

# 冶金企业集中接入配网的谐波影响及对策分析

孙文华<sup>1</sup>, 陈龙<sup>2</sup>, 袁晓冬<sup>3</sup>

(1.常州供电公司,江苏常州 213004;2.中国矿业大学信电学院,江苏徐州 221008;

3.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京 211103)

**摘要:**冶金企业大量非线性负荷接入配电网会对电力系统电能质量造成明显的影响。在介绍典型非线性负荷的电气特性、谐波发射水平的基础上,给出了不同类型谐波源谐波迭加方法。结合常州地区电能质量普查工作,分析了冶金企业产生谐波对电网的具体影响,并提出了相应治理和应对措施。

**关键词:**冶金企业;电能质量;谐波;治理措施

**中图分类号:**TM714

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2013)03-0046-04

冶金企业用电设备多数为非线性负荷,非线性负荷设备向电网中注入谐波,会造成公共连接点的波形畸变,供电质量降低。随着冶金行业的蓬勃发展,非线性负荷不断增长,造成某一地区电网中冶金企业集中接入现象增多。现有的研究中,针对单个冶金企业对电网的影响分析较多,而对集中接入存在的问题研究较少。文中介绍了冶金企业典型负荷谐波发射水平,在多谐波源谐波迭加方法的基础上,分析了冶金企业集中接入产生谐波对常州地区电网的影响,并提出了相应治理办法。

## 1 谐波限值的规定

电能质量是指通过公用电网供给用户端的交流电能的品质。理想状态的公用电网应以恒定的频率、正弦波形和标准电压对用户供电。而在实际工况下,谐波是造成公共连接点电能质量下降的重要因素之一。谐波可能会导致损耗增加、继电保护装置误动作、设备寿命缩短。为了确保电力系统的安全运行和供电设备的正常工作,必须对谐波污染加以限制。我国国家标准 GB/T14549-1993《电能质量 公用电网谐波》对电力系统谐波电压、谐波电流限值做出了明确的规定。

## 2 冶金企业典型负荷的谐波分析

冶金行业用电设备主要为直流电动机和变流器驱动、交流电动机变频调速驱动、变压器、电抗器、电力电子装置等非线性负载。非线性负载是指具有非线性阻抗特性的电气设备,其阻抗随外施电压或电流的变化而变化。当向非线性负荷施加标准正弦波形的电压时,它将产生非正弦波形的电流。因此,非线性负荷最大特点是会引起电力系统电压或电流正弦波形的畸变,产生谐波分量。

电弧炉、中频炉、轧机等设备是冶金企业最常用的也是最主要的非线性负荷。下面就冶金企业典型非线性负荷谐波发射水平做简要分析。

### 2.1 电弧炉

电弧炉在冶炼过程中,主要因为电弧阻抗不稳定,并且在交流电弧的半个周期中电弧阻抗也在变动,造成了电弧电流的非正弦畸变,产生各次谐波。电弧炉电弧电流具有数值大而且不平衡、畸变和不规则波动的特点。电弧炉交流电的正负半周换相,电极和炉料交替作为阴极和阳极,导致电流正负2个半周不对称,造成偶次谐波;三相电弧不平衡导致3次谐波<sup>[1]</sup>。所以其电流波形不是正弦波,可分解为2次和2次以上的各次谐波电流,主要为2~7次,其中各次谐波平均值含有量和最大含有量可达基波分量的百分比如表1<sup>[2]</sup>所示。常州市某冶金企业电弧炉10kV炉前变谐波电流含有量实测值表如2所示。

表1 电弧炉谐波电流含有率

谐波次数/次	平均值/%	最大值/%
2~3	5~10	15~30
4~7	2~6	6~15

表2 电弧炉谐波电流发生量实测值

谐波次数/次	实测值/%	谐波次数/次	实测值/%
2	10.45	8	1.00
3	9.38	9	0.88
4	4.56	10	0.62
5	5.80	11	0.60
6	2.40	12	0.45
7	2.02	13	0.40

### 2.2 中频炉

中频炉中频电源主电路采用三相全控整流桥,包括整流电路、逆变电路和负载谐振电路。整流器件为晶闸管,应用电路多数为6脉波或12脉波整流电路。在6

脉波整流的电路中,交流侧电流中含 $6k\pm 1$ ( $k$ 为正整数)次谐波电流,这些谐波成为整流电路的特征谐波<sup>[3]</sup>。各次谐波有效值与谐波次数成反比,而且与基波有效值的比值为谐波次数的倒数。即6脉波整流的中频炉中,5次和7次谐波含所占比例较高,对总谐波含量影响最大。11次,13次,17次,19次谐波含量相对较高,对谐波总含量也有一定影响。同理,若中频炉的整流电路为12脉波整流,则特征谐波的次数为 $12k\pm 1$ 。依次类推,脉波整流电路的特征谐波次数为 $pk\pm 1$ 。实际测试中某企业中频炉谐波电流频谱如图1所示。

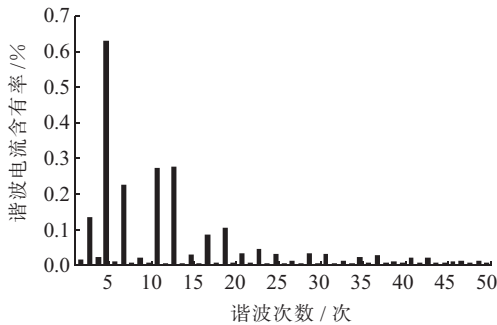


图1 6脉波中频炉谐波电流频谱

### 2.3 轧机

轧机是实现金属轧制最常用的设备。现代大型轧机运行时产生的有功冲击和无功冲击对电网的频率和电压都产生影响。由于轧机控制性能的要求,大部分轧机主传动装置使用晶闸管整流的直传动系统,部分轧机主传动使用晶闸管变流的交-交变频传动系统。轧机系统的整流装置属于典型的脉冲整流装置,轧机由于晶闸管调相调压的非线性特点,造成轧机电流电压波形畸变,产生大量的谐波。

## 3 多谐波源迭加分析

当某个企业有多台非线性设备,或电网某条线路存在多个企业接入的情况下,各个谐波源产生的谐波相互迭加将对电网产生进一步的影响。在计算多谐波源迭加时,根据谐波源类型的不同主要有以下2种迭加方法。

### 3.1 变流器类型谐波源

中频炉、轧机等谐波源为电力电子变换装置,主要包括各种交直流换流装置、双向晶闸管可控开关设备等。尽管该类谐波源谐波发射水平的影响因素十分复杂和繁多,但有一定的规律。以中频炉为例评估谐波注入,2台炉按下式进行迭加计算:

$$I_h = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h2}^2 + K_h I_{h1} I_{h2}} \quad (1)$$

式中: $I_h$ 为迭加后的第 $h$ 次谐波电流; $I_{h1}$ , $I_{h2}$ 分别为2个谐波源的第 $h$ 次谐波电流; $K_h$ 为迭加系数。当同次谐波源相角差 $\theta$ 确定时, $K_h = 2\cos\theta$ ;当相角差不能确

定时, $K_h$ 按表3选取。当数台中频炉同时计算时,应首先按照2个谐波电流迭加,然后再与第3个谐波电流迭加,依此类推。

表3 同次谐波电流迭加系数

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

### 3.2 时变谐波源

电弧炉负荷属于时变谐波源,发生谐波特征和大小随时间变化,其谐波电流都是随机变化的。因此2台电弧炉同次谐波电流的迭加计算时, $I_{h1}$ 和 $I_{h2}$ 彼此间无任何联系,所以不应用叠加系数,直接按式(2)计算,采用均方根计算值。多台电弧炉同次谐波电流迭加计算也按此方法进行<sup>[4]</sup>。

$$I_h = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h2}^2} \quad (2)$$

冶金企业集中接入配电网地区谐波源分布广泛,准确评估同种和不同谐波源谐波迭加情况,有助于把握电网中谐波的总体含量,为相应的治理措施提供决策依据。

## 4 常州市谐波影响现状

随着常州市现代化工业的迅速发展,炼钢、轧辊、铸造等冶金企业的数量、规模不断增长。常州地区是典型的冶金企业集中接入配电网地区,谐波源负荷类型多且复杂、谐波迭加情况严重。

文中对常州地区电网和主要用户进行了电能质量普测工作。统计在内的40个大容量非线性负荷电能质量污染源用户中,其中32个用户属于冶金企业,且近半数的冶金企业存在电能质量超标现象,如表4所示。

表4 冶金企业主要负荷谐波超标数量 个

用户负荷类型	用户数量	谐波超标用户数量
电弧炉	9	3
中频炉	9	5
轧机	5	4
电弧炉、轧机、中频炉	2	2
变频整流装置	4	0
高压电机	3	0
总计	32	14

可见,冶金企业集中接入配电网谐波超标现象明显,对电能质量造成明显影响。具体测试结果表明:

- (1) 用户谐波电压一般不存在超标现象,谐波电流超标比较普遍,超标的企业中大多数是冶金企业。
- (2) 所有谐波超标用户的主要负荷均为电弧炉、

中频炉、轧机 3 种中的 1 种或几种。此类用户的 5 次, 7 次等典型谐波电压电流含量、谐波畸变率等指标一般都处于较高水平, 且部分指标已经超出国家标准。

(3) 未按要求采取谐波治理措施的企业谐波含量丰富, 谐波都处在较高的发射水平。而已安装滤波装置企业, 谐波含量一般符合国家标准中规定的限值。图 2、图 3 分别为未采取任何治理措施和采用了一定治理措施的企业的谐波电流频谱。比较可知, 不采取治理措施时各次谐波含量丰富, 而应用治理措施的企业虽然 5 次, 7 次等典型次谐波仍高于其他次谐波, 但整体已处于较低水平。

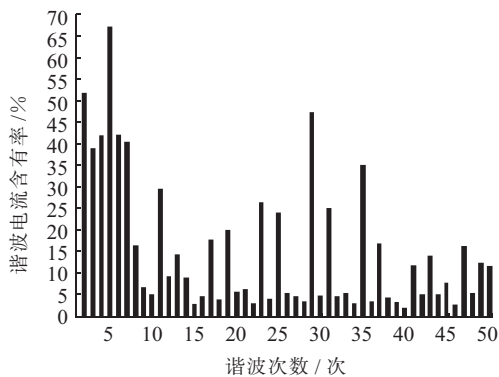


图 2 未采用治理措施时某企业谐波电流频谱

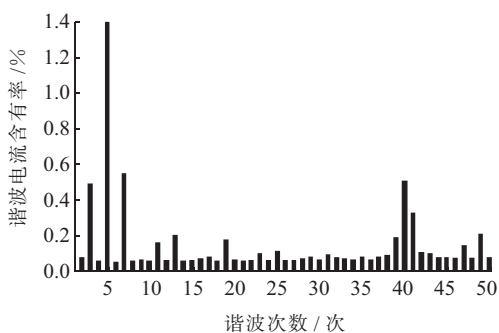


图 3 采用治理措施企业谐波电流频谱

(4) 部分企业已安装 5 次, 7 次等特征次谐波滤波装置, 特征次谐波含量处于限值以下, 但 11 次, 13 次, 23 次, 25 次等其他次谐波含量存在超出标准限值现象, 如图 4 所示。

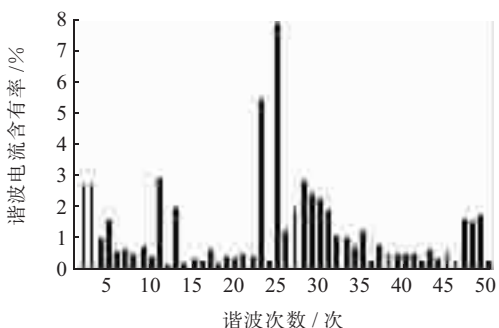


图 4 某企业谐波电流频谱

从常州地区电网整体电能质量测试情况看, 大型电能质量污染企业、工厂分布较少的市区电能质量情

况良好, 基本无谐波超标问题。少数变电站谐波电流含量和总畸变率较大, 超出国标要求, 主要由于低压系统采用的无功补偿装置通常没有考虑谐波的影响所致。农村电网由于自身容量较小, 小型冶金用户非线性负荷分布广, 且用户也较少考虑谐波问题。因此, 它们所带来的电能质量问题, 可能在局部对电网和其他用户造成影响。电能质量指标超出国标限值比较严重的城郊等地区, 一般都存在冶炼、铸造、轧钢等有大量的变频器群和电弧炉等谐波源的重工业企业。

## 5 谐波治理措施

### 5.1 常州地区现状

冶金企业集中接入地区谐波超标现象普遍, 对电网造成影响恶劣, 必须加以限制。现有的谐波治理装置主要分为无源滤波器和有源滤波器 2 种, 谐波治理的另一个方向是, 谐波治理与无功补偿相结合的方式。

常州地区统计在内的 32 家大容量冶金企业中, 已经采用治理措施的企业有 14 家, 其中 9 家采用以单调谐加高通滤波为主的无源滤波器和 5 家应用静止无功补偿装置(SVC)进行综合治理。从治理效果上看, 采用无源滤波装置进行谐波治理的企业中, 仍有部分存在高次谐波超标现象, 而应用 SVC 进行综合补偿的企业谐波水平几乎均控制在合理的范围内。由于技术经济等多方面的原因, 有源滤波器尚未在常州地区大规模投入使用。

### 5.2 典型案例

常州市在谐波超标的冶金企业中, 有近 1/3 的用户是在安装了滤波器后仍出现谐波超标现象, 原因主要是这些企业大部分采用无源滤波器, 其本身存在易受电网运行状态影响、只能补偿固定频率谐波等问题。

某冶金企业主要负荷为轧机、中频炉, 生产过程中产生大量谐波, 采用传统的无源滤波装置滤波效果不明显。企业更改治理措施后, 在其配电变电站 10 kV 母线上采用静止无功发生器(SVG)和滤波器(FC)相结合的形式进行滤波和无功综合补偿, 其一次系统图如图 5 所示。该方案能够对系统的无功量进行跟踪补偿, 做到无级调节, 并能有效滤除谐波, 稳定电压。设备运行之后谐波治理的效果显著, 各项指标均满足国家标准。治理前后电流波形如图 6 所示。

### 5.3 滤波方案

冶金企业一般可采用增设 5 次, 7 次, 11 次, 13 次静态型无源滤波装置进行就地治理<sup>[5]</sup>, 滤波器典型组合见表 5。效果不明显时, 宜配置有源滤波器或采用谐波治理与无功综合补偿相结合的方案。有源电力滤波器(APF)能补偿各次谐波, 原则上能达到完全滤波的效果。而 SVC 和 SVG 在谐波抑制、综合补偿的实践中

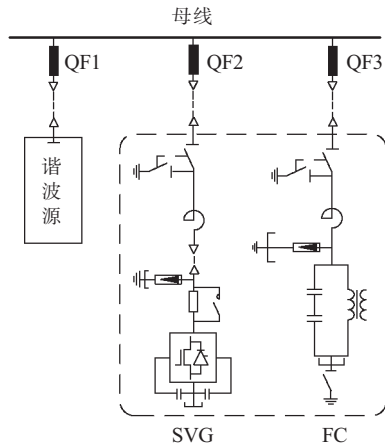
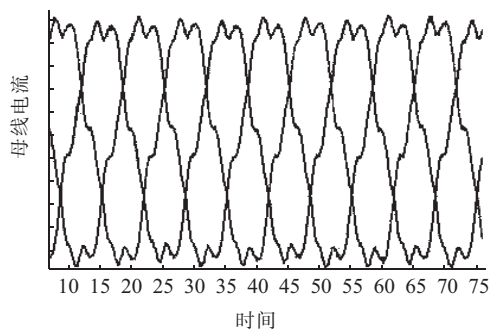
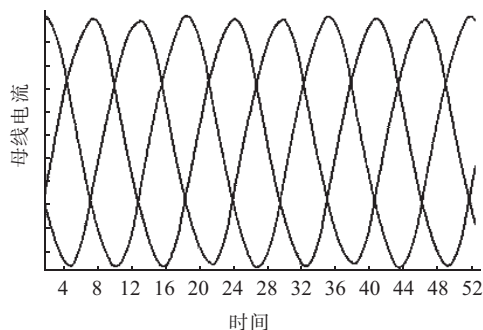


图5 SVG和FC相结合的一次系统



(a) 治理前



(b) 治理后

图6 治理前和治理后母线电流

显示了技术上的优势和良好的效果，有效地降低了对电网的不利影响。在设计滤波装置时应根据现场供电系统短路容量、变压器短路阻抗、负荷状况等数据考虑具体方案。

冶金企业负荷情况复杂，谐波超标现象严重，治理较为困难。针对冶金企业集中接入配电网的情况，电力管理部门应从宏观上更加有计划的制定谐波治理措施，避免企业由于经济技术等原因而放弃治理或采用传统落后的治理方式，避免某个企业谐波治理后符合标准但可能导致其他企业谐波放大等现象。在谐波治理策略上建议考虑综合治理，即在重要谐波源处采用就地治理方式，而对于一般负荷在总进线处集中治理。这样既能达到理想的谐波治理效果，又能节约治理的投入。由此确保电网中谐波含量限制在合理的水平。

表5 滤波器典型组合方案

谐波源描述	滤波与无功补偿装置组合方式(推荐)
交流电弧炉	3次、4次单调谐(或二阶高通)组合或2次C型高通、3次、4次单调谐(或二阶高通)组合
6脉动整流负荷	5次、7次单调谐滤波器与11次高通滤波器组合
12脉动整流负荷	5次单调谐与11次二阶高通组合或5次、7次单调谐与11次、13次、17次二阶高通组合
大功率可关断高速电力器件的高压变频器负荷	5次、7次单调谐与11次、13次、17次二阶高通组合
注入系统的三相3次谐波电流方向不一致	3次单调谐滤波器

此外,还必须贯彻“堵新治旧”谐波管理方针。在审查新上和扩建的电能质量污染源项目的接入方案时,应同时进行谐波项目的评估,谐波治理措施要与工程项目同步实施。对于现有的谐波源用户,在实测的基础上,积极分析治理方案;污染严重的用户,必须提出限期整改的计划和措施。

## 6 结束语

冶金企业集中接入对配电网电能质量影响较为恶劣,为保证电网谐波限制在合理水平,在满足用户要求的基础上保证电网安全经济运行,应加强对谐波等电能质量相关问题的研究,实现更经济适用和切实有效的治理办法。电力部门还需做好引导和监管工作,树立和增强维护电能质量的意识,提升电能质量管理水平,力争为用户提供更优质高效的电能。

### 参考文献:

- [1] 杨奎禄,张仕民.电弧炉对电网的影响及其治理方法[J].四川电力技术,2005(S1):23-25.
- [2] 翁利民,陈允平,舒立平.大型炼钢电弧炉对电网及自身的影响和抑制方案[J].电网技术,2004,28(2):64-67.
- [3] 周孝信,卢强,杨奇逊,等.中国电气工程大典(电力系统工程)[M].第8卷.北京:中国电力出版社,2009.
- [4] 陈延鏢,陆乃城,王敏杰,等.钢铁企业电力设计手册(上册)[M].北京:冶金工业出版社,1996.
- [5] 沈龙大,刘天泽,贾庆勇,等.冶金企业的无功补偿与谐波治理[J].电力设备,2003,4(1):14-17.

### 作者简介:

孙文华(1965),女,江苏常州人,高级工程师,从事电力生产、电能质量监测和管理以及配电自动化的研究工作;  
陈龙(1988),男,河北廊坊人,硕士研究生,从事电能质量相关检测、研究工作;  
袁晓冬(1979),男,江苏南京人,高级工程师,从事电能质量、新能源及智能配网方面的研究工作。

2 轮中,负荷功率被重复计算的问题,在系统中增加了出线减载轮次校验功能。如果一出线间隔同时设置在减载 1 轮和 2 轮中时,则只在 1 轮减载负荷中进行计算,在 2 轮中则不计算此功率。

### 3.3.4 增加出线跳闸校验功能

为了防止减载跳闸出口后,低压出线间隔跳闸失败,开关未分开而造成备自投动作后主变仍然过负荷的异常情况,在系统中增加了出线跳闸校验功能。可在自适应矩阵减载跳闸出口 1~3 s 后,校验低压出线间隔返回的开关位置;如异常,则发出减载失败告警,并根据现场需要决定是否闭锁备自投。

## 4 结束语

通过对传统备自投方法不足之处的分析研究,提出了基于功率负荷自适应的备自投实现方法。根据工程应用的特点,对部分实现方法作了比较分析,并对该方案工程实施细节作了优化处理,提高了备自投保护的可靠性,降低了低压备自投简单动作易造成小容量主变长期过负荷运行或简单和电流闭锁备自投易导致的全站失电的问题,具有较强的实用性。

### 参考文献:

[1] 高翔. 数字化变电站应用技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2008.

- [2] 潘书燕,吕良君,周洪涛,等.一种适用于安全稳定控制系统的备用电源自投装置[J].电力自动化设备,2007,27(2):114-117.
- [3] 杜振华,王建勇,罗奕飞,等.基于MMS与GOOSE网合一的数字化网络保护设计[J].电力系统保护与控制,2010,38(24):178-181,221.
- [4] 范寿忠.备自投过负荷联切功能的实现[J].电力系统保护与控制,2010,38(5):139-140.
- [5] 冯玲.防止备自投装置动作过负荷方案的实践[J].华北电力技术,2006(8):19-20.
- [6] 王德全.110 kV 备自投与保护装置配合问题的分析和探讨[J].江苏电机工程,2010,29(4):41-44.
- [7] 许琦,曹建权.防止因备自投动作引起变压器过载跳闸的分析及对策[J].江苏电机工程,2012,31(4):30-33.

### 作者简介:

赵家庆(1963),男,江苏苏州人,高级工程师,从事电力系统自动化的研究开发、建设运行和技术管理工作;

霍雪松(1976),男,河南周口人,高级工程师,从事调度自动化系统运行管理工作;

钱科军(1981),男,江苏苏州人,博士,从事电力系统自动化系统研发和管理、可再生能源发电并网等工作;

李澄(1970),男,江苏无锡人,高级工程师,从事变电站综合自动化系统与时钟同步领域技术研究与开发工作;

陈颢(1987),男,湖北钟祥人,工程师,从事变电站综合自动化系统的开发及工程应用工作。

## A Method of Automatic Switchover Device Based on Self-Adaptive Electrical Load

ZHAO Jia-qing<sup>1</sup>, HUO Xue-song<sup>2</sup>, QIAN Ke-jun<sup>1</sup>, LI Cheng<sup>3</sup>, CHEN Hao<sup>3</sup>

(1.Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China;2. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

3. Jiangsu Frontier Electric Technology Co. Ltd., Nanjing 211102,China)

**Abstract:** For two main transformers in one power substation, if the capacity of one transformer is not equal to another transformer's or less than the total power load of the substation, the action of automatic switchover device will cause the transformer with smaller capacity overload. However, the action of automatic switchover device with current blocking will cause extensive load loss. Based on the detailed analysis in the shortage of the overload management in traditional automatic switchover device, a novel method of automatic switchover device for traditional and smart substation is proposed based on self-adaptive electrical load.

**Key words:** self-adaptive electrical load; smart substation; automatic switchover device; universal digital interface

(上接第 49 页)

## Harmonic Effect and Strategy Analysis of Metallurgical Enterprises Centralized Connected to Distribution Grid

SUN Wen-hua<sup>1</sup>, CHEN Long<sup>2</sup>, YUAN Xiao-dong<sup>3</sup>

(1. Changzhou Power Supply Company, Changzhou 213004,China;

2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

3.Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Large numbers of nonlinear loads of metallurgy enterprises connected to distribution grid have significant effect on system power quality. After introducing the electrical characteristics and harmonic emission levels of typical nonlinear load, this paper presents the harmonic superposition method of different types of harmonic sources. Combined with power quality test results in Changzhou area, the specific harmonic effect of metallurgical enterprises on power grid is then analyzed, and corresponding measures are also proposed.

**Key words:** metallurgical enterprise; power quality; harmonic; treatment measures