

## 交流电弧炉 SVC 装置 2 次滤波支路设计校核新方法

段晓波<sup>1</sup>, 朱明星<sup>2</sup>, 胡文平<sup>1</sup>, 戎士洋<sup>1</sup>, 钱辰辰<sup>2</sup>, 韩冰<sup>2</sup>

(1. 国网河北省电力公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 教育部电能质量工程研究中心, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 交流电弧炉不仅属于典型的谐波污染源、闪变发生源, 而且交流电弧炉冶炼过程在 2 次附近产生较大的间谐波分量。基于某实际钢铁公司交流电弧炉谐波发生量和 SVC 装置参数的定量分析及仿真研究, 得到交流电弧炉必须设置 2 次 C 型滤波器, 保证将电弧炉 2 次左右的谐波和间谐波放大控制在一定范围内的研究结论。在此基础上给出 2 次滤波支路的设计方法, 提出了 2 次滤波支路安全校核新方法, 指导交流电弧炉滤波装置工程设计。

**关键词:** 交流电弧炉; 谐波和间谐波; 静止无功补偿器; 2 次 C 型滤波器; 安全校核

### Research on the design and check method of the secondary filter branch for SVC device of the AC arc furnace

DUAN Xiao-bo<sup>1</sup>, ZHU Ming-xing<sup>2</sup>, HU Wen-ping<sup>1</sup>, RONG Shi-yang<sup>1</sup>, QIAN Chen-chen<sup>2</sup>, HAN Bing<sup>2</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. Power Quality Engineering Research Center of Ministry of Education, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The AC arc furnace is a typical pollution source of harmonic wave as well as a flicker source. It also produces larger inter-harmonic component during working near secondary harmonic. This paper analyzes and simulates the harmonic quantity and the parameters of SVC device of the arc furnace in a steel company. The conclusion shows that it is better to install the secondary filter of type C for the arc furnace in order to limit the harmonic and interharmonic near secondary. A new checking method is put forward for the secondary filter branch, which is a good method that can instruct the design of the AC arc furnace filter.

**Key words:** AC electric arc furnace; harmonics and interharmonic; SVC; secondary filter of type C; safety checking

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0126-08

## 0 引言

随着电弧炉在冶金行业的广泛应用, 它在工作过程中造成系统的电压闪变、谐波、间谐波和负载不平衡等电能质量问题, 成为电网的主要公害之一, 给电网供电和用户用电带来了严重的危害<sup>[1-5]</sup>。

文献[6]对含有无功补偿的三相对称电弧炉电气系统的谐波分析进行了研究, 讨论了电弧炉供配电系统谐波的特点, 为交流电弧炉SVC装置的设计提供了设计依据; 文献[7-8]建立了一个有效地反映电弧炉运行特性的电弧炉模型; 文献[9]分析了电弧炉工作过程中引起的电能质量问题, 提出了新型拓扑结构的SVC和APF电弧炉无功谐波综合治理方案, 但是没有明确考虑到间谐波的情况且该方案没

有实现混合控制, 经济投资成本大; 文献[10-11]只给出了SVC中TCR部分的设计方法, 没有具体考虑FC部分的设计; 文献[12]详细介绍了SVC的设计方法, 但是没有结合交流电弧炉的实际工作特性; 文献[13]给出了一个交流电弧炉供配电SVC装置的设计步骤, 但是没有具体探讨关于2次滤波支路设计方法; 文献[14-19]分析了电弧炉的工作特性及其对电网的影响, 总结了目前常用的典型无功补偿装置及方法, 但是都没有涉及到SVC装置2次滤波器设计的讨论。

笔者从对国内投运60 t、80 t、110 t、150 t交流电弧炉供配电系统电能质量测试与分析的工作实践角度, 认为目前国内电能质量控制装置制造企业交流电弧炉的谐波治理方面, 特别是2次滤波支路设计方面或多或少地存在一些问题, 例如针对交流电弧炉的SVC装置不设2次滤波支路, 更有甚者将2次滤波支路设计成单调谐型, 完全忽略了对电弧炉工

**基金项目:** 河北省电力公司 2012 综合计划项目(kj2012-048); 青海省重大科技专项(2012-J-A1)

作过程中产生的旁瓣较大的2次谐波的考虑, 造成交流电弧炉的电能质量治理效果不理想或者有一定的负面影响。

基于此背景, 本文基于某实际钢铁公司交流电弧炉谐波发生量和SVC装置参数的定量分析及仿真研究, 对交流电弧炉SVC装置设置2次滤波支路的必要性和设计方法进行研究, 提出了交流电弧炉SVC装置2次滤波支路安全校核的新方法, 为交流电弧炉滤波装置工程设计提供了必要的理论支撑。

表 1 交流电弧炉熔化前期 1~7 次谐波和间谐波电流发生量

Table 1 The fundamental to the seventh harmonic and interharmonics current occurrence quantity at the early stage of steel melting

	A											
h	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2
I	388.47	142.65	189.54	29.63	190.2	81.9	59.07	18.05	42.37	62.03	32.05	12.86
h	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2	3.3	3.4
I	54.8	25.23	34.09	37.6	47.46	19.15	17.52	86.66	60.41	25.4	11.03	27.03
h	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
I	26.27	20.98	14.88	17.93	20.65	11.3	13.87	0.94	3.68	15.24	7.92	6.31
h	4.7	4.8	4.9	5	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8
I	1.31	19.71	31.45	9.55	37.76	12.39	19.65	17.35	3.25	14.03	9.24	14.28
h	5.9	6	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	7
I	7.38	16.54	4.16	0.45	5.41	3.12	11.15	12.89	3.44	7.85	11.42	9.83

将表1得到的交流电弧炉谐波和间谐波电流分量用柱状图表示如图1 (取1.1~4次)。

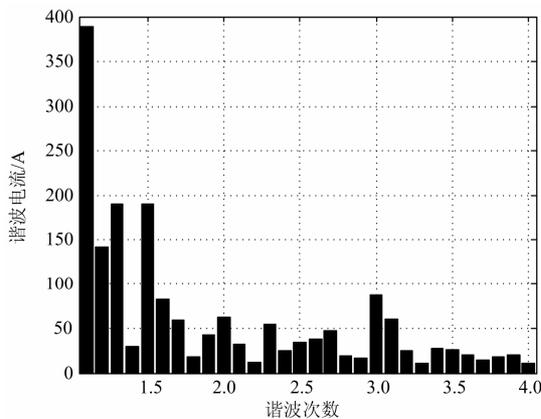


图 1 某钢铁公司交流电弧炉 1~4 次谐波电流发生量

Fig. 1 The fundamental to the fourth harmonic current occurrence quantity in a steel company

由表1和图1可知: 在熔化前期, 由于电弧导电率和长度不规则性, 在1次到4次区间, 除产生整数次谐波, 还产生了丰富的间谐波分量。

## 1 交流电弧炉的谐波分布

对某钢铁企业已投运的 110 t 交流电弧炉进行电能质量测试分析, 选取交流电弧炉熔化前期电弧不规则运行产生谐波电流较大的工况, 选取 10 周波时间宽度做 FFT 分析, 得出交流电弧炉 1~7 次谐波和间谐波电流发生量 (选取 A 相), 见表 1。为分析问题的需要, 未将间谐波分量按照 IEC61000-4-7 标准<sup>[20]</sup>归整到整数次谐波。

## 2 电弧炉谐波滤波与无功补偿装置研究

### 2.1 SVC 装置的参数

该钢铁公司交流电弧炉供配电系统接线示意图如图2所示。

图2中所示某钢铁厂交流电弧炉供配电系统中 SVC 装置滤波器支路参数如表2所示。

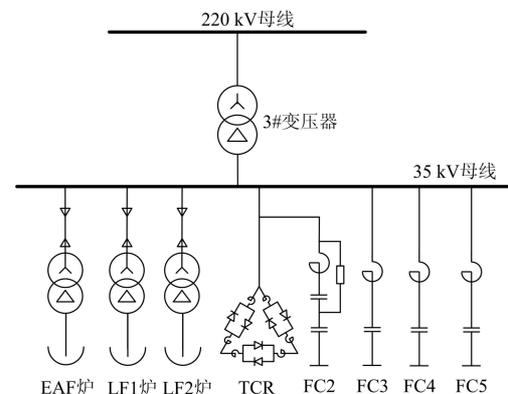


图 2 该钢铁公司交流电弧炉供配电系统接线示意图

Fig. 2 Power supply system diagram for the steel company

表 2 滤波器支路主要参数(单相)  
Table 2 Main parameters of the filter branch (single phase)

支路	电容器型号	数目(单相)	电抗器型号	电阻器
FC2-C 型	AAM8.4-650-1W	8 并 4 串	LKKT-35-619-43.19	RWGL-35/12-2000 6 台
FC3-单调谐	AAM7.2-650-1W	8 并 4 串	LKKT-35-722-14.10	/
FC4-单调谐	AAM6.1-550-1W	5 并 4 串	LKKT-35-451-10.77	/
FC5-单调谐	AAM6.1-550-1W	6 并 4 串	LKKT-35-541-5.74	/

### 2.2 谐波阻抗模型仿真

谐波滤波与无功补偿装置接入后的交流电弧炉供配电系统等效仿真模型如图3所示<sup>[21]</sup>。

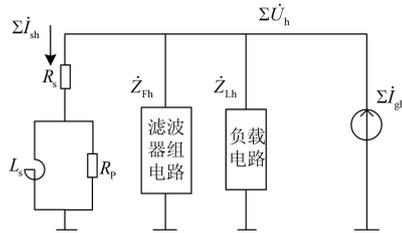


图 3 配电系统等效仿真模型

Fig. 3 Equivalent simulation model of distribution system

图中： $R_s$ 、 $L_s$ 、 $R_p$  为系统阻抗参数； $\dot{Z}_{Fh}$  为滤波装置  $h$  次谐波阻抗，针对滤波装置不同的组合方式， $\dot{Z}_{Fh}$  有不同的值； $\dot{Z}_{Lh}$  为负载  $h$  次谐波阻抗； $\sum \dot{I}_{gh}$  为配电网内非线性负载的谐波电流发生量； $\sum \dot{I}_{sh}$  为非线性负载注入系统的谐波电流； $\sum \dot{U}_h$  为非线性负载注入系统的谐波电流所产生的谐波电压。

根据图 3 所示的仿真模型，定义谐波电流系数  $k_{ih}$  为滤波与无功补偿装置接入后注入系统谐波电流与谐波电流发生量的比值，计算公式如下式所示。它反映了滤波与无功补偿装置中各次滤波支路对谐波的滤波效果。

$$k_{ih} = \frac{\sum I_{sh}}{\sum I_{gh}} = \frac{Z_{Nh}}{Z_{sh}} = \frac{Z_{Lh} // Z_{Fh} // (j2\pi f_i h L_s // R_p + R_s) // (-j \frac{10^6}{2\pi f_i h C_b})}{j2\pi f_i h L_s // R_p + R_s}$$

### 2.3 交流电弧炉 SVC 装置 2 次滤波支路的功能研究

根据表2中给出的该钢铁公司SVC基础参数，仿真得到含有2次滤波支路和不含2次滤波支路的谐波电流系数如图4所示。

含有2次滤波支路和不含2次滤波支路方式下，系统谐波电流系数仿真结果见表3。

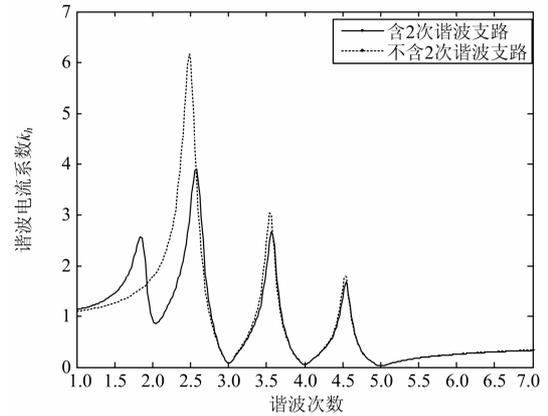


图 4 含有 2 次滤波支路和不含 2 次滤波支路的谐波电流系数  
Fig. 4 Harmonic current coefficient of the the secondary filter branch and non-secondary filter branch

根据仿真结果，得出以下结论：（1）含有2次滤波支路时，2次谐波电流系数为0.94，说明SVC装置2次滤波支路对2次谐波电流基本没有滤波效果。而不含2次滤波支路时，2次谐波电流系数为1.76，造成注入系统的2次谐波电流被放大1.76倍。（2）不设置2次滤波支路，会造成2次和2次到3次区间的某些频率分量的间谐波电流被放大，最大放大倍数可达6倍左右。（3）设置2次滤波支路，如果2次滤波装置的参数选择不合理，也会造成2次左右的某些频率分量的间谐波电流被放大，最大放大倍数可达4倍左右。（4）综合以上三点，交流电弧炉进行谐波滤波与无功补偿装置的设计中，必须设置2次滤波支路，同时要充分考虑滤波装置对2次谐波旁瓣的影响，避免由于滤波装置与系统阻抗发生谐振造成2次左右间谐波电流放大对系统带来的危害。

## 3 交流电弧炉 SVC 装置 2 次滤波支路设计方法

### 3.1 2 次滤波支路选型

滤波器的类型很多，工程应用中最常用的三种类型滤波器如图5所示<sup>[21]</sup>。

表 3 含有 2 次滤波支路和不含 2 次滤波支路系统的谐波电流系数

Table 3 Harmonic current coefficient for the system which contains the secondary filter branch and which does not contain

含有 2 次 滤波 支路	h	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2
	kh	1.16	1.2	1.26	1.34	1.44	1.61	1.9	2.41	2.1	0.94	0.93	1.19
	h	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2	3.3	3.4
	kh	1.54	2.09	3.14	3.72	1.83	0.81	0.32	0.07	0.24	0.45	0.7	1.09
	h	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
	kh	1.94	2.4	1.01	0.45	0.18	0.05	0.14	0.27	0.43	0.7	1.36	1.2
	h	4.7	4.8	4.9	5	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8
	kh	0.47	0.21	0.09	0.02	0.06	0.1	0.13	0.15	0.18	0.2	0.21	0.23
	h	5.9	6	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	7
	kh	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.3	0.3	0.31	0.32	0.32	0.33
不含 2 次 滤波 支路	h	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2
	kh	1.11	1.14	1.17	1.21	1.25	1.31	1.38	1.47	1.6	1.76	2.01	2.4
	h	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2	3.3	3.4
	kh	3.1	4.6	6.07	3.12	1.48	0.73	0.31	0.07	0.25	0.48	0.77	1.27
	h	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
	kh	2.47	2.26	0.93	0.43	0.18	0.05	0.15	0.28	0.45	0.76	1.55	1.15
	h	4.7	4.8	4.9	5	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8
	kh	0.46	0.21	0.08	0.02	0.06	0.1	0.13	0.16	0.18	0.2	0.22	0.23
	h	5.9	6	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	7
	kh	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.3	0.3	0.31	0.32	0.33	0.33	0.34

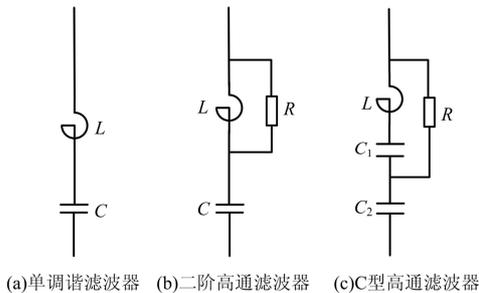


图 5 常用无源滤波器

Fig. 5 Common passive filter

图6所示为单调谐滤波器与C型高通滤波器谐波电流系数对比。

由图6可以得知：

(1) 单调谐滤波器的调谐频率点处阻抗近似为零，但会对在低于调谐频率的某些频率与系统阻抗形成高阻抗的并联谐振。如果对交流电弧炉2次滤波支路采用单调谐滤波器设计，会造成低于2次的间谐波分量的放大。

(2) 由前文的分析结果，电弧炉在熔化前期，会在2次附近产生丰富的间谐波，根据谐波分布而设计合理的2次C型滤波支路，由于增加了阻尼电阻，尽管降低了对2次谐波的滤波效果，但可以有效地避免对2次左右的间谐波的放大。

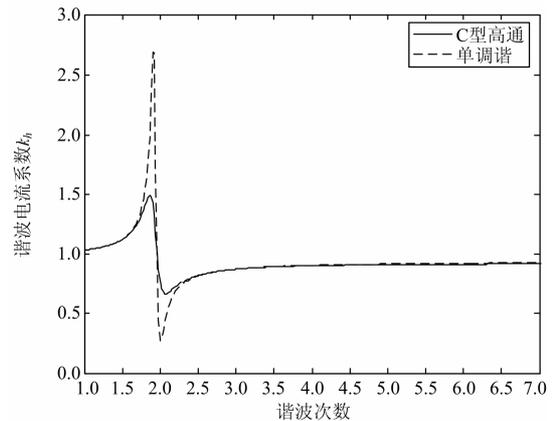


图 6 单调谐滤波器与 C 型高通滤波器谐波电流系数对比图

Fig. 6 Comparison chart for the single tuned filter and the high pass filter of type C

(3) 基于以上分析，交流电弧炉SVC装置2次谐波支路设计必须选用C型高通滤波器设计。

### 3.2 不同滤波器品质因数的影响

C 型高通滤波器的品质因数  $q_{f_{h0}}$  取决于并联电阻  $R$  的值，品质因数  $q_{f_{h0}}$  决定了 2 次 C 型滤波支路对 2 次左右哪些频率分量的间谐波放大和放大倍数，因此研究 C 型高通滤波器的品质因数  $q_{f_{h0}}$  在

8~30 的变化范围,系统的谐波电流系数变化仿真结果如图 7 所示。

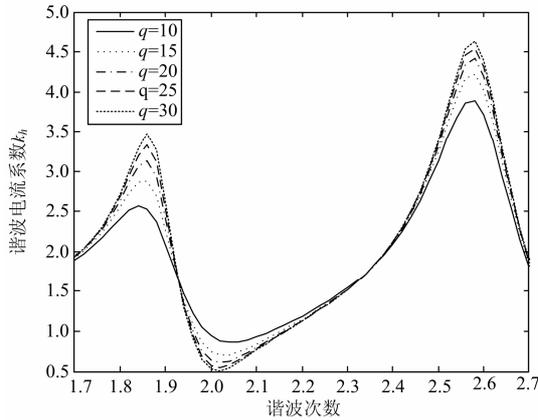


图 7 系统谐波电流系数随 2 次滤波支路品质因数变化曲线  
Fig. 7 Harmonic current coefficient-power factor curve for the secondary filter

由图 7 可知,当滤波器品质因数  $q_{m_0}$  在 8~30 范围内变化时,1.8 次到 2.7 次的系统谐波电流系数有所变化,具体表现为串并联谐振点发生偏移,串联谐振效果得到削减,并联谐振效果得到加强,滤波器品质因数  $q_{m_0}$  越大,通频带越窄,间谐波放大加剧。因此,在实际交流电弧炉谐波与无功补偿装置设计工作中,应结合交流电弧炉的谐波和间谐波的频谱分布,合理选择 C 型高通滤波器品质因数  $q_{m_0}$ ,对 2 次左右的间谐波的放大控制在最小程度。

### 3.3 设计方法

根据本文对交流电弧炉 SVC 装置的 2 次滤波支路研究结果,交流电弧炉 2 次滤波支路的设计应遵循以下的方法:

(1) 设计前必须获取设计对象交流电弧炉的谐波频谱分析,这是交流电弧炉谐波滤波装置设计成败的关键。

(2) 交流电弧炉必须设计 2 次滤波支路,并且 2 次滤波支路必须选用 C 型高通滤波器。

(3) 设计 2 次 C 型高通滤波器时,不仅要考虑对 2 次谐波电流的滤波效果,更应考虑对 2 次左右的间谐波的放大倍数,很多时候,需要牺牲对 2 次谐波电流的滤波效果,从而把 2 次支路对 2 次左右的间谐波的放大控制在一定范围内,可以通过合理选择 2 次 C 型高通滤波器的品质因数来实现。

## 4 交流电弧炉 SVC 装置 2 次滤波支路校核方法

文献[21]给出了设计高压无源滤波装置时对各

滤波支路的校核方法,但是针对交流电弧炉冶炼过程中产生了丰富的间谐波分量的工作特性,笔者认为对于交流电弧炉 2 次 C 型高通滤波支路设计参数的安全校核应不同于一般滤波支路校核方法。

### 4.1 IEC 61000-4-7 的谐波规定

文献[21]指出在设计高压无源滤波装置时,如果存在间谐波频谱分量,应该以 IEC 十周波谐波分析得到的谐波电流分量作为滤波器设计的依据。

IEC 61000-4-7 推荐的 DFT 的时间窗口长度为 10 个周波。当测量窗口宽度为 10 个工频周期时,谐波分析的频率分辨率是 5 Hz,产生了谐波集和谐波子集的概念,如图 8 所示。

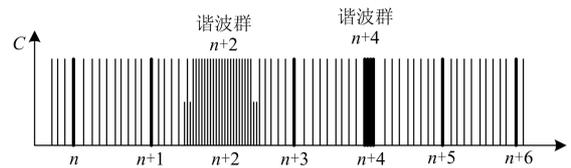


图 8 谐波群和谐波子群示意图

Fig. 8 Harmonic group and harmonic subgroup diagrams

谐波集的计算式为

$$G_{g,n}^2 = \frac{C_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=4}^4 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+5}^2}{2}$$

谐波子集的计算式为

$$G_{sg,n}^2 = \sum_{i=1}^1 C_{k+i}^2$$

其中:  $C_{k+i}$  是 DFT 输出对应的频谱分量的有效值;  $G_{g,n}$  是经过计算得到的谐波集的有效值;  $G_{sg,n}$  是经过计算得到的谐波子集的有效值。

按照 IEC 谐波集和谐波子集的概念计算得到交流电弧炉 2~6 次谐波电流发生量如表 4 所示。

表 4 交流电弧炉熔化前期 2~6 次谐波电流发生量

Table 4 The second to the sixth harmonic current occurrence quantity at the early stage of steel melting

	A				
<i>h</i>	2	3	4	5	6
$I_{gn}$	199.17	133.88	48.504	61.753	30.629
$I_{sgn}$	81.671	107.08	27.322	50.061	18.583

注:表中的  $I_{gn}$  为采用谐波集方法计算所得的 2~6 次谐波电流发生量;  $I_{sgn}$  为采用谐波子集方法计算所得的 2~6 次谐波电流发生量。

### 4.2 SVC 装置滤波支路校核方法

文献[21]提出的滤波支路电容器安全校核方法如下。

(1) 过电压校核

$$K_u U_{CN} \geq U_{C1,max} + \sum_{h \geq 2} U_{Ch,0.95}$$

式中:  $U_{CN}$  为电容器的额定电压;  $U_{C1,max}$  为加在电容器两端的基波电压的最大值;  $U_{Ch,0.95}$  为加在电容器两端  $h$  次谐波电压值;  $K_u$  为电容器的电压因数, 在实际工程中推荐选取原则为如果系统运行基波电压和谐波电压是稳定的则  $K_u = 1$ , 否则  $K_u = 1.1$ 。

### (2) 过电流校核

$$1.3I_{CN} \geq (I_{C1,max}^2 + \sum_{h \geq 2} I_{Ch,0.95}^2)^{\frac{1}{2}}$$

式中:  $I_{CN}$  为电容器的额定电流;  $I_{C1,max}$  为流过电容器的基波电流的最大值;  $I_{Ch,0.95}$  为流过电容器的  $h$  次谐波电流值。

### (3) 过容量校核

$$1.14\sqrt{K_u}U_{CN} \geq (U_{C1,max}^2 + \sum_{h \geq 2} hU_{Ch,0.95}^2)^{\frac{1}{2}}$$

(4) 由 (1)、(3) 计算所得  $U_{CN}$  中大值为电容器最小额定电压  $U_{CN}$ , 由 (2) 计算得到的  $I_{CN}$  为电容器的额定电流, 电容器额定基波容量  $Q_{CN1} \geq U_{CN}I_{CN}$ 。

### 4.3 交流电弧炉 SVC 装置 2 次滤波支路校核方法

其中, 关于流过电容器的  $h$  次谐波电流值  $I_{Ch,0.95}$

文献[21]规定的是 95% 概率大值, 而对于交流电弧炉 SVC 装置 2 次滤波支路校核时笔者按照谐波集方法、谐波子集方法和间谐波得出的三种谐波电流发生量, 得到安全校核结果如表 5 所示。

表 5 三种方法下交流电弧炉 SVC 装置 2 次滤波支路校核结果

Table 5 Check result of secondary filter in the AC electric arc furnace SVC device under three kinds of methods

2 次 C 型高通滤波支路	校核方法	电容器 C1			电容器 C2		
		过电流 $I_{C1}/A$	过电压 $U_{C1}/kV$	过容量 $Q_{C1}/Mvar$	过电流 $I_{C2}/A$	过电压 $U_{C2}/kV$	过容量 $Q_{C2}/Mvar$
计算值	谐波集	524.52	7.9	3.53	525.96	23.77	10.65
	谐波子集	500.32	7.21	3.36	501.48	21.68	10.13
	间谐波	506.06	9.09	3.4	507.3	27.39	10.25
额定值		619.05	8.4	5.2	619.05	25.2	15.6
计算比值	谐波集	0.847	0.940	0.679	0.850	0.943	0.683
	谐波子集	0.808	0.858	0.646	0.810	0.860	0.649
	间谐波	0.817	1.082	0.654	0.819	1.087	0.657
标准比值		$\leq 1.3$	$\leq 1.1$	$\leq 1$	$\leq 1.3$	$\leq 1.1$	$\leq 1$

由表5可以得知:

(1) 对于过电流校核和过容量校核, 采用谐波子集方法的计算比值最小, 谐波集方法的计算比值最大, 但是三种方法的计算比值较标准比值小得多。

(2) 对于过电压校核, 采用谐波子集方法的计算比值最小, 间谐波方法的计算比值最大, 且采用间谐波方法的计算比值已非常接近标准比值, 当交流电弧炉供配电系统的供电电压升高时, 将会引起 SVC 装置的安全。

(3) 交流电弧炉 SVC 装置滤波支路必须按照间谐波进行安全校核, 以保证交流电弧炉 SVC 装置的安全性, 使得交流供配电系统的稳定可靠运行。

## 5 结论

本文基于某实际钢铁公司交流电弧炉谐波发生量和 SVC 装置参数进行定量分析, 讨论交流电弧炉 SVC 装置 2 次滤波支路的设计和安全校核方法, 并得出以下研究结论:

(1) 交流电弧炉的谐波滤波与无功补偿装置必须设置 2 次滤波支路, 且应选取 2 次 C 高通滤波器;

(2) 交流电弧炉 2 次滤波支路的作用是将交流电弧炉 2 次左右的谐波和间谐波放大控制在一定范围内。

(3) 交流电弧炉 2 次 C 高通滤波器的设计应综合电弧炉谐波发生量及频谱分析, 合理选取品质因数  $q_{th0}$ 。

(4) 交流电弧炉 SVC 装置 2 次滤波支路的安全校核方法必须按照间谐波电流发生量进行。

## 参考文献

- [1] 刘书铭, 李琼林, 陈栋新, 等. 中高压配电网非线性用户的电能质量特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 150-154.  
LIU Shu-ming, LI Qiong-lin, CHEN Dong-xin, et al. Study of power quality characteristics of nonlinear electric user in medium-high voltage distribution

- networks[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 150-154.
- [2] 陈艳, 王赛英. 混合型有源滤波器在衡钢供电系统的应用研究及参数设计[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 51-57.  
CHEN Yan, WANG Sai-ying. Application research and design parameters of hybrid active power filter on the Hengyang steel electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 51-57.
- [3] 韩松, 邱国跃, 彭小俊. 瞬时电压闪变监测及定量评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(16): 34-37.  
HAN Song, QIU Guo-yue, PENG Xiao-jun. An investigation on quantitative evaluation and detection of instantaneous voltage flicker[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(16): 34-37.
- [4] 邵振国, 吴丹岳, 林焱. 波动负荷的闪变危害评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 36-40.  
SHAO Zhen-guo, WU Dan-yue, LIN Yan. Evaluating the flicker interference of fluctuating load[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 36-40.
- [5] 堵俊, 郭晓丽, 张新松. 供电系统中闪变源定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 62-65.  
DU Jun, GUO Xiao-li, ZHANG Xin-song. Research on identification of flicker source in power supply system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 62-65.
- [6] 刘小河, 杨秀媛. 电弧炉电气系统谐波分析的频域方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 30-35.  
LIU Xiao-he, YANG Xiu-yuan. Research on harmonic analysis of arc furnace electric system based on frequency domain method[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 30-35.
- [7] 石新春, 付超, 马巍巍, 等. 基于实测数据的电弧炉实时数字仿真模型及其实现[J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 177-182.  
SHI Xin-chun, FU Chao, MA Wei-wei, et al. A real-time digital simulation model and its implementation for arc furnace based on recorded field data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(7): 177-182.
- [8] 张恺伦, 陈宏伟, 江全元. 电弧炉负荷的三相综合建模与参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 77-82.  
ZHANG Kai-lun, CHEN Hong-wei, JIANG Quan-yuan. Modeling and parameter identification of electric arc furnace load[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 77-82.
- [9] 张定华, 桂卫华, 王卫安, 等. 大型电弧炉无功补偿与谐波抑制的综合补偿系统[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 23-29.  
ZHANG Ding-hua, GUI Wei-hua, WANG Wei-an, et al. Comprehensive compensation system combining reactive power compensation and harmonic suppression for large-scale electric arc-furnace[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 23-29.
- [10] 刘华东, 张定华, 邓建华, 等. SVC 在电弧炉治理中的应用研究[J]. 大功率变流技术, 2009(5): 51-59.  
LIU Hua-dong, ZHANG Ding-hua, DENG Jian-hua, et al. Application research of SVC for electric arc furnace governance[J]. High Power Converter Technology, 2009(5): 51-59.
- [11] 方忠民, 赵延明. 基于 SVC 的电弧炉谐波抑制研究[J]. 中国仪器仪表, 2008(1): 62-65.  
FANG Zhong-min, ZHAO Yan-ming. Study of harmonic suppression for arc furnace based on SVC[J]. China Instrumentation, 2008(1): 62-65.
- [12] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun, et al. Harmonic suppression and reactive power compensation[M]. Second Edition. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [13] 吴杰. 大型电弧炼钢炉 SVC 方案设计及其实效效果[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 76-79.  
WU Jie. Scheme design and its practical effect of SVC for a large scale arc furnace[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 76-79.
- [14] 刘华东, 张定华, 唐建宇, 等. 抑制电弧炉闪变的 STATCOM 直接电压控制研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 41-47.  
LIU Hua-dong, ZHANG Ding-hua, TANG Jian-yu, et al. Research on direct voltage control of STATCOM for mitigating electric arc furnaces flicker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 41-47.
- [15] 刘其辉, 蔚芳, 康长路. 基于电网电压定向矢量变换的 SVC 平衡化补偿策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 147-153.  
LIU Qi-hui, WEI Fang, KANG Chang-lu. Balancing compensation strategy of SVC based on grid-voltage-

- oriented vector transformation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 147-153.
- [16] 帅智康, 罗安, 吴传平. 一种低成本动态无功补偿装置及两级协同优化运行方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 162-170.
- SHUAI Zhi-kang, LUO An, WU Chuan-ping. A novel low-cost dynamic var compensator and two-level collaborative optimization method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 162-170.
- [17] 郑倩. 电弧炉负荷对配电网影响及其治理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- ZHENG Qian. Electric arc furnace load's influence to the distribution network and its governance[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [18] 唐微. 三相交流电弧炉电能质量优化技术研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2011.
- TANG Wei. Optimization technology research of power quality for AC electric arc furnace[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2011.
- [19] 李妍, 余新梅, 文劲宇, 等. 小容量电弧炉所引起的电压波动及抑制措施研究[J]. 继电器, 2003, 31(5): 59-61.
- LI Yan, YU Xin-mei, WEN Jin-yu, et al. Voltage fluctuation analysis and methods for electric arc furnace fluctuation mitigation[J]. Relay, 2003, 31(5): 59-61.
- [20] IEC61000-4-7(2002) electromagnetic compatibility (EMC)-part 4-7: testing and measurement techniques general guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto[S].
- [21] 国家标准化管理委员会. GB/T 26868-2011, 高压电力滤波装置设计与应用导则[M]. 北京: 中国质检出版社, 2008.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 26868-2011, The guide for design and application of high-voltage power filter[M]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2008.

收稿日期: 2013-04-18; 修回日期: 2013-09-13

作者简介:

段晓波(1959-), 男, 双学士, 高级工程师, 主要从事电能质量分析与控制、电网分析工作;

朱明星(1968-), 男, 硕士, 副教授, 硕士研究生导师, 长期致力于大型企业用户供配电系统的电能质量技术监督与管理、电能质量监测与分析、电能质量控制、电能质量综合评估、电能质量仿真技术等领域的科研与教学工作;

E-mail: xysah@163.com

胡文平(1968-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事新能源发电并网、电网分析工作。