8	0.5	0.9	0.5	1.2	0.5	3.7
15	5.1	3.65	4	3.45	3.9	2.8	4.1
16	1	0.7	0.9	0.6	0.8	0.7	3.2
17	8.5	5.05	5.1	3.85	5.7	4.1	6.0
18	0.8	0.5	0.5	0.3	0.6	0.4	2.8
19	4.7	3.15	4.6	3.2	4.3	3.05	5.4
20	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	2.6
21	2.7	2	2	1.4	2.4	1.8	2.9
22	0.5	0.3	0.3	0.2	0.5	0.3	2.3
23	1.8	1.6	1.6	1.2	1.9	1.5	4.5
24	0.3	0.2	0.2	0.1	0.3	0.2	2.1
25	1.5	1.2	1.2	1.05	1.6	1.3	4.1

表 7-7 10kV 母线各次谐波电压含有率及谐波电压总畸变率 %

谐波次数 (次)	A 相		B 相		C 相		国际限值
	最大值	95%概率值	最大值	95%概率值	最大值	95%概率值	
基波(kV)	6.220	6.181	6.309	6.269	6.285	6.240	
2	1.91	1.22	1.23	0.88	1.72	1.09	1.6
3	2.45	1.96	3.90	2.90	2.47	1.95	3.2
4	0.45	0.33	0.82	0.45	0.50	0.38	1.6
5	6.82	6.16	7.00	5.48	6.79	5.76	3.2
6	0.89	0.65	1.07	0.51	1.06	0.65	1.6
7	4.12	3.62	4.22	3.71	3.91	3.42	3.2
8	0.52	0.32	0.52	0.28	0.48	0.33	1.6
9	1.93	1.55	1.93	1.52	2.21	1.73	3.2
10	0.60	0.40	0.51	0.42	0.60	0.40	1.6
11	3.59	3.18	3.45	2.82	3.85	3.24	3.2
12	0.44	0.29	0.37	0.25	0.59	0.32	1.6
13	3.25	2.68	3.38	2.68	2.62	2.21	3.2
14	0.31	0.25	0.32	0.22	0.29	0.16	1.6
15	2.28	1.85	1.80	1.57	1.53	1.31	3.2
16	0.41	0.30	0.39	0.26	0.39	0.30	1.6
17	2.48	1.74	1.78	1.53	2.19	1.76	3.2

续表

谐波次数 (次)	A 相		B 相		C 相		国际限值
	最大值	95%概率值	最大值	95%概率值	最大值	95%概率值	
18	0.26	0.18	0.19	0.13	0.28	0.18	1.6
19	1.54	1.12	1.19	1.01	1.66	1.27	3.2
20	0.22	0.15	0.19	0.12	0.24	0.15	1.6
21	1.02	0.77	0.84	0.61	1.07	0.86	3.2
22	0.22	0.13	0.13	0.11	0.23	0.13	1.6
23	1.17	0.89	0.83	0.67	1.05	0.85	3.2
24	0.18	0.10	0.11	0.08	0.21	0.12	1.6
25	1.00	0.82	0.78	0.67	1.07	0.89	3.2
THD _V (%)	8.11	7.48	8.26	7.11	8.11	7.22	4

二、测试数据直观分析

(1) 110kV 电压等级。

图 7-3 为其谐波电压含有率特征，结论如下：

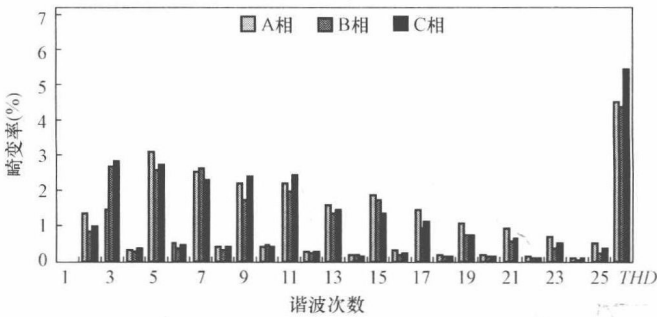


图 7-3 110kV 母线各次谐波电压含有率及总畸变率

超过 2% 的国家标准。

(2) 35kV 电压等级。图 7-4 为 35kV 电压等级谐波电压含有率特征。

1) 35kV 母线谐波频谱表现为 $6k \pm 1$ (k 为正整数)，为典型的 6 脉波整流负荷特征。

2) 在所给母线短路容量及其测试负荷水平下，谐波电流 5、7、11、13 次均超过国家标准，尤以 5、7 表现最为严重；同时 5、7 次谐波电压含有率超过国家标准。

3) 谐波电压总畸变率大大超过 3% 的国家标准。

(3) 10kV 电压等级。图 7-5 为 10kV 电压等级谐波电压含有率特征。

1) 10kV 母线谐波频谱具有 110kV、35kV 母线频谱的共同特征。

2) 10kV 母线谐波电流均未超过国家标准，但 5、7、11、13

1) 该站 110kV 母线谐波频谱表现为 $2k \pm 1$ (k 为正整数)，为典型的电气化机车负荷特征。

2) 在所给母线短路容量及其测试负荷水平下，谐波电流均未超标；但 3、5、7、9、11、13、15、17 次谐波电压含有率均超过 1.6% 的国家标准。

3) 谐波电压总畸变率严重

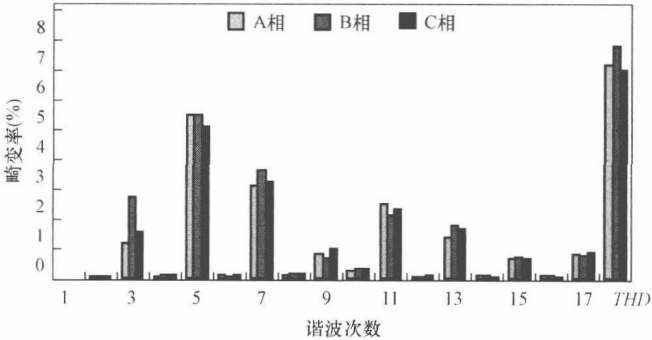


图 7-4 35kV 母线各次谐波电压含有率及总畸变率

次谐波电压含有率均超过国家标准。

- 3) 10kV 母线谐波电压总畸变率大大超过 4%的国家标准。
- 4) 分析测试数据可知, 10kV 母线谐波电压几乎都由 110kV、35kV 母线谐波电压方均根合成。
- 5) 10kV 基波相电压 95%概率值在 6.25kV 左右, 超出额定相电压的 8%左右。
- 6) 在不考虑其他谐波效应及谐波谐振、放大的前提下, 10kV 电容器将至少长期额外承受测试相电压情况下 8%左右的谐波电压 (8%的谐波电压总畸变率), 即达到系统额定电压的 116.64% ($1\times1.08\times1.08$)。

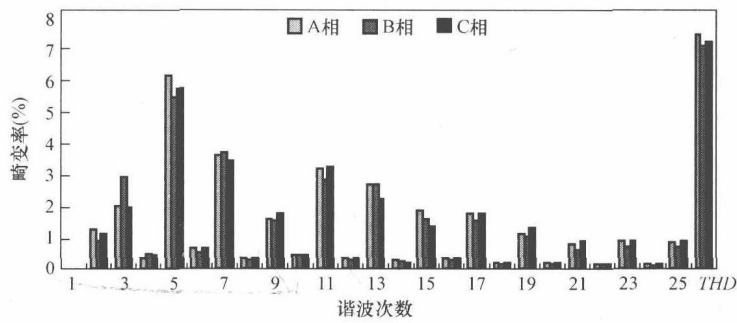


图 7-5 10kV 母线各次谐波电压含有率及总谐波畸变率

- (4) 初步结论。
- 1) 该站 10kV 背景谐波水平较高, 谐波频谱丰富。
- 2) 10kV 电容器承受较高的基波及背景谐波电压, 运行环境恶劣。

三、谐波潮流分析

1. 分析电气参数
- 分析时所采用的变电站基本参数见表 7-8。

表 7-8 变 电 站 基 本 参 数	
设 备	参 数
110kV 侧系统短路容量(MVA)	789.80, 分析时取 80%
35kV 侧系统短路容量(MVA)	158.34
10kV 侧系统短路容量(MVA)	100.02
10kV 侧无功补偿参数	电容器型号: BAMH 11/1.732-2100-3W 串联电抗: 电抗器型号: CKGKL-42-10-6 铭牌上电抗: 3.89Ω
主变压器参数	容量: 20MVA 电压: 110/38.5/10.5kV 短路电压(%): 高一中 10.14, 高一低 17.81, 中—低 6.61 空载电流: 0.37 空载损耗: 27.12 短路损耗(高对中): 125.696kW 短路损耗(中对低): 103.771kW 短路损耗(高对低): 125.806kW

续表

设 备	参 数
10kV 负荷水平	0.75MW，功率因数取 0.85
35kV 负荷水平	未考虑
电网频率(Hz)	50
分析系统接线图	图 7-1

2. 分析谐波源水平

图 7-6 给出测试情况下 110kV、35kV 母线谐波源流向趋势图。由图 7-6 可见：

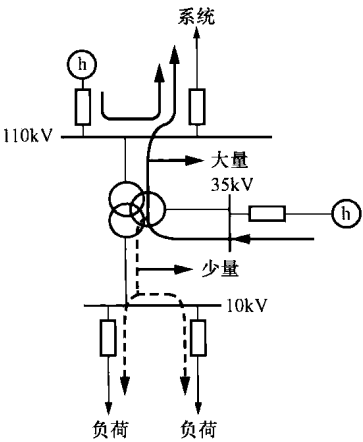


图 7-6 谐波电流流向及其流量

(1) 35kV 侧谐波源将通过主变 35kV 侧 TA 大部分流向 110kV 系统，少量流入 10kV 负荷侧，因此通过主变压器 35kV 侧 TA 能够正确测量该母线谐波源电流水平。

(2) 110kV 母线谐波源大部分直接流向系统，仅仅有很少量经过主变压器 110kV 侧 TA 流向 10kV 负荷侧及 35kV 母线，因此，通过主变压器 110kV 侧 TA 无法正确反映 110kV 母线谐波源电流水平。

因此潮流分析中 35kV 侧谐波源采取实际测试数值，110kV 采取理论计算与经验相结合的方法获取 110kV 牵引负荷产生的谐波水平。

据了解，此段机车机头型号为 SS1、SS3，其产生的特征谐波为 $2k \pm 1$ ，单机头机车平均臂电流为 225A，货车考虑两个机头，平均臂电流为 450A，则注入牵引变压器的谐波电流见表 7-9。

表 7-9 理论分析单列车牵引负荷谐波电流 95%概率大值

次 数	1	3	5	7	9	11	13	15
电力机车幅值(A)	450	90	45	22.5	9.0	8.1	6.7	6.7
折算到 110kV 电流(A)	130	25.8	12.9	6.4	2.6	2.3	2.0	2.0

该站 110kV 有 4 条出线和周边的 5 个牵引变电站相连，因此应考虑其共同作用的谐波效果。同时考虑了机车的同时率及工程经验，最终采纳的 110kV 谐波源水平见表 7-10。因此，潮流计算中所采纳的谐波源水平见表 7-11。

表 7-10 110kV 母线牵引负荷谐波水平预估

次 数	3	5	7	9	11	13	15
折算到 110kV 电流(A)	40	25	14.3	5.81	5.14	4.47	4.47

表 7-11 潮流计算中所采纳的 110kV、35kV 侧谐波源参数

谐波次	110kV 谐波 电流采纳值(A)	35kV 谐波 电流采纳值(A)	10kV 谐波电压 含有率(%)	谐波次	110kV 谐波 电流采纳值(A)	35kV 谐波 电流采纳值(A)	10kV 谐波电压 含有率(%)
2	2.89	0.20	1.91	14	0.12	0.12	0.31
3	40	1.28	2.45	15	4.47	0.37	2.28
4	0.59	0.29	0.45	16	0.19	0.07	0.41
5	25	19.37	6.82	17	0.63	1.42	2.48
6	0.79	0.31	0.89	18	0.09	0.1	0.26
7	14.3	8.93	4.12	19	0.49	0.1	1.54
8	0.42	0.28	0.52	20	0.11	0.1	0.22
9	5.81	1.12	1.93	21	0.31	0.1	1.02
10	0.21	0.11	0.60	22	0.08	0.1	0.22
11	5.14	4.23	3.59	23	0.38	0.1	1.17
12	0.21	0.14	0.44	24	0.05	0.1	0.18
13	4.47	3.20	3.25	25	0.33	0.1	1.00

3. 电容器回路谐波水平计算

经谐波潮流计算得知，电容补偿装置投入运行后，其回路谐波水平见表 7-12。

表 7-12 电容补偿装置投入运行前后回路谐波水平变化

次数	电压标准 (%)	电压畸变率% (电容器未投运)	电压畸变率% (电容器投运)	电容回路注入 电流(A)
2	1.60	0.17	0.19	0.53
3	3.20	3.55	5.35	40.99
4	1.60	0.08	0.02	0.83
5	3.20	4.52	2.80	20.37
6	1.60	0.15	0.11	0.46
7	3.20	3.46	2.58	7.84
8	1.60	0.12	0.09	0.22
9	3.20	1.61	1.26	2.53
10	1.60	0.07	0.06	0.10
11	3.20	2.04	1.62	2.49
12	1.60	0.09	0.07	0.10
13	3.20	2.04	1.63	2.04
14	1.60	0.06	0.05	0.06
15	3.20	2.01	1.61	1.71
16	1.60	0.10	0.08	0.08
17	3.20	0.52	0.42	0.38
18	1.60	0.06	0.05	0.04

续表

次数	电压标准 (%)	电压畸变率% (电容器未投运)	电压畸变率% (电容器投运)	电容回路注入 电流(A)
19	3.20	0.29	0.23	0.19
20	1.60	0.08	0.07	0.05
21	3.20	0.21	0.17	0.12
22	1.60	0.07	0.06	0.04
23	3.20	0.27	0.22	0.15
24	1.60	0.05	0.04	0.03
25	3.20	0.26	0.21	0.13
总畸变率	4.00	7.79	7.28	

4. 分析结论

通过上述潮流分析可见：

(1) 电容补偿装置投入运行后，将有较大的 3 次、5 次谐波电流流入电容器回路，谐波电流严重情况下占基波电流的 60% 左右。

(2) 电容补偿装置投入运行情况下，对 3 次谐波存在一定程度的放大，也就是说，运行点处于 3 次谐波放大的区域。

(3) 可见，电容器运行环境不仅受背景谐波的影响，还产生了背景特征谐波频谱放大现象。

四、应用 $\gamma_n-\alpha_n$ 曲线定量分析电容器的损坏原因

实测结果表明：电容器不运行时 10kV 母线谐波电压主要由 7 种谐波频谱组成，如表 7-13 及图 7-7 所示，此数值即为电容器投运前的背景谐波电压水平。

表 7-13 10kV 母线背景谐波电压水平

谐波次数	含有率(%)	谐波次数	含有率(%)	谐波次数	含有率(%)	谐波次数	含有率(%)
3	2.45	7	4.12	13	3.25	17	2.48
5	6.82	11	3.59	15	2.28		

依据第五章电容器容限曲线，考虑到谐波背景水平，结合网络具体参数，仿真计算电容器投入运行后的 $\gamma_n-\alpha_n$ 曲线如图 7-8 所示。分析图 7-8 可见：10kV 母线投入电容器后，3 次、5 次谐波对电容器的危害最大，由于此时至少有 7 种主要的谐波频谱，按图中最下端的容限约束分析，则电容器运行后将出现过负荷现象，引起电容补偿装置损坏的主要原因应该是 3 次、5 次谐波电流为主要频谱的电容器过负荷故障。

五、事故分析结论

通过上述多方面的定性、定量分析，可以得出该站电容器频繁损坏的结论如下：

- (1) 造成该站电容器损坏的主要原因在于系统中较高的背景谐波。
- (2) 电容器串抗的设计参数未能考虑到系统背景谐波频谱因素，对 3 次谐波存在一定程度的放大。
- (3) 谐波潮流分析及电容器容限分析表明，3 次、5 次谐波过负荷是导致电容器损坏

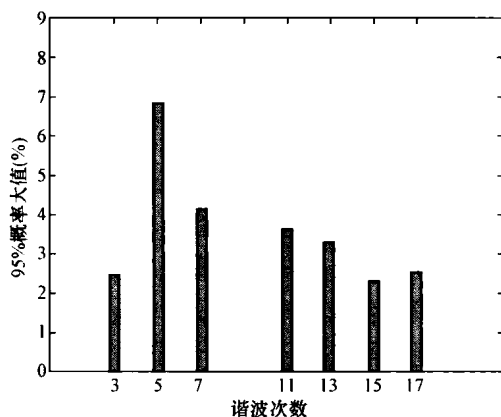


图 7-7 容限分析对应的谐波源频谱

的根本原因。

(4) 要彻底解决谐波问题，宜考虑滤波器方案。

考虑到 110kV 电压等级谐波控制对于区域供电环境有较强的改善作用，因此，实际工程中对于滤波器设置提出了两种控制目标：

(1) 滤波器设置在 10kV 母线，在改善谐波水平的同时，提供基波无功补偿。

(2) 首要控制目标为：在滤波器运行良好的条件下，确保 110kV 母线谐波电压控制在 GB/T 14543—1993《电能质量 公用电网谐波》标准范围内，同时，35kV 不出现严重的背景谐波谐振现象。

(3) 当 110kV 控制目标无法实现时，控制目标修改为：确保 10kV 母线谐波电压水平控制在 GB/T 14543—1993 标准范围内，同时，尽可能地改善 110kV、35kV 谐波电压水平。

第二节 110kV 控制目标下滤波器方案的论证

一、滤波方案设计思路

由于控制目标针对 110kV 母线，因此变压器参数等将成为滤波回路的主要组成部分，且此参数不可调整。因此，需要采取优化分析的方法在给定电容器参数下选择合适的滤波电抗参数。

滤波支路的设置及其参数的确定受到很多因素的制约，而且常常是互相矛盾的。因此参数选择过程中除了理论性的导向外，还须反复进行分析比较工作，并需要不断地验算和校正，从技术经济等方面全面权衡，从而获得比较合理的谐波补偿及无功补偿方案。

(1) 支路设置。从前面的谐波电流分析数值可见，该变电站谐波源频谱主要表现为 3、5、7、11、13 次谐波，因此滤波支路的设置宜考虑下述制约因素：

1) 上述谐波频谱的制约；

2) 场地开关间隔的制约（目前变电站仅有 2 个开关间隔空间，现场也无多余空间增加间隔）；

3) 控制目标。

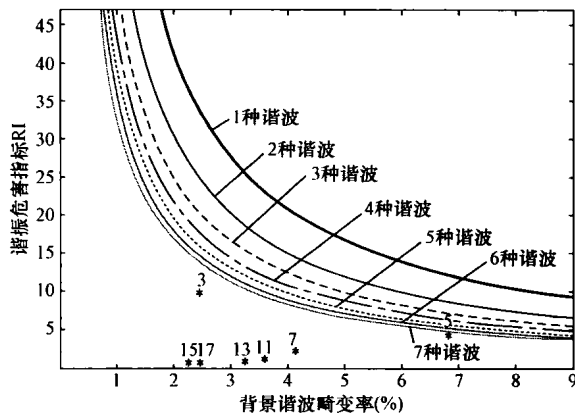


图 7-8 谐波对电容器危害的容限分析

注：主要的谐波频谱有 7 个，

即 3、5、7、11、13、15、17 次谐波。

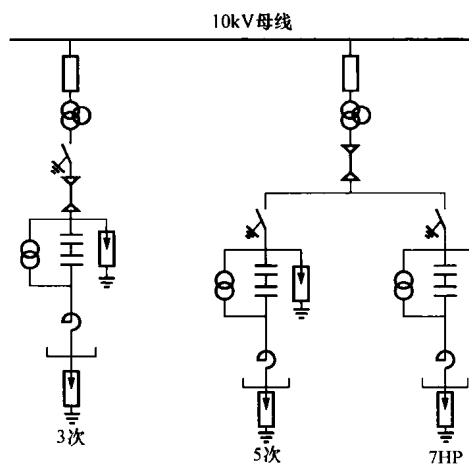


图 7-9 滤波器主接线原理图

在考虑上述因素的前提下，通过多种方案的技术比较，确定须设置 3 次、5 次单调谐支路和 7 次兼高通支路。同时确定 3 次支路单独用一台断路器，5+7HP 合用一台断路器。滤波器主接线原理图如图 7-9 所示。

(2) 基波补偿容量。补偿容量的确定不仅受谐波水平的制约，同时还受到基波无功补偿的制约，一般应从以下几个方面考虑：

- 1) 满足消除高次谐波电流和电压的要求；
- 2) 满足基波无功功率的要求；
- 3) 限制补偿站投运中的过电压要求；
- 4) 防止补偿站投运中旁频并联谐振的要求。

由于该站原补偿电容能够满足其基波出力的要求，因此，本工程基波容量继续采纳 4200kvar。

二、3 次滤波支路参数确定

图 7-10 给出了单相基波补偿容量及其合适滤波电抗组合情况下可能出现的最小谐波阻抗仿真结果，其电容、电抗参数见表 7-14。分析图 7-10、表 7-14 可见：

(1) 要取得相对好的滤波效果，3 次滤波支路单相基波补偿容量应大于等于 1.5Mvar，即三相出力为 4.5Mvar，但是该站总基波无功出力的约束为不大于 4.2Mvar。

(2) 1.5Mvar 的单相补偿容量产生的滤波效果仅仅比单相 0.6Mvar 的滤波效果提高 10%左右，以增加 3 倍的补偿容量提高 10%左右的滤波效果在经济上是不可取的。

因此该支路基波补偿容量选择为单相 0.6Mvar，对应滤波电抗感抗为 6.2511Ω。

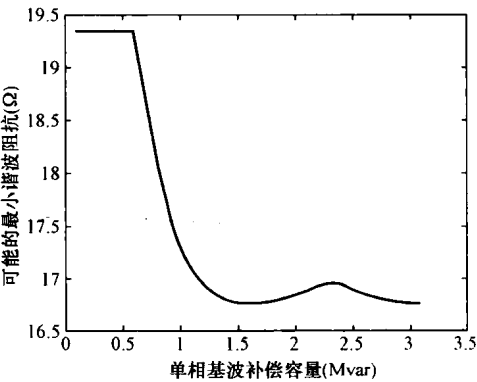


图 7-10 3 次支路基波补偿容量与滤波效果关系

表 7-14 3 次谐波阻抗随基波补偿容量变化表

电容器容量 (Mvar)/相	支路最大阻抗 (Ω)	最大阻抗对应 电感阻抗(Ω)	支路最小阻抗 (Ω)	最小阻抗对应 电感阻抗(Ω)
0.1	58.64	41.34	19.34	41.76
0.2	77.73	20.24	19.34	20.45
0.3	93.75	13.21	19.34	13.35
0.4	90.92	9.69	19.34	9.80
0.5	87.28	7.50	19.34	7.67
0.6	93.75	6.10	19.34	6.25
0.7	94.90	5.11	18.73	5.29

续表

电容器容量 (Mvar)/相	支路最大阻抗 (Ω)	最大阻抗对应 电感阻抗(Ω)	支路最小阻抗 (Ω)	最小阻抗对应 电感阻抗(Ω)
0.8	90.92	4.36	18.08	4.52
0.9	93.75	3.74	17.62	3.93
1.0	95.16	3.28	17.30	3.45
1.1	94.06	2.90	17.08	3.06
1.2	93.75	2.55	16.94	2.73
1.3	95.05	2.29	16.84	2.45
1.4	94.90	2.07	16.79	2.22
1.5	93.75	1.84	16.76	2.01
1.6	94.91	1.67	16.75	1.83
1.7	95.13	1.52	16.76	1.67
1.8	94.46	1.39	16.78	1.53
1.9	94.78	1.25	16.80	1.41
2.0	95.16	1.15	16.83	1.29
2.1	94.90	1.05	16.87	1.19
2.2	94.67	0.94	16.91	1.10
2.3	95.12	0.87	16.95	1.01
2.4	95.09	0.79	16.94	0.95
2.5	94.61	0.73	16.88	0.88
2.6	95.05	0.65	16.84	0.81
2.7	95.15	0.59	16.81	0.75
2.8	94.90	0.54	16.79	0.70
2.9	94.98	0.48	16.77	0.64
3.0	95.16	0.44	16.76	0.59
3.1	95.06	0.39	16.75	0.54

三、5次滤波支路参数确定

按照与3次支路相同的分析方法，图7-11给出了单相基波补偿容量及其合适滤波电抗组合情况下可能出现的最小谐波阻抗仿真结果，分析可见：

- (1) 要取得相对好的滤波效果，5次滤波支路单相基波补偿容量应大于等于0.5Mvar，即三相出力为1.5Mvar。
- (2) 0.5Mvar的单相补偿容量产生的滤波效果仅仅比单相0.3Mvar的滤波效果提高5%左右；考虑到基波补偿容量的总体约束，该支路基波补偿容量取单相0.3Mvar，对应滤波电抗感抗为3.9239Ω。

四、7次滤波支路参数确定

图7-12单相基波补偿容量及其合适滤波电抗组合情况下可能出现的最小谐波阻抗仿真结果，分析可见：

- (1) 要取得相对好的滤波效果，7次滤波支路单相基波补偿容量应大于等于0.4Mvar，即三相出力为1.2Mvar。
- (2) 同时，0.4M~1.4Mvar范围内的单相补偿容量产生的滤波效果基本相同。最终该支路基波补偿容量取单相0.5Mvar，对应滤波电抗感抗为0.93567Ω。

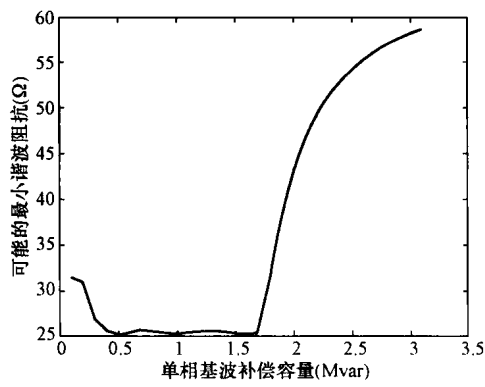


图 7-11 5 次支路基波补偿容量与滤波效果关系

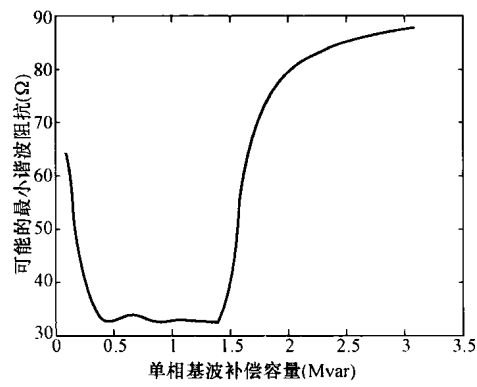


图 7-12 7 次支路基波补偿容量与滤波效果关系

五、额定频率 50Hz 情况下的滤波效果分析

(一) 电压等级 110kV 母线

表 7-15 50Hz 情况下滤波器投入前后 110kV 母线谐波电压变化表

次数 (次)	电压标准 (%)	未投滤波器 畸变率(%)	投滤波器 畸变率(%)
2	0.80	0.14	0.14
3	1.60	2.88*	2.12*
4	0.80	0.06	0.07
5	1.60	3.64*	1.34
6	0.80	0.13	0.12
7	1.60	2.80*	0.97
8	0.80	0.09	0.07
9	1.60	1.31	1.15
10	0.80	0.06	0.05
11	1.60	1.66*	1.40
12	0.80	0.07	0.06
13	1.60	1.66*	1.44
14	0.80	0.05	0.04
15	1.60	1.62	1.50
16	0.80	0.08	0.07
17	1.60	0.42	0.34
18	0.80	0.05	0.04
19	1.60	0.06	0.05
20	0.80	0.07	0.06
21	1.60	0.15	0.14
22	0.80	0.04	0.04
23	1.60	0.07	0.06
24	0.80	0.04	0.04
25	1.60	0.08	0.07
总计	2.00	6.28	3.88

* 超标。

仿真分析表明，在电网额定运行频率下 110kV 母线阻抗频率特性如图 7-13 所示，滤波器投运前后 110kV 母线谐波电压水平变化见表 7-15，分析表 7-15 可见：

(1) 滤波器投运前，各次谐波含有率及总谐波电压畸变率与实测值基本吻合，3、5、7、11、13 次谐波电压含有率及谐波总畸变率严重超标；

(2) 滤波器投入运行后，3 次改善效果不到 30%，仍超标，5、7 次谐波电压含有率均下降至原来的 30% 左右；

(3) 110kV 母线总谐波畸变率由原来的 6.28% 下降到 3.88%，但仍超过国家标准近 2 倍。

(二) 电压等级 10kV 母线

仿真分析表明，在电网额定运行频率下 10kV 母线谐振特性如图 7-14 所示，滤波器投运前后 10kV 母线谐波电压水平变化见表 7-16，分析表 7-16 可见：

(1) 滤波器投运前，各次谐波含有率及总谐波电压畸变率与实测值基本吻合，3、5、7、11、13 次谐波电压含有率及谐波总畸变率严重超标；

(2) 滤波器投入运行后，引起 3 次谐波放大，其谐波电压含有率由原来的 2.78% 上升到 3.48%，超过国家标准，同时 5、7 次谐波含量均放大 2 倍以上；

(3) 10kV 母线总谐波畸变率由原来的 9.33% 上升到 17.37%，严重超过 4% 的国家标准，将会引起一系列问题。

表 7-16 50Hz 情况下滤波器投入前后

10kV 母线谐波电压变化表			
次数 (次)	电压标准 (%)	未投滤波器 畸变率(%)	投滤波器 畸变率(%)
2	1.60	0.14	0.18
3	3.20	2.78	3.48*
4	1.60	0.09	0.11
5	3.20	6.20*	12.98*
6	1.60	0.17	0.10
7	3.20	4.39*	10.92*
8	1.60	0.15	0.02
9	3.20	1.48	0.16
10	1.60	0.08	0.02
11	3.20	2.86	0.75
12	1.60	0.11	0.03
13	3.20	2.71	0.87
14	1.60	0.10	0.03
15	3.20	1.62	0.57
16	1.60	0.10	0.04
17	3.20	1.08	0.40
18	1.60	0.08	0.03
19	3.20	0.11	0.04
20	1.60	0.12	0.05
21	3.20	0.14	0.05
22	1.60	0.04	0.01
23	3.20	0.13	0.05
24	1.60	0.11	0.04
25	3.20	0.14	0.06
总计	4.00	9.33	17.37

* 超标。

(三) 电压等级 35kV 母线

仿真分析表明，在电网额定运行频率下 35kV 母线谐振特性如图 7-15 所示，滤波器投运前后 35kV 母线谐波电压水平变化见表 7-17，分析表 7-17 可见：

(1) 滤波器投运前，各次谐波含有率及总谐波电压畸变率与实测值基本吻合，3、5、7、11、13 次谐波电压含有率及谐波总畸变率严重超标；

(2) 滤波器投入运行后，引起 7 次谐波轻微放大，对其他谐波滤除效果不明显；

(3) 谐波电压总畸变率由原来的 9.43% 变化到 8.36%，仍大大超过 3% 的国家标准。

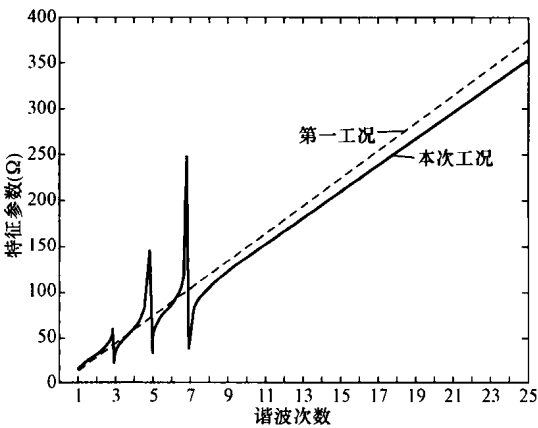


图 7-13 50Hz 情况下 110kV 母线谐振特性

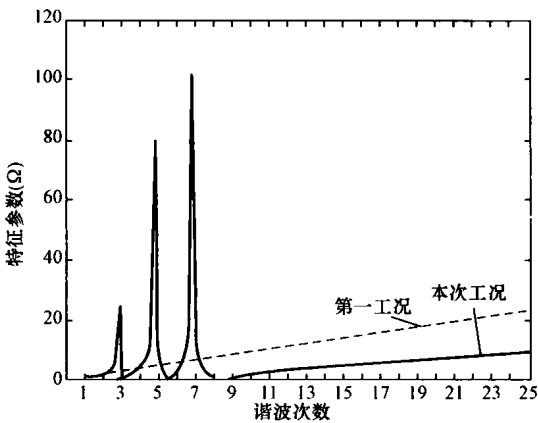


图 7-14 50Hz 情况下 10kV 母线谐振特性分析

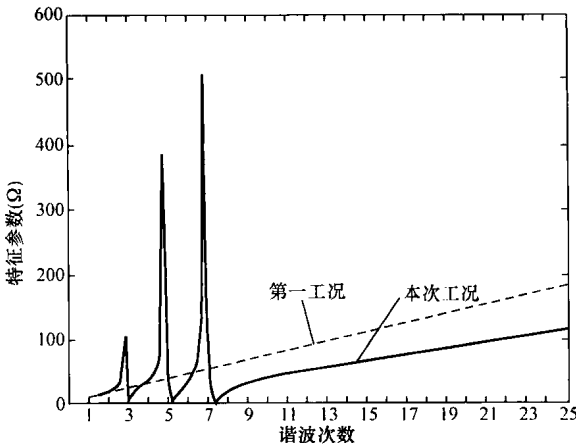


图 7-15 50Hz 情况下 35kV 母线谐振特性分析

六、等值频率偏移±2%情况下滤波效果分析结论

采用与前述相同的分析方法，电网额定频率 50Hz 等值偏移±2%情况下滤波效果汇总表 7-18，结论如下：

(1) -2%情况下滤波效果结论：

- 1) 对 110kV 母线谐波水平降低 30% 左右；
- 2) 引起 10kV 侧 3、5、7 次谐波严重放大，总畸变率达 52.48%；
- 3) 引起 35kV 侧 3、5、7 次谐波严重放大，总畸变率达 30.66%。

表 7-17 50Hz 情况下滤波器投入前后 35kV 母线谐波电压变化表

次数 (次)	电压标准 (%)	未投滤波器 畸变率(%)	投滤波器 畸变率(%)
2	1.20	0.14	0.17
3	2.40	2.80*	1.17
4	1.20	0.09	0.11
5	2.40	6.26*	5.86*
6	1.20	0.17	0.13
7	2.40	4.44*	5.21*
8	1.20	0.15	0.05
9	2.40	1.50	0.67
10	1.20	0.08	0.04
11	2.40	2.89*	1.57
12	1.20	0.11	0.06
13	2.40	2.74*	1.59
14	1.20	0.10	0.06
15	2.40	1.64	0.98
16	1.20	0.11	0.06
17	2.40	1.09	0.67
18	1.20	0.08	0.05
19	2.40	0.11	0.07
20	1.20	0.12	0.07
21	2.40	0.14	0.09
22	1.20	0.04	0.02
23	2.40	0.13	0.08
24	1.20	0.11	0.07
25	2.40	0.14	0.09
总计	3.00	9.43	8.36

* 超标。

表 7-18 各频率下 110、10、35V 母线谐波电压水平一览表

%

电压等级	谐波次数	49Hz		50Hz		51Hz		国家标准
		未投	投入	未投	投入	未投	投入	
110kV	3 次谐波	2.82	1.45	2.88	2.12	2.93	2.42	1.6
	5 次谐波	3.56	0.98	3.64	1.34	3.71	2.06	1.6
	7 次谐波	2.75	3.48	2.80	0.97	2.86	1.61	1.6
	总畸变率	6.16	4.76	6.28	3.88	6.41	4.56	2.0
10kV	3 次谐波	2.73	8.92	2.78	3.48	2.83	1.43	3.2
	5 次谐波	6.08	28.17	6.20	12.98	6.32	7.37	3.2
	7 次谐波	4.30	43.35	4.39	10.92	4.47	5.85	3.2
	总畸变率	9.15	52.48	9.33	17.37	9.51	9.63	4.0
35kV	3 次谐波	2.75	4.65	2.80	1.17	2.86	0.16	2.4
	5 次谐波	6.14	15.55	6.26	5.86	6.38	2.26	2.4
	7 次谐波	4.35	25.88	4.44	5.21	4.52	1.98	2.4
	总畸变率	9.25	30.66	9.43	8.60	9.61	4.05	3.0

(2) 2%情况下滤波效果结论:

- 1) 110kV 母线谐波水平降低 30%左右, 但谐波电压总畸变率 4.56%仍大大高于 2%的国家标准;
- 2) 10kV 母线谐波电压总畸变率基本维持不变, 谐波电压总畸变率 9.63%大大高于 4%的国家标准;
- 3) 35kV 母线谐波电压总畸变率降低到原来的 50%左右, 但谐波电压总畸变率 4.05%仍高于 3%的国家标准。

七、110kV 控制目标结论

进一步分析表明, 在表 7-18 环境下要确保滤波装置的安全运行, 在等值频率偏移 ±2%情况下滤波器容量将从 9.66~32.1Mvar 范围变化。
考虑到上述所有约束情况, 从技术经济两方面决策, 放弃 110kV 的控制目标, 采用以 10kV 为主要控制目标的方案。

第三节 10kV 控制目标下滤波器方案

通过与 110kV 控制目标相同的分析, 10kV 控制目标下滤波器各支路的设置及其基波容量见表 7-19。

表 7-19 滤波器各支路基波无功出力

支 路	3 次	5 次	7 次高通
基波补偿容量(三相: kvar)	1800	1500	1500

一、额定电网频率 50Hz 情况下滤波效果分析

1. 变电站 10kV 母线

10kV 母线属于本工程主要的控制目标, 要求各次谐波电压含有率及谐波电压总畸变率满足国家标准。仿真分析表明: 在电网额定运行频率下 10kV 母线谐振特性如图 7-16

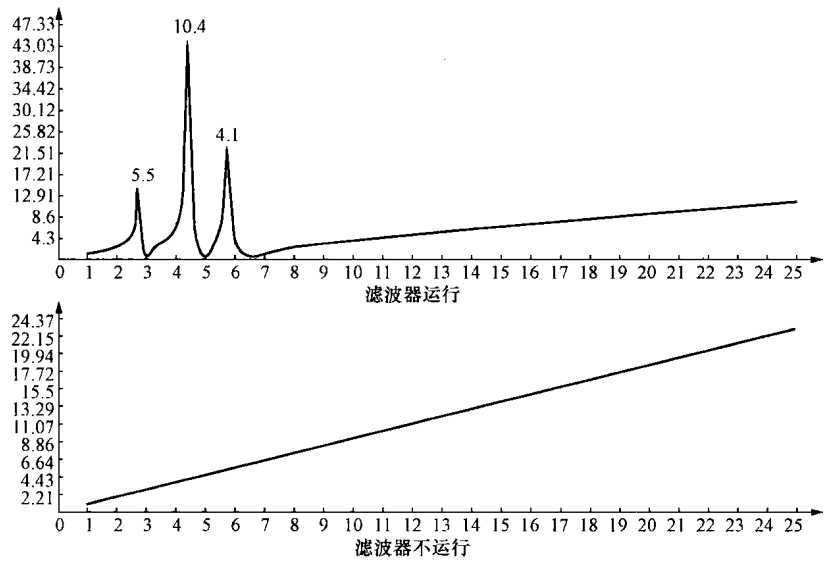


图 7-16 电网额定运行频率下 10kV 母线谐振特性

所示，滤波器投运前后 10kV 母线谐波电压水平变化见表 7-20。分析表 7-20 可见：滤波器投入运行后，3、5、7 次谐波电压含有率均下降至 1% 以下，9 次以后各次谐波均下降 50% 以上，各次谐波含有率均满足国家标准；同时 10kV 母线总谐波畸变率由原来的 9.3% 下降到 2.4%，大大低于国家标准。

2. 变电站 35kV 母线

35kV 母线属于本工程考虑的次要目标，要求在 10kV 母线满足国家标准的前提下尽可能降低该母线谐波水平。在电网额定运行频率下母线谐振特性如图 7-17 所示，滤波器投运前后 35kV 母线谐波电压水平变化见表 7-21。分析表 7-21 可见：滤波器投入运行后，仅 5 次谐波含有率稍微超过国家标准（标准为 2.4%，此时 5 次为 2.7%），其余各次谐波均在国家标准范围内；35kV 母线谐波电压总畸变率由原来的 9.4% 降为现在的 4.85%，但仍超过 3% 的国家标准。

表 7-20 滤波器投入前后 10kV 母线谐波电压变化表

次数 (次)	电压标准 (%)	未投滤波器 畸变率(%)	投入滤波器 畸变率(%)
2	1.60	0.14	0.18
3	3.20	2.78	0.43
4	1.60	0.09*	0.16
5	3.20	6.20*	0.65
6	1.60	0.17*	0.11
7	3.20	4.39*	0.77
8	1.60	0.15	0.05
9	3.20	1.48	0.56
10	1.60	0.08	0.03
11	3.20	2.86	1.26
12	1.60	0.11	0.05
13	3.20	2.71	1.27
14	1.60	0.10	0.05
15	3.20	1.62	0.79
16	1.60	0.10	0.05
17	3.20	1.08	0.53
18	1.60	0.08	0.04
19	3.20	0.11	0.05
20	1.60	0.12	0.06
21	3.20	0.14	0.07
22	1.60	0.04	0.02
23	3.20	0.13	0.07
24	1.60	0.11	0.06
25	3.20	0.14	0.07
总计	4.00	9.33	2.39

* 超标。

表 7-21 滤波器投入前后 35kV 母线谐波电压变化表

次数 (次)	电压标准 (%)	未投滤波器 畸变率(%)	投入滤波器 畸变率(%)
2	1.20	0.14	0.17
3	2.40	2.80*	1.29
4	1.20	0.09	0.14
5	2.40	6.26*	2.74*
6	1.20	0.17	0.02
7	2.40	4.44*	2.16
8	1.20	0.15	0.09
9	2.40	1.50	0.92
10	1.20	0.08	0.05
11	2.40	2.89*	1.89
12	1.20	0.11	0.08
13	2.40	2.74*	1.84
14	1.20	0.10	0.07
15	2.40	1.64	1.12
16	1.20	0.11	0.07
17	2.40	1.09	0.75
18	1.20	0.08	0.06
19	2.40	0.11	0.08
20	1.20	0.12	0.08
21	2.40	0.14	0.10
22	1.20	0.04	0.03
23	2.40	0.13	0.09
24	1.20	0.11	0.08
25	2.40	0.14	0.10
总计	3.00	9.43	4.85

* 超标。

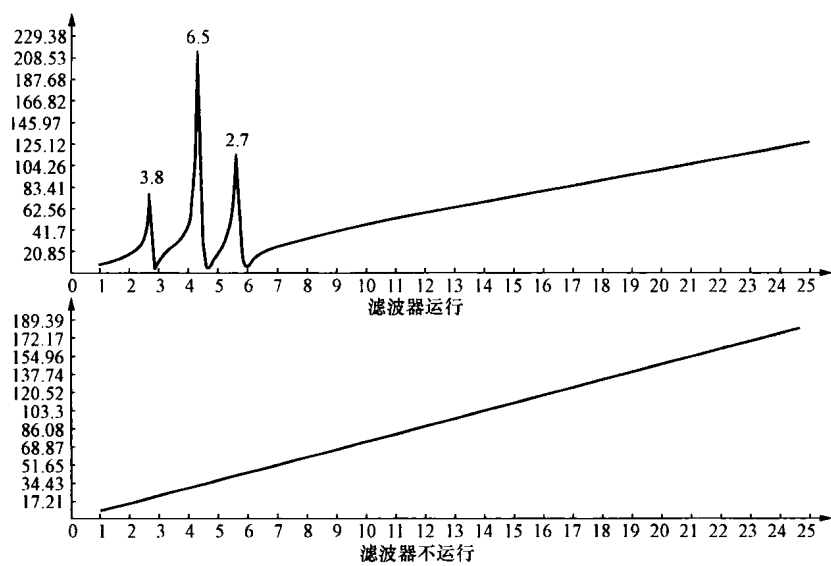


图 7-17 电网额定运行频率下 35kV 母线谐振特性

3. 变电站 110kV 母线

110kV 母线也属于本工程考虑的次要目标，在电网额定运行频率下母线谐振特性如图 7-18 所示，滤波器投运前后 110kV 母线谐波电压水平变化见表 7-22，分析表 7-22 可见：滤波器投入运行之后，对 110kV 基本没有大的影响，仅仅有轻微改善。

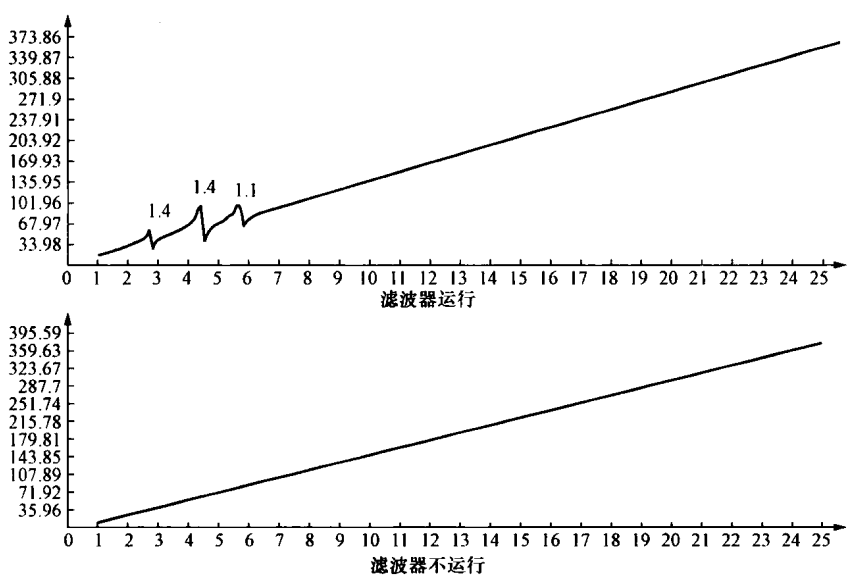


图 7-18 电网额定运行频率下 110kV 母线谐振特性

二、等值频率偏移±2%时的滤波效果

经分析，等值频率偏移-2%情况下，滤波效果完全满足 10kV 母线的滤波要求，优于 50Hz 情况，不出现特征谐波的放大现象。

表 7-22 滤波器投入前后 110kV 母线谐波电压变化表

次数 (次)	电压标准 (%)	未投滤波器 畸变率(%)	投入滤波器 畸变率(%)
2	0.80	0.14	0.15
3	1.60	2.88*	2.59*
4	0.80	0.06	0.07
5	1.60	3.64*	2.96*
6	0.80	0.13	0.09
7	1.60	2.80*	2.36*
8	0.80	0.09	0.08
9	1.60	1.31	1.20
10	0.80	0.06	0.05
11	1.60	1.66*	1.46
12	0.80	0.07	0.06
13	1.60	1.66*	1.49
14	0.80	0.05	0.05
15	1.60	1.62*	1.52
16	0.80	0.08	0.07
17	1.60	0.42	0.35
18	0.80	0.05	0.04
19	1.60	0.06	0.05
20	0.80	0.07	0.06
21	1.60	0.15	0.15
22	0.80	0.04	0.04
23	1.60	0.07	0.06
24	0.80	0.04	0.04
25	1.60	0.08	0.07
总计	2.00	6.28	5.42

* 超标。

通过分析，得出下述结论：

- 1) 应禁止 5 次支路单独切除的运行方式；
- 2) 应避免 5、7 次同时切除的运行方式；
- 3) 3 次单独切除滤波系统可短时运行；
- 4) 7 次单独切除滤波系统可较长时间运行。

第四节 滤波装置测量保护要求

一、控制基本要求

(1) 各支路接地开关与相应的断路器应有机械或电气连锁措施，防止接地开关误操作，确保工作人员安全；

等值频率偏移+2%情况下，滤波效果也完全满足 10kV 母线的滤波效果要求，此条件下的滤波效果劣于 50Hz 情况；不出现特征谐波的放大现象。

三、非正常状况下的几种运行方式

该补偿站共设 3 个支路，其中 3 次支路由单独断路器控制，5、7 次支路合用一台断路器。滤波装置的投切必须遵循以下原则：

- 1) 投滤波装置时，必须先投低次，再投高次；即先投 3 次支路，再投 5、7 次支路；
- 2) 切滤波装置时，必须先切高次，再切低次，即先切 5、7 支路，再切 3 次支路。

但是在实际运行过程中，不可避免地会出现某一支路的设备因某种原因而使该支路退出运行的情况，那么此时剩余设备能否安全可靠运行是运行部门普遍关心的问题。因为一个支路的退出，改变了整个网络的阻抗—频率特性，从而改变了各支路的负荷情况，有可能造成谐波放大和相应的过负荷问题。因此必须对剩余设备的运行从量值上作一分析，以确保补偿站安全可靠地运行。

滤波支路的退出运行分以下几种情况：

- 1) 3 次支路单独退出运行；
- 2) 5 次支路单独退出运行；
- 3) 7 次高通单独支路退出运行；
- 4) 5、7 次同时退出运行。

(2) 各滤波支路网门与相应的断路器应有机械或电气联锁措施，以防止工作人员误入带电间隔；

(3) 考虑到滤波装置的具体运行特点，两次合闸间隔不应小于 10min，严禁重合闸；

(4) 考虑到滤波装置的具体要求，分闸顺序确保为：先分高次，再分低次；合闸时先合低次，再合高次。

二、测量基本要求

宜测量下述电气参数：

(1) 3 次滤波支路。

- 1) 分别监测 A、B、C 三相电流，信号取自本支路 TA；
- 2) 监测无功功率及无功电度，信号来自本支路 TA 及 10kV 母线 TV。

(2) 5、7 次滤波支路。

- 1) 分别监测 A、B、C 三相电流，信号取自本支路 TA；
- 2) 监测无功功率及无功电度，信号取自本支路 TA 及 10kV 母线 TV。

三、保护基本要求

滤波装置的保护实际上主要是针对电容器的保护。宜设置下述保护：

(1) 过电压保护。GB/T 11024.1—2010《标称电压 1000V 以上交流电力 系统用并联电容器 第 1 部分：总则》规定的过电压倍数与电容器允许运行时间见表 7-23，应据此配置过电压保护。

(2) 低电压保护。当母线电压失压或因某种原因而降低到额定电压的 50%~60%时，若重新供电或电压又恢复正常，可能使电容器上承受较高的合闸过电压，因此宜设置低电压保护。当母线电压降低到额定电压的 60%时瞬时跳闸。

表 7-23 电容器过电压运行要求

过电压倍数	允许运行时间
1.1	长期
1.15	30min
1.2	5min
1.3	1min

(3) 滤波支路电流定时限速动保护。根据电容装置速断保护设置规则，速断保护主要用于保护电容器连线母线发生三相（两相）短路或电容器顶端与断路器连接线间三相（两相）短路，时限整定应能躲过涌流。

(4) 滤波支路过负荷保护。为了避免滤波电容器长期运行于过负荷状况下而损坏电容器，宜设置过负荷保护。

(5) 电容器内部故障保护。此类保护由电容器供货厂家配套，一般包括以下两种：

- 1) 单台外熔丝保护；
- 2) 借用放电装置的差压或开口三角电压保护。

第五节 主设备原理接线及平面布置

一、主设备原理接线

滤波装置主设备原理接线如图 7-19 所示。其中两台开关柜用该站原电容补偿真空开关柜。

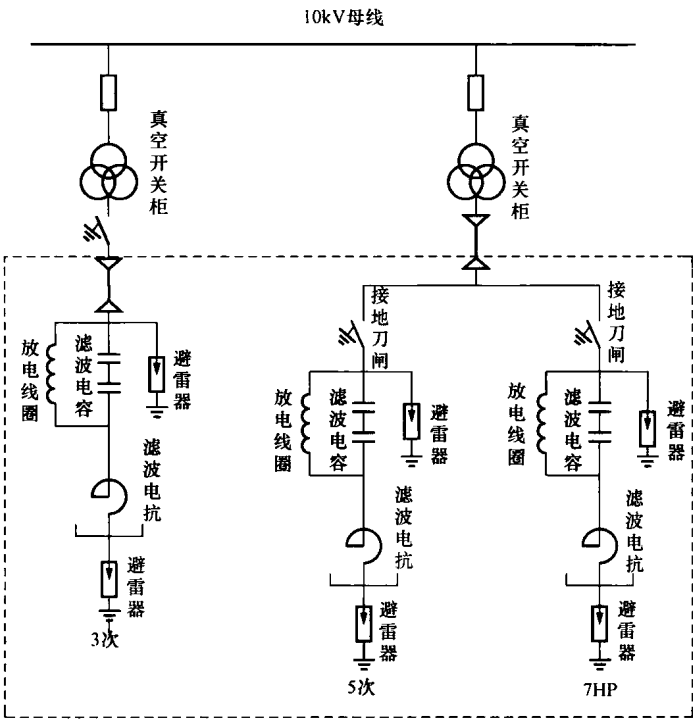


图 7-19 滤波器主设备原理接线图

二、滤波器平面布置图

滤波装置的布置应考虑：

- 1) 设备绝缘距离要求；
- 2) 有利于接线原则；
- 3) 具体的现场情况。

为了尽可能减少占地面积，本设计暂提出设备分层布置的思路，并依此考虑设备平面布置如图 7-20 所示，其中滤波器总占地面积：长×宽=10m×9m。

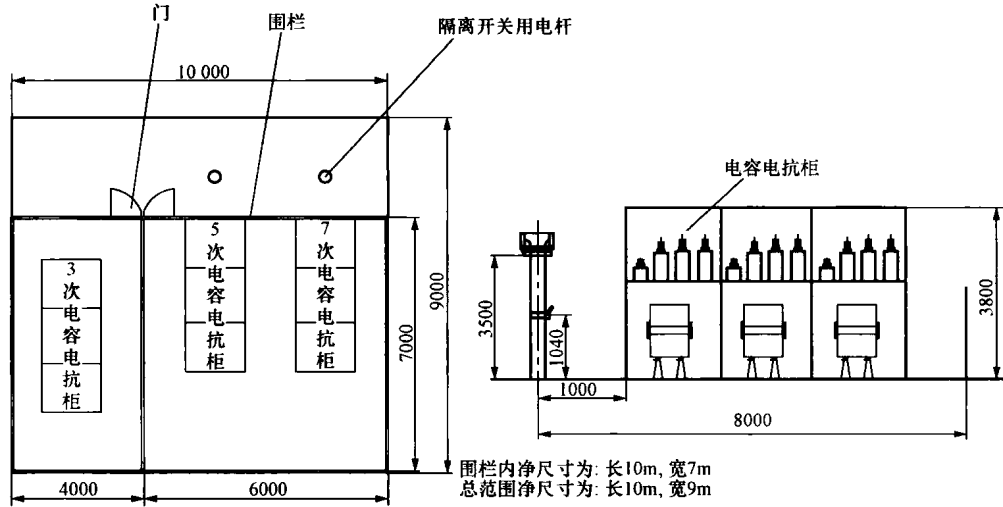


图 7-20 滤波装置设备平面布置图

三、投运情况

2009年8月,工程投运,测试数据完全达到设计要求。一切运行正常。

投运前按下述顺序进行检查,一切合格后方可投运。

- (1) 确保3次支路、5+7次支路断路器处于断开位置。
- (2) 确保3次、5、7支路各隔离开关处于断开接地位置。
- (3) 检查所有设备型号、参数、接线是否准确无误。
- (4) 检查前期现场下述测试数据:

1) 各支路每相滤波电容器组组装后与额定值允许误差不大于 $\pm 1\%$,三相之间电容器电容值允许误差不大于 $\pm 1\%$ (若现场没有测试,检查是否有满足此要求的工厂预组装编号,现场安装是否按此编号安装);

2) 检查滤波电抗器位置,调整其参数,各支路调谐到等值频率偏移 -1% 位置,即基波频率为49.5Hz。

- (5) 检查各保护回路前期调试结果是否满足要求。
- (6) 检查各断路器回路前期动作试验结果是否满足要求。
- (7) 检查各隔离开关前期动作试验结果是否满足要求。
- (8) 清理滤波支路栅栏内各种调试辅助设备,所有人员退出滤波支路室,关闭栅栏。
- (9) 依次投运3次、5次+7次支路隔离开关,使其处于运行状态。
- (10) 合闸3次支路断路器,观察其回路电压、电流、功率表有无异常。
- (11) 3次合闸完成后,合闸5+7次支路断路器,观察其电压表、各支路电流表、功率表显示是否正常。
- (12) 上述各步骤任一项有问题,则切断电源,终止投运,检查设备。
- (13) 上述各步骤实行操作监护制度,需有投运记录。

暂态电能质量控制

随着信息工业的发展及其工业自动化水平的提高,暂态电能质量问题已经成为影响工业生产工程的最主要问题。本章选择目前广受电压暂降危害的芯片制造业及变频电机负荷,以工程实例说明解决暂态电能质量问题的基本方法。

第一节 某芯片封装企业电压暂降抑制方案论证分析

一、项目背景

该企业为芯片封装、检测企业,供电原理示意图如图 8-1 所示。其负荷分为敏感负荷(不得停运)及可停运 5min 负荷两种类型。该企业有自备柴油发电机,但从启动到供

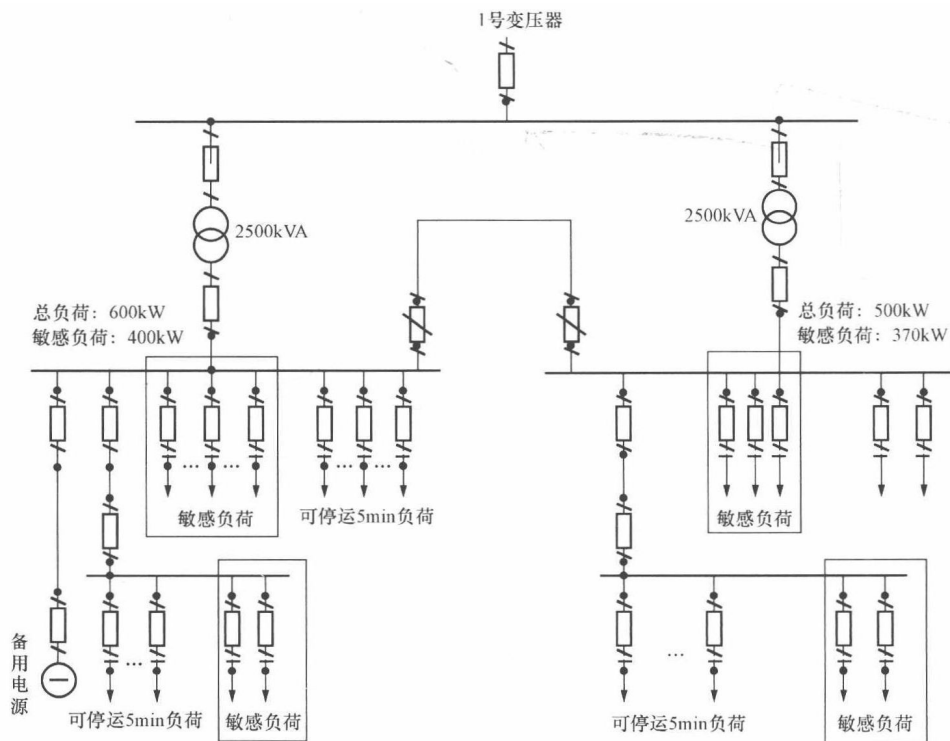


图 8-1 某芯片封装企业供电原理接线图

电需要 17s, 作为应急电源仅供应紧急负荷。

现场实地了解, 近年来电压暂降造成的事件主要为:

1) 2009 年 3 月 4 日, 现象为照明灯闪烁, 随即出现部分计算机重启动, 主要敏感设备停止运行, 感觉持续 1s 左右;

2) 2009 年 3 月 5 日, 感觉持续时间稍长, 原因由外部企业供电故障引起;

3) 2008 年 11 月 26 日, 发生持续 1s 左右的电压闪络, 造成敏感设备停机。

企业期望: 补偿装置至少支撑 5s 时间, 电压暂降幅度按 100% 考虑。

二、现象分析及目标确定

1. 事件特征提取

根据企业事故描述, 目前发生的三次暂态事件均表现为图 8-2 所示特征。

1) 事件诱因: 外部供电电源瞬态事故引起系统电压异常发生;

2) 事件后重合闸恢复供电;

3) 电压降至 10% 以下持续时间几秒钟左右;

4) 敏感设备停运, 影响产品线正常生产。

2. 项目要求及约束条件

本项目的主要技术约束条件表
现为:

(1) 要求在下述条件下给敏感负荷提供充足的电力供应:

1) 电压暂降幅度按 100% 考虑, 补偿装置最少支撑 5s 时间;

2) 电压暂升情况下设备不至于损坏停机。

(2) 客观因素约束:

1) 敏感设备、非敏感设备接于同一母线;

2) 敏感设备、非敏感设备供电间隔非集中布置。

3. 约束条件分析

上述“项目要求及约束条件”(1) 要求: 补偿装置在电压短时中断条件下要求能够提供有功支持, 也就是它本身必须是一种有功电源。

上述“项目要求及约束条件”(2) 要求:

1) 若要集中补偿, 需将敏感负荷供电与非敏感负荷供电分开, 必须改变现有负荷的接线方式;

2) 若不希望改变现有负荷供电接线方式, 只有采用单个负荷补偿的分散补偿方式。

三、可行性方案分析

以下在考虑上述约束条件下分析现有市场存在的各类抑制方案是否满足本方案的要求, 在此基础上, 给出适合该项目约束条件的基本方案。

(一) 方案选择

1. 动态电压恢复器

动态电压恢复器 (Dynamic Voltage Regulator, DVR) 是首先想到的方案之一, 但

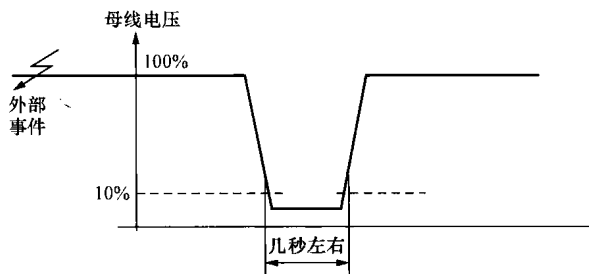


图 8-2 电压事件特征示意

是要实现供电完全中断的补偿，其条件是功率单元足够大。

目前，DVR 一般多应用于不低于 50% 暂降的补偿场合。因此，对于本项目要求的电压完全中断条件并不理想。

2. 低压静止串联补偿器

低压静止串联补偿器（Low Voltage Static Series Compensator, LV-SSC）该技术属于面向对象的补偿装置，主要应用在 380V 电压等级，针对具体的负荷特点进行配置。原理接线图如图 8-3 所示。

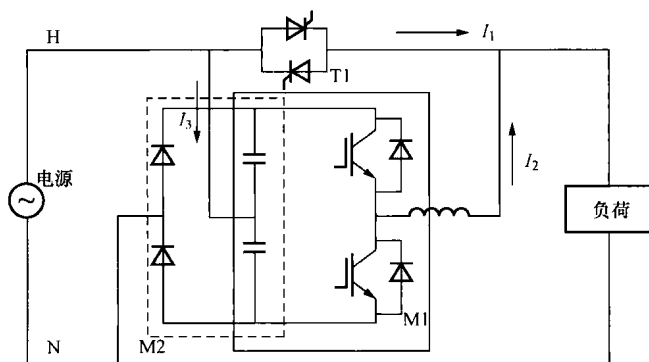


图 8-3 LV-SSC 示意图

电源正常情况下，T1 通过 I1 路径给负荷供电，M1 模块热备用，M2 模块给电容器储能；当外部电源出现异常时，T1 关断，M1 模块将电容器的储能通过 I2 路径供电给负荷；电源恢复正常后又回复到 T1 供电，M1 热备用。

根据美国电科院 2000 年电能质量监测分析收集的数据表明：用户遭受电能质量事故 92% 是电压暂降，其持续时间为 20ms~2s。该类产品就是基于这些调查数据，主要为抑制电压暂降而设计的。该类设备的反应速度极快（<2ms），免维护；但不能保护长时间掉电的情况。一般情况下的保护时间为 0~200ms。

可见，针对该项目，该方案可评价为：

- 1) 良好的面向对象的补偿设备，可以不改变原有电力接线结构；
- 2) 遗憾的是，现有产品一般不适应完全的电力中断事件，中断期间最大持续时间目前还不超过 200ms。

3. 不间断电源（UPS）

不间断电源（Uninterruptable Power Supply, UPS）也属于面向对象的补偿装置。UPS 是为长时间掉电设计的，作为后备电源用。假如是长时间掉电，最好的选择只有 UPS。UPS 的保护时间取决电池的容量，典型设计为 10s~3min。

考虑到本方案约束，只有 UPS 能够满足要求，其余方案均存在缺陷，分析如下：

- 1) 只有 UPS 才能满足供电中断支撑 5s 的供电需求；
- 2) 只有 UPS 才能满足电压暂降、暂升、短时中断的要求；
- 3) UPS 可分散补偿，也可集中补偿，以适应不同接线方式。

（二）具体方案

1. UPS 类型选择

根据 GB/T 7260.3—2003《不间断电源设备（UPS）第 3 部分：确定性能的方法和

试验要求》的附录 B 定义, 将 UPS 运行分为: 双变换运行、互动运行、后备运行三类运行方式。

(1) 双变换 UPS。GB/T 7260—2003 定义为“在正常运行方式下, 由整流器/逆变器组合连续地向负载供电。当交流输入供电超出了 UPS 预定允差, UPS 单元转入储能供电运行方式, 由蓄电池/逆变器组合在储能供电时间内, 或者在交流输入电源恢复到 UPS 设计的允差之前 (按两者之较短时间), 连续向负载供电”。也就是说, 这种 UPS 采用双变换模式 (如图 8-4 所示)。市电正常供电时, 交流输入经 AC/DC 变换转换成直流, 一方面给蓄电池充电, 另一方面给逆变器供电, 逆变器自始至终都处于工作状态, 将直流电压经 DC/AC 逆变成交流电压给用电设备供电; 市电非正常供电时, 蓄电池/逆变器组合按照设计的时间要求给用电设备供电。

在线式 UPS 具有极其优越的电气特性: 由于采用了 AC/DC、DC/AC 双变换设计, 可完全消除来自于市电网的任何电压波动、波形畸变、频率波动及干扰产生的任何影响。UPS 逆变器向负载提供毫无干扰的高质量的正弦波电源。

(2) 互动 UPS。GB 7260—2003 定义为: 在正常运行方式下, 由合适的电源通过并联的交流输入和 UPS 逆变器向负载供电。

也就是说, 在输入市电正常时, UPS 的逆变器处于反向工作 (即整流工作状态), 给电池组充电; 在市电异常时逆变器立刻转为逆变工作状态, 将电池组电能转换为交流电输出, 因此在线互动式 UPS 也有转换时间 (如图 8-5 所示)。但是, 互动式 UPS 对于来自市电网的频率波动、电压谐波失真和传导干扰等无实质性改善。

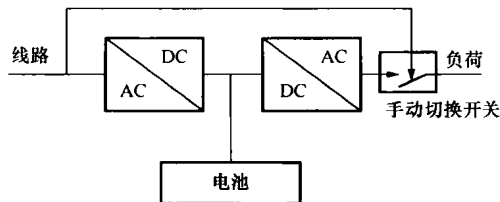


图 8-4 双变换 UPS

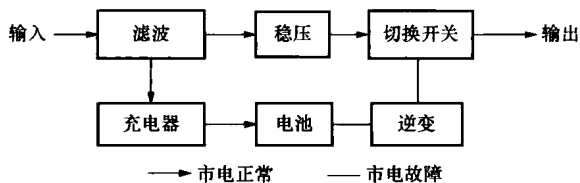


图 8-5 互动 UPS

(3) 后备 UPS。GB 7260—2003 标定义为: 在正常运行方式下, 负载由交流输入电源的主电源经由 UPS 开关供电。可能需结合附加设备 (例如铁磁谐振变压器或者自动抽头切换变压器) 对供电进行调节。这种 UPS 通常称为“离线 UPS”, 如图 8-6 所示。

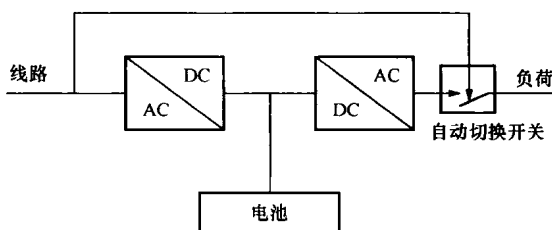


图 8-6 后备 UPS

这种运行方式的缺点是当存在暂态电能质量事件时, 其切换时间较长, 一般为十几毫秒甚至几十毫秒, 同时也具有互动 UPS 的缺点。

(4) 结论。比较上述 UPS 运行类型的特点, 考虑到本工程抑制电压暂降、暂升、短时中断的约束条件, 从技术角度选择双变换 UPS, 即通常所说的在线式 UPS。

2. 补偿设备配置

UPS 可采用“集中式”或“分散式”两种配备方式。

(1) 集中式补偿。所谓“集中式”，就是用一台较大功率的 UPS，为所有设备供电，这种方式虽然便于管理，但对于本工程而言，必须改变现有供电方式，可实施方案如图 8-7 所示。

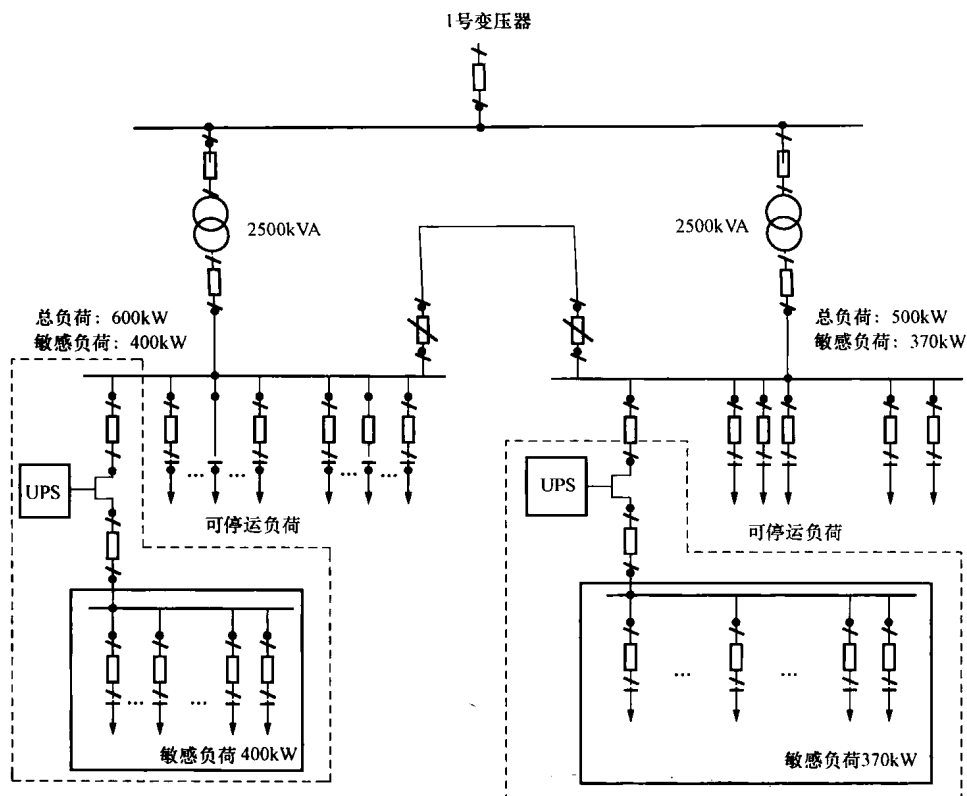


图 8-7 集中式解决方案示意图

该方案基本参数如下：

- 1) 需要 2 台 UPS。
- 2) 对于 400kW 敏感负荷，容量选取：560kVA；对于 370kW 敏感负荷，容量选取：520kVA。
- 3) 要求输入功率因数接近 1，输出功率因数不低于 0.9。

集中式方案评价：

- 1) 便于管理。
- 2) 由于 UPS 电源的单机容量大，系统的可靠性提升。
- 3) 但原供电结构需要改造。

(2) 分散式补偿。“分散式”配备方式在计算机电源保护方面是比较流行的一种配备方式，根据设备的需要分别配备适合的 UPS。本工程可实施的基本方案如图 8-8 所示。

分散式 UPS 的容量依据各回路负荷确定，一般可选取 $S_{\text{ups}} = 1.4 \times P$ ，其中 P 为有功。

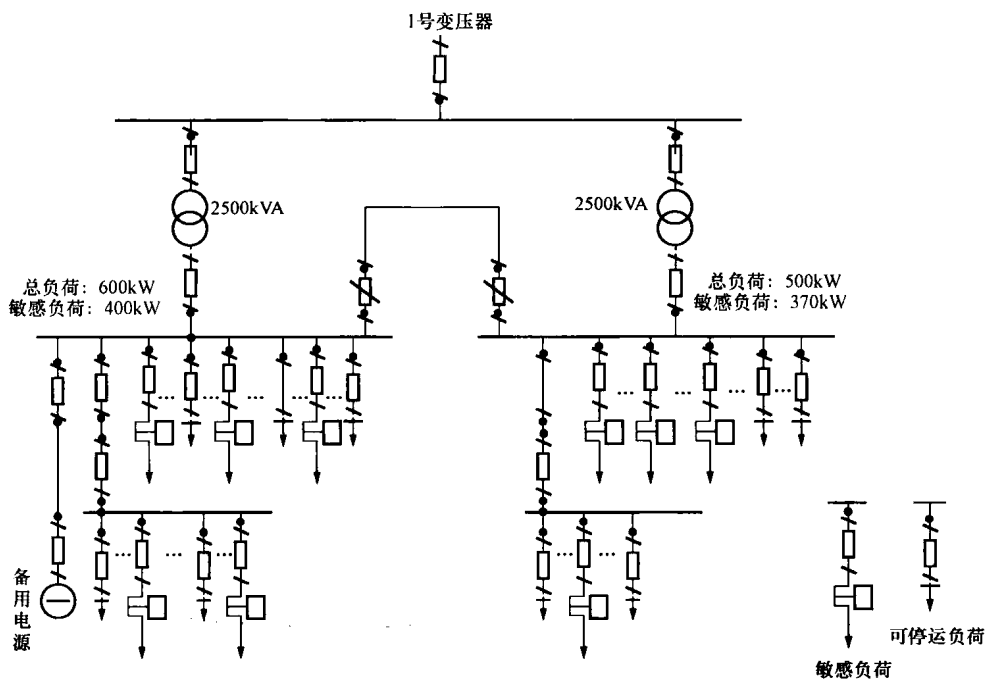


图 8-8 分散式解决方案示意图

分散方式评价：

- 1) 不便于管理；
- 2) 由于单机容量不大，因此可靠性不如集中式高；
- 3) 虽然总体供电结构不变，但每一回路都需要改造；
- 4) 综合造价比集中式高。

3. 推荐方案

依据上述分析，考虑基本约束条件，给出的最终推荐方案为：

- (1) 选择双变换 UPS 进行电压暂降、暂升、短时中断补偿；
- (2) 考虑到两种设置方式的比较，突破现有供电方案的约束，380V 各段母线考虑采取集中的补偿方式（对现有供电方案进行改造）；
- (3) 各敏感负荷的补偿容量按 $S_{\text{ups}} = 1.4 \times P$ 选取，停电支撑不小于 5s；
- (4) 通用技术要求见表 8-1。

表 8-1 通用技术要求

变 量	技术参数	变 量	技术参数
效率	不低于 90%	输出功率因数	不低于 0.9
输入电压	额定：AC230/400V	输出电压偏差（%）	±5
输入电压范围	±20%	电池类型	铅酸免维护电池
频率（Hz）	45~65 自适应	通信接口	RS232、485 或以太网
输入功率因数	接近 1		

第二节 某化工企业暂态电能质量抑制方案

一、问题的提出及现象描述

该公司是以煤为原料进行甲醇加工生产的大型企业，设计年产甲醇 60 万 t，主要生产工艺流程如图 8-9 所示，企业供电原理图如图 8-10 所示。

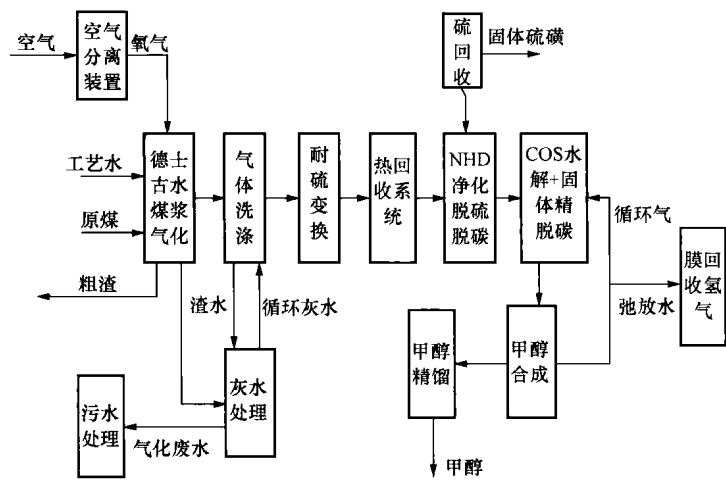


图 8-9 某甲醇生产公司主要工艺流程

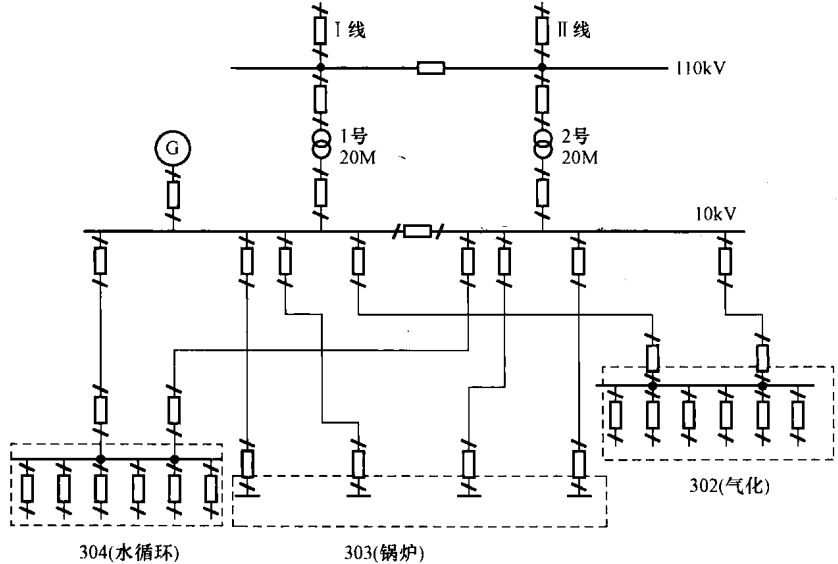


图 8-10 化工厂供电原理图

表 8-2 变频负荷列表		
负荷	有功 (kW)	型号
302 气化	3×160	
303 锅炉	24×2.2	
304 水循环	3×30	
307A	2×144	

1. 负荷特点

该企业 80%以上负荷为电动机负荷。其中 10kV 电动机均为普通电动机，380V 侧一部分为普通电动机，另一部分为变频电机。主要的变频电机容量及其位置见表 8-2。



全厂负荷目前为 14MW，其中自备电厂发电 8MW 左右，系统供电 6MW 左右。

2. 存在问题

目前主要存在问题如下：

1) 当供电电压瞬时低于 60% 情况下，变频器机回路接触器脱扣失电。

2) 2007 年 6 月 16 日 9 时许，系统供电电压上升至 123kV，9 时 05 分，无功补偿电容器跳闸；9 时 06 分，电压又突然降至 70.4kV，导致变频器跳闸。据分析，电压降低持续时间为 55ms，如图 8-11 所示。

3) 因供电电压的不确定性波动所导致的接触器动作、变频器跳闸严重地影响了生产工艺流程的连续性，造成较大的经济损失。

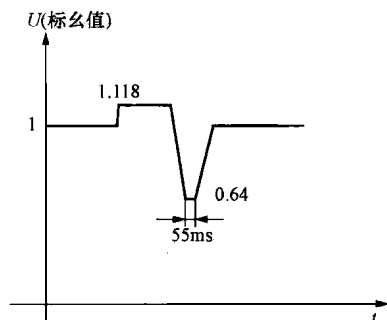


图 8-11 事件幅值—持续时间描述

二、变频器及其运行特点简析

变频器是利用电力半导体器件的通断作用将工频电源变换为另一频率的电能控制装置。目前使用的变频器主要采用交直交方式，即先把工频交流电源通过整流器转换成直流电源，然后再把直流电源转换成频率、电压均可控制的交流电源以供给电动机。变频器的电路一般由整流、中间直流环节、逆变和控制 4 个部分组成。整流部分为三相桥式不可控整流器，逆变部分为 IGBT、GTR 三相桥式逆变器，且输出为 PWM 控制，中间直流环节为滤波、直流储能和缓冲无功功率。现代变频器一般均有内部直流母线端子。

低压通用变频器电源额定电压 380V，输出电压为 380~650V，输出功率为 0.75~400kW，工作频率为 0~400Hz。

变频器控制的基础都是视直流母线电压为恒定。一旦直流母线电压降低，除造成转速、转矩、功率变化导致变频器性能下降之外，还可能导致电力电子器件过电流而发热增加。我们知道电力电子器件的最大弱点在于发热。要解决短时发热问题势必要增加器件的裕度，裕度的增加势必增加器件成本。因此，一般的变频器都具有过压、失压和瞬间停电的保护功能。变频器的逆变器件为 GTR 时，一旦失压或停电，控制电路将停止向驱动电路输出信号，使驱动电路和 GTR 全部停止工作，电动机将处于自由制动状态；逆变器件为 IGBT 时，在失压或停电后，将允许变频器继续工作一个短时间 t_d ，若失压或停电时间 $t_0 < t_d$ ，变频器将平稳运行；若失压或停电时间 $t_0 > t_d$ ，变频器自我保护停止运行。一般 t_d 都在 15~25ms。

一般引起中间直流回路低电压的原因主要来自以下两个方面：

(1) 电源输入侧的低电压。正常情况下的电源电压 380V，允许误差为 $-5\% \sim +10\%$ ，经三相桥式全波整流后中间直流的电压值为 513V，个别情况下电源线电压较小的电压波动，也不会造成变频器的低电压跳闸。

(2) 负载侧的低电压：大型设备启动和应用；线路过载。

三、接触器及其脱扣特点

接触器的一个主要参数即动作值，可分为吸合电压和释放电压。吸合电压是指接触器吸合前，缓慢增加吸合线圈两端的电压，接触器可以吸合时的最小电压。释放电压是

指接触器吸合后，缓慢降低吸合线圈的电压，接触器释放时的最大电压。一般规定，吸合电压不低于线圈额定电压的 85%，释放电压不高于线圈额定电压的 70%。

因此，在实际应用中，由于原理方面的限制，接触器在电压暂降发生时往往脱扣动作，切断电源供应，中断生产流程，造成较大的经济损失。

四、变频器电压暂降抑制的关键

分析表明，变频调速设备是对电压暂降最为敏感的设备之一。分析变频器的工作原理，变频器工作过程的控制是基于直流母排的直流电压进行的。因此只要在电力系统电压暂降发生时，能够对直流母排提供能量，支持直流电压水平，变频器就能跨越暂降，保持生产的连续性。

五、可采取的方案论证

结合化工厂供电系统原理图分析，该厂存在的主要问题表现如下：

(1) 供电电压因某种原因（系统的、其他用户的、自身的）产生电压暂降时，变频器欠压保护动作，生产工艺中断。

(2) 供电电压因某种原因（系统的、其他用户的、自身的）产生电压暂降时，接触器脱扣动作，生产过程中断。

(3) 就目前发生的暂降事件分析，其持续时间小于 100ms，暂降幅度不大于 50%。

因此，其补偿方案可设定 95% 概率事件表现为暂降深度不大于 50%、持续时间不大于 2s 进行方案确定。

(一) 直流支撑技术

考虑到变频器工作过程的控制是基于直流母排的直流电压进行的，现有的变频器一般对外引出直流母线端子，因此，可考虑支撑该直流母线电压为主要目标。

1. 蓄电池支撑

以蓄电池作为后备电源，如图 8-12 所示，电压暂降发生时，DC-bank 向 VVVF 提供直流电源，暂降过后，系统自动恢复正常工作，DC-bank 停止向 VVVF 提供直流电源。转换过程瞬间完成。

优点：该方法减少了 AC/DC、DC/AC 两次变换，硬件开销减少，不仅可抑制暂降，而且对短时中断也有效果。

缺点：有储能设备（一般为蓄电池），占地面积大，维护成本较高。

2. boost 暂降抑制

DC-boost 与 DC-bank 的区别在于没有储能设备，即没有蓄电池，增加了 boost 电路。因而不需要维护成本，也没有日常电池充电损耗。如图 8-13 所示。

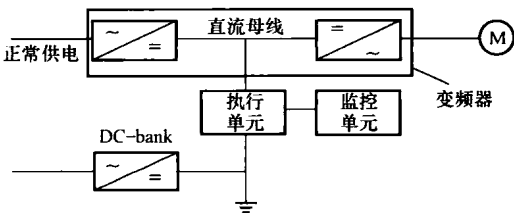


图 8-12 DC-bank 原理示意图

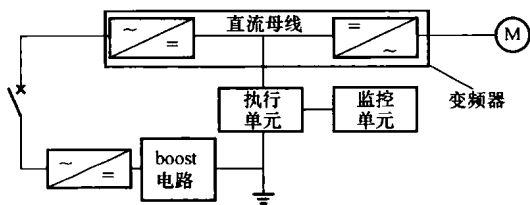


图 8-13 DC-boost 原理示意图

优点：无运行维护成本，占地面积小。

缺点：仅对 50% 深度的暂降有效果。

（二）面向对象的串联补偿技术

动态电压暂降修正器串联在电源和电气设备之间，一旦电压暂降发生，修正器将其修正为完美的正弦波输出给电气设备，保证其正常工作，如图 8-14 所示。

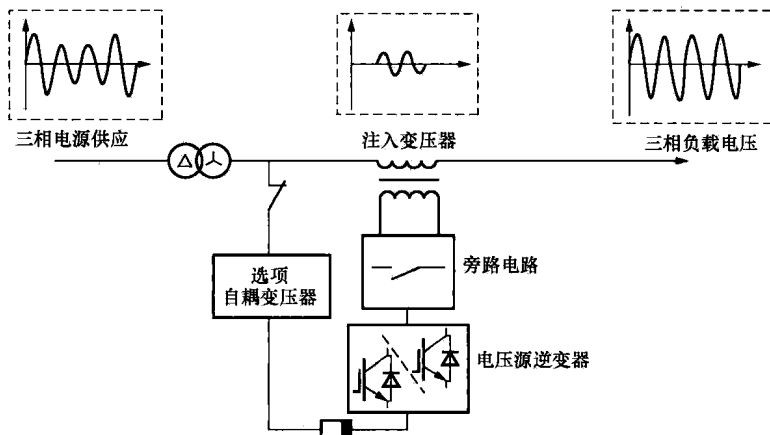


图 8-14 动态电压暂降修正器补偿原理图

该设备是专门为电压暂降设计的，无电池、免维护、使用寿命长。单相或两相电压暂降到 0，最大保护时间为 3s；三相电压暂降到 0，最大保护时间 200ms。其保护特点为：

- 1) 电压暂降深度至 50% 提供保护达 2s；
- 2) 电压暂降至 0V 提供保护达 3 个周波；
- 3) 增强型对电压暂降至 0V 提供保护达 12 个周波；
- 4) 电压暂降的动态反应时间小于 2ms。

缺点：价格高。

（三）接触器脱扣解决方案

分析表明，接触器在电压降低到 50%，持续 10~20ms 就跳开，带来很大的经济损失。解决这一问题最直接的办法就是设法取消电压脱扣功能，使其一直处于合闸状态。这样往往会造成负荷的群启动，使上游变压器、开关严重过负荷，造成更大范围和更长时间的供电中断。有些企业曾经因此蒙受巨大的经济损失。

考虑到实际过程中出现的电压暂降大多持续时间为不大于 100ms，一般不超过 2s，因此，在分析生产工艺的基础上，可采取下述措施：

- 1) 可选择具备欠电压延时脱扣功能的低压开关，延时范围为 0.3~5s 可调；
- 2) 可将原来的交流接触器更换为 GMD 系列接触器，并配置 AD 型延时断开装置，延时 1~4s 可调；
- 3) 采用国产某公司产品，接触器上插入延时器（空气延时），根据需要调整延时。

六、推荐方案

项目选 302（气化）3×160kW 变频电机进行电压暂降抑制。该三台电机运行方式为两主一备，即不允许三台电机同时运行。

推荐方案为采用动态电压暂降修正器，基本方案及其参数、补偿柜体尺寸如图 8-15 所示。

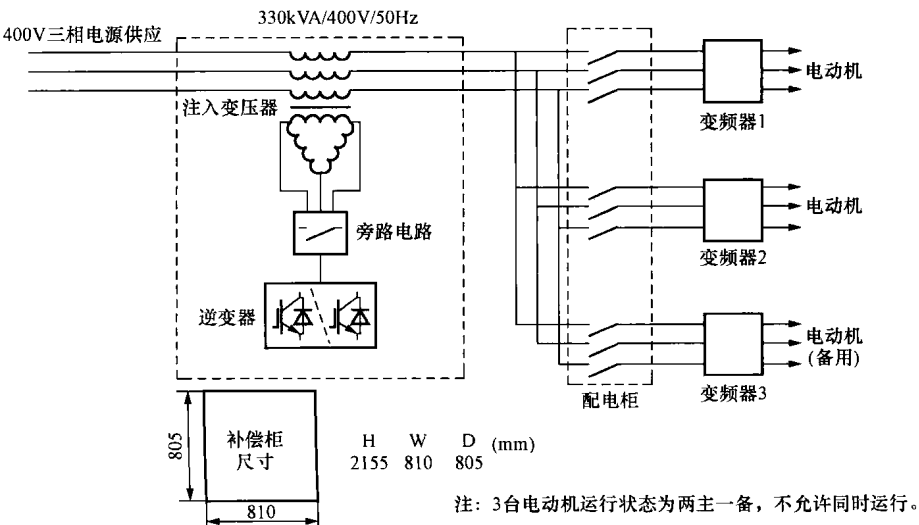


图 8-15 动态电压暂降修正器方案

七、最终实施方案

出于价格原因，厂家最终实施方案为：DC-bank 方案。基本参数为：补偿容量 320kW，电池：300A·h，三组，每组 44~45 节，占地面积 20m² 左右。

瞬态电能质量及其控制

随着大量电力电子设备的广泛应用及电力自动化水平的不断提高,特别是智能电网概念的提出,瞬态电能质量问题逐步浮出水面。在今后相当长的一段时间内,瞬态电能质量问题将会成为电力系统及其广大用户需要共同面对的迫切问题。

本章侧重于低压系统介绍了瞬态电能质量的基本概念及其危害,同时介绍了预防的基本思路。见于瞬态电能质量在国内的重视程度不够,故本章围绕 IEEE 相关文件对低压供电系统的浪涌环境进行了更多的介绍,便于瞬态电能质量的综合治理。

第一节 瞬态电能质量问题

本书所指的“瞬态”电能质量主要相对于暂态电能质量的“暂态”二字,从持续时间上给予划分,一般不超过半个工频周波,主要包括通常所说的、以峰值衡量的雷电过电压和操作过电压。其特征参数为幅值、持续时间、上升率。

一、瞬态电能质量的基本概念

表 1-1 给出了 IEEE 定义的瞬态电能质量的基本参数^[1],该文献没有给出瞬态的严格定义,指出其同义词为浪涌(surge),主要包括脉冲型和振荡型两种瞬态现象。

脉冲型瞬态是一种单极性突变,一般用上升时间和衰减时间进行表征。例如 1.2/50,即上升时间 1.2ms,衰减时间 50ms。大部分脉冲型瞬态现象是由雷电引起的,如图 9-1 所示。由于这一波形的高频特性,使得其在有电阻的电路中传播时衰减很快,也容易诱发系统谐振,产生振荡型瞬态现象。

振荡型瞬态现象是一种正负极性变化的突变现象,一般以幅值、持续时间、主要频谱(低频、中频、高频)特征进行描述。频率大于 500kHz 的为高频振荡多由系统操作引起,或由脉冲型瞬态现象诱发。电力电子转换电路也会产生高频振荡型瞬态现象,而且按照一定的频率重复出现;频率在 5~500kHz 之间的为中频振荡,例如背靠背电容器投入会产生这样的现象,如图 9-2 所示。当然,脉冲型瞬态现象也会诱发中频振荡瞬态现象;频率小于 5kHz 的振荡型瞬态现象为低频振荡,如图 9-5 所示。

在三相系统中,瞬态现象可能出现在线对地、中性线对地、线对中性线等之间。

二、瞬态电能质量国家标准

GB/T 18481《电能质量 暂时过电压和瞬态过电压》定义了瞬态过电压的概念,属

于瞬态电能质量的范畴。主要包括操作过电压和雷电过电压。

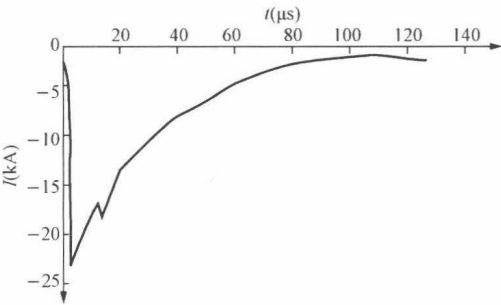


图 9-1 雷电引起的脉冲型电流波形

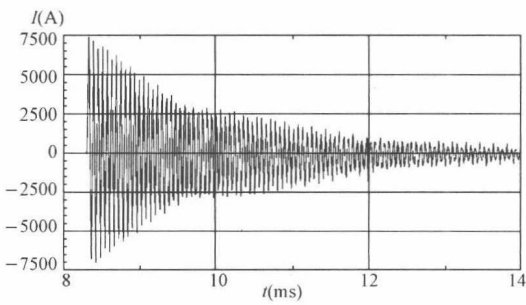


图 9-2 电容器背靠背投运引起的振荡型瞬态电流

操作过电压一般由断路器、开关的操作引起，不仅与电力系统结构、短路容量、参数、运行方式、故障条件以及各种安全自动装置的特性有关，同时与断路器（熔断器）性能、电力系统中性点接地方式密切相关。典型原因表现为：

- 1) 线路切、合与重合；
- 2) 故障与切除故障；
- 3) 开断容性电流和开断较小或中等的感性电流；
- 4) 负载突变。

操作过电压的特征一般包含下述几种波形：

(1) 缓波前（头）过电压。如图 9-3 所示，一般表现为单极性，峰值时间在 $20 \sim 5000 \mu\text{s}$ 之间，半峰值时间小于 20ms 。在电容器的投切、事故跳闸时可能发生这种现象，特别在切除空载线路（小电容电流）、切断电容器、事故切除三相线路时，还容易发生电弧重燃现象。

例如图 9-4 所示电路，系统阻抗主要表现为感性，单组电容投入运行。电容器端电压是不能突变的，当开关合上后，电路将强迫电容器端电压与系统电压在一个很短的时间内达到相等并保持稳定，存在一个瞬态过程，此时将出现一个数值很大、频率很高的涌流，同时伴随着操作过电压，其频率与涌流相同。假设电容器在系统电压峰值时投运，则其两端电压将很快从 0 电压、非充电状态过渡到系统峰值电压，过渡过程的过电压将达到 2 倍的系统电压，典型值为 1.8 倍（如图 9-5 所示）^[2]，一般历时半个周波，振荡频率为 $200 \sim 5000 \text{kHz}$ 。

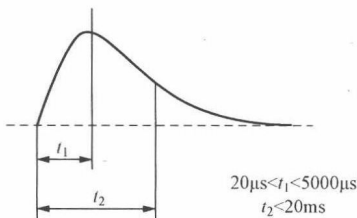


图 9-3 缓波前（头）过电压

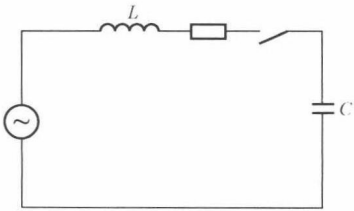


图 9-4 单组电容投入运行

(2) 快波前（头）操作过电压。一般也表现为单极性（如图 9-6 所示），波前时间在 $0.1 \sim 20 \mu\text{s}$ 之间，半峰值时间小于 $300 \mu\text{s}$ 。在打开具有串联电抗器的回路时，容易发生电

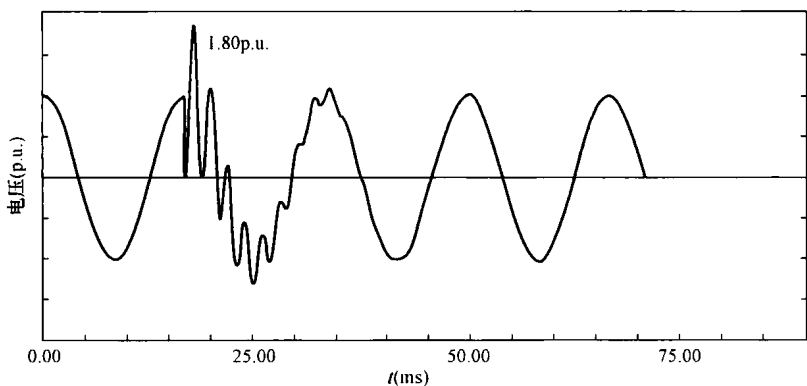


图 9-5 单组电容器投入运行产生的操作过电压

弧重燃，从而发生高频、高幅值的此类操作过电压，例如我国对切除电动机负荷、变压器、变压器并联电抗器补偿回路时，均有过电压限制。

(3) 陡波前（头）操作过电压。雷电过电压的持续时间一般在数十微秒左右，基本波形是：波头为快波头，波末按指数函数衰减。当雷落到架空地线、电力线、铁塔等物体上时，系统会产生雷电过电压，雷电波从雷击点向两个方向传播，其传播速度几乎为光速；即使没有直接雷击输电线路，也可能产生感应雷过电压，一般为陡波头，如图 9-7 所示。

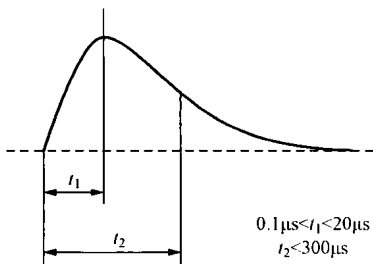


图 9-6 快波前（头）操作过电压

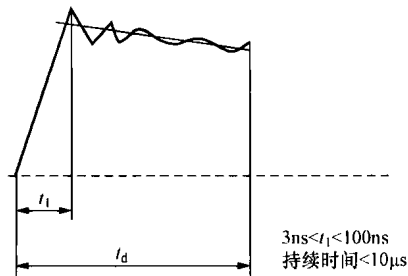


图 9-7 陡波前（头）操作过电压

实际上，浪涌不仅由雷击、外部系统操作引起，建筑物配电系统内部设备的开断运行，例如变频电机、复印机、PLC 等设备的操作运行更容易频繁引起内生振荡型浪涌。

第二节 瞬态电能质量的危害

随着智能电网概念的普及，电力系统及用电设备自动化水平将会提高到一个新的水平，微电子设备、电力电子设备将会广泛应用到电力、工业、商业、民用等各个领域，这些设备的运行均对浪涌现象极其敏感。因此，瞬态电能质量问题将会成为智能电网运行中的首要问题。

浪涌冲击对配电系统中的连接设备具有多种负面影响：从小到难以察觉的元件及线路老化，到电路板烧毁、设备报废等各种损伤。具体而言，电子设备中的半导体元件的接口最容易在系统浪涌下发生老化；其次，如果浪涌电压超过设备额定电压 2 倍以上，

绝大多数的半导体元件本身也会出现故障。另外，浪涌冲击对数据处理及传输设备也存在直接的影响，容易导致数据错误和元件故障。总之，配电系统中的浪涌（瞬变）冲击的危害可分为两个方面：硬件损伤；运行控制、数据处理发生偏差或错误。

浪涌危害的机制目前还没有完全清楚，但是其危害造成的后果却是有目共睹的。同时，由于浪涌传播的耦合方式广泛（直接耦合、感应耦合、电容耦合、电磁场渗透等），一种系统（例如电力系统）内的浪涌可以耦合到另外系统（例如通信系统）从而引起危害。一般来说，浪涌的危害从下述角度考虑：绝缘损坏、闪络、机械损伤、发热、瞬时峰值功率过负荷、 dU/dt 、 dI/dt 。表 9 - 1^[3]为反映浪涌参数可能引起危害的统计表。

表 9 - 1 浪涌参数引起危害统计表

设备类型		浪 涌 参 数					
		源阻抗	峰值	最大上升率	浪涌波尾持续时间	重复率	I^2t
绝缘器件	体积		×		×		
	裙伞数		×	×			
	裙边形状		×	×			
箝位 SPD	体积	×	×			×	×
	分界层		×				
短路开关型 SPD		×			×	×	×
半导体器件	晶闸管		×	×			×
	双向三端晶闸管	×	×	×			×
	IGBT		×	×			×
功率转换设备	直流级	×	×	×	×	×	
	其他				×		
数据处理异常			×	×		×	

注 图中×表示浪涌参数引起的危害与对应设备类型（参数）相关联。

（1）绝缘损坏。浪涌的主要危害之一是造成电气设备绝缘损坏。分析此类现象时，要善于发现事故的诱发点，也就是损坏首先是从什么地方开始的，从而根据损坏的发展及现象分析事故与浪涌峰值/时间、上升率等的一系列关系解释现象，采取措施予以补救。

（2）引起浪涌保护器损坏。大部分浪涌保护器的损坏与其通流能力有关，若其通流能力不足以转移浪涌电流，则可能发生损坏。

（3）引起电力电子器件损坏。例如晶闸管器件可能因脉冲型电压浪涌而导通，或者损坏器件，或者在不必要的时候接通主电路而引起事故。

（4）引起功率转换设备故障。例如浪涌引起直流回路滤波电容器电压升高而使得下级逆变器过早或不必要的动作（过电压或过电流保护触发）。

（5）数据处理设备功能紊乱。通过反映快速变化的 dU/dt 的电容耦合或 dI/dt 的感应耦合，浪涌可造成数据信号错误而引起危害。

另外，浪涌引起的地电位变化问题造成的危害更加复杂，本书暂不涉及。

根据浪涌的具体特征，其幅值、持续时间、变化率与设备的敏感度（产生危害）之间的关系如图 9 - 8 所示^[4]。该图将浪涌所在区域划分为 3 部分：无影响区、工作紊乱区、

损坏区。其中无影响区、工作紊乱区的边界以 dU/dt 划分, 反映电压的变化率。幅值不高但变化率大的浪涌将造成设备的工作紊乱; 工作紊乱区、损坏区边界以电压、电流对时间的积分划分, 反映浪涌的能量效应, 或引起闪络或绝缘破坏, 造成设备损坏。

无影响区即设备的功能没有丧失, 性能在所规定的范围之内。但是, 并不意味着没有潜在的风险, 此时设备的性能可能已经或将会大幅降低, 可能存在潜在的元件故障或设备故障等。设备工作紊乱区包含诸多情况, 但是均可通过设备自恢复、自动干预或人工干预恢复到正常运行状态。设备损坏区即在此区间的浪涌施加到电器设备时, 设备将永久性丧失其功能。

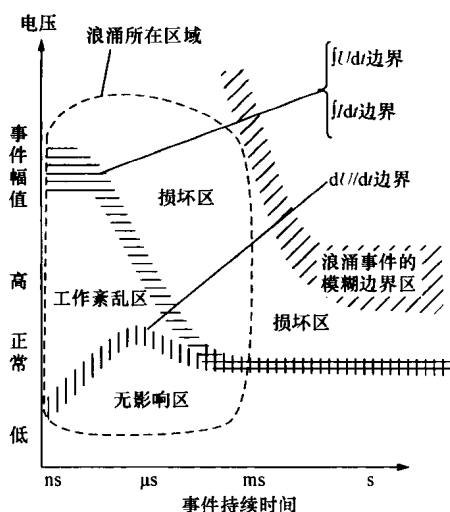


图 9-8 浪涌危害示意图

第三节 瞬态电能质量环境分析

关于低压系统浪涌问题, IEEE 系列标准^{[4][5][6]}进行了详细、广泛的研究探讨, 对于浪涌的预防控制有着重要的指导意义。该系列标准着眼于 1000V 及以下低压系统的浪涌现象, 其中文献 [4] 描述了浪涌环境, 文献 [5] 定义了浪涌抗扰度试验波形, 文献 [6] 规范了浪涌抗扰度试验步骤方法。本节将主要以这些文献为线索介绍浪涌的环境、传播、抗扰度试验等内容。

需要特别强调的是, 这里的浪涌主要侧重于进入低压建筑电气供电电路的瞬态现象。

一、瞬态电能质量环境

现实世界中浪涌产生的机制是什么? 它是通过什么样的途径侵入到低压建筑物供电电路的? 浪涌传播过程中会发生哪些变化? 本节简单分析这些问题。

(一) 瞬态电能质量的产生机制

目前, 低压系统浪涌的产生原因主要包括操作、雷电以及某一系统出现上述现象时对其他系统的相互作用。雷电的产生情景如图 9-9 所示, 包括直接耦合和非直接耦合两种机制 (如图 9-10 所示)。

系统正常或非正常操作均会诱发振荡型浪涌现象, 其振荡频率主要由系统的固有谐振特性决定, 振荡幅值由诸多因素包括电路参数、开关操作类型 (关、合、重合等)、负荷、开关类型 (真空、 SF_6) 等。一般开关在系统供电电压最大值时关合将产生最大操作过电压现象, 如图 9-11 所示。

为了便于浪涌的防护与控制产品的开发, 一般将浪涌环境划分为 2 种情景进行分析, 如图 9-9 所示。

(1) 情景 1. 非直接作用于建筑物, 包括雷电及外部操作, 其中雷电作用机制包括:

- 1) 雷电直接或间接接入供电系统, 作用于建筑物供电入口端;
- 2) 雷电通过电场、磁场的传播 (渗透) 进入建筑物, 感应耦合作用于建筑物内

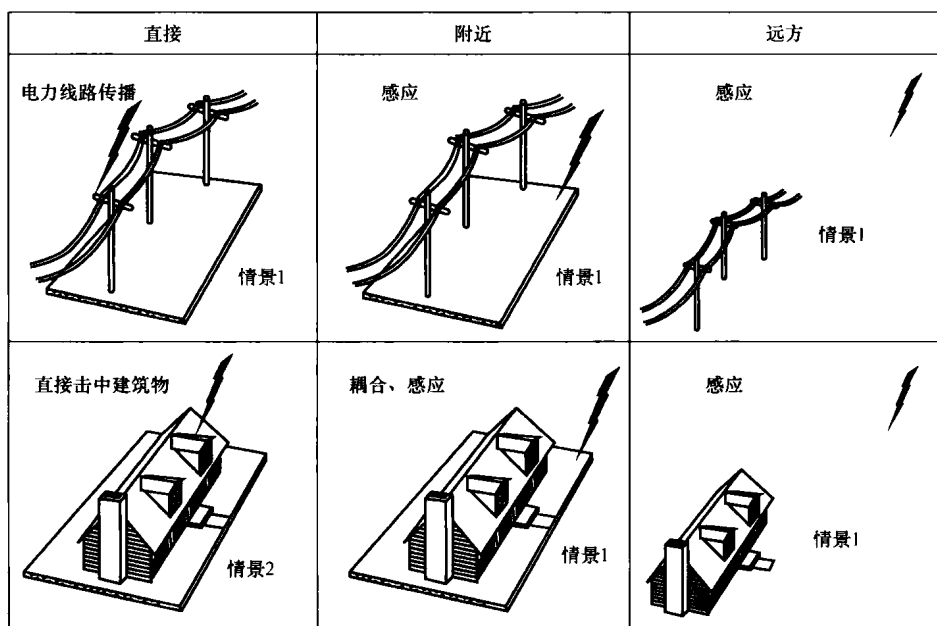


图 9-9 雷电产生情景示意

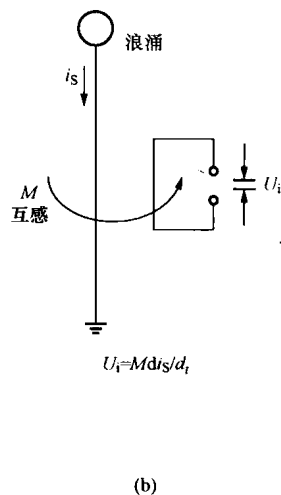
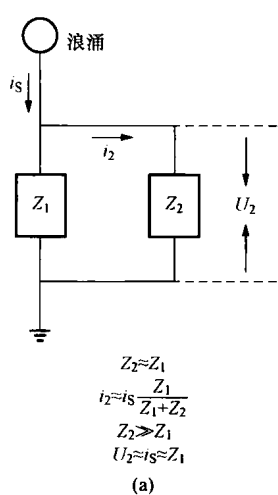


图 9-10 雷电耦合机制

(a) 直接耦合；(b) 非直接（感应）耦合

电路。

(2) 情景 2。雷电直接击中建筑物，存在下述引起浪涌的机制：

- 1) 直接进入供电电路；
- 2) 感应耦合进入供电电路；
- 3) 地电位的升高。

(二) 浪涌的传播

一般认为，操作产生的振荡浪涌可等效为电压源分析；直接雷击引起的浪涌和部分近距离雷击引起的浪涌可等效为电流源分析，部分近距离雷击引起的浪涌及远距离雷电引起的浪涌可等效为电压源分析。

电流源将依据电路定律寻找一切可能的路径向地电位传播。当遇到高

阻抗时（图 9-10 中 U_2 ），或上升初期 $\left(L \frac{di}{dt}\right)$ 将引起较高的过电压；遇到低阻抗通道将会迅速泻入。这也是浪涌保护的基本原理。

电压源的产生包括直接耦合和感应耦合，图 9-10 中 U_2 即为直接耦合产生的电压源浪涌， U_i 的产生即为感应耦合。

为了便于浪涌的控制及控制产品安装位置的确定，按电器设备与供电入口的距离以及浪涌在建筑物内的传播途径对情景 1 进行位置分类，如图 9-12 所示。其 A、B、C 区

间并没有一条明显的分界线，而是一个“带区”范围。浪涌电压源从建筑物供电入口传播中几乎不发生衰减（若入口遇到放电间隙时有一个明显的降低），浪涌电流源从建筑物供电入口传播中遇到强大的阻抗抵制（经过户内电源箱、表计时可能存在放电间隙），从而减少了进入户内电路的浪涌电流，浪涌上升速度越快这种效应越明显，其传播变化如图 9-13 所示。

对于极少发生的直接雷击建筑物情况（情景 2），浪涌电流从雷击点沿着各种可能的路径向大地泄漏，如图 9-14 所示。可见，情景 2 的雷电浪涌电流传输的主要路径是接地线、接地极，但是也有部分浪涌电流通过供电入口的 SPD（预防情景 1 浪涌）流入供电网络。

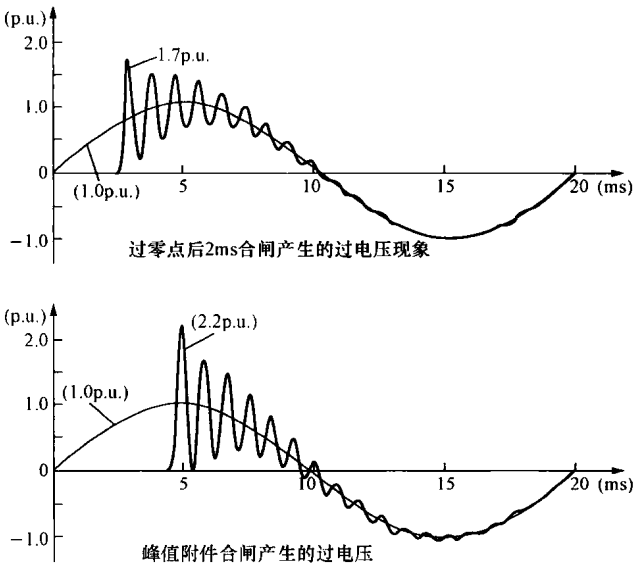


图 9-11 典型的操作过电压现象示意

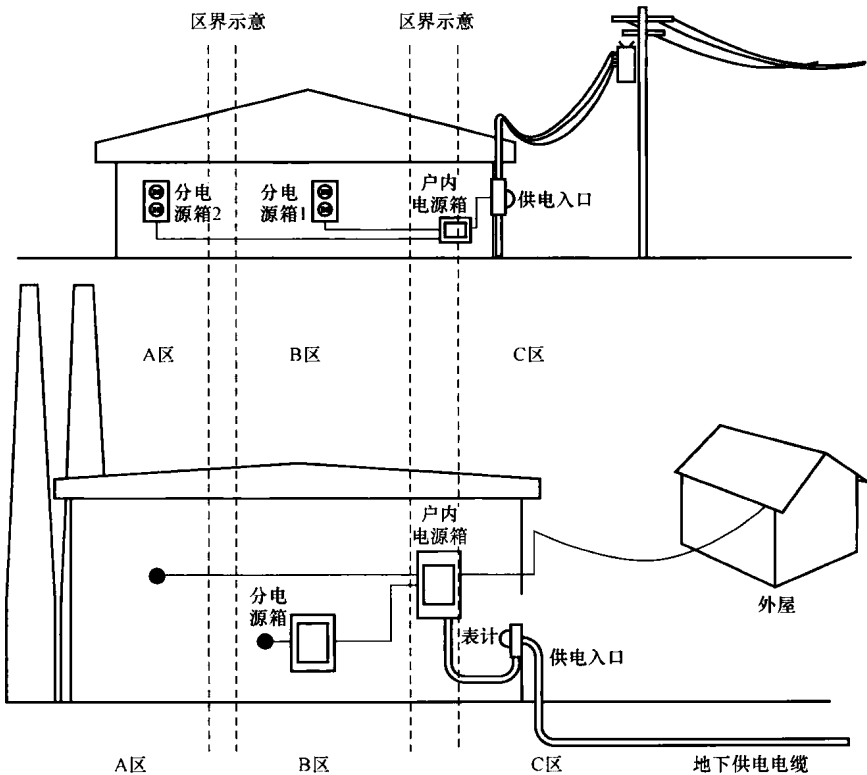


图 9-12 情景 1 浪涌位置分区图示意

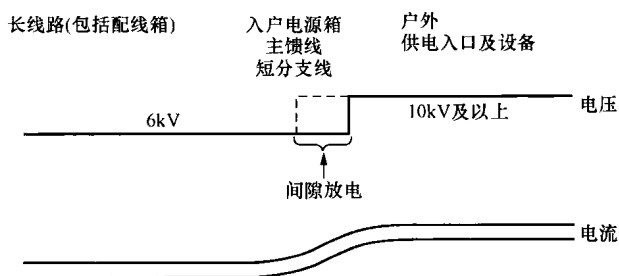


图 9-13 情景 1 浪涌电压、电流的传播

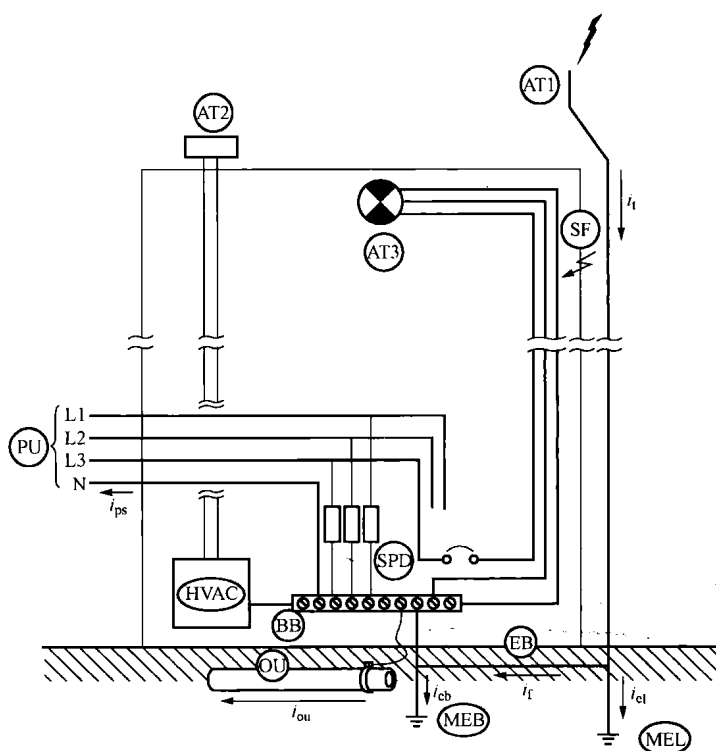


图 9-14 直接雷击建筑物浪涌电流的传播示意

AT1—雷电防护系统；AT2—通风、空调等其他设备空气外露端；AT3—浪涌传播中类似起到 AT1、AT2 作用的设备；SF—闪络；BB—设备连接端子；EB—接地端；MEB—建筑物接地极；MEL—雷电防护系统接地极；HVAC—加热、通风、空调等设备；SPD—安装在供电入口处的浪涌保护器；PU—供电网络的入口；OU—其他系统入口，例如水系统、通信系统等； i_t —总的雷电电流； i_{el} —进入电气设备中的部分雷电流； i_{el} —进入雷电防护系统接地极的部分雷电流； i_{cb} —进入建筑接地极的部分雷电流； i_{ps} —通过供电网络流出的部分雷电流； i_{ou} —经过其他系统流出的部分雷电流

二、瞬态电能质量抗扰度分析

浪涌现象是一个极其复杂的过程，其分析仿真过程存在诸多假设条件，许多问题还需要继续分析研究。浪涌环境下电器设备的抗扰度水平分析和浪涌保护设备（SPD）的性能评价也是需要规范的问题。

当然，要搭建一个与现实世界相同的浪涌试验环境是不可能的，但是如果通过某种

简化，选取有代表性的电压、电流波形代替浪涌的作用，以此来对设备、SPD 进行试验测评，从而获取实际环境中良好的运行效果，则不失为一条最佳的技术经济路线。

低压电气浪涌抗扰度试验代表波形汇总见表 9-2，下面分别予以解释。

表 9-2 低压电气浪涌抗扰度试验代表波形汇总

情景 1 (浪涌由建筑物供电入口侵入、或由建筑物内部产生)						情景 2 (直接雷击建筑物)	
位置分区	振荡波 100kHz	组合波	单一 电压/电流	阶跃波 5/50ns	长波 10/1000μs	感应耦合	直接耦合
A	标准	标准	—	附加波	附加波	振荡波	视具体情况
B	标准	标准	—	附加波	附加波		
C 低暴露	标准	标准	—	选择*	附加波		
C 高暴露	选择*	—	标准	选择*	—		

* 特殊情况下，当考虑对波头的响应时，或考虑可能引起设备工作紊乱时进行试验。

1. 标准试验波形

两种标准的试验波形包括：0.5μs~100Hz 的振荡波（图 9-15）和 1.2/50~8/20μs 的组合波（图 9-16、图 9-17），不同情景下波形参数的选择见表 9-3~表 9-6。其中振荡波主要评判设备的抗扰度水平，不侧重于通流能力；组合波主要用于 SPD 性能判断。

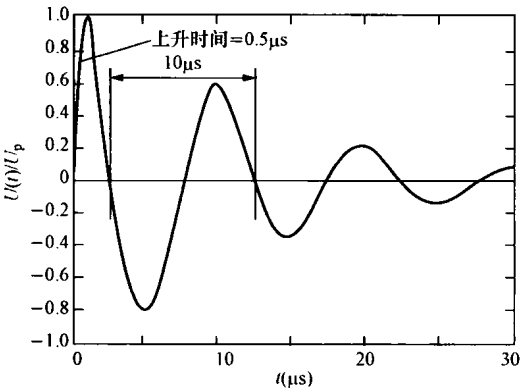


图 9-15 0.5μs~100Hz 的振荡波（开路电压）

表 9-3 标准 100Hz 的振荡波参数选择*

情况(1)分区	峰 值		有效阻抗** (Ω)
	电压(kV)	电流(kA)	
A 区	6	0.2	30
B 区	6	0.5	12

* 单相电路施加于：L-N、L-G、[L、N]-G
三相电路施加于：L-L、L-G、[L' s]-G
(N-G 施加参数见表 9-6)，下同。

** 有效阻抗定义为峰值电压与峰值电流的比值，下同。

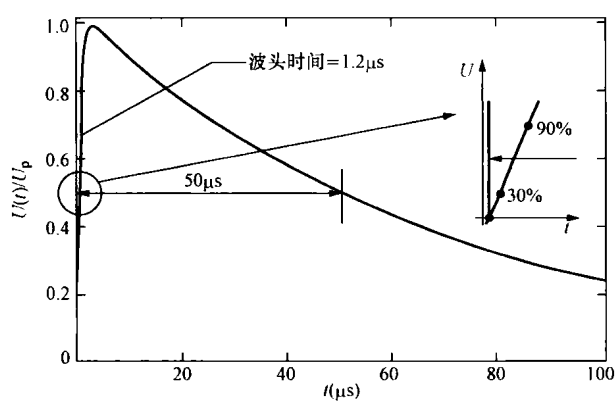


图 9-16 组合波：开路电压 1.2/50 μ s

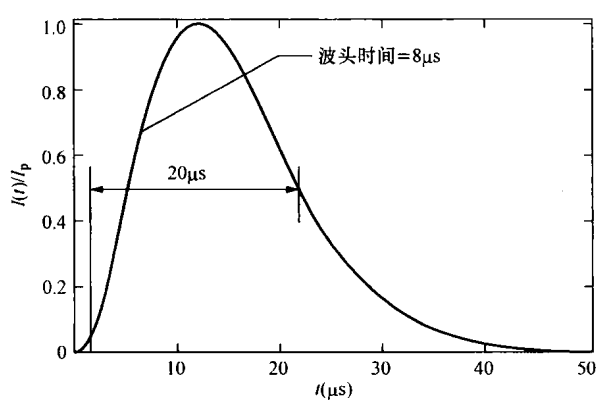


图 9-17 组合波：短路电流 8/20 μ s

表 9-4 1.2/50~8/20 μ s 组合波参数选择

情况(1)分区	峰 值		有效阻抗 (Ω)
	电压(kV)	电流(kA)	
A	6	0.5	12
B	6	3	2

表 9-5 情景 1 中 SPD 试验参数选择

雷暴程度	标准试验		选择试验
	1.2/50 μ s 最小开路电压(kV)	8/20 μ s 电流(kA)	100kHz 振荡波(kV) (用于对波头的响应评估)
低	6	3	6
高	10	10	6

0.5 μ s~100Hz 振荡波上升时间定义为上升沿 10%到 90%之间的时间段；频率周期定义为第一峰值过后第一个和第三个过零点之间的时间。

(2) 10/1000 μ s 长波。该波形如图 9-20 所示。上升时间 10 μ s 比较长，因此，忽略了传播途径的电感效应。但是其尾部 1000 μ s 很长，故主要用来测试组成设备的器件的通流能力。该波形测试施加参数不以情景 1 的分区进行考虑，而是以被关注点雷暴水平进行划分，如表 9-8 所示。

表 9-7 阶跃波施加参数 (注)

试验强度	峰值开路电压(kV)
低	1
中	2
高	3
X	协商

注 不同于 IEC 61000-4-4，其施加强度为 5 级，电压范围为 0.5~4kV。

表 9-8 10/1000 μ s 长波参数选择

暴露强度	峰值开路电压(kV)	有效阻抗(Ω)
低(居民系统)	无	
中(商业系统)	1.0 系统峰值电压	1.0
高(工业系统)	1.3 系统峰值电压	0.25

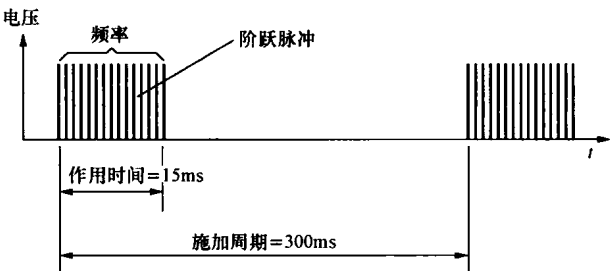


图 9-19 阶跃波的施加示意
峰值 ≤ 2 kV，为 5kHz
峰值 > 2 kV，为 2.5kHz

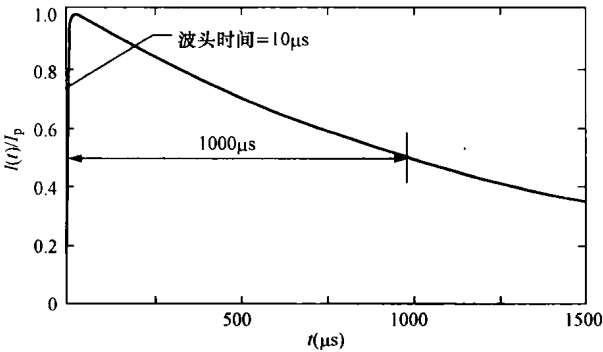


图 9-20 10/1000 μ s 长波示意

波头将产生较大的 Ldi/dt ，可进行抗扰度测试。

(1) 直接耦合雷电浪涌。其目的在于测试建筑物入口处 SPD 的通流能力。属于 IEC 61643-1: 1998^[8] 所定义的“class I test”。其试验参数见表 9-9。值得一提的是，该文献未定义所施加的波形形状。

(2) 感应耦合雷电浪涌。IEC 61312-3: 2000 定义了 0.25 μ s 波头的上升率。一般可采用情景 1 的 100kHz 振荡波进行测试。

3. 情景 2 浪涌抗扰度分析

情景 2 直接雷击建筑物现象虽然不常发生，但却是 IEC 61312-3: 2000^[7] 的基本内容，其特征参数一般包括：电流幅值；雷击电荷；释放能量。

情景 2 浪涌的产生包括直接耦合和感应耦合。直接耦合主要关注一次雷电波，由于其强大的雷电流，因此一般作为通流能力的考核；感应耦合一般关注后续雷电波，主要原因在于其陡峭的波

表 9-9 IEC 61643-1: 1998 所定义的 “class I test” 参数

I_{peak} (kA)	转移电荷 $Q(As)$ 10ms 时间内	I_{peak} (kA)	转移电荷 $Q(As)$ 10ms 时间内
20	10	2	1
10	5	1	0.5
5	2.5		

注 $Q(As) = 0.5 I_{peak}$ 。

第四节 瞬态电能质量控制

瞬态电能质量的控制主要有两个途径：①提高设备抗扰度水平，采取设备嵌入式抵抗手段；②外接浪涌保护设备。

浪涌保护器（Surge Protection Device，SPD）是目前低压系统瞬态电能质量控制的主要设备，其作用是限制电源外部雷电、系统操作导致的脉冲型浪涌，同时限制使用该电源的内部设备例如复印机、传真机、空调等操作导致的振荡型浪涌，避免被保护设备或系统受冲击而损坏。SPD 对于电子类设备的保护尤其重要。

一般的浪涌保护器件包括金属氧化可变电阻（MOV）、硅雪崩二极管（SAD）或 TRANSORB 二极管、气体放电管等。SPD 可为上述单一器件，也可包含上述多个器件。

MOV 是一种有效的电涌抑制器件，主要用来防止对设备的灾难性破坏，但响应时间较长，这意味着在保护电路发生作用前，可能有非常短暂的尖峰电流进入设备。因此单纯采用 MOV 设计的电涌保护器不适合保护含微处理器的敏感设备。目前市场上多数电涌保护器采用这种设计。

SAD 或 TRANSORB 二极管响应速度比 MOV 快，对浪涌反应非常灵敏，但这种元件的通流能力较小。

气体放电管响应时间长，但它能吸收大量的浪涌，设计中一般把它作为抑制浪涌的“最后一道防线”，防止前级没有滤掉的电涌的进入。

某种 SPD 产品设计中组合不同的元件对付不同类型的浪涌，或者在不同的时刻起不同的作用，从而通过组合发挥每个器件的最佳特性，克服各自的缺陷是浪涌保护产品的最佳选择。

就电力系统二次设备而言，例如各种微机保护、电力计量或 RTU 等，一般来说，虽然设备本身通过了电磁兼容所要求的浪涌抗扰度水平，但是由于下述原因，很多情况下仍经受浪涌的一次次袭击而损坏：

- 1) 抗扰度水平低，GB/T 17626.5—2008《电磁兼容 试验和测量技术 浪涌（冲击）抗扰度试验》规定的浪涌试验等级为 4 级，所施加的试验电压为 0.5、1、2、4kV；据统计，脉冲型浪涌电压在几微秒里可以从几百伏至 2 万 V 之间变化；振荡型浪涌电压可在几微秒至几毫秒内从几百伏至 6000V 之间变化。
- 2) 二次设备端口浪涌保护响应时间往往无法满足要求，或仅考虑脉冲型浪涌。
- 3) 由于浪涌保护的通流容量、响应速度、保护模式的缺陷无法起到应有的作用。

一、浪涌保护器的选择

从图 9-8 可见,浪涌保护不仅要从设备安全方面进行考虑,同时也需要从设备功能、性能方面考虑(工作紊乱区域)。因为即使设备没有永久损坏,但是若发生运行紊乱,同样可以造成巨大的损失。

实际上,针对信息技术类设备(Information Technology Equipment, ITE),图 2-53 给出的 ITIC 曲线的上部包含了 ITE 设备的浪涌抗扰度内容。其中 500%界限采用图 9-16、图 9-17 组合波在工频 90°峰值施加获取;(200%, 1ms)点、(140%, 3ms)点均采用模拟电容器投切的实际波形获取。因此,对于 ITE 设备的保护,可依据此曲线选择合适的 SPD。

一般来说,浪涌保护器的选择至少宜考虑下述因素:

- 1) 保护类型,即是限幅型,还是跟踪型;
- 2) 通流容量;
- 3) 残压;
- 4) 响应时间;
- 5) 保护模式,要求全模保护;
- 6) 安装方式。

下面选取几项作重点介绍。

(1) 保护类型。浪涌保护器是一种高效能的电路保护器,当它承受瞬态高压、高能量脉冲时,快速(可在 10^{-9} s 范围内,即纳秒级)由原来的高阻抗变为低阻抗,并将瞬变高压干扰脉冲抑制到预定电压,从而有效地保护设备和敏感器件不受损坏,电路工作不受干扰。目前,市面上存在两种类型的浪涌保护类型,即门限抑制型和主动跟踪型。

门限抑制型产品能够抑制正弦波峰值电压以上某固定值以外的浪涌掉,是有效保护电气设备的广泛方案,对外部产生的高能量脉冲型浪涌特别有效。工作原理如图 9-21 所示。

主动跟踪型主要针对负载切换产生的振荡型电涌和大功率脉冲型电涌,可对敏感/关键设备提供有效的浪涌和 EMI/RFI (Electro Magnetic Interference & Radiation Frequency Interference) 保护。该类型产品的浪涌抑制包络随着交流正弦波的变化而变化,可以快速探测浪涌并将它限定在正弦波包络的范围内,其工作原理如图 9-22 所示。

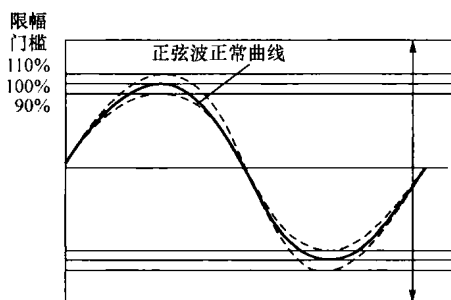


图 9-21 门限抑制型 SPD 工作原理示意

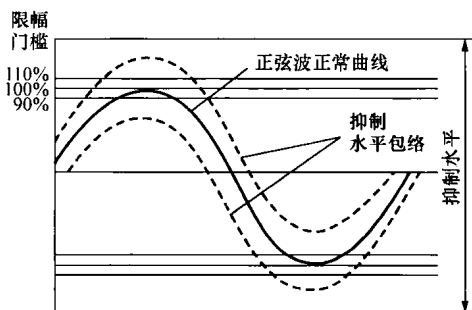


图 9-22 主动跟踪型 SPD 工作原理示意

- (2) 保护模式。应考虑浪涌至负载设备的所有可能路径提供浪涌保护设置,例如对三

相五线系统，L-L，L-N，L-G 和 N-G 共 10 个模式都要进行保护（称为全模式保护，如图 9-23 所示）。

无论差模、共模浪涌，全模式的浪涌保护均提供有效防护。当浪涌使 SPD 导通放电时，巨大的涌流瞬间流向中性线，使中性线电位上升，此时全模式保护将给中性线提供一个有效的放电电流通道。

（3）响应时间。浪涌保护器的响应时间必须比浪涌的速度快才能达到保护设备的目的。一般响应时间要求在纳秒级。

二、浪涌保护器的配置

据统计，约 20% 的浪涌属于脉冲型浪涌，来自外界雷电及外电网切换操作、周边大功率设备的启动运行等；约 80% 的浪涌属于振荡型浪涌，来自供电电源内部的设备操作、运行。如图 9-24 所示。

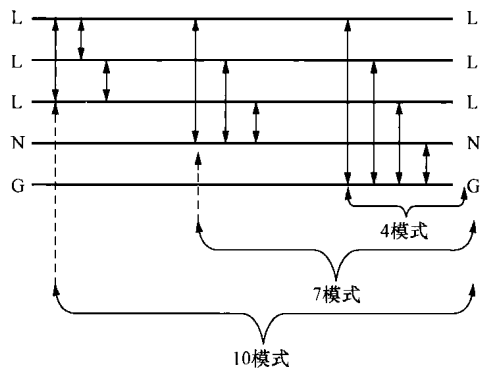


图 9-23 全模式保护示意

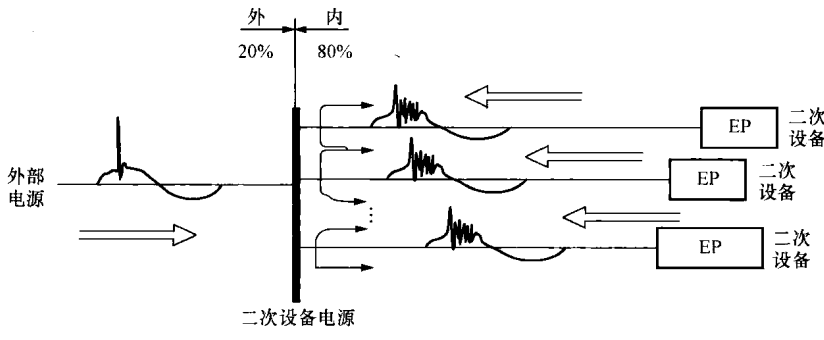


图 9-24 浪涌干扰分布及其流向示意

根据本章第三节浪涌的传播特性及其位置分区概念，从技术、经济两方面考虑，浪涌冲击可采用分级转移的办法：①可以在配电系统总开关柜处进行一级保护，将大部分浪涌电流消解导入地下；②在下游各配电板、支线配电板实施二、三级保护，完全消除进入配电系统的外来浪涌，保护线路及连接设备；③配电系统中的二、三级保护还要求有效抑制内生振荡型浪涌，阻断系统浪涌流窜的通路。

另外，外来浪涌对 UPS 电源及其连接设备存在严重威胁。这些浪涌可在某些情况下通过 UPS 电源静态开关的旁路进入配电系统，损伤电子设备。因此，在 UPS 电源及其旁路（包括手动检修旁路）的进线端，应该安装浪涌保护设备。

按照上述思想，以电力系统变电站二次系统电源浪涌保护为例（二次设备多为 ITE 设备），其配置方案可考虑如下：

（1）交流二次电源系统浪涌抑制。变电站交流二次电源浪涌抑制典型配置方案如图 9-25 所示。在交流二次电源进线柜总进线处分别安装浪涌抑制器（图中按两路电源配置，一般有几路电源，则安装几台浪涌抑制器）。图 9-26 为某变电站实际配置方案。

（2）直流二次电源系统浪涌抑制。直流二次电源浪涌抑制配置方案如图 9-27 所示。

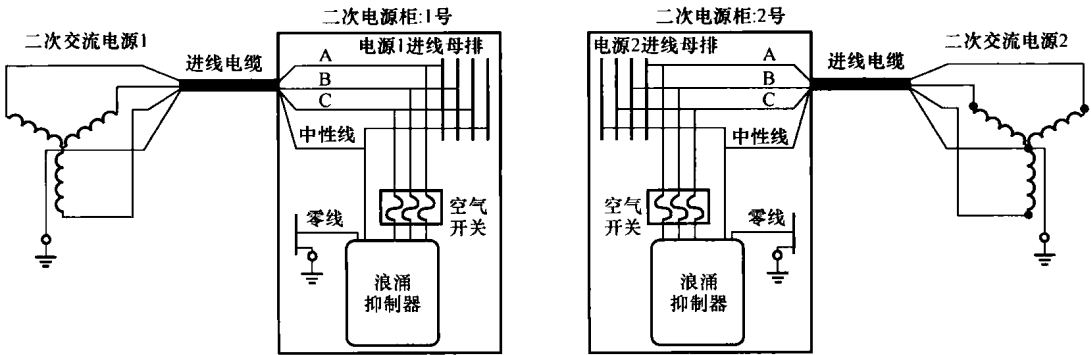


图 9-25 交流二次电源浪涌抑制典型配置方案

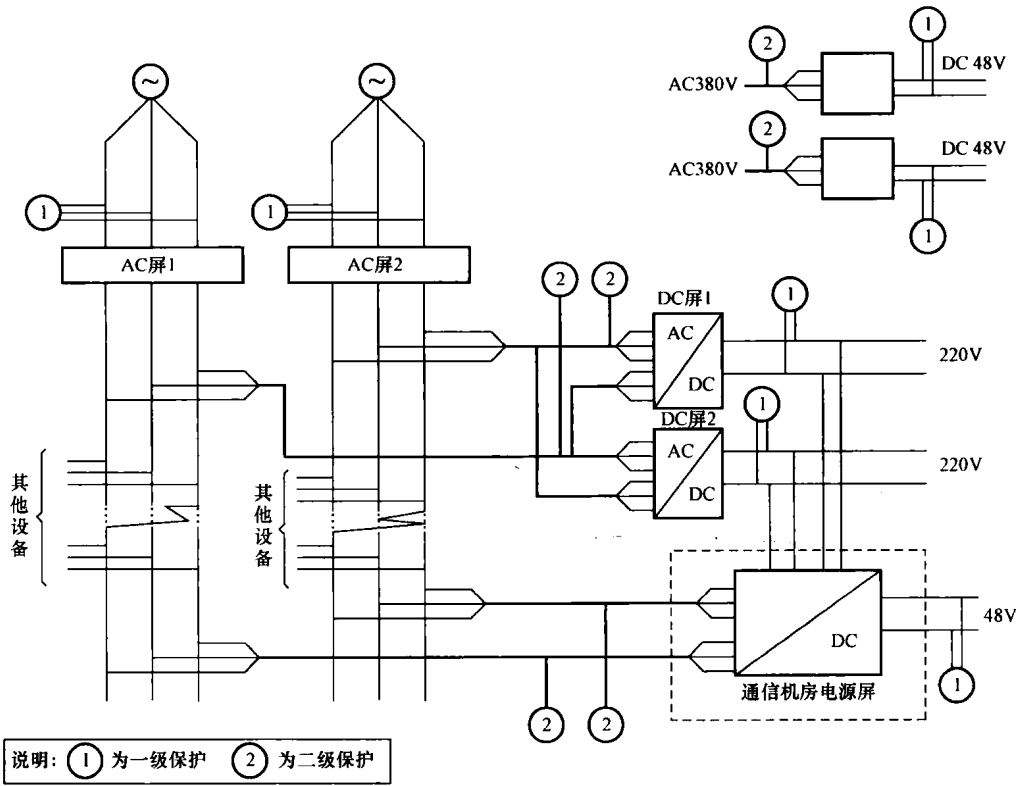


图 9-26 某变电站实际配置方案

在直流二次电源进线柜总进线处分别安装浪涌抑制器。图中按两路电源配置，一般有几路电源，则安装几台浪涌抑制器。

三、浪涌保护器的安装

浪涌保护器是否正确安装对其工作性能有直接关系。

由于浪涌保护器本身类似一个非线性器件，正常电网运行时相对于电网开路，只有在浪涌发生时才导通，提供低阻抗“转移坑”降低了浪涌电压，将浪涌电流转移至大地。因此，其接线回路电阻、电感特性对浪涌抑制会产生非常大的影响。

安装浪涌保护器时，浪涌保护器的导线长度应尽量简短（减小电阻），在布线过程中

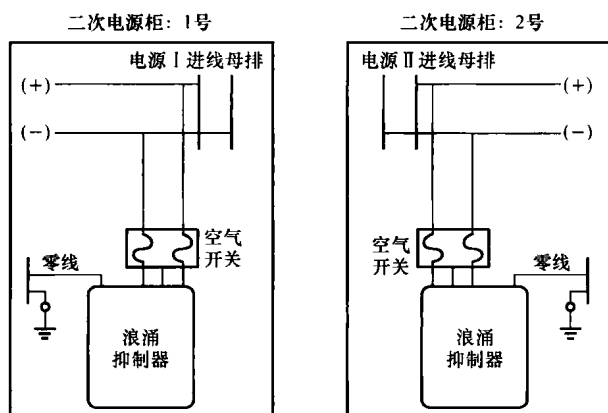


图 9-27 直流二次电源浪涌抑制配置方案

应尽量避免导线弯折（减小等效电感）。

参 考 文 献

- [1] IEEE Std 1159—2009 IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [2] IEEE Std 1036—1992 IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors.
- [3] IEEE Std 1100—1999 IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment.
- [4] IEEE Std C62. 41. 1—2002, IEEE Guide on the Surge Environment in Low-Voltage (1000V or less) AC Power Circuits.
- [5] IEEE Std C62. 41. 2—2002, IEEE Recommended Practice on Characterization of Surge in Low-Voltage (1000V or Less) AC Power Circuits.
- [6] IEEE Std C62. 45—2002, IEEE Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage AC Power Circuits.
- [7] IEC 61312—3: 2000, Protection against lightning electromagnetic impulse (LEMP)-Part3: Requirements of surge protective devices.
- [8] IEC 61643—1: 1998, surge protective devices connected to low-voltage power distribution system-Part1: performance requirements and testing methods.