

钢铁企业35/10 kV变电所10 kV母线滤波补偿装置改造设计

钢铁企业供配电系统中存在大量高次谐波，除来自供配电系统外，其主要还来源于非线性用电设备，如变流装置和电弧炉等。非线性用电设备引起供配电系统电压波形畸变，即有谐波电流产生。供配电系统存在高次谐波造成多方面的危害和影响，因此对钢铁企业变电所的滤波补偿装置进行升级改造，以满足生产需求。根据实测数据结构对新设计的滤波补偿装置进行校验与仿真，最终新的滤波补偿装置满足设计要求，达到预期结果。

蔡黎明/宝钢工程技术集团有限公司

成电网污染，给对电网中其他电气设备带来危害。由于10 kV I段、II段有新增负荷，原有滤波补偿装置的投入不能有效滤除谐波电流，无法满足目前生产需求，并且无法保证滤波器长期安全运行，存在较大的安全隐患，因此原有滤波补偿装置迫切需要改造，为此本文提出该工程10 kV I、II段母线滤波补偿装置（FC装置）的改造方案。

0 引言

国内现代化大型钢铁联合企业的供电系统由于存在着大量高次谐波^[1]，给钢铁企业的正常供电带来诸多的危害，如产生谐波损耗，使发电、变电和用电设备效率降低；加速电力电缆绝缘老化，而使其容易被击穿；影响继电保护装置正常动作；对通信线路和控制信号造成电磁及射频干扰^[2-3]等。

某钢铁企业冷轧不锈钢带钢工程的主要非线性负荷为轧机整流机组，其在运行过程中快速的无功波动会引起电网电压波动与闪变^[4-5]。另外轧机整流机组在运行过程中产生各种高次谐波，造

1 某钢铁企业冷轧不锈钢带钢工程35/10 kV变电所供电系统简介

冷轧不锈钢带钢工程35/10 kV变电所一期工程于2007年10月投产，一期负荷较轻，视在功率为37.8 MV·A，配置两台40 MV·A的变压器，负荷率仅为47.25%。冷轧不锈钢带钢工程35/10 kV变电所单线系统如图1所示。

该变电所有35 kV主变压器两台，容量为40 MV·A，电压比为35 kV/10 kV。主要负荷有不锈钢二十辊轧机组、不锈钢热轧退火酸洗机组、碳钢酸洗机组和碳钢热镀锌机组等。

所内原有两套滤波补偿装置，每套补偿装置分三组补偿，其安装容量分别为



蔡黎明/工程师

关键词/Keywords

供配电系统·
高次谐波·
非线性负荷·
电压波形畸变·
滤波补偿·

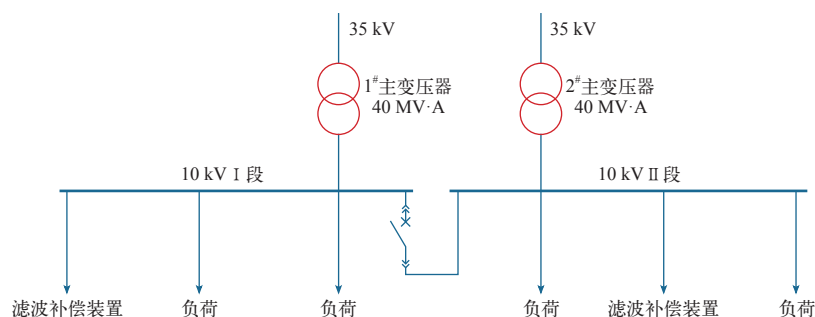


图1 35/10 kV变电所单线系统

2 500 kvar、2 000 kvar和2 000 kvar，两套共计13 000 kvar。

根据用户提供的数据，负荷正常运行时，该变电所10 kV I 段、II 段月平均功率因数约为0.85。电能质量考核点为10 kV母线 I 段、II 段进线处。

2 35/10 kV变电所计算负荷

35/10 kV变电所10 kV I 段：视在功率 $S=30\ 125\text{ kV}\cdot\text{A}$ ，有功功率 $P=25\ 852\text{ kW}$ ，无功功率 $Q=15\ 467\text{ kvar}$ ，功率因数 $\cos\varphi=0.86$ 。将功率因数提高到0.92以上所需总的基波无功功率为 $Q_c=4\ 327.0\text{ kvar}$ 。

35/10 kV变电所10 kV II 段：视在功率 $S=24\ 621\text{ kV}\cdot\text{A}$ ，有功功率 $P=20\ 870\text{ kW}$ ，无功功率 $Q=24\ 621\text{ kvar}$ ，功率因数 $\cos\varphi=0.85$ 。将功率因数提高到0.92以上所需总的基波无功功率为 $Q_c=4\ 049.0\text{ kvar}$ 。

3 35/10 kV变电所谐波电流测试

测试时间为2009年8月12日10:32~2009年8月12日14:50；测试地点为冷轧35/10 kV变电所35 kV配电室；测试仪器为PQ216便携式电能质量分析仪；测试工况为冷轧10 kV I、II进线各主要负荷正常运行，滤波装置未投入运行。

该变电所10 kV I 段、II 段谐波电流数据如表1、表2所示。

表1 变电所10 kV I 段谐波电流值

(单位: A)

谐波次数	二十辊轧 I	热退酸洗 I	碳钢酸洗 I	合计
2	/	/	/	
3	/	/	/	
4	/	/	/	
5	64.2	6.1	2.2	64.5
6	/	/	/	
7	44.7	1.7	0.7	44.7
8	/	/	/	
9	/	/	/	
10	/	/	/	
11	48.3	25.7	3.8	54.8
12	/	/	/	
13	23.1	19.4	3.9	30.4

(续)

谐波次数	二十辊轧 I	热退酸洗 I	碳钢酸洗 I	合计
14	/	/	/	
	105.9	3.2	1.4	106
总计	144.3	33	6.1	

表2 变电所10 kV II段谐波电流值

(单位: A)

谐波次数	碳钢热镀锌 II	热退酸洗 II	碳钢酸洗 II	合计
2	/	/	/	
3	/	/	/	
4	/	/	/	
5	25.2	6.1	2.2	26
6	/	/	/	
7	9.4	1.7	0.7	9.6
8	/	/	/	
9	/	/	/	
10	/	/	/	
11	12.6	25.7	3.8	28.9
12	/	/	/	
13	7.5	19.4	3.9	21.2
14	/	/	/	
	5.4	3.2	1.4	6.4
总计	31.1	33	6.1	

根据国家标准GB/T 14549《电能质量 公用电网谐波》的规定，允许用户注入10 kV系统的谐波电流值如表3所示。

表3 允许注入10 kV系统谐波电流的允许值

(单位: A)

谐波次数	基准短路容量为100 MV·A时10 kV侧谐波允许值
2	26
3	20
4	13
5	20
6	8.5
7	15
8	6.4
9	6.8
10	5.1
11	9.3
12	4.3
13	7.9
14	3.7
15	4.1
16	3.2
17	6

(续)

谐波次数	基准短路容量为100 MV·A时10 kV侧谐波允许值
18	2.8
19	5.4
20	2.6
21	2.9
22	2.3
23	4.5
24	2.1
25	4.1

由表1数据可以看出, 10 kV I 段中, 5、7、11和13次谐波电流超标。

由表2数据可以看出, 10 kV II 段中, 5、11和13次谐波电流超标。

4 滤波补偿装置的设计

4.1 设计目标

根据电能质量国家标准和供电部门对功率因数的要求, 新设计的滤波补偿装置应达到如下效果:

- 1) 10 kV母线段月平均功率因数 ≥ 0.92 。
- 2) 10 kV母线段谐波满足国家标准GB/T 14549《电能质量 公用电网谐波》要求。
- 3) 滤除系统谐波。
- 4) 保证用电设备安全。
- 5) 保证装置投运后不产生谐波放大现象, 同时不与系统发生并联谐振。

4.2 滤波补偿装置支路选择

综合上述因素, 提出10 kV滤波补偿装置方案。即10 kV I、II段各加装一套FC装置, 滤波补偿装置一次原理主接线如图2所示。

根据以上配置, 每套滤波支路设置方案如下:

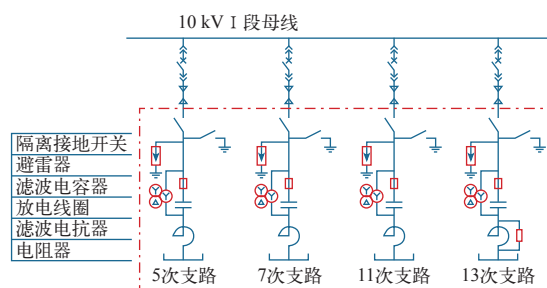


图2 滤波补偿装置一次原理主接线示意图

1) 5次滤波支路——采用单调谐滤波器, 可有效滤除5次谐波电流。

2) 7次滤波支路——采用单调谐滤波器, 可有效滤除7次谐波电流。

3) 11次滤波支路——采用单调谐滤波器, 可有效滤除11次谐波电流。

4) 13次滤波支路——采用高通滤波器, 可有效滤除13次及以上谐波电流。

5 安全校核及仿真

5.1 安全校核

滤波电容器运行时, 通过的电流包含基波和谐波电流。这些电流通过电容器时, 将在其两端产生基波电压和谐波电压。由于滤波器长期处于特殊的运行状态, 为保证其长期、安全运行, 对设计的各滤波电容器必须按照标准进行校验。

校验公式为

$$\sqrt{I_{c1}^2 + \sum I_{ch}^2} \leq 1.3 I_{CN} \quad U_{c1} + \sum U_{ch} \leq 1.1 U_{CN}$$

式中, I_{CN} 、 U_{CN} 为滤波电容器的额定电流、额定电压; I_{c1} 、 U_{c1} 为滤波电容器的基波电流、基波电压; I_{ch} 、 U_{ch} 为滤波电容器的谐波电流、谐波电压。

投入滤波补偿装置后系统频率阻抗如图3所示。

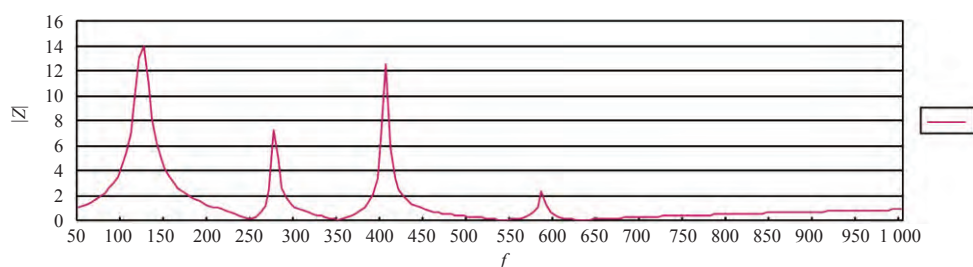


图3 系统频率阻抗

由图3可见,滤波补偿装置和系统不会在工频整数倍频率发生并联谐振,也不会产生谐波电流放大现象。

5.2 补偿效果

滤波补偿装置四个支路投运后,共发出基波无功6 298.9 kvar,计算补偿后10 kV I段 $P=25\ 852\ \text{kW}$, $Q=9\ 168\ \text{kvar}$,功率因数为0.94,满足设计要求;计算补偿后10 kV II段 $P=20\ 870\ \text{kW}$, $Q=6\ 764\ \text{kvar}$,功率因数为0.95,满足设计要求。

5.3 滤波效果

未投入滤波补偿装置前10 kV母线电流波形如图4所示。

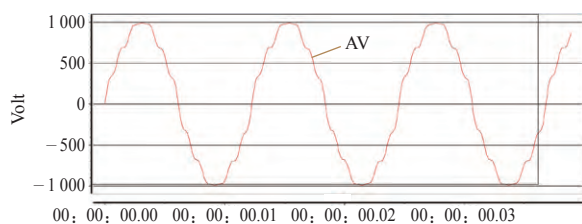


图4 未投入滤波补偿装置前10 kV母线电流波形

投入滤波补偿装置后10 kV母线电流波形如图5所示。

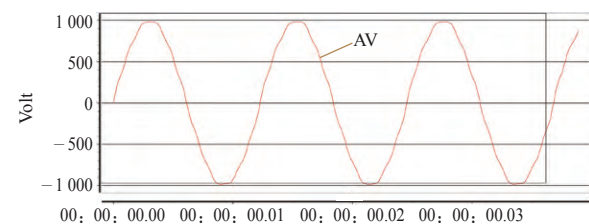


图5 投入滤波补偿装置后10 kV母线电流波形

投入滤波补偿装置后注入10 kV I段、II段母线的谐波电流如表4所示。

表4 投入滤波补偿装置后注入10 kV I段、II段母线的谐波电流

谐波次数	5	7	11	13
10 kV I段谐波电流/A	9.68	5.59	5.48	2.28
国标限值/A	20	15	9.3	7.9
说明	合格	合格	合格	合格
谐波次数	5	7	11	13
10 kV II段谐波电流/A	3.9	1.2	2.89	1.59
国标限值/A	20	15	9.3	7.9
说明	合格	合格	合格	合格

10 kV I段母线电压畸变率为0.68%;10 kV II段母线电压畸变率为1.22%,可以看出注入10 kV电网谐波电流值、10 kV电压畸变率满足国标及用户要求。

6 结束语

经过对用户供电系统的谐波、无功功率等电能质量指标的分析和计算,确定了在10 kV I段、II段母线装设两套滤波补偿装置(FC)进行治理的方案。通过对用户供电系统加装FC后电能质量的详细仿真和计算,得出结论如下:

- 1) 注入考核点10 kV电网的各次谐波电流、母线电压总谐波畸变率均符合国家标准GB/T 14549《电能质量 公用电网谐波》和用户的要求。
- 2) 考核点在负荷正常运行时月平均功率因数在0.92以上,满足用户要求。
- 3) 滤波器组和系统不会在工频整数倍频率上发生并联谐振,也不会产生谐波电流放大现象。
- 4) 滤波器组的安全校核结果显示,电容器过电流倍数均小于电容器额定电流的1.3倍,电容器过电压倍数均小于电容器额定电压的1.1倍,故各滤波器支路都能安全可靠运行。

综上所述,本方案设计的滤波补偿装置投入,对改善用户供电系统的电能质量、提高功率因数以及稳定电网运行水平将起到积极、重要的作用。

参考文献

- [1] 陈延鏢,陆乃斌,王敏杰.钢铁企业电力设计手册[M].北京:冶金工业出版社,1996.
- [2] 林海雪.电压电流频率和电能质量国家标准应用手册[M].北京:中国电力出版社,2001.
- [3] 翁双安.供配电工程设计指导[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [4] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,1998.
- [5] 施文冲.现代电力无功控制技术与设备[M].北京:中国电力出版社,2010.

(收稿日期:2016-10-10) EA