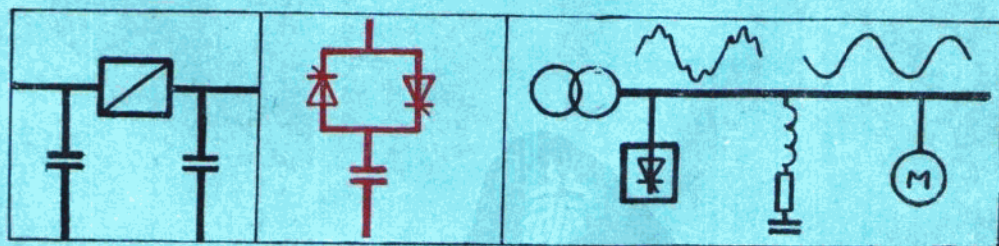


宝钢电网谐波滤波技术

(谐波研究初步成果)



指挥部施工技术处
宝钢电机工程学会
设备部电气技术室

73.762
90/0001

前 言

晶闸管技术在现代大中型企业中愈来愈广泛的应用，同时也大大地增加了注入供电系统的高次谐波，使供电质量下降，成为电网“公害”。为此世界各先进工业国家对电网不同电压等级的电压正弦波畸变率及注入的各次谐波电流允许值都作出了明确的规定，而且对谐波的抑制广泛采用了有效措施，努力把谐波“公害”控制在最小范围以内。我国也于八四年颁布了标准 SD126-84《电力系统谐波管理暂行规定》，以加强谐波管理。

宝钢是我国全面引进国外先进技术的现代化大型钢铁企业，四大轧钢厂传动系统中都广泛采用了晶闸管，亦装备了抑制谐波并兼作补偿的滤波装置，这些技术体现了供货厂商西门子、BBC、AEG、日立等公司的先进水平。为了更好地消化、吸收引进技术，一家引进全国受益，宝钢工程指挥部组织关于“宝钢电网谐波调查及对策研究”的科研工作，在此基础上，我们组织有关科技人员撰写文章，汇编成此文集，作为谐波研究的初步成果，以供同行们参考。

本文集仅是我们消化引进技术、现场测试的初步成果，尚有许多分析、测试工作需要进一步开展，我们将朝着这个方面继续努力。由于时间匆促、限于技术水平，难免有不妥和遗漏之处，望热心的读者予以批评、指正。

编 者

1988.9

目 录

前言

谐波分析及谐波抑制措施在宝钢的应用(设备部谢振德)	1~9
谐波吸收装置的理论基础(宝钢设计研究院瞿昆琦)	10~34
电力系统的谐波及在宝钢开展谐波测试工作的初步探讨(设备部丁天富)	35~46
宝钢初轧厂高次谐波滤波装置介绍及分析(初轧厂陈劲柏)	47~06
钢管厂增加 10 千伏母线上的补偿吸收装置(宝钢设计研究院瞿昆琦姚小庆)	61~77
宝钢热轧厂用高次谐波滤波器(设备部周世民)	78~93
宝钢冷轧厂滤波器介绍(武汉钢铁设计研究院余锦波)	94~111
大量使用晶闸管装置对电网的危害(设备部王燕永)	112~117
电网谐波测试中的几个问题(设备部吴今迈)	118~122
冷轧无功补偿及滤波装置的测试分析(“冷轧厂无功补偿及滤波装置分析研究”课题组	123~129
武汉钢铁设计研究院 余锦波 宝钢工程指挥部 张春林 执笔)	

附录

附录	常用符号一览表	129~130
附录	名词术语	130~132
编后语		133

谐波分析及谐波抑制措施在宝钢的应用

设备部 谢振德

现代大中型企业供电系统的特点是非线性负荷比重很大,尤其是晶闸管整流和变频装置在工业中愈来愈广泛地应用以后,极大地增加了供电系统中的非线性负荷,给电网注入了大量的高次谐波,使供电电压波形畸变,供电质量下降,给连接于同一电网系统的其它用电设备带来了不利影响和危害。为保证电网和用户电气设备的安全运行,必须大力加强谐波管理,分析研究高次谐波产生的原因,查明主要谐波源泉及其分布,积极推广抑制谐波的有效措施,努力把电网电压正弦波畸变率限制在规定的极限值范围以内。

宝钢是我国引进世界先进技术的最现代化的钢铁企业,它所属的四大轧钢厂(初轧、无缝、冷轧、热轧)大量采用了可控硅整流装置和变频装置,为此各厂都拥有一套抑制高次谐波、减小谐波危害的先进技术,且各有其特点,他们分别代表了日本日立、西德BBC、AEG、西门子四大公司的水平,这些技术是值得大力消化、吸收并在我国积极推广、移植的,也是我们宝钢电气工程技术人员的义不容辞的责任。

一、高次谐波的产生

电力系统中的高次谐波来源于工厂中的非线性负荷:如变压器是电力系统中的主要元件,其容量可达系统总装机容量的四倍以上,但由于铁磁饱和的原因向电网注入了大量的严重畸变的稳态励磁电流和接入电网运行时的瞬态励磁涌流;电弧炼钢炉因电弧特性的非线性及熔炼期负荷电流的大幅度变化,轧钢电动机所承受的极大冲击电流以及电焊机的断续冲击电流等都将使电网电流产生复杂的谐波分量而形成谐波电流源,但目前最主要的谐波电流源还应是硅整流、晶闸管整流和变频装置。六十年代以来,半导体技术特别是晶闸管技术得到了迅速的发展,新器件(如快速晶闸管、可关断晶闸管GTO、功率晶体管GTR等)如雨后春笋地不断出现,各种新颖的整流、变频装置也相继开发使用,元器件的大量生产及成本的降低,使电力传动系统发生了深刻的变化:尽管直流发电机组有着供电电压波形稳定、平滑、供电质量较高、对电网影响小等优点,但晶闸管供电具有 di/dt 大、时间常数小、运行可靠性高、维护工作量小、总投资便宜、无噪声等一系列明显的优点,故正在不断取代直流发电机组,不仅新建直流电源几乎全部采用晶闸管整流装置,就是原有的直流发电机组也正逐步被改造为晶闸管供电装置;过去在调速系统中占绝对优势的直传动目前正逐步为交流调速技术所取代;原有的用一般交流电机拖动的风机水泵大量采用交流调速节能技术,其高效的变频调速、串级调速和无换向器电机等都含有晶闸管整流、逆变单元。上述晶闸管整流、变频装置在冶金、化工、铁道系统等领域中应用愈来愈广泛,有些场合(如轧钢厂)占有很大的负荷比例,给电网注入了大量的谐波电流,导致电网电压正弦波形严重畸变,远远超过了谐波管理规定的极限值,如某厂10kV电网在接有3250kW交交变频装置后,电网谐波畸

变率最高已达 12.85%，大大超过了国标 4% 的规定。

众所周知，晶闸管整流装置在网侧产生的特征谐波次数 h 和其电流幅值 I_h 可由下式来计算：

$$h = KP \pm 1 \quad (1)$$

$$I_h = \frac{C}{h} I_1 (A) \quad (2)$$

式中： K 为任意正整数， P 为整数电路相数即整流电压脉动次数， I_1 为基波电流值， C 为经验系数

理论上 C 值等于 1，但由于换向重迭现象、直流电流脉动等原因，实际上的 C 值都是小于 1 的，各国都有自己的经验系数；我国推荐的 C/h 值列于表一^[4]之中。

表一 谐波电流与基波电流的比值

脉波数 P	谐波次数 h (相对于基波电流的标么值)							
	5	7	11	13	17	19	23	25
6	0.175	0.110	0.045	0.029	0.015	0.010	0.009	0.008
12	0.026	0.016	0.045	0.029	0.002	0.001	0.009	0.008
18	0.026	0.016	0.007	0.004	0.015	0.010	0.001	0.001
24	0.026	0.016	0.007	0.004	0.002	0.001	0.009	0.008

由于电网电压的不对称、触发延迟角不对称等非理想因素的存在，变流器不可避免地会产生其它非特征次数的谐波。对于交交变频装置，不仅产生上述特征谐波，还会在其旁二侧产生旁频谐波，其谐波次数为

$$h = (KP \pm 1) \pm 6nf_1/f_2 \quad (3)$$

式中 $n=0, 1, 2 \dots$ ， f_1 为电源频率， f_2 为交交变频器的输出频率。

由上述公式可知，随着脉动数 P 的增加，所含高次谐波的最低次数也增加，谐波电流幅值则变小。

宝钢 2000 多台直流电动机中，除港口卸船机等几台直流电动机仍采用直流发电机供电外，其它直流电动机（从 0.37kW 到 6200kW）几乎全部采用晶闸管整流装置供电，一期工程总容量约 126,000kW，540 套，其中初轧厂 210 套、容量 55000kW，钢管厂 154 套、41000kW；二期工程冷轧厂主机整流装置共 38 套，容量 89482kW，热轧厂仅 35kV 电网就有 22 套，容量约 89300kW。

另外还有各种变频装置，其中大型的有高炉鼓风机用 48000kW 同步电动机的起动变频装置 12000kW 一套，热轧厂粗轧 R_3 机架用 9000kW 同步电动机的交交变频器一套，钢管厂中频淬火 2000Hz 变频装置六台共 4100kW。

表 2 为宝钢主要晶闸管供电系统一览表

二、谐波的影响与危害

供电系统中非线性负荷所产生的高次谐波电流，在线路上造成谐波压降而引起电网

电压波形畸变,使供电质量下降,对线路上的其它电气设备带来不利影响甚至危及正常工作,下面简介受其影响和危害的主要用电设备:

1. 电容器: 高次谐波电流最明显、最严重的危害对象是补偿功率因数用的电力电容器。当这些电容器与系统电机之间在某次谐波附近产生并联谐振时,会出现谐波放大现象,使电网电压显著增加,以致造成电容器被击穿损坏;同时使这些电容器流过的谐波电流达到很大的数值,从而引起过负荷发热损坏。如上钢十厂 550mm 热带钢用 6kV 母线上,在 2400KVA 补偿电容器投入后,谐波电流被放大了,尤其是 6 次谐波放大了 19.7 倍^[3](C 投入时的谐波电流为负荷电流的 9.88%,而 C 没有投入时只有 0.5%),致使电容器发热严重。广东韶关钢铁厂二总降 20000KVA 变压器带有 10 吨电炉 5000KVA 电炉变压器等负荷,6kV 母线上装了 3060KVAR 补偿电容器,在该电炉投产后不到一年,经常因电容器鼓肚和放炮而退出运行的共有 173 台。由于几乎所有主要用户都装有补偿电容器,故谐波对电容器的危害也越来越引起人们的重视,同时电容器的容抗与频率成反比,故它对谐波电流最敏感,对较低次谐波电流的放大作用很显著。此外,谐波电流还常使运行中的电容器产生异常的响声。

2. 电机 电网高次谐波电流通过交流电机定子绕组,使线圈发热增加,机轴产生振动,从而降低电机的出力和电磁转矩,还将使异步电机的功率因数恶化,整流器输出直流电压所含的高次谐波交流分量,给直流电机带来如下影响:

1) 换向元件的变压器电势增加,使换向恶化,电刷磨损加剧;

2) 交流分量在绕组中产生附加损耗,在主极表面产生空载脉振损耗,使电机温升增加,出力降低;

3) 磁通的高频脉振产生电磁噪声;

4) 产生与谐波交流分量成正比的轴电势和轴电流。

这样,晶闸管等半导体器件在交直流传动系统中的应用,给电动机的设计、制造带来了值得考虑的新问题。

3. 变压器: 和电机相似,谐波电压使磁路饱和和加激,激磁电流加大,功率损失增加,功率因数恶化,电磁噪声异常;变压器空投时励磁涌流中的二、三次谐波特别严重,对其过流保护和低压保护也是一种相当严重的威胁。

4. 架空线、电线: 由于通讯线路和输电线路平行、交叉布置,且输送的功率又差距极大(输电功率在几万千瓦以上,而通讯功率往往只有几微瓦左右),故输电线中的高次谐波对通讯系统的干扰极大,严重时可使正常通讯受到破坏,其中尤以 16~21 次谐波干扰最强;对于高频、高振幅的谐波电压分量,可能引起电缆放电甚至击穿。

5. 电气仪表: 谐波电流使感应式测量仪表指示不准确、指针出现摆动。

6. 电控系统及继电保护: 高次谐波对取电网电压作同步电压或基准电压的电控系统可产生严重的影响,有时甚至使调节系统不能正常工作;对于目前广泛用于线路快速保护、距离保护、发电机和变压器保护和母差保护的晶体管继电器,由于瞬时谐波的侵入,可能引起过流保护、低压保护继电器等的误动作,影响系统正常工作。

总之高次谐波对电气设备的影响、危害是很大的,必须引起足够的重视,并加强谐波管理,大力推广采用抑制谐波的各种有效措施,使谐波分量控制在规定的极限范围之内。为此一些工业国家在谐波管理上,对电网不同电压等级的电压正弦波畸变率(DDV%)及允许注

表二 宝钢主要晶闸管

厂名	机组名称	电 动 机				整 流 变				
		功 率 (kW)	电 压 (V)	电 流 (A)	台 数	绕 组 数	容 量 (KVA)	一次电压 (kV)	二次电压 (kV)	二次电压 (kV)
初 轧 厂	No1 初轧机	5000	1200	4800	2	3	8550/2×4275	10	1.25	1.25
	No2 初轧机	5000	1200	4700	2	3	8550/2×4275	10	1.25	1.25
	连 轧 V ₁ 、H ₁	1100	750	1580	2	3	3600/2×1800	10	0.75	0.75
	轧 V ₂ 、H ₂	1300	750	1875	2	3	4100/2×2050	10	0.75	0.75
	机 V ₃ 、H ₃	1400	750	2020	2	3	4600/2×2300	10	0.75	0.75
	板 坯 剪	1400	600	2550	2	2	4700	10	1.25	—
	飞 剪	850	600	1600	2	2	2900	10	1.25	—
无 缝 钢 管 厂	穿 孔 机	2600	840	3240	2	2	3700	10	0.8	—
	连 轧 1°、2°	2200	840	2740	2	2	3150	10	0.8	—
	3°~6°	2600	840	3240	4	2	3700	10	0.8	—
	7°、8°	1300	840	1640	2	2	1800	10	0.8	—
	张减机 1°~1°	350	530	691	12	2	3150	10	0.48	—
	13°~28°	350	530	691	16	2	3150	10	0.48	—
	感 应 加 热 机	—	—	—	—	2	1200	10	0.55	—
冷 轧 厂	连 轧 1°机架	2×1120	713/925	1720/1290	2×2	3	4410/2×2205	35	0.906	0.906
	2°~5°机架	2×1500	938	1720	2×2×4	3	4410/2×2205	35	0.906	0.906
	1°、2°张卷机	3×720	460/915	1865/838	2×3	{ 3 2	4410/2×2205 1850	35 35	0.906 0.906	0.906
	平 整 机	2×1085	920	1240	2×2	3	3650/2×1825	10	0.883	0.883
	张 力 辊	3×900	557/921	1855/1028	2×3	{ 3 2	3650/2×1825 1825	10 10	0.883 0.875	0.883
	开 卷 机	1×800	551/913	1634/926	2×1	3	3650/2×1825	10	0.883	0.883
热 轧 厂	粗 轧 E ₁ 机架	3000	1040	3090	1	2	4735	35	0.94	—
	R ₁ 机架	2650	566	5820	2	3	9700	35	0.51	0.51
	R ₂ 机架	6200	1069	6325	2	3	2×9800	35	0.95	0.95
	R ₃ 机架	9000	1650	2×1619	1	3	3×5700	35	1.03	1.08
	连 切 头 剪	1600	637	2520	2	3	15600	35	0.7	0.7
	轧 F ₁ ~F ₆ 机架	5000	1189	4425	12	3	15600	35	1.08	1.08
	F ₇ 机架	5000	1189	4425	1	2	7800	35	1.08	—
能 源 部	高炉鼓风机	48000	10000	3349	2	2	18000	10	12	—

变流器供电系统一览表

压 器			变 流 器				组合相数		备 注
接线方式	台数	母线段号	容 量 (kW)	电 流 (A)	脉波数	台数	电动机侧	母线数	
Y/Y-Δ	2		2900kW	2417	6	4	12	24	上、下两变 后器一次绕组 移相 15°
Y/Y-Δ	2		2900	2417	6	4	12	24	
Y/Y-Δ	1		1250	1667	6	2	6	12	
Y/Y-Δ	1		1450	1933	6	2	6	12	
Y/Y-Δ	1		1600	2133	6	2	6	12	
Δ/Δ	1		3200	2670	6	1	6	6	
Y/Δ	1		2000	1667	6	1	6	6	
Δ/Y 或 Δ/Δ	2	50B03	3000kW	+3580/-2050	6	2	6	12	
同 上	2	50B03	3000	+3580/-2050	6	2	6	12	
同 上	4	50B03	3000	+3580/-2050 3580 治	6	1+3	6	12	
同 上	2	50B03	2600	3090	6	2	6	12	
同 上	2	50B03	557	±1050	6	12	6	12	
同 上	2	50B03	2650	+5000/-2650	6	2	6	12	
Δ/Y-5	4	50B03	\	\	6	4	6	6	
Δ/Y-Δ	2		2320	2×1255	6	4	6	12	
Δ/Y-Δ	8		2354	2×1255	6	16	6	12	
Δ/Y-Δ	2		2297	2×1255	6	4	6	12	
Y/Y	2		2562	2×1400	6	2	6	6	
Δ/Y-Δ	1		2309	2×1255	6	4	6	12	
Y/Y	1		2312	2×1255	6	4	6	12	
Δ/Y-Δ	1		2579	2×1400	6	2	6	6	
			2292	2×1255	6	2	6	12	
Y/Δ-11	1	35L	3695	3553	6	2	6	6	
Y/Δ-Y	1	35L	3802	6693	6	2	6	12	
Y/Δ-Y	2	35L	7276	7274	6	2	6	12	
Y/Δ-Y	1	35L	9243	3238	12	1	12	12	
Y/Δ-Y	1	35B	1990	2898	6	2	6	12	
Y/Δ-Y	6	2 台 35L 4 台 35B	6050	5089	6	12	6	12	
Y/Δ-Y	1	35B	6650	5089	6	1	6	6	
Δ/Δ	1	\	12000	1024	6	1	6	6	用作变频启动

入的各次谐波电流值都作出了明确的规定^[2],英国电气委员会早在1976年9月就提出了关于“供电网络谐波的工程技术导则 G5/3”的建议文件,我国水电部也于84年上半年颁布了标准 SD126-84《电力系统谐波管理暂行规定》,对此必须认真贯彻执行。

三、抑制谐波影响的主要措施及其在宝钢的具体应用

为把谐波影响控制在最小的范围内,不仅要减小注入电网的谐波分量,改善供电系统的质量,以减少“电力公害”,而且要提高其它用电设备的抗谐波影响的能力,从设计、结构等角度来改进电气设备本身。下面就这两方面的主要措施作一简要介绍:

1. 改善供电系统质量,减少“电力公害”:为达此目的,就是要抑制、消除电网上的谐波电压,使电压的畸变维持在规定的允许范围以内,常用的主要措施有下述三种:

① 改善供电结构:主要是增加非线性负荷接入点母线的短路容量,减少同样数量谐波电流注入时对电网的影响,同时应尽量将产生大量谐波的非线性负荷基本上与不产生高次谐波的用电设备分在不同的供电母线上。

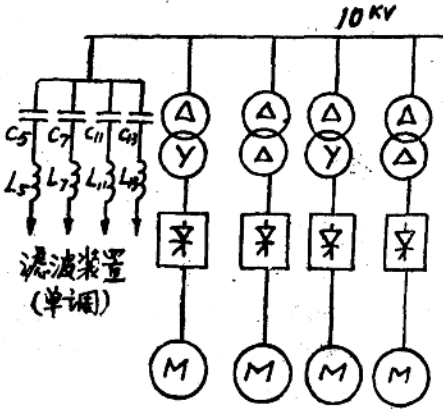
宝钢供电系统的短路容量远大于晶闸管整流装置容量20倍以上,故高次谐波对系统不会有危险的影响。在负荷布置上也尽量按负载性质分类,如钢管10kV供电母线分三段,其中50B03母线段给所有的大中型可控硅整流装置(20套总容量为52250KVA)和几台中频变频装置供电,另外两段母线则供给其它所有负荷和重要用电负荷及照明。又如热轧厂四段35kV供电母线,其中母线段35L专供产生谐波的粗轧机架 R_1-R_3 和精轧机架 F_1-F_2 等整流装置和交-交变频器,母线35R专供产生谐波的 F_3-F_7 等精轧机架用的整流装置,其它两段母线35ML和35MR则专供一般用电设备。

② 增加变流装置的等效脉波数:这是减小谐波电流经济可行的一种有效措施。由公式(1)、(2)可知,增加变流装置脉波数 P 值,可以消除某些幅值较大的低次谐波,如 $P=6$ 时,某些较低次的谐波为5、7、11、13、17、19等,而当 $P=12$ 时,理论上的谐波为11、13、23、25...没有5、7、17、19,实际上尚有5、7等次谐波,但幅值已大为减少,如 $P=6$ 时5次和7次谐波电流为基波电流的17.5%和11%,而 $P=12$ 时,则分别只有2.6%和1.6%了。大中型变流装置多采用 $P=6$ 的三相全控桥式电路,大容量变流器本身需要多个变流器串并联组成,适当增加脉波数($P=12$)并不增加投资。对于多台整流装置并用的供电系统,可利用其供电的整流变压器绕组不同的连接组合或移相来实现等效的多相整流效果,如将相邻两台整流变压器按 Δ/Y 和 Δ/Δ 进行接线,就能使之等效成十二相整流,采用三绕组变压器且两个付绕组彼此接成 Y 和 Δ ,也具有12相整流的等效效果;若再通过变压器一次绕组的曲折接线和组合,可使相互转移相 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 7.5^\circ$,即可等效为24相、36相、48相整流,这样谐波分量则只有 $24K \pm 1$ 、 $36K \pm 1$ 、 $48K \pm 1$ 次了。因脉波数为36或更大对减小谐波已无明显效果,再加上投资增加、维修困难的原因,故不推荐使用。

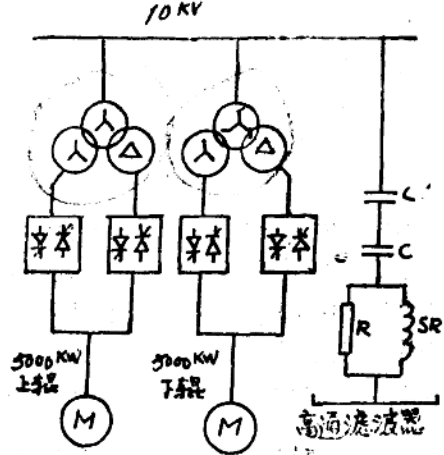
为减小并消除变频器的高次谐波,可采用多重化(二重、三重、四重)技术,尤其是变压器耦合型多重化技术,也可采用脉冲宽度调制(PWM)型逆变器。多重化技术可把输出电压的方波变成阶梯波,以减小谐波分量,而变压器耦合型多重化则可消除某些特定的高次谐波,如二重化的输出只含 $12K \pm 1$ 次谐波,三重化只含 $18K \pm 1$ 次谐波,四重化只含 $24K \pm 1$ 次谐波。PWM型逆变器由于是通过改变每半个周期内开关元件的通断时间比来改变逆

变器的输出电压的幅值,并使每个输出矩形脉冲波电压下的面积接近于对应的正弦波电压下的面积,使输出电压非常接近于基波电压,从而大大削减了高次谐波电压。

宝钢的晶闸管整流、变频装置大量采用了上述这些措施,如钢管厂的各整流变压器都是按 Δ/Δ 、 Δ/Y 接线相间组合的,如图一所示;初轧冷轧和热轧厂则大量采用 $Y/Y-\Delta$ 连接的三绕组变压器;初轧厂 5000kW 电机不但采用两组各 2900kW 整流桥并联供电,还利用上、下辊用的两台三绕组变压器一次绕组移相 15° (一台为曲折接线),使之等效成 24 相整流电路(图二)。



图一 可控硅整流器供电系统图

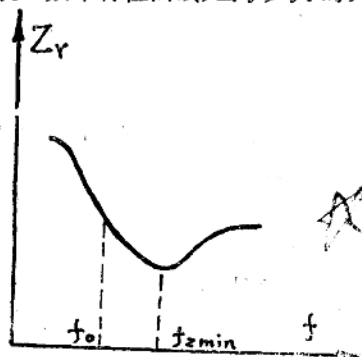


图二 初轧上、下辊5000kW直流电动机供电系统图

宝钢连铸已实现电力拖动全部交流化,在线电动机75%为交流调速系统,全部为PWM控制方式,热轧高速运行辊道380台11kW鼠笼电机也是由PWM型变频器供电的;高炉一、二次除尘风机的起动就是由一套变压器耦合二重化技术的电流型变频器来供电的,热轧R₃轧机采用了西门子公司提供的以交-交变频器供电、用矢量控制的9000kW同步电动机,为了减少电网的谐波(包括旁频谐波),经过变压器接线和电动机绕组相位为 0° 和 30° 时旁频谐波大小的对比,定子绕组采用双Y连接、相差 30° 的结构,使电机等效成了一台六相电动机。

3. 装设滤波器: 滤波器是一种用来减少流入电力系统某一部分的谐波电流或降低加到电力系统某一点上谐波电压的电力设备。滤波器通常安装在非线性负荷侧母线上,是电容和电感(有时还包括电阻)组成的,并使其固有频率按要求和某些特征频率共振,从而吸收大部分谐波源注入电网的谐波电流,减少电网中的谐波及其影响,这已成为广泛采用的抑制谐波的技术措施之一。可采用的滤波型式有调谐滤波器(如图一所示的单调或双调)和高通滤波器(如图二中所示)两大类。调谐滤波器是利用电容、电感调谐于某一特定频率,以形成该次谐波的低阻抗通路,通常用于幅值较大的5、7、11、13等谐波的滤波;也有把滤波器的谐振频率设定在两个特征频率之间,用一套滤波器去减小这两种谐波分量的,如11点几次滤波器以削减11和13次谐波的影响,从而减少滤波器的投资。高通滤波器则不是削弱某一特定次数的谐波,而是同时减小或滤除某些幅值较小的几个高次谐波,通常用于尚需抑制调谐滤波器更高次数的谐波(如17、19、23、25...)或幅值较小的低次谐波。图3为高通滤波器的

阻抗—频率特性曲线,当 $f > f_0$ 时,阻抗 Z_r 较小,称为通带,可滤除 $f > f_0$ 的各次谐波。为了取得较好的经济效果,通常把滤波装置和无功补偿装置结合起来,即兼顾了无功补偿的需要,因此这种滤波装置既要调谐于某些特定次数的谐波,又要使各滤波器输出的总无功功率满足改善功率因数的需要。



图三. 高通滤波器的阻抗—频率曲线

宝钢四大轧钢厂都装设了谐波滤波装置,初轧厂由于广泛采用三绕组变压器和曲折接线变压器,使负荷最大的四台 5000kW 电动机的整流装置等效成了 24 相整流电路,其它大中型电机的整流装置也等效成了 12 相整流电路,从而大大滤除了 11 次甚至 23 次以下的各次谐波,故该厂装设的是高通滤波器,容量为 6000KVA,滤去 5 次以上的残余高次谐波。钢管厂、冷轧厂都是装设了 5、7、11、13 次调谐滤波器,热轧厂

采用分段分级加滤波器的方案,如 35KVR 段母线上装有 5、7、11、13 四套调谐滤波器,35kVL 段母线上则只装了 5、7、11.5 次滤波装置,而在 6kV 级六段母线上,61A、61B、62B、63B 上仅装有 5 次谐波滤波装置,而 62A、63A 两段母线上的负荷为平整、横切、纵切及粗轧机组的压下、辊道等机械,不少为直流传动系统,晶闸管整流装置较多,故各装有 5、7 两套滤波装置。表三列出了宝钢四大轧钢厂所装设的滤波器、补偿器及其容量。

表三 宝钢四大轧钢厂装设的带补偿的滤波器的无功功率(千乏)

厂名	母线段号	母线电压 (kV)	谐 波 次 数						
			3	4.08	5	7	11	11.5	13
初 轧		10	6000 (高通)						
钢 管	50B03	10	/	6521	6985	3658	2447	/	2102
冷 轧		35	/	/	12140	5940	6480	/	6450
热 轧	35 R	35	/	/	18460	9230	4620	/	4620
"	35 L	35	6920	/	9230	4620	/	4620	/
"	6A1	6	/	/	3940	/	/	/	/
"	6A2	6	/	/	5120	2360	/	/	/
"	6A3	6	/	/	3940	2360	/	/	/
"	6B1]	6	/	/	3540	/	/	/	/
"	6B2	6	/	/	5510	/	/	/	/
"	6B3	6	/	/	4720	/	/	/	/

2. 改进部件结构,提高抗谐波影响的能力。

1) 直流电动机:为克服晶闸管供电谐波的不利影响,直流电机可采取下述一些措施:

1) 为防止轴电流从轴瓦间隙通过而烧坏轴承,可采用两端轴承座都绝缘的办法,在轴上加一接地电刷并接到轴承座外壳上;

- (ii) 采用迭片磁路结构,减少脉振损耗,并改善换向;
- (iii) 为减少电流脉振产生的变压器电势,可采用磁场绕组并联电阻分路的办法;
- (iv) 为提高耐热能力,采用 F 级薄形绝缘材料及真空整浸的工艺方案。

2) 交流电动机: 为克服变频器供电谐波的影响,提高绝缘等级、采用真空整浸工艺、设计更合适的风扇以适应损耗增加、温升增高的要求,增大转轴直径以加强转子的刚度,尽量减少残留的不平衡量,提高部件加工精度使气隙偏心减小从而降低电机的振动与噪声,避免调速范围内的机械共振,采用特殊槽形以抑制高次谐波,有些国家还已研制出专门适应变频器供电的方波电动机。

3. 电力电容器: 为了防止补偿电容及滤波电容器的损坏,必须采取措施防止其电容器与系统电抗之间在某次谐波附近产生并联谐振的可能性,最基本的方法是在补偿电容器回路中串联一组电抗器,使系统并联谐振频率降到变流器所产生的最低次谐波频率以下。为防止并联谐振的危害,采用高于系统电压10%的电容器与整流器并联,适当地选择电容器的安装地点和容量,使尽可能避开谐振条件。

宝钢的直流电机全部采用 F 级绝缘、大电机全采用真空整浸方案、有接地电刷、迭片磁路结构。钢管厂在一般用电设备的供电母线(50B02)上,为避免电网谐振和消除高频振荡,在补偿无功功率的电容器组中串接了 3.4 毫亨/相的电感以形成 204Hz (4.08 次谐波)的谐振频率。

四、几点结论

1. 晶闸管整流、变频装置的广泛应用是当前供电系统中高次谐波的主要源泉,必须引起足够的重视。

2. 电网谐波“污染”供电质量,对系统中的电气设备带来不利影响,甚至危及正常工作,已成为“电力公害”,必须按谐波管理暂行办法严加控制。

3. 积极推广抑制谐波影响和危害的各种有效措施,把谐波分量控制在规定的范围内。

4. 宝钢四大轧钢厂拥有的抑制谐波的措施,代表了当前世界的先进水平,值得大力消化、吸收,并在我国积极推广、移植。

主要参考资料

1. 《钢铁企业电力设计参考资料(上册)》 冶金工业出版社
2. 《电力系统的谐波(讲义)》 华东电力试验研究所 八五年一月
3. “双调式低能耗电力高次谐波滤波装置的研制和运行” 马鞍山钢铁设计研究院电力室 86 年 11 月
4. 《半导体电力变流器与电网互相干扰及其防护方法的守则(报批稿)》国家标准局
5. 《风机水泵调速节能手册》 机械工业出版社
6. 谢振德:“现代化钢厂选用轧机主传动电机应考虑的几个问题”
7. 宝钢有关谐波滤波装置的资料

谐波吸收装置的理论基础

宝钢设计研究院 瞿昆琦

一、傅立叶级数

在工程技术问题中经常要遇到周期现象,交流电的电流和电压波形就是常见的例子。尤其在研究可控硅整流器中的谐波畸变问题,需要将一个周期函数表示为下列形式:

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos kx + B_k \sin kx)$$

该级数叫做三角级数。在工程技术问题中,三角级数还有一种表达形式,对于 $A_k \cos kx + B_k \sin kx$ 可以改写成其它形式

$$\begin{aligned} A_k \cos kx + B_k \sin kx &= \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \left[\frac{A_k}{\sqrt{A_k^2 + B_k^2}} \cos kx + \frac{B_k}{\sqrt{A_k^2 + B_k^2}} \sin kx \right] \\ &= C_k [\sin \phi_k \cos kx + \cos \phi_k \sin kx] \\ &= C_k \sin(kx + \phi_k) \end{aligned}$$

式中

$$C_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$$

$$\sin \phi_k = \frac{A_k}{\sqrt{A_k^2 + B_k^2}}$$

$$\cos \phi_k = \frac{B_k}{\sqrt{A_k^2 + B_k^2}}$$

这样,三角级数就可表示为

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(kx + \phi_k)$$

式中 $C_k \sin(kx + \phi_k)$ 称为 k 次谐波,

C_k 为振幅,

ϕ_k 为初相角

1. 三角函数族的正交性

$\{1, \cos x, \sin x, \cos 2x, \sin 2x, \dots, \cos nx, \sin nx, \dots\}$ 为三角函数族,它们具有下列性质: (m 与 n 是正整数)

$$1) \int_{-\pi}^{\pi} \cos mx \, dx = \int_{-\pi}^{\pi} 1 \cdot \sin mx \, dx = 0$$

$$2) \int_{-\pi}^{\pi} \cos mx \cdot \sin nx \, dx = 0$$

$$3) \int_{-\pi}^{\pi} \cos mx \cdot \cos nx \, dx = \int_{-\pi}^{\pi} \sin mx \cdot \sin nx \, dx = 0 \quad (m \neq n)$$

族中任意两个不同函数的乘积在区间 $(-\pi, \pi)$ 上的积分为零,这种性质叫做三角函数族在 $[-\pi, \pi]$ 上的正交性。

但下列等式是成立的:

$$4) \int_{-\pi}^{\pi} 1 dx = 2\pi$$

$$5) \int_{-\pi}^{\pi} \cos^2 nx dx = \int_{-\pi}^{\pi} \sin^2 nx dx = \pi \quad (n \text{ 为正整数})$$

2. 将已给函数 $f(x)$ 展开成三角级数问题

先假定定义在区间 $[-\pi, \pi]$ 上的函数 $f(x)$ 确能展开成三角级数, 即

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos kx + B_k \sin kx) \quad (1)$$

试问上式系数 A_k, B_k 如何确定? 由于上式右端的级数在区间 $[-\pi, \pi]$ 上的逐项积分为

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{A_0}{2} dx + \sum_{k=1}^{\infty} \left[A_k \int_{-\pi}^{\pi} \cos kx dx + B_k \int_{-\pi}^{\pi} \sin kx dx \right]$$

由于三角函数族的正交性, 除右端第一项外均等于零, 所以

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = \frac{A_0}{2} \times 2\pi = A_0 \pi$$

$$\therefore A_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx$$

再将(1)式两端乘以 $\cos nx$,

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx = \frac{A_0}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \cos nx dx + \sum_{k=1}^{\infty} \left[A_k \int_{-\pi}^{\pi} \cos kx \cos nx dx + B_k \int_{-\pi}^{\pi} \sin kx \cos nx dx \right]$$

上式右端除 $k=n$ 时的那一项是

$$A_n \int_{-\pi}^{\pi} \cos^2 nx dx = A_n \pi$$

以外, 其余各项均等于零, 所以

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx = A_n \int_{-\pi}^{\pi} \cos^2 nx dx = A_n \pi$$

$$\therefore A_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx, \quad (n=1, 2, \dots)$$

同样, 将(1)式两端乘以 $\sin nx$, 然后逐项积分, 可得

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx, \quad (n=1, 2, \dots)$$

由此可知, 若 $f(x)$ 在区间 $[-\pi, \pi]$ 上能展开一致收敛的三角级数(1), 则诸系数 $A_0, A_n, B_n (n=1, 2, \dots)$ 是唯一的, 且必需是

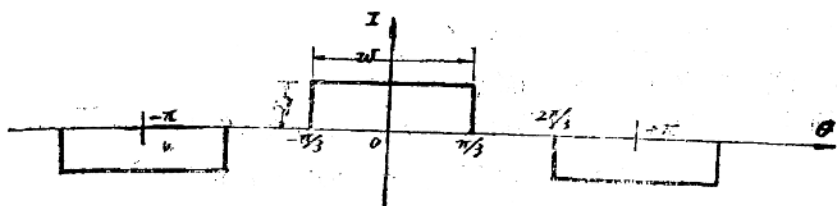
$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \\ A_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx \quad (n=1, 2, \dots) \\ B_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx \quad (n=1, 2) \end{aligned}$$

通常称上面系数 A_0, A_n, B_n 为 $f(x)$ 的傅立叶系数, 以傅立叶系数构成的三角级数

$$\frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nx + B_n \sin nx)$$

称为函数 $f(x)$ 在区间 $[-\pi, \pi]$ 上的傅立叶级数。

二、可控硅阀电流波形数学分析



换流变压器阀侧的阀电流波形如上图所示是一系列等时间间隔 (2π 弧度) 的正的矩形脉冲。而换流变压器的线电流则是一系列等时间间隔, 并轮流出现正的和负的矩形脉冲。这些阀电流和变压器线电流都可展开成傅立叶三角级数:

$$F(\theta) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta)$$

式中

$$\begin{cases} A_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(\theta) d\theta \\ A_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(\theta) \cos n\theta d\theta \\ B_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(\theta) \sin n\theta d\theta \end{cases}$$

上图正矩形波形幅度为 I_d , 宽度为 w 弧度。取横座标 θ 的原点在一个脉冲的中心, 则阀电流波形为偶函数, 其傅立叶三角级数系数 $B_n = 0$, 即级数只有余弦项, 而且所有余弦项的幅值为

$$\begin{aligned} A_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(\theta) \cos n\theta d\theta \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-w/2}^{w/2} I_d \cos n\theta d\theta = \frac{I_d}{n\pi} [\sin n\theta]_{-w/2}^{w/2} \\ &= \frac{2I_d}{n\pi} \sin \frac{nw}{2} \end{aligned} \quad (2-1)$$

$$\begin{aligned} \text{同时 } A_0 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(\theta) d\theta = \frac{1}{\pi} \int_{-w/2}^{w/2} I_d d\theta = \frac{2}{\pi} I_d \frac{w}{2} = \frac{w}{\pi} I_d \\ \therefore \frac{A_0}{2} &= \frac{w}{2\pi} I_d \end{aligned} \quad (2-2)$$

$\therefore$ 阀电流波形(正矩形波形)的傅立叶级数式为:

$$\begin{aligned} F(\theta) &= \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\theta \\ &= \frac{w}{2\pi} I_d + \frac{2}{\pi} I_d \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{1}{n} \sin \frac{nw}{2} \right) \cos n\theta \right] \\ &= \frac{2I_d}{\pi} \left[\frac{w}{4} + \frac{1}{1} \sin \frac{w}{2} \cos \theta + \frac{1}{2} \sin w \cos 2\theta \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3} \sin \frac{3w}{2} \cos 3\theta + \frac{1}{4} \sin 2w \cos 4\theta + \dots \right] \end{aligned} \quad (2-3)$$

当阀电流波形(正矩形波形)符合下列条件时

$$\frac{nw}{2} = K\pi \quad \text{或} \quad w = \frac{2K\pi}{n}, \quad K \text{ 为任意正整数。}$$

则 $\sin \frac{nw}{2} = \sin K\pi = 0,$

这时有些余弦项将消失。例如三相桥式 6 脉动换流系统中,理想阀电流脉冲宽度

$$w = \frac{2\pi}{3}。$$

当 n 为“3”的倍数时,

$$\frac{nw}{2} = \frac{n\pi}{3}$$

$$\sin \frac{nw}{2} = \sin K\pi = 0,$$

其对应的余弦项都等于零。所以理想的阀电流中没有三次谐波和三倍次谐波。

如果研究上图中负脉冲波形,则可得相似式(2-3)的三角级数 $F_1(\theta)$

$$F_1(\theta) = -F(\theta + \pi)$$

代入(2-3)式得:

$$\begin{aligned} F(\theta) &= \frac{2I_d}{\pi} \left[-\frac{w}{4} - \sin \frac{w}{2} \cos(\theta + \pi) - \frac{1}{2} \sin w \cos 2(\theta + \pi) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{8} \sin \frac{3w}{2} \cos 3(\theta + \pi) + \frac{1}{4} \sin 2w \cos 4(\theta + \pi) + \dots \right] \\ &= \frac{2I_d}{\pi} \left[-\frac{w}{4} + \sin \frac{w}{2} \cos \theta - \frac{1}{2} \sin w \cos 2\theta \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{8} \sin \frac{3w}{2} \cos 3\theta - \frac{1}{4} \sin 2w \cos 4\theta + \dots \right] \end{aligned} \quad (2-4)$$

换流变压器阀侧线电流是一系列等时间间隔,并交替出现正的和负的矩形脉冲。这样的线电流波形的傅立叶级数式显然是(2-3)(2-4)两式之和,即

$$\begin{aligned} F_2(\theta) &= F(\theta) + F_1(\theta) \\ &= \frac{4I_d}{\pi} \left[\sin \frac{w}{2} \cos \theta + \frac{1}{8} \sin \frac{3w}{2} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \sin \frac{5w}{2} \cos 5\theta + \dots \right] \end{aligned} \quad (2-5)$$

在三相桥式整流中 $w = \frac{2}{3}\pi,$

$$\begin{aligned} \therefore F_2(\theta) &= \frac{4I_d}{\pi} \left[\sin \frac{\pi}{3} \cos \theta + \frac{1}{8} \sin \pi \cos 3\theta + \frac{1}{5} \sin \frac{5\pi}{3} \cos 5\theta + \frac{1}{7} \sin \frac{7\pi}{3} \cos 7\theta \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{11} \sin \frac{11\pi}{3} \cos 11\theta + \frac{1}{13} \sin \frac{13\pi}{3} \cos 13\theta + \dots \right] \\ &= \frac{4I_d}{\pi} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta - \frac{1}{5} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \cos 5\theta + \frac{1}{7} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \cos 7\theta \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{11} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \cos 11\theta + \frac{1}{13} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \cos 13\theta + \dots \right] \\ &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\cos \theta - \frac{1}{5} \cos 5\theta + \frac{1}{7} \cos 7\theta - \frac{1}{11} \cos 11\theta + \frac{1}{13} \cos 13\theta + \dots \right] \end{aligned} \quad (2-6)$$

从(2-6)式中可看出,在理想条件下,不计换相角,三相六脉动换流桥变压器阀侧线电流中,除基波电流外,只含有 $6K \pm 1$ 次谐波。线电流中基波电流幅值

$$I_{(1)m(r=0)} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d = 1.103 I_d \quad (2-7)$$

基波有效值

$$I_{(1)rms(r=0)} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \times \frac{1}{\sqrt{2}} I_d = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d = 0.78I_d \quad (2-8)$$

n 次谐波的有效值为

$$I_{(n)rms(r=0)} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} I_d \times \frac{1}{n} = \frac{I_{(1)rms(r=0)}}{n} = \frac{0.78I_d}{n} \quad (2-9)$$

三、逆变器电压波形数学分析

1. 基本的三相六阶梯逆变器电路

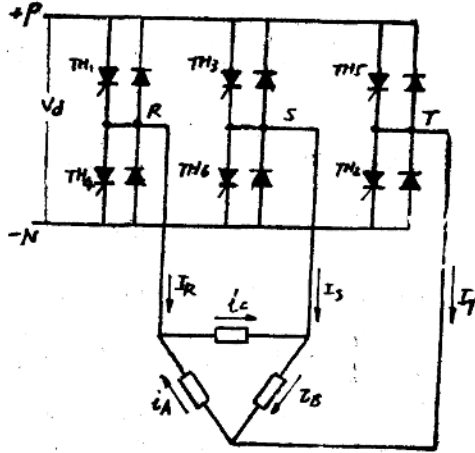


图 3-1 负载为三角形联接的基本三相桥式逆变器电路

静止逆变器必需产生频率和电压都可以改变的三相输出。最简单的三相逆变器是图 3-1 所示的三相桥式逆变器电路。此电路六阶梯逆变器工作时，每个可控硅导通的周期为 180° 。通过导通的可控硅，使每个输出端 R, S, T 交替地联接到直流电源的正端与负端。保持输入到逆变器每个桥臂上的触发脉冲相互位移 120° ，就可获得三相输出。图 3-1 中可控硅按其正确的触发次序编号，这就是说它们必需按 $TH1, TH2, TH3, TH4, TH5, TH6$ 的次序以同样的时间间隔加以触发，以完成输出电压的一个周波。逆变器输出频率取决于可控硅的触发频率

2. 电压波形

取直流电源的负线作为基准点 N ，并假定瞬时换向，则输出端电压 U_{RN} 、 U_{SN} 和 U_{TN} 为图 3-2 所示方波。

当可控硅 $TH1$ 导通时， U_{RN} 等于直流电源电压 V_d ，而当 $TH4$ 导通时， U_{RN} 等于零。反馈两极管使输出电压钳位在直流电源电压上，这样，在电抗性负载下，就保持了平顶的方波输出电压。

线电压可以用端电压相减办法得到，于是

$$U_{RS} = U_{RN} - U_{SN}, U_{ST} = U_{SN} - U_{TN}, U_{TR} = U_{TN} - U_{RN}.$$

因为线电压由两个方波端电压相减得到，所以线电压不包含三次或三的倍数次的谐波，这是