



www.apqi.org

用户电能质量测试评估 与解决方案 案例集

欧盟-亚洲电能质量项目中国合作组 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

ASIA INVEST



EUROPEAID
CO-OPERATION OFFICE



www.apqi.org

用户电能质量测试评估 与解决方案

案例集

COPPER

国际铜业协会(中国)

International Copper Association Ltd. China

ISBN 978-7-5083-8981-3



9 787508 389813 >

定价: 28.00 元

销售分类建议: 电力工程 / 电力安全



EU-ASIA
POWER
QUALITY
INITIATIVE

www.apqi.org

用户电能质量测试评估 与解决方案 案例集

欧盟-亚洲电能质量项目中国合作组 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书由欧盟—亚洲电能质量项目中国合作组组织编写。

主要内容有：电能质量概论、电能质量测试评估案例、电能质量问题与解决方案案例、电能质量与节电运行案例。

本书可作为电力公司、电力用户、电力设备制造商的电能质量相关专业技术人员和领导人员参考使用，也可作为电力用户解决电能质量的参考方案使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

用户电能质量测试评估与解决方案案例集 / 欧盟—亚洲电能质量项目中国合作组编. —北京：中国电力出版社，2009

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8981 - 3

I. 用… II. 欧… III. ①电能—质量—测试—案例 ②电能—质量—评估—案例 IV. TM60

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 098360 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 9 月第一版 2009 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 9.25 印张 215 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.00 元

敬 告 读 者

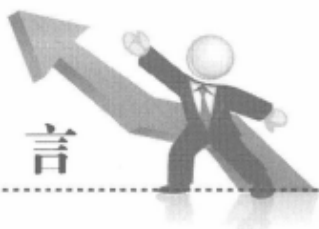
本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

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



前言



用户电能质量测试评估与解决方案案例集

近年来,电能质量成为越来越热的话题,但对于其具体的表现形式,造成的各种危害,甚至是给用户带来的直接和间接的损失以及由此引起的能源浪费,在用户和相关群体中的认知度依然偏低。因此,有必要在行业内展开相关的教育和宣传工作,通过提高用户对于电能质量危害的认知度,来推动相关测试及评估系统的应用,促进各种电能质量解决方案的普及,最终帮助用户解决实际的电能质量问题,减少损失,提高企业的生产竞争力,为社会的节能增效贡献一份力量。

本案例集基于上述原因编撰出版,告诉读者:电能质量应是电力公司、电力用户和电力设备制造商三方共同关注的问题。科学地贯彻电能质量标准和有关电磁兼容标准是协调三方利益的最好手段;合理地分配用户对电网的干扰限值和确定电力设备与配电网的电磁兼容水平是低成本解决电能质量问题的重要前提;把电能质量测试评估和配电网安全经济运行评估结合在一起,提供整体解决方案,使投资方利益最大化,是电能质量测试评估的核心。提供解决方案不等同于简单的提供治理设备,更重要的是根据测试评估的结果,给出最优(简单、经济、高效)的整体解决方案。

本书由两部分组成,电能质量概论和实际应用案例。在电能质量概论中介绍了电能质量定义、电能质量标准、电能质量测试评估技术、电能质量解决方案与相关控制设备。收集的实际应用案例分3类:①电能质量测试评估案例;②电能质量问题解决方案案例;③电能质量与节电运行案例。涉及的电能质量问题有:谐波和间谐波、三相电压不平衡度、电压偏差、电压波动与闪变、电压切痕、电压暂降、电压尖峰脉冲等。涉及的电能质量控制技术及设备有:无源滤波技术及设备(并联型PF、串联型PF);有源滤波技术及设备(并联型APF、串联型APF);动态无功补偿技术及设备(SVC、SVG);动态电压恢复技术及设备(DVR、DUPS);配电网重构技术与设备(SSTS);交流电弧炉节电运行技术等。

本书得到了欧盟—亚洲电能质量项目中国合作组的大力支持,并由国际铜业协会(中国)统筹安排。汇编在本案案例集中的素材来自中国合作组成员的贡献。安徽大学教育部电能质量工程研究中心的朱明星副教授,上海宝钢安大电能质量有限公司技术总监李令冬教授受托修改和整理全部案例,并汇编成册,期间付出了大量的工作,在此,我谨代表中国合作组全体成员向两位表示衷心的感谢!

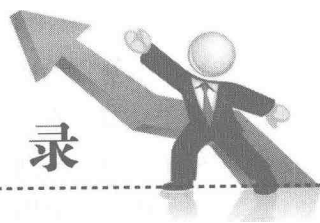
希望本书可以为广大的读者提供有益的参考,同时欢迎各位专家学者、业界同仁的建议和批评,我们一定虚心接纳。

黄 炜

2009年8月23日



目 录



用户电能质量测试评估与解决方案案例集

前 言

第一章 电能质量概论

第一节	电能质量的定义	1
第二节	电能质量标准	1
第三节	电能质量测试评估与解决方案	4
第四节	电能质量解决方案	5

第二章 电能质量测试评估案例

第一节	案例 1 工厂供配电系统电能质量综合测试评估	8
第二节	案例 2 城市低压电网非线性负荷测试评估	17
第三节	案例 3 轨道交通供配电系统电能质量综合测试评估	27
第四节	案例 4 静止型动态无功补偿装置 SVC 动态响应时间和调节时间测试分析	29
第五节	案例 5 高压变频器引起电网电压波形缺口和尖刺干扰测试分析	30
第六节	案例 6 某工厂电弧炉 3 次滤波器故障分析	33
第七节	案例 7 供配电系统电压脉冲事件捕捉和分析	36
第八节	案例 8 电弧炉的 2 次谐波和间谐波电流问题研究	39
第九节	案例 9 变压器不同接线方式对用户电压暂降的影响评估	42
第十节	案例 10 高压变频器谐波故障诊断	47
第十一节	案例 11 低压变频电机的故障诊断	49

第三章 电能质量问题与解决方案案例

第一节	案例 12 电压切痕的测试与解决方案	51
第二节	案例 13 大红鹰南基站电气灾害分析与解决方案	52
第三节	案例 14 控制电源模块损坏故障诊断及解决方案	55
第四节	案例 15 异常高次谐波问题分析与解决方案	59
第五节	案例 16 制氧空压机增速机出现剧烈振动故障诊断及解决方法	63
第六节	案例 17 桥式起重机频繁停运故障诊断及解决方案	66
第七节	案例 18 整流变压器异常温升问题分析与解决方案	68
第八节	案例 19 某变电站 35kV 无功补偿电容器故障分析及解决方案	71
第九节	案例 20 汉铝 110kV 高压滤波补偿装置工程技术方案	73
第十节	案例 21 兴海煤矿 FC+MCR 动态滤波补偿工程	77

第十一节	案例 22	应用有源电力滤波器治理地铁低压供电系统谐波电流	80
第十二节	案例 23	利用电力有源电力滤波器 APF 治理卷烟厂的谐波电流 ...	82
第十三节	案例 24	金属制品加工企业应用 SVG 案例	85
第十四节	案例 25	利用有源电力滤波器治理通信机房的谐波电流	87
第十五节	案例 26	利用 SVG 抑制轧机与电弧炉的电压波动与闪变	90
第十六节	案例 27	利用 FTFC 滤波装置对中频炉无功补偿和谐波治理	94
第十七节	案例 28	华卫钢管厂中频炉谐波测量及治理改造	97
第十八节	案例 29	利用混合型滤波器对钢管厂无功补偿和谐波治理	99
第十九节	案例 30	利用 TPF 无源滤波装置治理中频炉谐波	102
第二十节	案例 31	京良轧钢厂 TCR+FC 动态滤波补偿工程	104
第二十一节	案例 32	双钱集团股份有限公司电效改造工程	108
第二十二节	案例 33	等离子加热设备对硅钢液面控制系统谐波辐射干扰 测试评估与解决方案	108
第二十三节	案例 34	IT 企业供配电系统电压暂降评估与解决方案	110
第二十四节	案例 35	不锈钢厂 DPS 工业驱动电源的解决方案	115
第二十五节	案例 36	基于配电网重构技术的电压暂降解决方案	118
第二十六节	案例 37	一种面向设备电气元器件的电压暂降解决方案	125
第二十七节	案例 38	电压暂降对制氧站同步电机安全运行影响及解决方案 ...	129

第四章 电能质量与节电运行案例

第一节	案例 39	交流电弧炉节电运行技术应用	132
第二节	案例 40	工厂配电网电压偏差运行节电技术应用	138

司、电力用户和电力设备三者之间实现最大的兼容。

二、电能质量标准的内容和分类

1. 电能质量标准的内容

电能质量标准包括三部分内容：公共连接点供电电压质量限值和用户的干扰限值；电力设备运行的电压质量限值和对供电点的干扰限值；电能质量测量仪器和测量方法。我国已发布的电能质量标准可分为两大类：国家电能质量标准和电磁兼容标准。

2. 国家电能质量标准

国家电能质量标准主要规定了公用电网公共连接点的电压质量限值和用户的干扰限值、测量仪器和测量方法。

已发布的 GB 系列国家电能质量标准有：

GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》；

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 12326—2008《电能质量 电压波动和闪变》；

GB/T 15543—2008《电能质量 三相电压不平衡》；

GB/T 18481—2001《电能质量 暂时过电压和瞬态过电压》；

GB/T 19862—2005《电能质量 监测设备通用要求》。

3. 电磁兼容标准

电磁兼容标准主要规定了电力设备运行的电压质量限值和对供电点的干扰限值、测量仪器和测量方法。

(1) 电磁现象和电能质量分类标准。

IEEE Std 1159—1995 IEEE Recommended Practice For Monitoring Electric Power Quality。

(2) 非线性负荷谐波限值。

GB 17625.1—2003/IEC 61000—3—2：2001《电磁兼容 限值 谐波电流发射限值（设备每相输入电流 $\leq 16\text{A}$ ）》；

GB/Z 17625.6—2003/IEC 61000—3—4：1998（TR）《电磁兼容 限值 对额定电流大于 16A 的设备在低压供电系统中产生的谐波电流的限值》；

GB/Z 17625.4—2000/IEC 61000—3—6：1996（TR2）《电磁兼容 限值 中高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估》；

IEEE Std—1993 Recommended Practice And Requitments For Harmonic In Electrical Power System；

IEEE 519—1993 IEEE Recommended Practice And Requirements For Hamonic Control In Electrical Power；

EA 电力协会工程推荐标准 G5/4（2001）：英国谐波电压畸变及非线性设备接入输电系统和配电网的规划水平（Planning Levels For Harmonic Voltage Distortion And Connection Of Non-linear Equipment To Transmission Systems And Distribution Networks In The United Kingdom）。

(3) 无功波动负荷产生的电压波动和闪变限值。

GB 17625.2-1999 / IEC 61000-3-3; 1994《电磁兼容 限值 对额定电流不大于16A的设备在低压供电系统中产生的电压波动和闪烁的限值》;

GB/Z 17625.3-2000 / IEC 61000-3-5; 1994《电磁兼容 限值 对额定电流大于16A的设备在低压供电系统中产生的电压波动和闪烁的限值》;

GB/Z 17625.5-2000/IEC 61000-3-7; 1996 (TR3)《电磁兼容 限值 中高压电力系统中波动负荷发射限值的评估》。

(4) 电压容限曲线。

IEEE 446-1987 IEEE Recommended Practice For Emergency And Stand By Power Systems For Industrial And Commerical Applications (IEEE Orange Book) (ANSI [S];

ITI (CBEMA) Curve Application Notes, Information Technology Industry Council, Washington DC, 2000;

SEMI F47-0200 Specifications for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sags Immunity, Semiconductor Equipment and Materials International, Mountain View, CA, 2000。

(5) 电能质量参数定义、测量仪器、测量技术和测量方法。

IEC 61000-4-15; 1997 电磁兼容 试验和测量技术 闪变测试仪——功能和设计规范;

IEC 61000-4-7; 2002 电磁兼容 试验和测量技术 供电系统及所带设备谐波、间谐波的测量和测量仪器导则;

IEC 61000-4-30; 2003 电能质量测量方法;

IEEE Std 1159-1995 电能质量监测推荐规程;

IEEE Std 1159.3™-2003 IEEE Recommended Practice For The Transfer Of Power Data;

IEC 61000-2-8; 2002 Voltage Dips And Short Interruption On Public Electric Power Supply Systems With Statistical Measurement Results。

三、电能质量标准应用中的几个问题

1. 接于公共连接点的多个用户对公用电网的干扰限值分配问题

国标中对接于公共连接点的多个用户对公用电网干扰限值分配是按照公平原则分配的,协议用电容量越大,允许干扰限值越大。但多数情况下,每个用户对公用电网的干扰性质和干扰水平是不一致的,如果每个电能质量指标都是公平分配,会造成单个用户治理费用大,从而使整体社会成本太高。对于负荷较固定的场合,只要保证全部用户的干扰限值不超标和用户的安全经济运行,在整体社会成本最小的条件下,可以对单个用户的干扰限值适当放宽。举例如下:接于公共连接点的三个干扰用户分别为谐波源用户、无功波动用户和三相不平衡用户,按照国标公平原则分配干扰限值,三个干扰用户都超标,但三个用户总体对公共连接点的干扰并不超标。因此,在用户负荷相对固定的前提下,可以放宽各用户的干扰限值,从而节省了用户的电能质量治理费用。

2. 高压用户内部配电网对子系统的供电质量和子系统的干扰限值分配问题

在保证高压用户对公用电网公共连接点干扰限值在国标限值以内的前提下,用户配电子

系统的供电电压质量按照电磁兼容标准的规划水平确定，子系统或设备对用户配电网的干扰限值按照电磁兼容标准计算，用户配电网对各电力设备的供电电压质量按电磁兼容标准的电磁兼容水平确定。因为对同一电能质量指标，国标比电磁兼容的规划水平严格，电磁兼容的规划水平比电磁兼容水平严格，因此按照上述方法确定高压用户内部配电网的电能质量和干扰限值可以最大限度地降低用户电能质量的技术和管理成本。

3. 提高电力设备的电磁兼容水平可以弱化电能质量问题

随着技术进步，设备制造商提高设备的电磁兼容水平往往比供电方提高供电电压质量要经济得多。例如：美国半导体制造商和电力公司合作后制定了一个国际半导体设备和材料组织 SEMI (Semiconductor Equipment and Material International, Inc) 性能曲线，要求处理设备可以承受最大的电压下降为 50%，而持续时间不超过 200ms 的电压暂降，从而形成了半导体工业自己的电磁兼容标准。这种方式对其他谋求提高生产设备电磁兼容水平的用户而言，同样是重要的。根据企业或行业的具体情况指定相应的电磁兼容标准可以弱化电能质量问题，降低相应的技术和管理成本。

第三节 电能质量测试评估与解决方案

一、电能质量测试的必要性

现代配电系统是最复杂的非线性系统，一方面随着工农业生产规模迅速扩大和电力电子新技术的应用，大量的非线性、冲击性、不对称负荷产生的谐波电流、冲击无功、负序电流注入电网，使公用电网的谐波电压、电压波动和闪变、三相电压不平衡度日趋严重；另一方面电压敏感用户对电能质量和供电可靠性提出了越来越高的要求。上述问题不仅影响电力用户的安全经济运行，而且还使公用电网电能质量变差。为了构建安全可靠、优质高效的输配电网，必须对配电系统的电能质量进行系统的测试评估，并针对评估的结果，系统地采取相应的技术措施，这里强调系统全面的测试评估和治理，可以避免局部测试评估和治理中出现顾此失彼的问题。

二、电能质量测试评估的主要内容

1. 综合测试评估

供电母线短路容量和电能质量限值计算，公共连接点供电电压质量和干扰水平测试评估，供电母线总进线和各馈线电压、电流及功率测试评估，供电变压器负载功率测试评估，配电网阻抗计算及仿真，基波电压状态分析，谐波电压状态分析，谐波潮流分析，基波功率潮流分析，系统安全运行评估，系统经济运行评估，电能质量问题与解决方案。

2. 故障诊断

数据采集（故障录波数据及补充测量数据），数据分析，故障数学模型，故障仿真，故障诊断结论，故障解决方案。

3. 电能质量治理效果测试评估

数据采集（干扰负荷支路数据，治理设备支路数据，公共连接点数据）、数据分析、治理效果评估、存在问题及解决方案。

三、电能质量测试仪器

1. 仪器类型选择

根据不同的测试目的, 确定不同的测试内容, 选择不同类型的测试仪器:

在线监测一般选用电能质量远程监测仪;

专项测试一般选用便携式多通道电能质量分析仪;

简单谐波测试一般选用手持式谐波分析仪;

信息设备电压容限曲线 (ITD) 记录一般选用专用瞬态电压记录仪。

2. 评估对测试仪器性能要求

每台仪器通道数要满足评估时同时测量信号路数的要求。

信号幅值和相位测量精度要满足评估要求。大多数仪器的电压相位测量精度较高, 电流相位测量精度较差。为了判断谐波电流流向, 当谐波电流含量大于等于电流满量程的 2% 时, h 次谐波电流相位的测量误差应小于等于 $0.3h^\circ$ 。

由于高压变频器的普遍使用, 配电网中的谐波次数往往会达到 100 次, 因此用于电能质量测试评估仪器的最高谐波测量次数应不小于 100 次。

第四节 电能质量解决方案

一、电能质量问题

电能质量产生的问题分为电网产生的问题和负荷产生的问题两类。

电网产生的问题: 供电电压质量超过电能质量国标限值或电磁兼容水平, 供电电压质量问题引起的自动装置或继电保护装置误动作, 供电电压质量问题引起的设备故障问题, 供电电压质量引起的电力损耗问题。

负荷产生的问题: 干扰参数超过电能质量国标限值或电磁兼容限值, 干扰参数引起的自动装置或继电保护装置误动作, 干扰参数引起的设备故障问题, 干扰参数引起的电力损耗问题。

二、电能质量控制技术与设备

1. 电能质量控制的含义

电能质量控制含义同电能质量含义一样, 也包含两方面的内容: 控制问题负荷对公用电网干扰水平, 保证公共连接点的电能质量; 控制问题电网对电压敏感负荷的影响, 为敏感负荷提供用电保护技术。

2. 定制电力技术

因为电能质量控制技术是根据电网和电力用户存在的具体问题提供解决方案的技术, 因此电能质量控制技术又称为定制电力技术或用户电力技术, 定制电力技术的提出为电力公司与用户以最经济的方法综合解决电能质量问题提供了一种新途径。

定制电力技术作为电力系统和用户之间的接口技术, 直接影响对用户供电的质量和可靠性及用电效率。定制电力技术在配电系统中应用方面的研究还处在起步阶段, 但由于其潜在的巨大市场, 已引起设备制造厂家的高度重视。世界上诸如美国西屋电气公司、德国西门子、日本三菱电气公司等各大电力设备制造厂都已制造出相应的产品, IEEE 和 CIGRE

也都成立了相应的工作组进行理论研究。所以作为电能质量控制设备的定制电力技术，必将得到越来越广泛的关注，具有广阔的应用前景。

3. 控制问题负荷的主要设备

控制问题负荷干扰的主要设备为静态补偿型设备，静态补偿型设备按其与电网的连接形式及功能的不同，主要分为串联型、并联型。

并联型补偿设备主要用于干扰电流的补偿，干扰电流包括谐波电流、负序电流和无功电流。典型设备为静止型动态无功补偿器（SVC）、配电用静止同步补偿器（DSTATCOM）、并联型无源滤波器（Parallel-Passive Power Filter, PPPF）、并联型有源滤波器（Parallel-Active Power Filter, PAPF）。

串联型补偿设备主要用于干扰电压的补偿，干扰电压包括谐波电压、瞬态冲击电压。典型设备为串联型无源滤波器（Series-Passive Power Filter, SPPF）、串联型有源滤波器（Series-Active Power Filter, SAPF）。

4. 控制问题电网的主要设备

控制问题电网的设备分静态补偿型和网络重构型两类。控制问题电网的静态补偿型设备主要为串联型补偿器，用于电压补偿。适用于线性负荷而电网电压有波动的场合，用以消除电网电压波动对负荷的不利影响，其代表产品为动态电压恢复器（Dynamic Voltage Restorer, DVR）、动态不间断电源（Dynamic Uninterruptible Power Supply, DUPS）。

控制问题电网的网络重构设备主要为电力电子开关装置，用于配电网重构。所谓网络重构，实际上就是利用网络重构设备，根据控制和保护的需要对电路进行开合，改变电网的运行方式。随着敏感负荷的应用日益增多和电网容量不断增大，在配电系统中利用各种开关设备对短路故障进行处理，以限制短路电流和系统电压暂降，已成为电能质量解决方案的一个重要方面。控制问题电网的网络重构型设备主要包括固态断路器（Solid State Circuit Breaker, SSCB）、固态限流器（SSCL）和固态转换开关（Solid State Transfer Switch, SSTs）。

5. 统一电能质量调节器（Unified Power Quality Controller, UPQC）

UPQC 为串并联、有源无源混合型的电能质量补偿装置，它具有双向补偿能力，同时解决电网和负荷存在的问题，是一种能解决绝大多数稳态和暂态电能质量问题的综合补偿装置。

三、解决方案的优化问题

1. 最优解决方案的含义

最优解决方案的含义应该是用最低的成本，在保证配电网电能质量参数及安全可靠运行指标符合规定标准的约束条件下，以实现最高的节电效果为目标解决电网中的电能质量问题。这里要强调的是，约束条件的指标只要达到规定要求即可，过高的电能质量及安全可靠指标会使实施解决方案的成本过高。

2. 电能质量测试评估是提供最优解决方案的前提

最优解决方案应该是技术可行，成本最低的方案，给出最优解决方案的前提是通过测试评估找到问题的根源。最应该反对的是对电能质量问题性质不清楚的情况下，盲目购买安装治理设备。例如，某办公楼由于使用紧凑型节能灯，因三次谐波严重，购买安装并联三次无源滤波器，由于并联三次无源滤波器对零序的三次谐波无任何滤波效果，因而造成人力物力

的浪费。紧凑型节能灯本质上是三次谐波电压源，在交流侧串入三次阻波器就可以减小中性线上的三次谐波电流。另一个案例是某轧钢厂 10kV 母线系统虽然安装了 3、5、7 次滤波器，但谐波负荷产生的 60~70 次谐波电流仍然被放大了 3 倍左右注入系统，致使 10kV 母线的 68 次谐波电压高达 10% 左右，造成系统中自动装置故障频繁，经测试分析，配电电缆电容并联在系统上，并联谐振频率与高压变频轧机产生的特征谐波频率重合，致使注入系统的 68 次谐波电流放大。通过仿真计算得到最优的解决方案是在 10kV 母线上接入一个较小容量的高通滤波器，就可把 68 次谐波电压降到 1% 以下。

3. 解决方案的“个性化”和“整体化”原则

解决电能质量问题可以归结为根据产生问题的根源、设备及配电网特性，给出个性化的整体解决方案这里，我们特别强调解决方案的“个性化”和“整体性”原则，反对简单地用“电能质量控制设备”代替解决方案，只有这样，才能给出最优解决方案。最典型的案例是第二节中的例子，按照国标依据协议容量的“公平”分配的原则计算分配三个干扰用户的限值，则三个用户都需要投入很高的治理费用，如果在保证公共连接点电能质量前提下按照总体社会成本最低原则分配干扰限值，则三个用户都不需投入治理费用。

表 2-1

各中压供电母线总进线功率潮流

变电站	电压 母线	S_T (MVA)	平均负载功率 P (MW) $+jQ$ (Mvar)	ΔP (MW)	ΔQ (Mvar)	PF	η_T (%)	存在问题及解决方案
总降	35kV	120	19.8+j3.4	89.3	20.7	0.97	17.0	η_T 低
	33kV	75	3.95-j9.40	33.4	45.6	0.38	21.2	过补偿、 PF 低、 ΔQ 大；设置 SVC
炼钢	10kV I	63	18.04+j11.01	3.48	2.12	0.85	33.6	PF 低、设置 FC
	10kV II	63	25.4+j14.9	7.11	4.54	0.86	46.7	PF 低、设置 FC
	10kV III	63	2.36+j1.58	0.58	0.81	0.83	4.52	η_T 低，并入 10kV I 段，停 3 号变 压器
新轧	10kV I	63	7.67+j9.58	16.32	10.16	0.62	19.7	PF 低、 ΔQ 大； 设置自动投切 FC
	10kV II	63	16.2+j3.8	3.6	2.14	0.97	26.0	η_T 低
冷轧	10kV I	63	12.17+j4.2	2.46	0.83	0.94	20.5	η_T 低
	10kV II	63	10.69+j5.15	1.95	1.96	0.90	18.9	η_T 低
	10kV III	63	11.34+j1.47	32.12	1.48	0.98	18.4	η_T 低

注 S_T —变压器容量； P —负载平均有功功率； Q —负载平均无功功率； η_T —变压器平均负载率； PF —平均功率因数； ΔP —有功冲击； ΔQ —无功冲击。

炼钢变 10kV I 段连铸高配和炼钢转炉高配、10kV II 转炉高配无功过补偿；冷轧变 10kV I 段冷轧水处理和精整、10kV II 段酸洗高配无功过补偿，对以上支路的无功补偿装置应加以调整。

2. 基波电压状态分析

(1) 基波电压状态图。根据测试数据，各供母线电压的电压偏差、电压变动与闪变、三相电压不平衡度、最大电压下降分析结果如图 2-2 所示。

(2) 基波电压评价。

1) 电压偏差。平均电压普遍偏高，以下各段母线电压高于或等于标称电压的 5%：35kV 母线；92 号炼钢变的 10kV I 段、10kV III 段母线；93 号新轧变的 10kV II 段母线；94 号冷轧变的 10kV II 段母线，以上各母线总负载约 80MVA。若将配电电压偏差降到 $\pm 3\%$ 以内，则可减小无功损耗约 7%，设平均功率因数为 0.8，则可减少配电系统无功 $80 \times \sqrt{1-0.8^2} \times 0.07 = 3.36\text{Mvar}$ ，设无功当量为 5%，则可减少无功损耗 168kW，全年可节电 50 万 kWh 左右。

2) 电压变动与闪变。由于 LF 炉的无功冲击严重，钢轧总降 33kV 母线的电压变动和闪

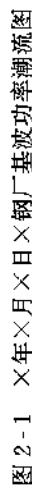


图 2-1 ×年×月×日×钢厂基波功率潮流图

变均超过国标限值，最大电压下降达 12%，建议在 33kV 上设置 SVC 解决上述问题。

冷轧变 10kVⅢ段母线电压大于 1% 电压变动超过 15505 次/小时，这是造成 3 号变压器有异常声音的根本原因。10kVⅢ段母线所带负载无功冲击并不大（1.48Mvar），不会造成大于 1% 的电压变动，但此处有功冲击确高达 32MW；在一定条件下也会造成电压的变动超标。建议从轧钢工艺和供电系统两方面进一步查找电压变动超标的原因并制定相应的解决方案。

3. 谐波电压状态分析

（1）谐波电压状态图。根据测试数据，各供母线电压的总谐波畸变率、主导谐波电压含有率，分析结果如图 2-3 所示。

（2）谐波电压评价。

1) 电压总谐波畸变率。新轧变 10kV I 段和 10kV II 段、33kV 母线、35kV 母线、110kV 母线、220kV 母线电压总谐波畸变率均严重超标。

2) 主导谐波电压。新轧变 10kV I 段和 10kV II 段、33kV 母线、35kV 母线、110kV 母线、220kV 母线的主导谐波电压以大于 50 次的谐波电压为主，其中 83 次谐波电压最为严重，新轧变 10kV I 段母线 $HRU_{73} = 7.01\%$ 、 $HRU_{83} = 2.06\%$ ，10kV II 段母线 $HRU_{73} = 5.92\%$ 、 $HRU_{83} = 2.90\%$ ，35kV 母线 $HRU_{83} = 9.76\%$ ，110kV 母线 $HRU_{83} = 6.08\%$ ，220kV 母线 $HRU_{83} = 5.75\%$ 。

4. 谐波潮流分析

（1）谐波潮流图。根据测试数据，各供电线路的谐波电流、谐波电压、谐波功率及谐波功率流向分析结果如图 2-4 所示。

（2）谐波潮流评价。

1) 谐波源。59、61、71、73、83、85、95、97 等高次谐波电流主要是由热轧主传动产生，冷轧变 10kV I 段母线负载产生 45 次和 65 次谐波电流，炼钢变 10kVⅢ段母线负载产生 11 次谐波电流，冷轧变 10kVⅢ段母线负载产生 19 次谐波电流。

2) 谐波传递。热轧主传动产生的 83 次谐波电流注入系统产生的 83 次谐波电压最为严重，35kV 母线的 83 次谐波电压分别传递到 220kV 和 110kV 母线，进而大面积影响配电系统的负载：如 33kV LF 炉、高炉风机、钢岔热电厂发电机组，93 号新轧变 10kV I 段和 II 段负载等。

数据分析表明，110kV 母线负载的 83 次谐波功率高达 90kW，220kV 母线负载的 83 次谐波功率接近 100kW，加上 59、61、71、73、85、95、97 等各次谐波损耗，马钢新区配电系统总的谐波损耗功率应在 300kW 左右，这正是 35kV 开关柜和 1 号主变压器作为谐波功率传递的主要设备出现高频啸叫的原因。

3) 谐波危害。35kV 热轧主传动产生的 50 次以上高次谐波是新区供电系统的主导谐波，并传递到全厂各段母线和线路上，一方面高次谐波引发的谐波故障严重影响配电系统的安全运行，另一方面高次谐波损耗高达 300kW，设平均谐波损耗功率为 100kW，每年耗电按 300 天计算，则谐波损耗电能约 70 万 kWh/年。

4) 谐波治理。根据 35kV 热轧主传动系统谐波阻抗和谐波电流分布设计 RC 高通滤波器，并通过仿真优化滤波器参数，滤除热轧主传动产生的 50 次以上的谐波电流。