

SEE

城市电网铁道电气化干扰影响

学术会议论文集

1986.10

成都

中国电机工程学会城市供电专业委员会主办

系统干扰及保护分专业委员会 编
武 汉 供 电 局

1987.3

武 汉

验所

3

目 录

“城市电网铁道电气化干扰影响”学术会议论文综述·····	李芬辰 (1)
电气铁路在电力系统中产生的不平衡谐波分析·····	吕润餘 (6)
工频单相交流牵引负荷产生的负序电流实用算法·····	徐宇顺 (24)
电铁牵引供电系统谐波的一种算法·····	李春华 潘隐萱 孙树勤 (41)
电牵引负荷谐波在电力系统中的分布·····	张进思 (52)
电力系统高次谐波的分析计算·····	徐宇顺 (63)
千里电气铁道的谐波问题·····	张直平 (76)
工频谐波分析报警仪研制报告·····	吴健国 (84)
牵引变电所无功补偿的时域分析·····	孙树勤 唐统一 (93)
牵引供电系统并联补偿方法的研究·····	李群湛 (99)
大型可控饱和电抗器式动态无功静止补偿装置在武钢一米七轧机 工程中的应用·····	古福立 (113)
低谐波可控饱和电抗器·····	李启泉 (136)
铁道电气化区段并联电容补偿装置投切的过渡过程·····	廖常敏 (148)
电气化铁道对通信线路的干扰影响及其防护措施的探讨·····	夏辅弼 (154)
对 AT 供电系统牵引变电所主变压器的选型分析·····	刘福生 (159)
电力线对电信线影响的简化计算三则·····	陈建成 (171)
宝成电气化铁路大地回流危害宝鸡发电厂电气设备情况综述·····	郑振均 (175)
强电线和地下管道间的电磁兼容·····	尹可华 熊祥建 (184)
电力牵引供电系统主电路研究·····	刘联和 (196)
关于牵引变电所计量的简介·····	阎法舜 (206)
电气化铁道牵引变电站主变压器铜损电量计算方法的推导·····	赖光义 (212)
谐波功率及其对电度计量的影响·····	张直平 滕世骅 (216)
江油发电厂发电机转子和护环受负序电流影响的情况介绍·····	唐仲林 (223)
汽轮发电机承受负序电流能力的分析研究·····	周德贵 (228)
达县电网变电站及电力机车牵引站谐波测量情况分析·····	梁德昌 陆良伟 (250)
电气化铁路对输电线路感应电压影响的探讨·····	王援军 (255)
电气化铁道多微机远动装置·····	钱清泉 (260)
微机馈线距离保护实现谐波闭锁原理与算法·····	贺威俊 (267)
电力机车引起的负序电流的计算·····	黄铁山 (278)

“城市电网铁道电气化干扰影响”

学术会议论文综述

武汉供电局 李 芬 辰

我国电气化铁道自从60年代在西北宝鸡到凤州段通车以来,二十年来缓慢发展中,据统计六五年以前全国已通车电气化铁道只有1130公里,十一届三中全会以后加速了电气化铁道的发展,到1985年电气化铁道已有3500公里,七五年计划将续建3660公里,到1990年电气化铁道里程可达7160公里。但是国外电气化铁道发展是迅猛的,根据国外1984年统计:苏联有电气化铁道44,800公里,电化率为31.4%,里程居世界首位,日本有13,774公里,电化率为51.2%,居世界第二位,西德有12,000公里,电化率为40%,居世界第三位,而中国1984年有2100公里(85年为3500公里),电化率为4.1%,居世界第十八位,就连印度也在我国前面,其里程为9,498公里,电化率为7.8%,居世界第六位。说明我国电铁建设太少了。但是,由于电铁和内燃车、蒸汽车相比具有功率大,速度快,运输能力大,耗能低,污染少等优点在铁道运输中越来越引起重视,我国已确定内燃和电力并举的铁路牵引方针,正因为电铁能适应大运量,大密度、高速的要求,计划部门曾提出设想本世纪末开辟以北京为中心1500公里的辐射网,运行15小时,朝发夕至或夕发朝至的旅客列车系统,这样将出现以北京为中心的电气化铁路网使电铁的发展将由山区到平原而且到了沿海城市,并且目前电铁已正在部分大中城市电网中陆续出现,预计将新增容量为3000MVA以上供应电铁的牵引变电站正是电铁将会迅猛蓬勃地发展。

电气化铁道建设突出问题,也是人们关注的问题,即是对电力系统和通信设施干扰影响问题,主要的有:

1、不平衡电流大

电铁使用单台单相负荷的电动机已达6400kW(韶山4型机车)牵引电流达300安以上,在双机区段重载列车负荷电流还得成倍增长,这些不平衡电流(负荷电流引起的)将影响电力系统及发电厂的安全运行,华北丰沙大线曾由于负序电流造成110kV出线开关跳闸,电业规程规定:汽轮发电机三相电流之差不得超过额定值的10%,水轮发电机及同期调相机三相电流之差不得超过额定值的20%,同时一相电流都不得大于额定值。

2、系统电压波动大

由于牵引电力负荷是短时的频繁的冲击负荷,致使牵引变电所主变压器所带负荷也是短时的,铁道单线运行时其利用率为0.3,复线时利用率为0.35,其所配置的无功补偿装置不能适应冲击负荷的变化,致使电力系统发生频繁的大幅度的电压波动。

3、高次谐波污染电力系统

正流型机车引起的高次谐波危及电力系统发供用电设备。单台电力机车运行时,以产生

三次谐波电流最大（为基波电压的18~35%），五次七次谐波次之，它们的谐波电流值均超过部颁《电力系统谐波管理暂行规定》的允许值。此外在远距离供电的牵引变电所可能产生五次或七次系统谐振事故。

4、对电信设施干扰严重

由于电气化铁道对有线及无线通信干扰严重，目前在电气化铁道建设中，防干扰赔偿费用几乎占整个投资的23%，已成为建设中突出矛盾。

5、对地下管线腐蚀大

由中国电机工程学会城市供电专业委员会主办的“城市电网铁道电气化干扰影响”学术会议的论文系针对这些问题进行交流探讨的。现将这些论文综合报导如下：

(1)、研讨关于不平衡电流的分析、计算、检测及改善措施。

山西省电力试研所吕润餘的“电气铁路在电力系统中产生的不平衡谐波分析”一文，从我国通用的韶山I型电力机车的谐波分析开始，依次分析牵引网多辆机车的合成谐波及其通过我国当前采用的两种供电方式的牵引变压器（Y/△—11和V/V）的不对称运行，注入电力系统的不平衡谐波，提出了计算公式。

经过对三种机车运行方式的滤波计算分析，提出了在供电臂两侧同时滤波的措施即至少装设三次及五次谐波滤波器，七次谐波滤波器根据牵引网负荷及系统实际需要来确定。文中还提出在牵引变压器为Y/△—11接线方式时，电气铁路输入电力系统的负序电流可在牵引变压器高压侧装设普通电流表进行监测，三相电流中的最小者即为输入系统的负序电流。

该文从理论分析，提出对于韶山型机车采用供电臂实测统计的谐波含有率进行谐波分析计算的方法。

西南电管局电力设计院赵宇顺“工频单相交流牵引负荷产生的负序电流实用计算”一文，利用对称分量的基本原理结合单相牵引负荷的特点，用计算机方法，编写出计算负荷分量的程序，程序使用BASLC语言，在PC—1500袖珍计算机上调试通过，通过计算分析提出了减少流入电力系统负序电流的措施，即：

(1)、各牵引变电站换相联结方式；

(2)、合理安排机车行车方式；

(3) 电力系统多电源供电方式。

(2)、关于电力牵引引起的高次谐波对电力系统的谐波分析计算、实测、监测及无功补偿设施问题。

清华大学李春华、潘隐萱、孙树勤的“电铁牵引供电系统谐波的一种算法”。

该文通过谐波分析将各机车负荷导致为谐波电流源，并将三相供电转化为单相网络，提出用节点电压方程计算网络谐波的简便方法并编制谐波专用计算程序。适用于25千伏电铁牵引供电系统。

西南交通大学张进思“电牵引负荷谐波在电力系统中的分布”一文根据该负荷的特点，从数学上论证了五次及五次以上谐波正交叠加的特性，建立起电牵引负荷谐波在电力系统分布的计算数学模型，并依此编制了一个通用电算程序。

西南电管局设计院徐宇顺“电力系统高次谐波的分析计算”是对铁道牵引变电站的110千伏进线拍摄的非正弦波形，用近似算法进行波形分析，使用BASLC语言编出程序在PC—

1500计算机上求出各次谐波值,可和现场使用谐波分析仪测得结果相互验证的。

西北电力试验研究所张直平“千里电气铁道的谐波问题”提出在60年代电气化铁道初期使用时,当时主要矛盾是负序电流问题,但在后期由于电力系统容量日渐扩大,谐波问题更显突出,并指出在西北陕西安康地区单侧供电线路长度约600公里。曾发生电力系统五次谐振事故,因此电气化铁道的电力系统供电方式必须考虑防止发生五次或七次系统谐振事故的措施。

关于如何监测报警有关高次谐波对电力系统的危害,川东电业局中心试验所吴健国“工频谐波报警仪研制报告”一文,提出了该报警仪具有能报警,数字显示,测量谐波,谐波阻抗及谐波功率等功能,与日本HWA-1谐波分析仪对比,具有一定的优点,已经重庆市科委鉴定,样机试运行。

关于牵引变电所的无功补偿及抑制谐波问题:

清华大学孙树勤、唐统一“牵引变电所无功补偿的时域分析”一文,用时域分析将负载电流分解成有功电流及无功电流的方式。另外组成一个无功补偿的电流源装置向系统注入无功电流,从而使系统无功得到补偿的电路图,它还具有单相无功补偿的方式。这种根据负载瞬时变化进行无功补偿装置称为大功率电子变流装置(Electronic Converter)。

西南交通大学李群湛“牵引供电系统并联补偿方法的研究”以Y/Δ-11结线牵引变电所为例,从综合补偿负序和无动着手,结合牵引负荷不对称的特点,提出研究并联无功补偿(PRC)在电力系统中分布与计算。

武汉钢铁公司古福立“大型可控饱和电抗器式动态无功静止补偿装置在武钢一米七轧机工程中的应用”一文,是对该公司于1978年引进比利时沙城公司四套大型可控饱和电抗器式动态无功静止补偿器的运行经验总结,这些设备解决了一米七轧机电压波动大(最大综合冲击负荷曾达162兆瓦,而当有功冲击负荷为82兆瓦时其母线电压波动20%),谐波电流大(各次谐波电压总值达到基波电压的10%)及功率因数低(约0.7左右)的问题,该设备具有自动调压、调相和滤波的综合功能,调节范围大,响应速度快,操作简便,能适应大幅度冲击负荷的需要,不仅是现代化大型连续轧机的主要配套设备,也可运用在有冲击负荷,电压波动大,谐波严重的诸如牵引变电所,整流站,电弧炉,矿山机械等用电设备上。

武汉供电局李启泉“低谐波可控饱和电抗器”一文介绍试制的KBDK5000/10-5000千伏安低谐波可控饱和电抗器应用了“曲线星形”接线,降低了电抗器自身产生的五次及七次谐波电流,该设备和五次及高通滤波设备组成的静止无功补偿器用于供电系统能平抑电压波动,消除高次谐波的功能,目前在武汉湛家矶变电站运行。

成都铁路局科所研廖常敏“铁道电气化区段并联电容补偿装置投切过渡过程”。对并联电容器投切的暂态过程做测试及计算分析,认为投合角是关键问题。

(3)、电气化铁道对通信线路,电台的干扰和对其他地下设施腐蚀干扰问题。

沈阳铁路局夏辅弼“电气化铁道对通信及弱电线路的干扰影响及其防护措施的探究”一文,对发生干扰的干扰源做了综合分析,并提出AT供电比BT供电方式的干扰影响小。

湖南大学电气工程系刘福生“对AT供电系统牵引变电所主变压器的选型分析”一文,提出了采用改进型伍德桥的接线方案的主变压器结构,它具有变压和换相两种功能,有改善单相负荷供电的不对称度的效果。

情报资料中刊载我国赴西德英国联合考察团“赴西德，英国高压电力线路对通信线危险及干扰影响考察技术报告”的文件，其中有第二部分电气化铁道的影响一文具体介绍了西德英国电气化铁道概况，两国对危险及干扰允许值和通信方面所采用的防护措施，可做参考，迫切希望有关部门早日制订有关电铁对通信的危险及干扰影响允许值以及有关技术规范的国家标准。

情报资料刊载了北方交通大学张林昌“电气化铁道无线电干扰的研究及其进展”一文，将有关电气化铁道的无线电干扰的国外先进经验进展情况及国内研究工作的情况做了较全面的综合报导，并提出今后国内应加速开展的几个方面的研究工作。

铁道部第四勘测设计公司电气化处陈建成“电力线路对电信线路的影响简化计算三则”一文，介绍了两种快速求感应电压，感应电流及地电位的图表演算法，减少繁杂的计算程序。

关于地下管线腐蚀问题：

宝鸡供电局郑振均“宝成电气铁路大地回流危害宝鸡发电厂电气设备情况综述”一文，介绍在电厂内建牵引变电站，由于采用直接供电方式即T—R方式电气化铁道大地回流大，引起电力电缆，控制电缆腐蚀损坏造成事故的分析及改进报导。

成都科技大学电力系干扰腐蚀组尹可华、熊祥健“强电线和地下管道间的电磁兼容”一文，对高压电力线路及电气化铁道对邻近金属管道产生的感应交流干扰电压及产生腐蚀影响。提出在强烈的交流电磁场作用下。不仅产生金属的腐蚀，而且还会生成沉积膜反过来抑制这种腐蚀过程。所以根据土壤性质来确定交流腐蚀临界安全电压，地理各种电缆也和管道一样也受到侵蚀，可根据不同情况采用保持安全距离，安装接地栅极，接地泄流和管道分段隔离等防护措施加以限制。

(4)、关于电气化铁道供电方式的探讨

目前我国电气化铁道供电方式只有交流供电一种方式，没有采用直流供电方式，交流供电方式中我国目前有直接供电方式(T—R)，BT供电方式(即吸流变压器式)，AT供电方式(单线自耦变压器式)，从建设电力系统及牵引变电所投资看AT造价低，对电信干扰较小，有普遍采用AT供电方式的趋势，例如京秦线大秦线和郑武线。

华北电力学院刘联和“电力牵引供电系统主电路研究”一文，提出一种“ Δ/Y_0 接线牵引变电所与两链段链形并联供电牵引网系统”的交流供电方式。它具有：(1)抑制干扰影响(与AT、BT方式接近)；(2)提高设备容量利用率(以同样选定50%备用容量情况下，选用 $2 \times \Delta/Y$ 供电方式比原有 $2 \times Y/\Delta$ 供电方式可节约1/2容量)；(3)提高网压水平(如以现行系统牵引网电压水平为基准，新型供电方式的电压水平可提高42%)；(4)降低网络能耗(估算新型和现有牵引网络能耗比约为0.84)；(5)改善三相不对称影响(现有供电变电所三相电流不平衡系统 K_1 约在 $0.5 \leq K_1 \leq 1$ 范围内，而新型供电方式 K_1 可在0.5以下，降低负序电流值)；(6)就地供应地方供电。

情报资料刊载的赴西德、英国考察的第二部分：电气化铁道的影响一文中介绍了西德采用交—直—交供电方式的电力机车，该机车规格为16 $\frac{2}{3}$ 赫15kV、5600kW。是国际公认的最先进的电力机车，该机车具有电机结构简单，工作可靠，很少维修。运营费用低，粘着性能好，功率因数高，便于客货共用等优点，另一突出优点是对通信产生的高次谐波干扰小。

在我国电气化铁道越来越向平原沿海一带大中城市发展之际，通信干扰将越来越严重，而

电气化铁道建设投资用于通信设施补偿费用估计每公里约 7.5~15 万元，同时在铁道穿越城市中走廊拥挤各类公用管道各种线路难以隔离分开，即使有补偿投资也无法实现，还有地下铁道、隧道铁道中采用交流困难较多，因此，电气化铁道在这些地区宜于改交流供电制为直流供电制，采用 1500 伏或 3000V 直流供电，或采用西德的交—一直—交供电制，这将大大缓解对通信干扰的矛盾，建议铁道等部门开展直流供电制的研究工作。

(5)、关于牵引变电所电力电度量问题

成都铁路局设计勘测所阎法舜“关于牵引变电所计量简介”一文，较全面地分析牵引变电所电力计量问题，认为牵引变压器负荷不平衡，由于利用率低其铁损大于铜损，铜铁损分配比例在 1:2.374 到 1:20.9 之间变化极大，在高压侧计量不易反映，提出低压侧计量加铜损表和铁损表的方式，解决了牵引变计量问题。

西南电管局赖光义“电气化铁道牵引变电站主变压器铜损电量计算方法的推导”一文进一步完善了低压计量的方法。

西北电力试研所张直平滕世骅“谐波功率对电度表的影响”一文根据西北电力系统大量谐波测试分析。认识到谐波功率将影响电度表的计量。提出进一步研究试制能适应于有基波功率和谐波功率的计量电度表，希望开展这方面工作。

(6)、电力系统运行问题的专题报告

四川瀘油发电厂唐仲林“源油发电厂发电机转子和护环受负序电流影响的情况介绍”

西南电力试研所周德贵“汽轮发电机承受负序电流能力的分析研究”

川东电业局梁德昌、陆良伟“达县电网变电站及电机车牵引站谐波测量情况分析”

宝鸡供电局王援军“电气化铁路对输电线路感应电压影响的探究”

西南交通大学钱清泉“电气化铁道多微机运动装置”是首次研制成功的提高电铁供电系统运行水平及效率的自动化装置。

西南交通大学贺威俊“微机馈线距离保护实现谐波闭锁原理与算法”是完善保护功能和提高距离保护选择性的较好的方式。

常州供电局黄铁山“电力机车引起的负序电流的计算。”

我们希望这次学术讨论会论文将能促进电气化铁道干扰影响的问题深入探讨研究，为电力系统铁道电气化建设服务，为加速“七五”计划作贡献。

电气铁路在电力系统中产生的不平衡谐波分析

山西省电力试验研究所 吕润余

内 容 摘 要

为了限制电气铁路电力机车牵引负荷在电力系统中产生的不平衡谐波及负序(基波)分量,本文从我国目前通用的韶山-1型电力机车的谐波分析开始,依次分析了牵引网多辆机车的合成谐波,及其通过我国当前采用的两种牵引变压器(Y/Δ-11和V/V)的不对称运行注入电力系统的不平衡谐波,提出了线谐波电流和序谐波电流的概念及计算公式,分析其随机车运行方式的变化规律(包括基波负序)并从输入系统谐波总量的观点分析了在供电臂采用各种滤波措施的效果。根据理论分析,提出对于该型机车采用供电臂实测统计的谐波含有率进行谐波分析计算的简单实用方法。有关的分析结果和计算公式与实测结果进行了比较,两者基本一致,对于Y/Δ-11牵引变压器输入电力系统的负序电流,文中提出了简易可行的监测方法,

一、前 言

当前我国的电气铁路都由系统110千伏供电。牵引变压器一般都采用Y/Δ-11结线的普通变压器和V/V结线的单相变压器组,如图1所示。高压侧中性点不接地。高低压侧电压比为 $110 \pm 2 \times 2.5\% / 27.5$ 千伏。低压侧两个顶点连接左右两个供电臂,向两侧的电力机车供电,另一顶点接地(铁轨或回流线),接受回流。实际三相变压器的低压侧C相和两个单相变压器的低压侧(x)端固定接地,为了减小负序对系统的影响,在高压侧进行换相。从系统来看,相当于低压侧不同的相接地,本文假定对应于高压侧电力系统,低压侧为C相接地。

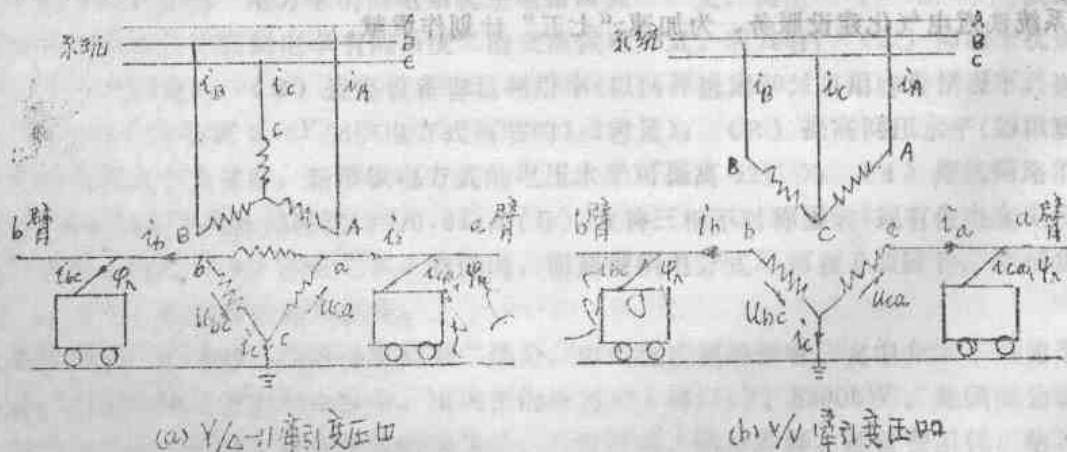


图1、电气铁路供电系统图

目前电气铁路上都采用国产韶山—1型电力机车,其内部为具有直流牵引电动机反电势负载的单相全波硅整流电路,原理接线如图2,B为机车整流变压器,中抽式,原方上接工频交流25kV供电臂,下经铁轨接地。 Z_1 、 Z_2 为硅整流元件, D 为直流牵引电动机,PK为平波电抗器。

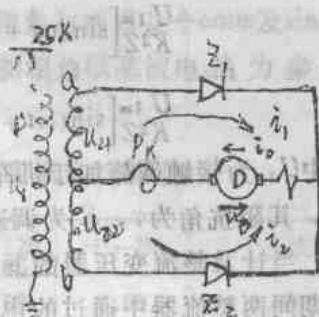


图2, 韶山—1型电力机车整流回路原理图

电气铁路对于系统来说为三相不对称的谐波负荷,将在系统中产生三相不平衡谐波(以及基波)。本文涉及四个内容:(1)韶山—1型电力机车的谐波分析,(2)供电臂多辆机车时谐波合成分析,(3)电力机车通过不对称运行的牵引变压器注入电力系统不平衡谐波(包括基波)的计算和分析,(4)在供电臂上采取滤波措施的效果分析。同时,还提出了监视通过Y/Δ—11牵引变压器输入电力系统负序电流的简便方法。

二、韶山—1型电力机车牵引负荷的谐波分析

一、机车电流波形

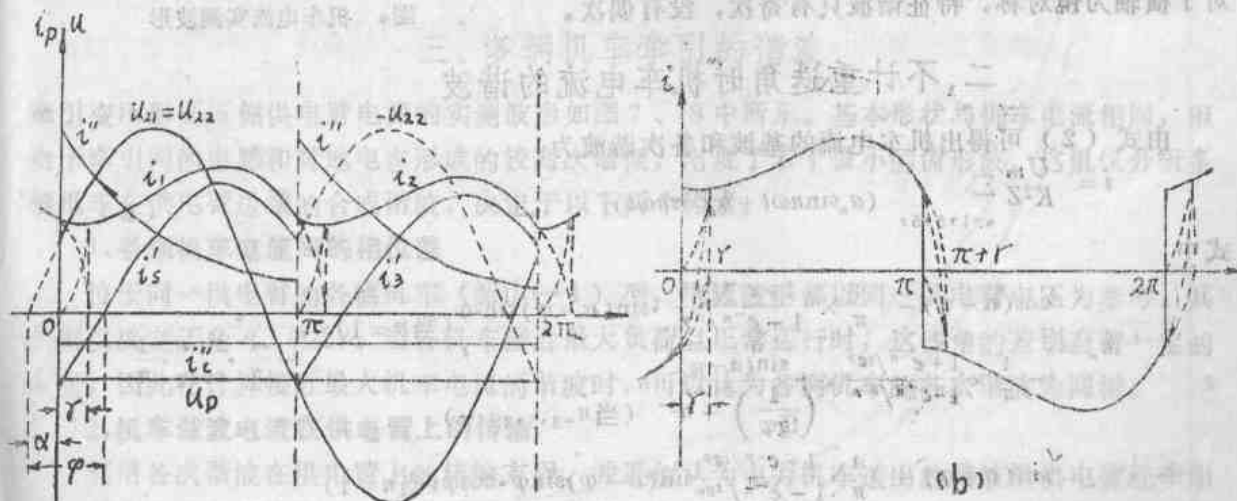
如图2,牵引电动机存在反电势 U_D 。使整流器的导通延迟 α 角,

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{U_D}{U_{2m}}, \quad (0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}) \quad (1)$$

式中 U_{2m} 为整流变压器每一整流绕组的电压幅值。 α 的大小取决于机车的载重量。行车速度以及变压器的调速手柄位置(变比K)等因素。

当不计整流变压器的漏抗时,换向瞬时完成。整流回路的电流如图3(a)中 i_1 和 i_2 所示,由交流电源引起的工频强制电流 i ,直流电动机反电势引起的反向直流 i_c 以及换路过程中产生的自由电流 i'' 迭加而成;平波电抗器的电感足够大,使波形连续。

机车电流 i (整流变压器的原方电流)如图3(b)所示。根据整流回路电流,可得到机车电流 i 为:



(a)

(a) 整流回路电流

(b) 整流变原方电流

图3 机车电流波形

$$i = \begin{cases} \frac{U_{1m}}{K^2 Z} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \frac{2 \sin(\alpha - \varphi)}{1 - e^{-\pi / \lg \varphi}} e^{-\omega t / \lg \varphi} - \frac{\cos \alpha}{\cos \varphi} \right], & (0 \leq \omega t \leq \pi) \\ \frac{U_{1m}}{K^2 Z} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \frac{2 \sin(\alpha - \varphi)}{1 - e^{-\pi / \lg \varphi}} e^{-(\omega t + \pi) / \lg \varphi} + \frac{\sin \alpha}{\cos \varphi} \right], & (\pi \leq \omega t \leq 2\pi) \end{cases} \quad (2)$$

式中 U_{1m} 为接触网施加于机车的工频电压幅值，其波形假定为正弦波， Z 为整流回路工频阻抗，其阻抗角为 φ ， K 为调速手柄所在位置的变比。

当计及整流变压器的漏感时，换向过程不可能瞬时完成，存在着重迭电流和重迭角。重迭期间两整流器中通过的电流如图 3 (a) 中虚线所示，由两电源电势形成的两整流器回路间的稳态环流。牵引电动机反电势产生的反向电流以及在换向期间保持两支路电流不变的暂态电流迭加而成，牵引电动机的电流为该两电流之和，其波形基本未变。重迭期间的机车电流如图 3 (b) 中粗虚线所示，求得其方程为：

$$i = \begin{cases} \frac{1}{K} \left\{ -I_D + \frac{2U_{2m}}{X_l} [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)] \right\}, & (0 \leq \omega t \leq r) \\ \frac{1}{K} \left\{ I_D - \frac{2U_{2m}}{X_l} [\cos \alpha + \cos(\omega t + \alpha)] \right\}, & (\pi \leq \omega t \leq \pi + r) \end{cases} \quad (3)$$

为经过平移后的余弦曲线。式中 X_l 为每个整流绕组的工频漏抗， $I_D = i_D(\omega t = 0)$ 重迭角，为

$$\gamma = \cos^{-1} \left[\cos \alpha - \frac{I_D X_l}{U_{2m}} \right] - \alpha \quad (4)$$

I_D 越大， X_l 越大， U_{2m} 越小，则 γ 越大。

由图 3 (b) 可见，重迭角的存在，使机车电流较接近于正弦波，将减少次数较高的谐波，并使基波及各次谐波的相位稍向右移动。机车电流的实测波形如图 4 所示，两者基本一致。

可见，电力机车为一个谐波电流源，机车电流波形对于横轴为镜对称，特征谐波只有奇次，没有偶次。

图 4 机车电流实测波形

二、不计重迭角时机车电流的谐波

由式 (2) 可得出机车电流的基波和各次谐波为：

$$i = \frac{U_{1m}}{K^2 Z} \sum_{n=1,3,5,\dots} (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t) \quad (5)$$

式中

$$a_n = \begin{cases} \cos(\alpha - \varphi) - \frac{4}{\pi} \times \frac{1 + e^{-\pi / \lg \varphi}}{1 - e^{-\pi / \lg \varphi}} \cdot \sin(\alpha - \varphi) \sin^2 \varphi & (\text{当 } n=1) \\ -\frac{4}{\pi} \times \frac{1 + e^{-\pi / \lg \varphi}}{1 - e^{-\pi / \lg \varphi}} \times \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\left(\frac{1}{\lg \varphi}\right)^2 + n^2} & (\text{当 } n=3, 5, 7, \dots) \end{cases}$$

$$b_n = \begin{cases} \sin(\alpha - \varphi) - \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1 + e^{-\pi / \lg \varphi}}{1 - e^{-\pi / \lg \varphi}} \sin(\alpha - \varphi) \sin \varphi \cdot \cos \varphi & (\text{当 } n=1) \\ -\frac{4}{\pi} \cdot \frac{1 + e^{-\pi / \lg \varphi}}{1 - e^{-\pi / \lg \varphi}} \cdot \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\left(\frac{1}{\lg \varphi}\right)^2 + n^2} \cdot \frac{1}{\lg \varphi} & (\text{当 } n=3, 5, 7, \dots) \end{cases}$$

由牵引变压器低压侧供电臂实测的各次谐波电流含有率和初相角与选择几个 $\cos\varphi$ 及 $\sin\omega$ 按上式计算得到机车电流谐波含有率和初相角相比较,如表1。初相角以基波电流为参考轴,且采用基波座标。

表1 谐波电流含有率 $\alpha_n = \frac{I_n}{I_1}$ (%) 及初相角 φ_n (%) 的实测和计算值

类 别			基 波	三 次	五 次	七 次	九 次	十一次	十三次
实测	I = 95A	α_n	100	18.90	9.40	6.27	3.53	3.50	1.99
		φ_n	0°	19.09°	17.67°	14.18°	16.86°	14.49°	14.45°
计算	$\cos\varphi = 0.4$	α_n	100	16.86	9.79	6.90	5.34	4.36	3.68
	$\sin\alpha = 0.35$	φ_n	0°	19.82°	13.66°	11.93°	11.19°	10.82°	10.61°
实测	I = 145A	α_n	100	19.20	10.30	6.47	3.55	2.95	1.27
		φ_n	0°	14.74°	11.79°	11.67°	8.88°	8.58°	8.72°
计算	$\cos\varphi = 0.35$	α_n	100	22.60	13.50	9.63	7.49	6.13	5.18
	$\sin\alpha = 0.3$	φ_n	0°	13.40°	9.86°	8.88°	8.48°	8.27°	8.16°
实测	I = 180A	α_n	100	21.70	10.50	6.26	2.95	1.35	1.16
		φ_n	0°	10.44°	9.05°	7.93°	6.10°	3.28°	3.46°
计算	$\cos\varphi = 0.3$	α_n	100	21.16	12.53	8.94	6.94	5.68	4.30
	$\sin\alpha = 0.35$	φ_n	0°	14.20°	10.30°	9.21°	8.76°	8.54°	8.41°

用不同的 $\cos\varphi$ 和 $\sin\alpha$ 值可作出如图五所示的曲线。在图中的曲线范围内,各次谐波含有率有一极小值, $\alpha_3 > 1.0\%$, $\alpha_5 > 4\%$, $\alpha_7 > 2\%$, $\alpha_9 > 1\%$ 。供电臂电流多次实测,各次谐波含有率都比以上相应各值为大,且计算所得的正常运行点,都在极小值的左边。

三、多辆机车牵引的谐波

牵引变压器低压侧供电臂电流的实测波形如图7、8中所示。基本形状与机车电流相同,但由于牵引网的电感和对地电容形成的较高次谐振,出现了若干很小的齿形波。这里仅分析多辆机车在供电臂送端的合成谐波,决定于以下两个因素:

1. 各辆机车电流间的相位差

位于同一供电臂的各辆机车(韶山—1)型,电流波形都以同一供电臂电压为参考。其差别仅决定于角 α 、 φ 及 γ 。当各机车接近最大负荷且正常运行时,这些角的差别有着一定的限度,因此在计算接近最大机车电流的谐波时,可以认为各辆机车的各次谐波为同相。

2. 机车谐波电流在供电臂上的传输

利用各次谐波在供电臂上的传输方程,并近似认为电力机车送出的谐波沿供电臂经牵引变压器向电力系统传输为无限长网络,机车谐波电流经牵引变压器短路阻抗全部输入而无反射波存在,这与在牵引变低侧代以等值的牵引网特征阻抗的情况相同。这时各次谐波的传输方程就简化为:

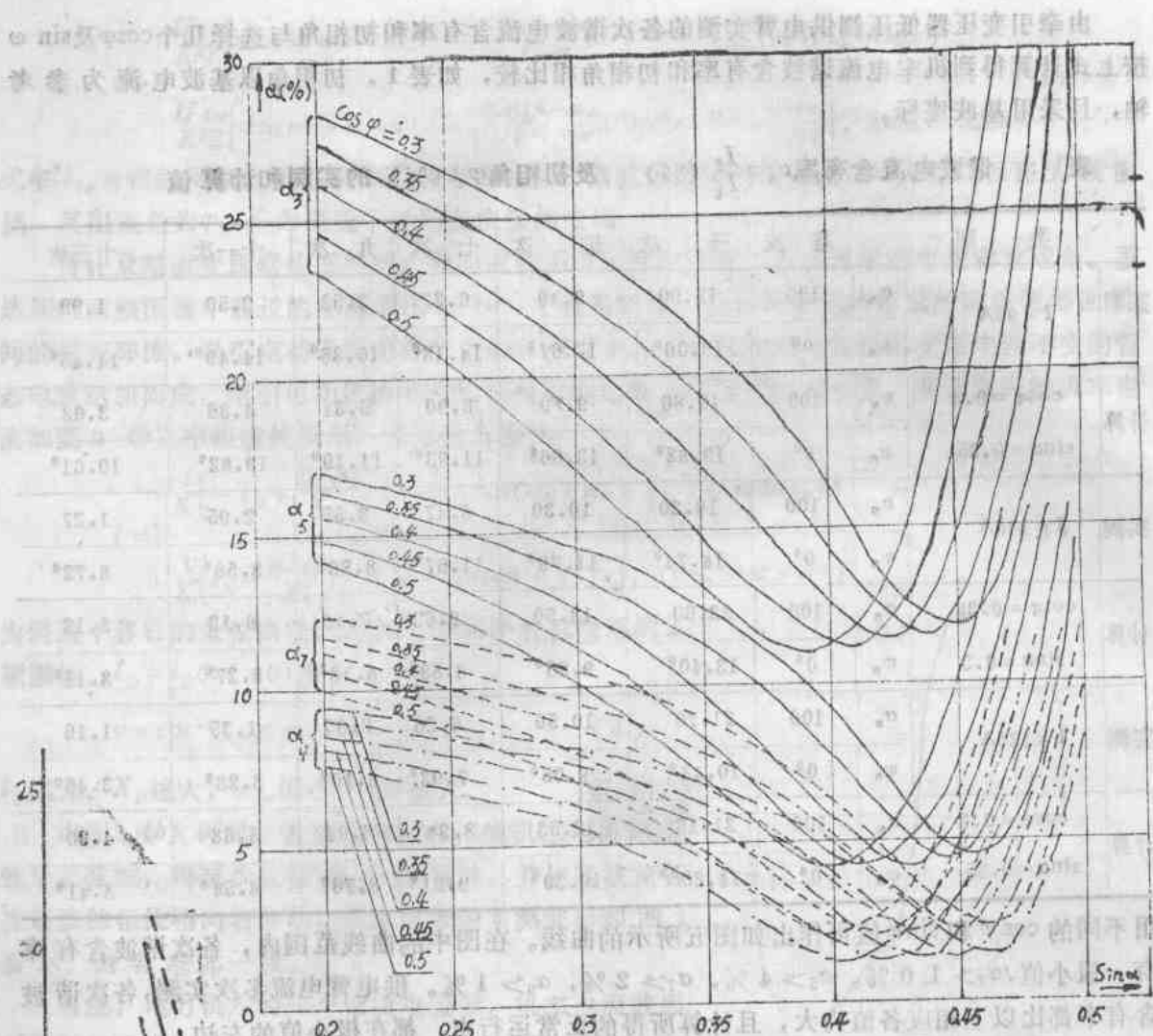


图5: 机车电流谐波含有率和 $\cos \varphi$, $\sin \alpha$ 的关系曲线

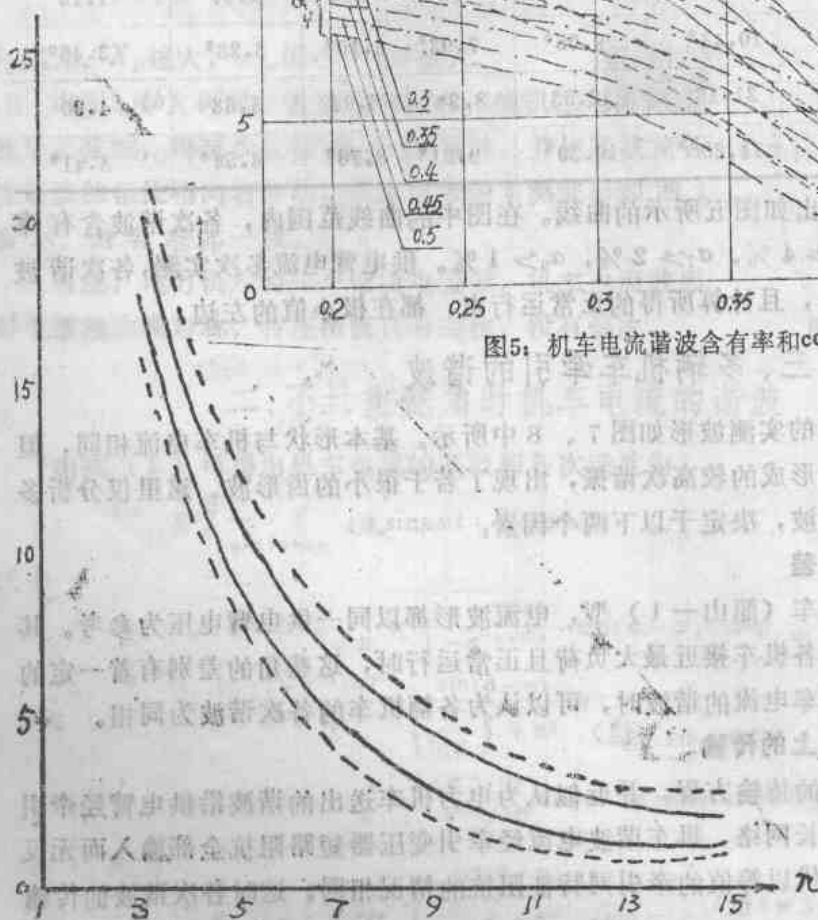


图6: 供电臂谐波电流含有率的分布

$$\dot{I}_{2n} \cdot e^{-\gamma_n l} = \dot{I}_{1n} \cdot e^{-\alpha_n l} \cdot e^{-j\beta_n l} \quad (6)$$

式中 $\dot{I}_{1n}$ 为机车送出的谐波, $\dot{I}_{2n}$ 为经过 l 公里的传输到达牵引变压器的谐波, $\gamma_n = \alpha_n + j\beta_n$ 为 n 次谐波在牵引网上的传输常数, 衰减因数和相位常数。

供电臂长度 20 公里左右。代入牵引网的参数作粗略计算, 可算出当机车位于距牵引站 20 公里处, 各次谐波传输至牵引变压器时的衰减及相位偏移 (滞后)。前者为 0.996 左右, 后者如表二所示。

表2 各次谐波的相位偏移 ($l=20$ 公里)

n	3	5	7	9	11
$\beta_n l$ (度)	-3.13	-5.20	-7.27	-9.35	-11.13

对于 n 次谐波约滞后 n 度。采用同一基波座标后, 合成的总电流波形未变, 相位滞后约为 1 度。因此对次数较低的谐波, 牵引网的影响可略去不计。

可见, 当同一供电臂上的不同地点有多辆电力机车运行、各机车的谐波到达牵引变时, 可近似按同相位直接相加求出牵引变压器低压侧总的合成谐波。

不论供电臂机车有多少, 其电流波形都相同, 如图七、八所示, 没有发现因谐波相位不同而造成的特殊畸变。表三为同一供电臂的两条馈电线 (上行和下行机车) 电流和供电臂总电流实测的谐波以及按两馈电线各次谐波直接相加所得的计算结果比较。表四为各种供电臂电流时 (不同机车数) 实测的除表一所列以外的另一部分衰减较快的谐波初相角。

综上所述, 可见由牵引变压器低压侧确定的供电臂总电流的谐波含有率, 具有一定的代表意义。

四、供电臂的“计算用谐波电流含有率”

实测的供电臂谐波电流含有率具有两个特点:

1. 当供电臂电流增大时, 各次谐波含有率有所减小。小电流时的谐波含有率虽较大, 但谐波电流值较小, 为得到较大的谐波电流, 需要确定大电流时的谐波含有率。

2. 不同供电臂电流时各次谐波含有率的分散性不大, 如图六所示, 实线间为集中带, 虚线间为分散带。

按照实测统计, 可确定供电臂接近最大持续电流时的“计算用谐波电流含有率”, 供谐波计算使用, 如表五所示。

表3 馈电线和供电臂电流谐波含有率 (%) 的实测和计算

地 点	电 流 (A)	α_1	α_3	α_5	α_7	α_9	α_{11}	α_{13}	α_{15}	时 间
1* 馈电线 实测	80	100	19.87	10.75	6.73	3.89	2.89	1.67	2.33	15:16'
2* 馈电线 实测	50	100	21.00	11.21	7.52	4.27	3.08	1.70	2.22	15:16'
供电臂 实测	130	100	20.61	10.89	7.04	3.83	2.66	1.60	2.45	15:17'
计算	130	100	20.34	10.93	7.03	4.04	2.96	1.69	2.29	

表4

各种供电臂电流时各次谐波的初相角(基波座标)

供电臂电流(A)	基波	三次	五次	七次	九次	十一次	十三次	十五次
$I = 100$	0°	9.64°	7.27°	6.23°	6.14°	5.55°	4.07°	1.33°
$I = 150$	0°	10.43°	6.21°	4.29°	3.38°	2.53°	1.05°	-1.30°
$I = 240$	0°	11.29°	8.16°	5.76°	4.77°	4.18°	2.70°	1.84°
$I = 414$	0°	9.66°	6.11°	4.67°	3.28°	1.65°	-2.87°	-4.91°
$I = 470$	0°	10.74°	7.31°	4.92°	2.55°	1.24°	0.52°	-1.22°

表5

供电臂电流的计算用谐波含有率

n	1	3	5	7	9	11	13	15	$\sqrt{\sum_{n=3}^{15} \alpha_n^2}$
$\alpha_n(\%)$	100	20	10.5	6.0	8.5	2.5	1.8	1.5	28.33

供电臂最大持续电流 I 由铁路部门提供。略去 N 次以上的谐波,前 N 次谐波电流及其总量可按下式计算:

$$I_1 = \frac{I}{\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_3^2 + \dots + \alpha_N^2}} = \frac{I}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \alpha_n^2}} \quad (\alpha_1 = 1.0)$$

$$I_n = \alpha_n I_1 = \alpha_n I / \sqrt{\sum_{n=1}^N \alpha_n^2} \quad (7)$$

$$\sqrt{\sum_{n=3}^N I_n^2} = I_1 \sqrt{\sum_{n=3}^N \alpha_n^2} = I \sqrt{\sum_{n=3}^N \alpha_n^2} / \sqrt{\sum_{n=1}^N \alpha_n^2}$$

此即为输入牵引变压器的谐波电流。

三、电气铁路在电力系统中产生的不平衡谐波

1. 系统不平衡谐波的产生及特点

如图1,每一供电臂上的电力机车为单相谐波负荷,当通过该两种牵引变压器的不对称运行方式后,便在电力系统中产生三相不平衡谐波。其特点为:

1. 各次谐波,包括三及三的倍数次,都要经牵引变压器送向系统,因此输入系统的特征谐波为全部奇次谐波。

2. 所有的不平衡线谐波电流,包括基波在内,可分成三类,令 $m = 0, 1, 2, \dots$,则

$n = 3m + 1$ 次为正序不平衡谐波,相序为A、B、C,

$n = 3m + 2$ 次为负序不平衡谐波,相序为A、C、B,

$n = 3m + 3$ 次,当 $\varphi_n = \varphi_n$ 时为零序不平衡谐波,位于同一直线上。

3. 各次不平衡线谐波电流都由序谐波电流组成,都含有正序谐波分量和负序谐波分量,但没有零序谐波分量。谐波序分量对旋转电机电度表、负序过滤器等设备将产生不同的影响。

4. 三相线谐波电流的向量和为零,组成闭合 Δ ,因而可以用线谐波电流的数值直接按下

式计算序谐波电流的数值:

$$I_n(+或-) = \sqrt{\frac{I_{An}^2 + I_{Bn}^2 + I_{Cn}^2}{6} \pm 2\sqrt{\frac{S_n(S_n - I_{An})(S_n - I_{Bn})(S_n - I_{Cn})}{3}}} \quad (8)$$

式中 $S_n = \frac{1}{2}(I_{An} + I_{Bn} + I_{Cn})$ 为三相线谐波电流组成闭合三角形的半周长。对于正序不平衡谐波 ($n=3m+1$)，根号内取正时为正序，取负时为负序，故 $I_{n+} > I_{n-}$ 。对于负序不平衡谐波 ($n=3m+2$)，根号内取正时为负序，取负时为正序，故 $I_{n+} < I_{n-}$ 。对于零序不平衡谐波 ($n=3m+3$)，根号内第二项为零，故正序与负序相等 $I_{n+} = I_{n-}$ 。

5. 基波为谐波的特例 (当 $n=1$)，用谐波计算的统一公式进行计算，但负序基波的限制措施不能用滤波方法解决。

二、系统不平衡谐波电流的计算

两供电臂的谐波电流都以超前相电压 u_{bc} 为参考，并表示成付立叶系数和复数两种形式:

$$\begin{aligned} i_{bc} &= \sum_{n=1,3,5,\dots} (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t) \\ &= I_m \sum_{n=1,3,5,\dots} [I_{bcn} e^{j\varphi_n} e^{jn\omega t}] = I_m \sum_{n=1,3,5,\dots} [I_{bcn} e^{jn\omega t}] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} i_{ca} &= \sum_{n=1,2,3,\dots} [C_n \sin n(\omega t - 120^\circ) + d_n \cos n(\omega t - 120^\circ)] \\ &= I_m \sum_{n=1,3,5,\dots} [I_{can} e^{j(\varphi_n - n \cdot 120^\circ)} e^{jn\omega t}] = I_m \sum_{n=1,3,5,\dots} [\dot{I}_{can} e^{jn(\omega t - 120^\circ)}] \end{aligned}$$

各电流 I_{bcn} 及 I_{can} 等可用幅值或有效值， φ_n 、 ψ_n 以各自的供电臂电压为参考。根据 (9) 式，可用三相对称分量法求出通过两种牵引变压器输入系统的不平衡线谐波电流和序谐波电流，并也表示为付立叶系数和复数两种形式。

1. 牵引变压器为 Y/Δ-11 结线时输入系统的不平衡谐波。

把低压侧各次三相谐波放在各自的复数平面上，用三相对称分量法分解成序谐波电流，然后按牵引变压器的结线组别和变比 (此两者对谐波的作用与基波相同) 计算高压侧输向系统的序谐波电流和线谐波电流。详细计算公式参见文 [3]，这里仅列出其数值为:

$$\begin{aligned} I_{n+} &= \frac{\sqrt{3}}{3K} \sqrt{I_{bcn}^2 + I_{can}^2 + 2I_{bcn}I_{can}\cos[\varphi_n - \psi_n + (n-1) \cdot 120^\circ]} \\ I_{n-} &= \frac{\sqrt{3}}{3K} \sqrt{I_{bcn}^2 + I_{can}^2 + 2I_{bcn}I_{can}\cos[\varphi_n - \psi_n + (n+1) \cdot 120^\circ]} \\ I_{An} &= \frac{\sqrt{3}}{3K} \sqrt{I_{bcn}^2 + 4I_{can}^2 - 4I_{bcn}I_{can}\cos[\varphi_n - \psi_n + n \cdot 120^\circ]} \\ I_{Bn} &= \frac{\sqrt{3}}{3K} \sqrt{I_{bcn}^2 + I_{can}^2 + 2I_{can}\cos[\varphi_n - \psi_n + n \cdot 120^\circ]} \\ I_{cn} &= \frac{\sqrt{3}}{3K} \sqrt{4I_{bcn}^2 + I_{can}^2 - 4I_{bcn}I_{can}\cos[\varphi_n - \psi_n + n \cdot 120^\circ]} \end{aligned} \quad (10)$$

对于 $K = 110\text{kV}/27.5\text{kV} = 4$ ， $\frac{\sqrt{3}}{3K} = 0.1443$ 。

根据前面机车及供电臂电流的谐波分析和实测结果，在实际计算中，可以认为 $\varphi_n = \psi_n$ ，

则上列各式不含 φ_a 和 φ_n ，计算更为简单。

对于基波，当两臂的基波功率因数角相等时（ $\varphi_1 = \varphi_2$ ），有：

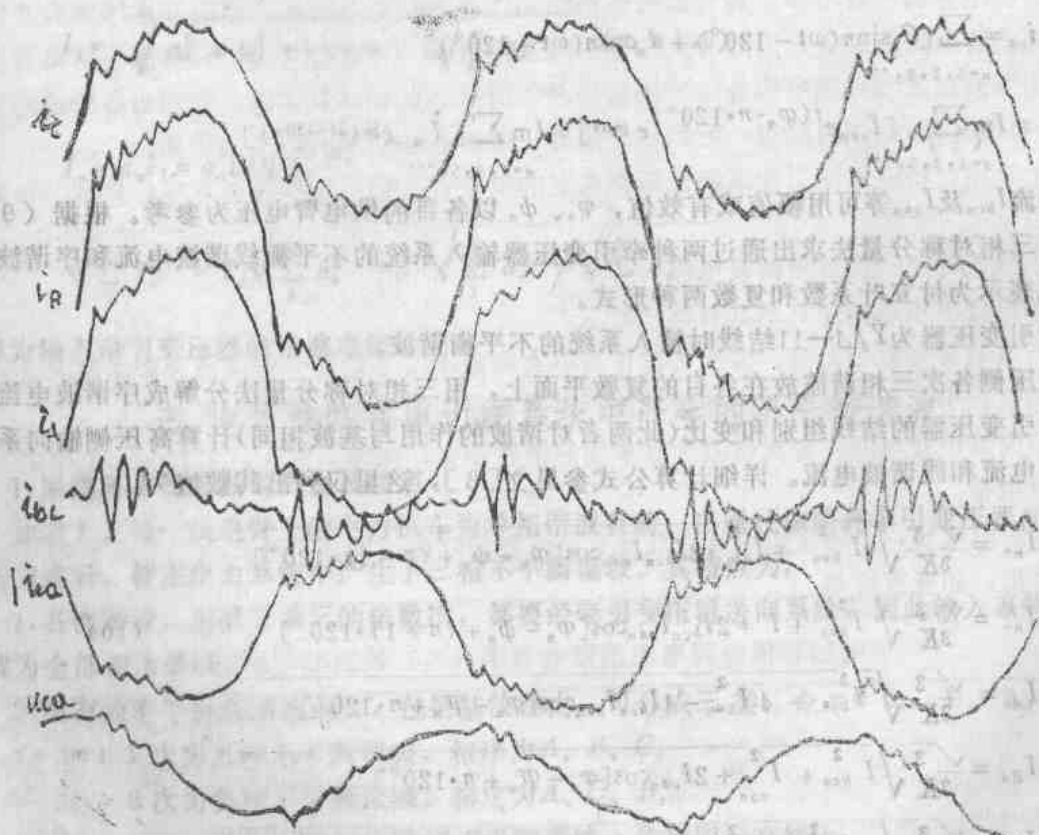
$$I_{1-} = I_{B1} = \frac{\sqrt{3}}{3K} \sqrt{I_{bc1}^2 + I_{ca1}^2 - I_{bc1} I_{ca1}} \quad (11)$$

即负序基波电流与对应于两供电臂的高压侧滞后相（B相）线电流基波数值相等。计及各自的谐波、两者的总电流也接近相等（B相总电流稍偏大）。据此可在该相装设普通电流表监测输入系统的负序电流。如果三相都装设，当两臂有机车时，三相电流中的最小者为负序电流，当一臂有机车时，两相电流相等且为第三相的一半，小者即负序电流。即使在换相中该牵引变与系统反相序连接，此结论仍为正确。

上列公式的计算结果和实测结果基本一致。岩会牵引变电站谐波电流实测和计算的比较列于表6、表7，有关付立叶系数的比较详见文[3]。两者的波形如图7和图8所示。波形分析在计算机上进行，手描输入，误差较大。

2. 牵引变压器为V/V接线时输入系统的不平衡谐波。

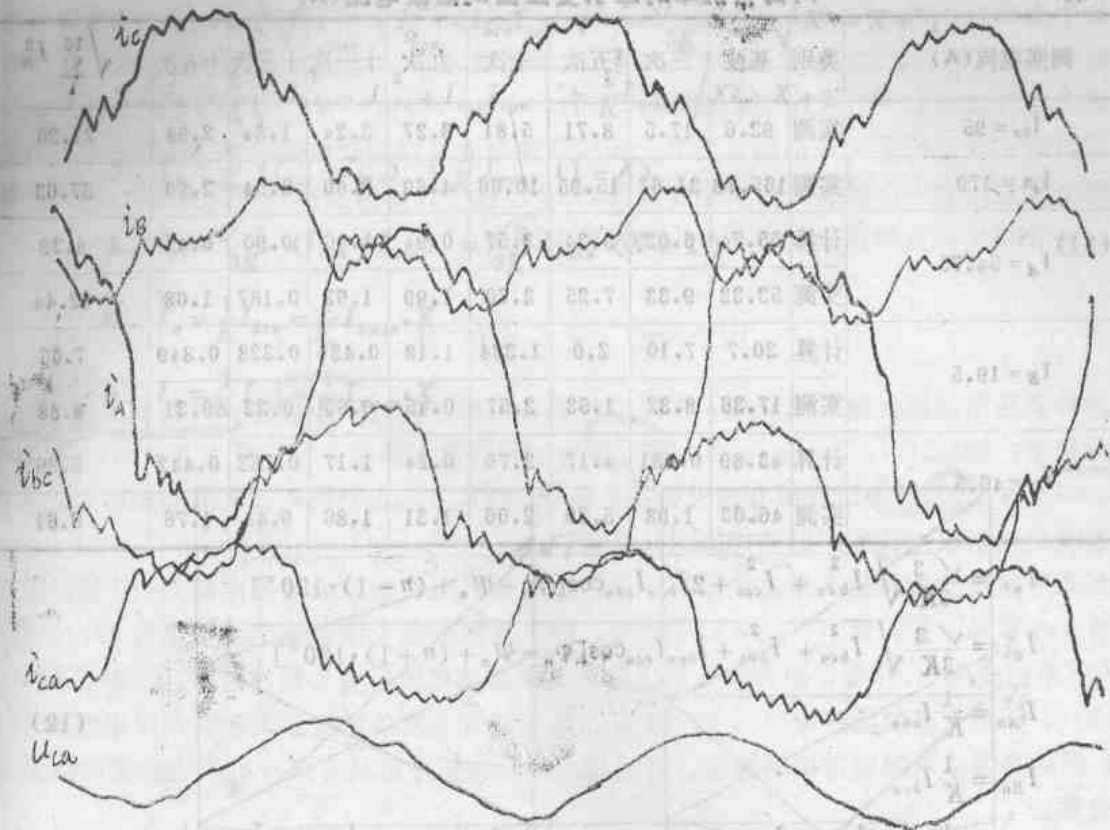
先按两个单相变压器求出高压侧输入系统的线谐波电流，再在各自的复数平面上把其分解为序谐波电流。这里仅列出其数值为：



i_{ca} - a臂电流, $I_{ca} = 514A$; i_{b0} - b臂电流, $I_{b0} = 0$;

i_a, i_b, i_c - 牵引变高压侧电流, u_{ca} - a臂电压

图7 一臂有机车时牵引变高低侧电流及供电臂电压的波形图(Y/A-11)



i_{ca} —a臂电流, $I_{ca}=170A$; i_b —b臂电流, $I_b=95A$

i_a, i_b, i_c —牵引变高侧电流, u_a —a臂电压

图3 两臂有机车时牵引变高低侧电流及供电臂电压的波形图

表6

一臂有机车时牵引变压器的谐波电流 (A) $I_c=0$

实测电流(A)	类别	基波	三次	五次	七次	九次	十一次	十三次	十五次	$\sqrt{\frac{15}{\sum} I_N^2}$
$I_{ca}=414$	实测	407.04	65.13	32.97	17.42	7.12	3.18	2.89	3.18	75.59
$I_A=127.5$	计算	117.43	18.79	9.47	5.03	2.054	0.922	0.835	0.918	21.79
	实测	123.45	18.89	10.64	5.32	2.26	1.59	0.99	0.78	22.53
$I_B=60.75$	计算	58.73	9.40	4.77	2.51	1.03	0.464	0.413	0.46	10.91
	实测	59.58	10.43	4.81	2.78	0.98	0.56	0.52	0.19	11.89
$I_c=67.5$	计算	58.73	9.40	4.77	2.51	1.03	0.464	0.418	0.46	10.91
	实测	66.6	8.52	5.92	2.82	1.29	1.0	1.15	1.17	11.02