

某大型铝厂 10KV 电网谐波 及其对电能计量影响的研究*

郭嘉琳 戚良娣 陈根永

(郑州工学院计算机与自动化系)

摘 要: 本文对某大型铝厂 10KV 供电网络谐波状况及其对感应型电能表计量的影响, 从理论与现场实测两方面进行分析论述, 并提出了若干相应的防治对策与建议。

关键词: 谐波, 电能计量, 电力系统运行

中图分类号: TM711

近年来, 发展迅速的冶金、电铁等含有大容量换流装置及其它非线性用电设备的电力用户, 已成为影响河南电网电能质量与安全经济运行的重要谐波源。

某铝厂是一个生产氧化铝、电解铝等系列产品的大型企业。其电解分厂所需之直流电源, 由多台大容量整流机组提供, 故该厂 10kV 电网的谐波状况及对电能计量的影响, 成为令人关注的问题。

1 铝厂 10kV 电网谐波的理论分析

该铝厂 10kV 电网接线示意图 1。

图中, 主变压器#1T、2T 接至 10kV I、II 段母线, 主要向氧化铝分厂等线性用电设备供电; 主变压器#3T、4T 接至 10kV III、IV 段母线, 主要向电解分厂等供电。10kV 母线上装设有#1—4 无功补偿电容器组。计费电能表分别装设于主变#1—4T 的 10kV 侧。

向电解分厂提供直流电源的 11 台大型整流机组中, #1、3、5、7、9、11 整流变为 Y/Y-Y 接线, #2、4、6、8、10 整流变为 $\Delta/Y-Y$ 接线, 它们是非线性用电设备, 即使在正弦电压作用下, 也将产生谐波电流, 并进而导致系统电压波形畸变, 成为一个重要谐波源。

1.1 理想情况下不同接线整流机组的谐波

* 收稿日期: 1994-02-23

理想情况: ①忽略整流机组换向电抗及内部阻抗; ②交流电源电压无畸变, 系统容量无穷大; ③直流侧电流平滑, 无脉动。

此时, 换向角为 0, 交流侧输入功率等于直流侧输出功率。

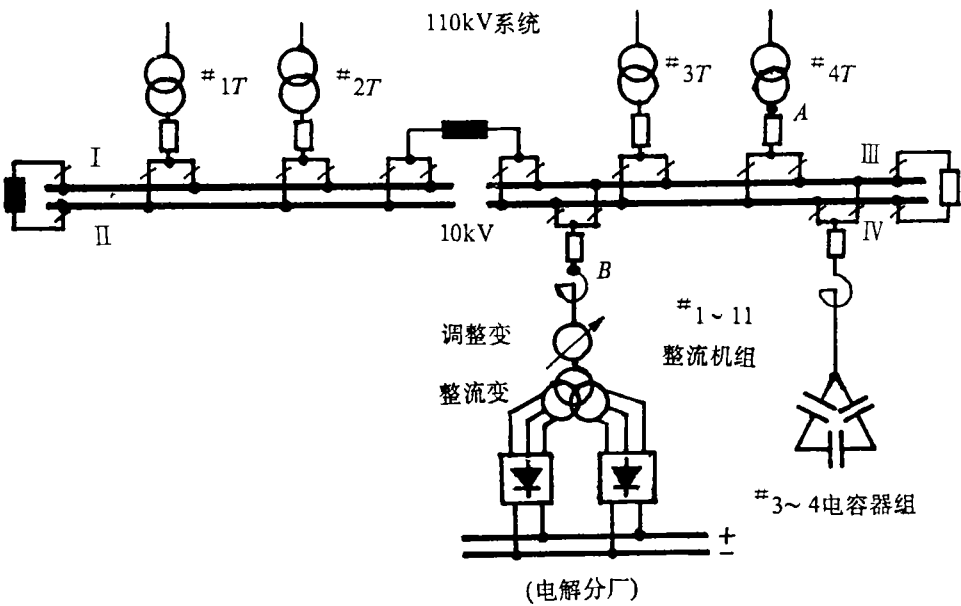


图 1 某铝厂 10kV 供电网络接线示意图

1.1.1 $\Delta/Y-Y$ 接线整流机组

其整流变压器一次侧为 Δ 接线, 二次侧为双 Y 接线, 分别向两组三相全波桥式整流装置供电, 形成如图 2 所示的三相桥式六脉波电路。

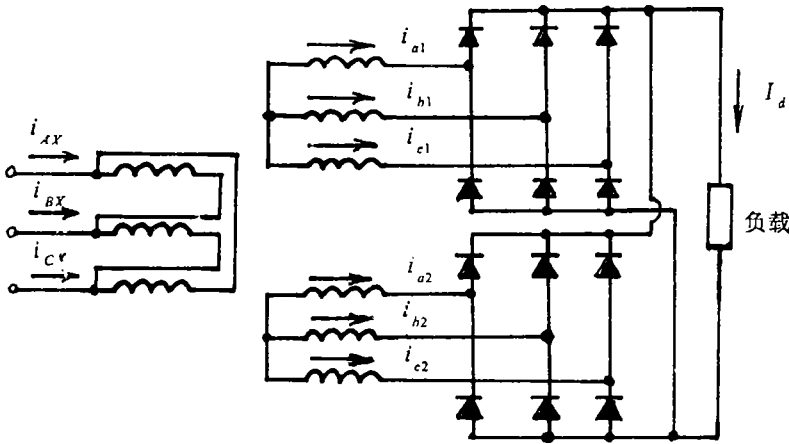


图 2 三相桥式六脉波整流电路 ($\Delta/Y-Y$ 接线)

其整流波形如图 3 所示。

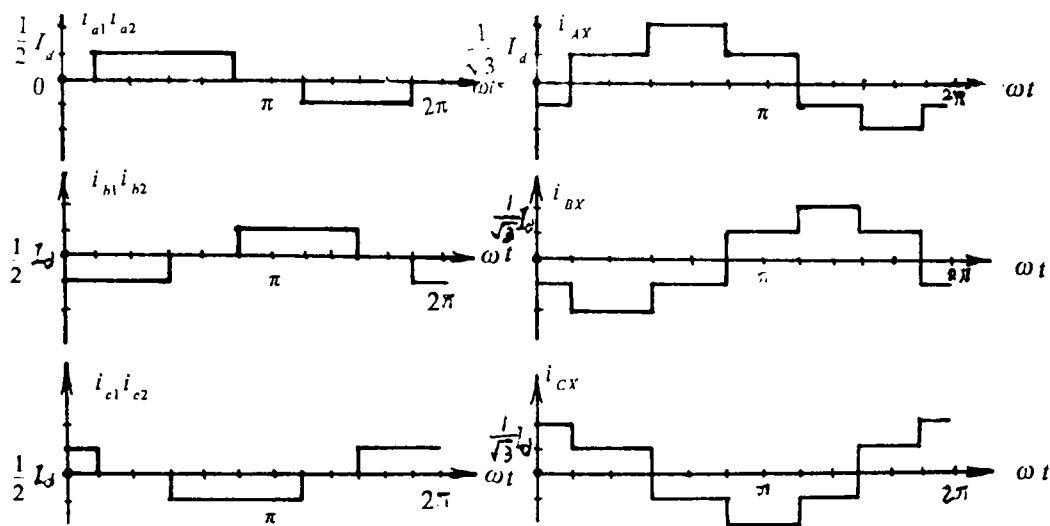


图3 三相桥式六脉波整流电路电流波形 (\$\Delta/Y-Y\$ 接线)

电流为上、下对称的阶梯波。选择适当的坐标原点, 可得 $f(0) = f(-0)$, 由之展开的整流变压器一次电流付氏表达式为

$$\begin{aligned}
 i_{AX} &= \sum A_n \sin(n\theta) \\
 &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\sin\theta + \frac{1}{5} \sin 5\theta + \frac{1}{7} \sin 7\theta + \frac{1}{11} \sin 11\theta + \frac{1}{13} \sin 13\theta + \dots \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中 n — 谐波次数;

A_n — n 次谐波电流幅值;

I_d — 直流电流。

可见, 其中只有奇次谐波, 无偶次谐波及直流分量; 且无三次及三的整倍数次谐波电流。 n 次谐波电流幅值是基波电流的 $\frac{1}{n}$, 即谐波次数愈高, 其幅值愈小。

1.1.2 Y/Y-Y 接线整流机组

其整流变压器一次侧为 Y 接线, 二次侧为双 Y 接线, 一次电流付氏表达式为

$$i_{AX} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\sin\theta - \frac{1}{5} \sin 5\theta - \frac{1}{7} \sin 7\theta + \frac{1}{11} \sin 11\theta + \frac{1}{13} \sin 13\theta - \dots \right] \quad (2)$$

可见其中亦只含有奇次谐波, 且不含三次及其整倍数次谐波。

对比两种不同接线整流变压器一次侧电流后可知, 它们的 5、7、17、19 次谐波电流大小相等, 而方向相反。因此, 当投运的两种接线整流机组台数相等、且负载均衡时, 它们的 5、7、17、19 次谐波电流将可互相‘抵消’, 构成等值十二脉波整流系统。而当投运的两种接线整流机组台数不等, 或虽二者台数相等, 但负载不均衡时, 它们的 5、7、17、19 次谐波电流将不能完全互相‘抵消’, 不能构成完全等值十二脉波整流系统。由于该铝厂共有 11 台两种接线的整流机组, 运行方式必然有所变化, 各机组的负载也不可能完全均衡, 故理论上该厂 10kV 电网将主要存在 5、7、11、13 次谐波。更高次的谐波幅值很小, 可以略而不计。

1.2 无功补偿电容器组对电网谐波的作用

无功补偿电容器组通常由电力电容器及串联电抗器等构成，其容抗、感抗皆为频率的函数。电力系统中的谐波源一般为恒流源，即其输出电流不随外部阻抗而变化。

设电力系统、无功补偿电容器、串联电抗器的基波电抗分别为 X_s 、 X_c 、 X_L ，则它们的 n 次谐波电抗将分别为 nX_s 、 X_c/n 、 nX_L 。谐波次数 n 不同时，各元件的谐波电抗亦相应不同。若谐波源输出的 n 次谐波电流为 I_n ，由其注入电力系统的谐波电流为 I_{sn} ，注入电容器组的谐波电流为 I_{cn} ，则相应的谐波电流分布示意如图 4。

其中

$$I_{sn} = \frac{nX_L - X_c/n}{nX_s + (nX_L - X_c/n)} I_n \tag{3}$$

$$I_{cn} = \frac{nX_s}{nX_s + (nX_L - X_c/n)} I_n \tag{4}$$

令
$$\beta = \frac{nX_L - X_c/n}{nX_s} \tag{5}$$

则
$$I_{sn} = \frac{\beta}{1 + \beta} I_n \tag{6}$$

$$I_{cn} = \frac{1}{1 + \beta} I_n \tag{7}$$

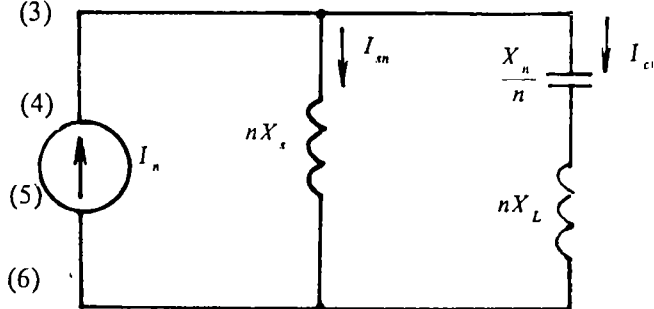


图 4 谐波电流分布

用式 (5)、(6)、(7) 综合分析当谐波源输出的谐波电流次数 n 从低到高变化时相应的 β 、 I_{sn} 、 I_{cn} 变化规律，不难看出，电容器支路对谐波电流的作用与基波电抗 X_s 、 X_c 、 X_L 及谐波次数 n 有关。对 $n'_o = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}}$ 次谐波，电容器支路呈串联谐振状态，第 n'_o 次谐波电流将被它完全分流；对低于 n'_o 的各较低次谐波电流，电容器支路呈容性，并对它们起放大作用；对高于 n'_o 的各较高次谐波电流，电容器支路呈感性，并对它们起部分分流作用，谐波次数愈高、分流作用愈差。

因此，必须根据电网谐波的实际情况，妥为确定投运的电容器支路参数 (X_c 、 X_L)，以达到较理想的效果。

2 铭厂 10kV 电网谐波的实测分析

为了正确反映该厂 10kV 电网的实际谐波状况及其对电能计量的影响，我们选择了主变压器 #4T 低压侧（图 1 中 A 点）、单台整流机组 10kV 电源测（图 1 中 B 点）两个测量点，分别在 11 台整流机组全部运行（5 台为 $\Delta/Y-Y$ 接线，6 台为 $Y/Y-Y$ 接线）、10 台整流机组运行（两种接线各 5 台）两种典型运行方式下，对各次谐波电压、电流、功率大小及方向、电能表读数等多次进行连续 24 小时观测，并作了电容器组的投切试

验。通过对大量实测数据的统计分析,可得出以下主要结果。

2.1 10kV 电网的谐波成分

表 1、表 2 分别选录了主变低压侧、单台整流机组 10kV 电源侧的谐波电压、电流测量数据,由之可知:

表 1 主变低压侧某日内的谐波电压、电流畸变率测算值
(投运机组: △/ Y-Y 接线 5 台, Y/ Y-Y 接线 6 台)

谐波次数	数值	电压波形畸变率		电流波形畸变率	
		$D_v(ab)$	$D_v(bc)$	$D_i(a)$	$D_i(c)$
3 次	最小值	0.233	0.783	0.297	0.869
	最大值	1.151	2.657	1.441	4.443
	平均值	0.577	1.486	1.014	2.034
5 次	最小值	0.336	0.482	0.190	0.381
	最大值	0.786	0.945	0.877	1.386
	平均值	0.597	0.761	0.581	0.845
7 次	最小值	0.046	0.057	0.329	0.255
	最大值	0.604	0.497	0.854	0.789
	平均值	0.383	0.319	0.624	0.545
11 次	最小值	1.773	1.545	1.607	1.382
	最大值	2.061	1.929	2.303	2.114
	平均值	1.900	1.741	2.000	1.742
13 次	最小值	0.909	1.175	0.745	0.922
	最大值	1.407	1.532	1.506	1.171
	平均值	1.155	1.342	0.893	1.056
总畸变率	最小值	2.107	2.418	2.162	2.275
	最大值	2.708	3.663	2.912	4.814
	平均值	2.421	2.805	2.584	3.117

注: 1) 电压波形总畸变率 $D_v = \frac{\sqrt{V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 + V_{11}^2 + V_{13}^2}}{V_1} \times 100(\%)$

式中, V_1 、 V_3 、 V_5 ……分别为基波及 3、5……次谐波电压有效值;

2) 电流波形总畸变率 $D_i = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2}}{I_1} \times 100(\%)$

式中, I_1 、 I_3 、 I_5 ……分别为基波及3、5……次谐波电流有效值;

3) 波形畸变率平均值 $X = \sum_{i=1}^n X_i / n$, $i = 1 - n$ 为测量次数。

表2 某单台整流机组 10kV 电源侧某日内的谐波电压、电流畸变率测算值
(机组接线: Y/Y-Y)

谐波次数	数值	电压波形畸变率		电流波形畸变率	
		D _u (ab)	D _u (bc)	D _i (a)	D _i (c)
3 次	最小值	0.799	0.772	0.000	1.113
	最大值	1.248	1.728	1.006	1.809
	平均值	1.003	1.152	0.210	1.454
5 次	最小值	0.213	0.340	14.405	16.327
	最大值	1.056	1.290	16.465	17.409
	平均值	0.856	1.091	15.578	16.682
7 次	最小值	0.125	0.145	6.442	6.669
	最大值	0.832	0.824	7.313	7.395
	平均值	0.683	0.685	7.094	6.899
11 次	最小值	1.768	1.670	1.904	2.047
	最大值	2.007	2.007	2.602	2.710
	平均值	1.872	1.825	2.130	2.249
13 次	最小值	1.105	1.242	1.183	1.203
	最大值	1.411	1.602	2.063	1.654
	平均值	1.286	1.421	1.298	1.337
总畸变率	最小值	2.389	2.404	16.118	17.896
	最大值	2.906	3.135	18.270	19.226
	平均值	2.731	2.909	17.302	18.300

10KV 电网中的主要谐波成分为 3、5、7、11、13 次, 其余的 17、19、23、25 次等谐波幅值很小, 可略而不计。分析说明:

①10KV 电网中始终存在着显著的 3 次谐波, 波动幅度较大 (电压波形畸变率最高达 2.657%, 电流波形畸变率最高达 4.44%), 且在每天上午与前夜期间呈现高峰状态。这种

3 次谐波, 主因电力系统中存在着相应的‘背景谐波’、本厂整流机组偏离理想工作条件而产生非特征谐波(3 次)、及电容器组对 3 次谐波的放大作用等所造成。

表 3 11 台整流机组全投时, 某日内主变
低压侧谐波功率测量值

测量时间	谐波功率						
	P_1	P_3	P_5	P_7	P_{11}	P_{13}	$\sum P_n$ ($n \neq 1$)
8:00	4.62	-0.58	1.74	0.819	-1.94	-0.752	-1.45
9:00	4.56	1.07	1.91	0.706	-1.60	0.146	1.99
10:00	4.86	1.05	1.64	0.387	-1.63	-0.01	1.13
11:00	5.35	3.03	1.35	0.159	-1.33	-0.96	1.34
12:00	4.73	0.179	3.22	0.983	-3.02	-0.28	0.773
13:00	5.17	2.47	1.59	0.368	-2.45	-1.22	-0.19
14:00	4.78	0.65	1.10	0.763	-2.23	-0.17	1.44
15:00	4.74	0.549	1.66	0.643	-1.33	-0.256	1.80
16:00	4.74	2.87	2.44	0.722	-1.52	-0.1	3.87
17:00	4.66	2.57	1.59	0.44	-3.40	-0.318	0.475
18:00	5.11	2.88	1.74	0.368	-2.36	-1.20	0.529
19:00	4.96	4.81	2.98	0.198	-2.86	-1.64	2.72
20:00	4.89	8.93	2.52	0.511	2.25	0.011	14.27
21:00	4.58	1.01	1.94	0.478	-3.37	-1.32	-2.10
22:00	4.53	0.373	3.83	0.628	-3.14	-0.33	0.537
23:00	5.51	-0.345	1.65	0.66	-3.38	-0.334	-1.96
24:00	4.87	0.795	2.85	0.894	-1.815	-1.29	0.025
1:00	5.19	0.484	1.90	0.657	-2.37	-1.93	-2.21
2:00	4.91	0.83	3.07	0.556	-1.73	-2.19	0.064
3:00	4.97	-1.93	3.28	0.955	-3.58	-1.54	-1.89
4:00	5.03	-0.507	3.23	0.685	-2.94	-1.87	-2.22
5:00	4.70	0.682	2.83	0.77	-2.24	-1.98	-0.765
6:00	3.88	-1.48	1.94	1.00	-1.99	-0.176	-0.758
7:00							

注: 功率单位 P_1 — 10^3W , P_n — $10^{-2}W$
②理论上, $\Delta/Y-Y$ 与 $Y/Y-Y$ 接线整流机组间的 5、7 次谐波可两两相互‘抵消’。但实际投运的两类接线整流机组台数并非始终相等; 且即使台数相等时, 各机组的

调压状态及负荷分配等也不会完全均衡，致使它们的 5、7 次谐波并不能完全相互‘抵消’。此外的 11、13 次谐波，则是等值十二脉波整流系统的特征谐波。

③主变压器低压侧的 5、7 次谐波含量及电压、电流总畸变率均低于单台整流机组 10kV 电源侧者，其原因与前者相似。

综上所述，该厂 10kV 电网主要谐波成分为 3、5、7、11、13 次，与理论分析相符。

2.2 主变 10kV 低压侧的谐波功率

表 3 中选录了#4T 主变 10kV 低压侧谐波功率的部分实测值，由之可以看出：

2.2.1 三次谐波功率波动幅度很大，5、7 次谐波功率波动很小，它们的功率方向均主要为正（即与基波功率方向一致）。11、13 次谐波功率波动很小，功率方向主要为负（即与基波功率方向相反）。

2.2.2 在电解分厂基波负荷基本平稳的情况下，3 次谐波功率多半为正，且注入功率的大小呈随系统负荷曲线而波动的趋势。即在白天及前夜期间注入的 3 次谐波功率较大，后夜时注入较少、或反向注入系统。

2.2.3 总谐波功率的方向多半为正（注：个别时期为负），且亦有随系统负荷曲线而波动的趋势。但在后夜期间，通常都是注入系统。

可见，谐波功率的大小与方向，不仅与特定的谐波源，而且与电力系统的运行状态均密切相关，必须具体分析。

表 4 电容器对主变低压侧谐波的影响情况

谐波次数	切除电容器前				切除电容器后			
	$D_V(ab)$	$D_V(bc)$	$D_I(a)$	$D_I(c)$	$D_V(ab)$	$D_V(bc)$	$D_I(a)$	$D_I(c)$
3	0.695	1.937	/		0.706	1.877	/	
5	0.643	0.644			0.890	0.874		
7	0.475	0.422			0.505	0.465		
3			1.530	3.048	/		0.791	0.994
5			0.594	1.081			0.946	1.113
7			0.454	0.493			0.622	0.617

2.3 无功补偿电容器组对谐波的作用

由投切电容器试验所得的实测数据表 4 可知，当切除 10kVⅢ、Ⅳ段母线上的#3—4 无功补偿电容器组后，#4T 主变压器 10kV 低压侧的 3 次谐波电流明显减小，而 5、7 次谐波电流则有不同程度的增加。因为，按该厂现在投运的电容器支路设备参数计算，其#3、4 电容器组的串联谐振点分别为 $n'_0=4.56$ 及 3.8，即它们对低于 n'_0 的 3 次谐波电

流有放大作用, 而对高于 n' 的 5、7 次谐波电流则有不同程度的分流滤波作用, 这也符合前面的理论分析。

3 铝厂 10kV 电网谐波对其电能计量的影响

电力用户所需要的基本上是基波功率、基波电能, 而谐波功率、谐波电能则对系统和用户都是一种“污染”和“公害”, 二者有着本质上的不同。据此, 当前国内外对电能计量问题持有三种不同观点:

①要求电能表能准确反映包含基波电能与谐波电能在内的全能量。此法未计及基波电能与谐波电能的本质区别及相应的奖惩要求, 并需要一种具有理想频率特性的电能表。

②要求电能表只准确地反映基波电能, 而不反映谐波电能。此法可部分补偿电力系统及正弦波电流用户的电费损失和非正弦波电流用户的漏交电费, 但需对普通感应型电能表进行相应的技术改造。

③要求用户装设分别计量基波电能与谐波电能的两种电能表, 并按相反原则计费。此法理论上较为合理, 但这两种电能表的价格均较贵, 技术上亦有一定难度。

和大多数电力用户一样, 该厂采用的也是普通感应型三相三线有功电能表。它所反映的是包含基波与谐波电能的“全能量” P :

$$P = P_1 + \sum_{n \neq 1} K_n P_n \quad (8)$$

式中 P_1 —— 基波功率;

P_n —— n 次谐波功率;

K_n —— 电能表频率特性系数 ($K_n < 1$)。

按工频设计、制造的感应型电能表, 具有下降式的频率特性曲线, 在计量高频电能时必将出现不同程度的误差。为了测算用它来计量全能量时的计量误差, 亦采用能反映全能量的电子式标准功率电能表作为标准表计, 后者所反映的全能量 P_* 为

$$P_* = P_1 + \sum_{n \neq 1} P_n \quad (9)$$

因此, 以全能量为基准时的感应型电能表相对误差 E (%) 为

$$E(\%) = \frac{P - P_*}{P_*} \times 100(\%) \quad (10)$$

再引入式 (8)、(9), 可得

$$E(\%) = \frac{P - P_*}{P_*} \times 100(\%) = \frac{\sum K_n P_n - \sum P_n}{P_1 + \sum P_n} \times 100(\%) \quad (11)$$

根据表 5、表 6 的实测数据, 并结合上述关系式进行分析后, 可得出如下主要结论:

①感应型电能表在畸变波形作用下的计量误差, 主要与其频率特性及波形畸变程度有关。谐波功率成分增大时, 计量误差亦增大。例如, 该厂单台整流机组 10kV 电源侧的谐波功率远大于主变低压侧的谐波功率, 故前者处感应型电能表计量误差的平均值 (0.24%)

亦远大于后者（平均值-0.083%）。

②感应型电能表的计量误差还与谐波功率方向有关。例如，该厂某单台整流机组 10kV 电源侧的总谐波功率方向为负（即与基波功率方向相反），故其感应型电能表的计量误差为正，即比真正的全能量多记了电能。而该厂主变低压侧的总谐波功率方向通常为 正（即与基波功率方向相同），故其计费用感应型电能表的计量误差为负，即比真正的全能量少记了电能；虽其平均相对误差仅为-0.083%，但因电解分厂负荷很大，故全年累计少记的电能将仍相当可观。

表 5 谐波对主变低压侧电能表
计量误差的影响

测量次数	感应型电能表 计量误差(%)
1	-0.07
2	-0.07
3	-0.07
4	-0.12
5	-0.05
6	-0.07
7	-0.05
8	-0.05
9	-0.07
10	-0.10
11	-0.12
12	-0.09
13	-0.06
14	-0.07
15	-0.08
16	-0.11
17	-0.09
18	-0.10
平均误差	-0.083

表 6 谐波对单台整流机组 10kV 电源侧
电能表计量误差的影响

测量次数	感应型电能表 计量误差(%)
1	0.26
2	0.23
3	0.24
4	0.23
5	0.25
6	0.24
7	0.28
8	0.24
9	0.25
10	0.25
11	0.24
12	0.25
13	0.24
14	0.24
15	0.27
16	0.26
17	0.21
18	0.21
平均误差	0.24

4 对改善该铝厂 10kV 电网谐波及电能计量工作的若干建议

4.1 合理调控整流机组的运行状态—例如在 11 台整流机组全投的运行方式下, 应适当调整#2、4、6、8、10 号 $\Delta/Y-Y$ 接线整流机组的总负荷, 使其与#1、3、5、7、9、11 号 $Y/Y-Y$ 接线整流机组的总负荷尽量接近平衡。而在 10 台整流机组工作、且两种接线各 5 台的运行方式下, 则应平均分配负荷。这样作, 都可使总的 5、7 次谐波电流大为减小。

4.2 适当调整有无功补偿电容器组的基波电抗 X_C/X_L 比值—例如适当减小 X_C 或增大 X_L , 使电容器支路的串联谐振频率 $n' < 3$, 以消除其对 3 次谐波电流的放大作用, 增强对 3、5、7 次谐波电流的综合分流作用。

4.3 鉴于该厂主变低压侧总谐波功率的当前实测方向通常为负, 有别于谐波源总谐波功率方向通常为负的一般概念, 故不宜用总谐波功率来概括非线性电力用户的谐波状况, 而应对其各次谐波进行具体分析。并建议电业管理部门进一步专题研究、测算该铝厂区域 110kV 电网内的谐波潮流分布, 制定全面综合治理谐波污染的方案。

4.4 条件允许时, 建议电业部门对大、中容量非线性电力用户采用仅计量基波电能, 或分别计量基波电能与谐波电能的电能计量方法。

参 考 文 献

- 1 张直平. 电力系统中谐波的某些主要影响. 电网技术. 1989.1
- 2 杨明耻等. 谐波对电能表计量的影响. 电力系统谐波会议论文集, 1990年. 成都.
- 3 戚良娣. 郭嘉琳. 陈根永. 感应型电能表在畸变波形下的数学模型. 中国电机工程学报. 1993年9月. 第 13 卷第 5 期.

A Study of harmonic in the 10kV Supply network of a Large Aluminium manufacturer and its effects on the measurement of energy

Guo Jialin Qi Liangdi Chen Genyong
(Department of Computer and Automation)

Abstract: In this paper, the harmonic in the 10kV Supply network of a large Aluminium manufacturer and its effects on the measurement of energy by induction watt-hour meters are analyzed based on the measurement results at the site and respective theory. In addition, some correspondent preventive measures and recommendations are proposed.

Keywords: Harmonic, Electrical energy measurement, electric power system operation, research.