

文章编号:1007-6492(2001)03-0048-03

## 电力牵引负荷对电能质量的影响

周 勇<sup>1</sup>, 王绪雄<sup>1</sup>, 邱永庆<sup>2</sup>

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 开封开化(集团)有限公司电气车间, 河南 开封 475002)

**摘 要:** 以 Y/Δ-11 接线的牵引变压器为例, 分析了电力牵引负荷产生负序电流和高次谐波的规律, 并给出了实测数据, 最后提出了对应的治理措施, 其中包括合理分配两供电臂的无功补偿容量, 利用斯坦美兹(Steinmetz)原理对无功和负序进行综合补偿, 在牵引变电所的低压侧安装滤波器或静止无功补偿装置。

**关键词:** 电力牵引负荷; 电能质量; 负序; 谐波

**中图分类号:** TM 714

**文献标识码:** A

### 0 引言

电力牵引负荷是指在电气化铁路上行驶的电力机车, 它是单相的非线性负荷, 由于功率大, 分布广, 而且三相不对称, 在其运行过程中必然会有较大的负序电流和高次谐波注入电网, 从而使电能质量受到影响。本文以 Y/Δ-11 接线的牵引变压器为例, 分析电力牵引负荷产生负序电流和高次谐波的规律, 并提出对应的治理措施, 这对于保证电力系统正常运行和提高铁路部门的经济效益都具有十分重要的意义。

### 1 牵引变压器各绕组中的电流分布

电气化铁道的供电系统接线如图 1 所示, Y/Δ-11 接线是牵引变压器广泛采用的接线方式, 通常将高压侧与 110 kV 电网相连, 低压侧与 27.5 kV 牵引网相连, 其中 c 相接地, 并与钢轨连接, a, b 两相分别接到两个供电臂上。电力机车负荷是接在低压侧的 ac 相和 bc 相, 因此, 具有明显的不对称性<sup>[1]</sup>。为便于分析, 可采用傅立叶级数将两供电臂的电流分解为基波和一系列高次谐波, 分别以  $i_{acn}$  和  $i_{bcn}$  表示。由于两供电臂电流的波形均满足奇对称条件, 经过傅立叶分解后, 只有奇次谐波, 没有偶次谐波, 因此, 通常取  $n = 1, 3, 5, \dots$ 。当  $n = 1$  时, 对应于基波; 当  $n > 1$  时, 对应于谐波。

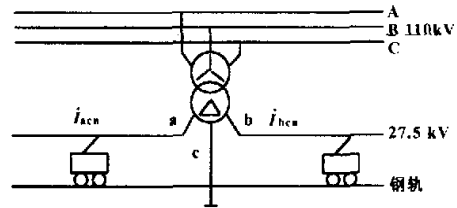


图1 电气化铁道供电系统

Fig.1 Power supply system of the electric railway

假设牵引变压器低压侧三相绕组的阻抗相等, 可写出高压侧三相绕组的各次谐波电流为<sup>[3]</sup>

$$\begin{cases} i_{An} = \frac{\sqrt{3}}{k} \left( \frac{2}{3} i_{acn} + \frac{1}{3} i_{bcn} \right); \\ i_{Bn} = \frac{\sqrt{3}}{k} \left( \frac{1}{3} i_{acn} + \frac{1}{3} i_{bcn} \right); (n = 1, 3, 5, \dots); \\ i_{Cn} = \frac{\sqrt{3}}{k} \left( \frac{1}{3} i_{acn} - \frac{2}{3} i_{bcn} \right). \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $k$  为牵引变压器的变比。

### 2 电力牵引负荷的负序电流和负序电压

所谓负序, 通常都是针对基波而言。取  $n = 1$ , 利用对称分量法对式(1)进行分解, 可求得高压侧 A 相绕组的正序电流 ( $i_{A+}$ ) 和负序电流 ( $i_{A-}$ ) 为

$$\begin{cases} i_{A+} = \frac{1}{3} (i_A + a i_B + a^2 i_C); \\ i_{A-} = \frac{1}{3} (i_A + a^2 i_B + a i_C), \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期: 2001-04-16; 修订日期: 2001-06-15

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(994052500)

作者简介: 周 勇(1957-), 男, 河南省固始县人, 郑州大学副教授, 主要从事电力系统负序和谐波问题方面的研究。

式中,  $a = e^{j120^\circ}$ . 将式(1)代入式(2), 可得

$$\begin{cases} I_+ = \frac{1}{\sqrt{3}K}(I_{ac1} - a^2 I_{bc1}) ; \\ I_- = \frac{1}{\sqrt{3}K}(I_{ac1} - a I_{bc1}) . \end{cases} \quad (3)$$

如果已知两供电臂的基波电流( $I_{ac1}$ 和 $I_{bc1}$ ), 利用式(3)便可求得电力牵引负荷注入电网的负序电流. 表1列出了牵引变压器高压侧正序电流( $I_+$ )和负序电流( $I_-$ )的实测数据. 其中,  $\epsilon_i$  为电流不对称度,  $\epsilon_i = \frac{I_-}{I_+} \times 100\%$ .

表1 牵引变压器高压侧正序电流和负序电流

Table 1 Positive sequence current and negative sequence current A

序号	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_+$	$I_-$	$\epsilon_i/\%$
1	111.0	29.1	121.3	78.8	55.5	70.4
2	88.0	20.6	72.9	50.1	44.5	88.8
3	68.9	39.8	103.0	40.3	63.4	157.3
4	84.3	43.9	89.1	69.5	28.4	40.9
5	93.3	58.2	153.0	75.3	78.4	104.1
6	110.0	66.7	173.0	92.6	83.0	89.6
7	157.0	111.0	232.0	152.9	82.8	54.2
8	61.3	60.6	118.0	70.7	45.9	64.9

从表1中可看出, 牵引变压器高压侧三相电流的不对称度基本上都在50%以上, 有时甚至超过了100%. 负序电流注入系统后, 会在电网中产生不同程度的负序电压, 表2列出了与表1对应的牵引变压器高压侧正序电压( $U_+$ )和负序电压( $U_-$ )的实测数据. 其中,  $\epsilon_u$  为电压不对称度,  $\epsilon_u = \frac{U_-}{U_+} \times 100\%$ .

表2 牵引变压器高压侧正序电压和负序电压

Table 2 Positive sequence voltage and negative sequence voltage kV

序号	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_+$	$U_-$	$\epsilon_u/\%$
1	66.7	62.4	64.3	64.5	1.25	1.94
2	66.5	62.6	64.4	64.5	1.13	1.75
3	67.4	62.4	64.7	64.7	1.46	2.26
4	67.1	62.5	64.8	64.8	1.33	2.05
5	67.5	61.8	64.6	64.6	1.65	2.55
6	64.6	63.8	63.7	63.8	0.55	0.86
7	65.2	64.7	64.5	64.6	0.46	0.71
8	66.7	65.0	64.7	64.7	0.52	0.80

从表2中可看出, 牵引变压器高压侧三相电压的不对称度为0.71%~2.55%, 按照国标 GB/T 15543-1995《电能质量 三相电压允许不平衡度》中的规定, 110 kV 电网正常电压不平衡度的允许值为1.3%.

还要说明一点, 为了减少区域电网(即 110 kV

电网)中的负序电流, 在将牵引变压器接入电网时, 采用了“换相连接”方式, 也就是将铁路沿线各牵引变电所的变压器依次按照 ABC, ACB, BCA, CBA, CAB 和 BAC 的相序与 110 kV 电网的 ABC 连接, 其中 ABC, BCA 和 CAB 为正相序连接; ACB, CBA, BAC 为逆相序连接. 当 6 个牵引变电所各供电臂电流都相等, 而且功率因数角都相同时, 按正相序连接的 3 个牵引变电所的负序电流之和为零, 按逆相序连接的 3 个牵引变电所的负序电流之和也为零. 但是, 这 6 个牵引变电所通常两两相距 40 公里左右, 不可能都接在同一区域电网; 再者, 牵引负荷波动很大, 也不可能满足“各供电臂电流都相等, 功率因数角都相同”的条件. 因此, 换相连接的实际效果是要打折扣的.

3 电力牵引负荷的高次谐波

电力机车是整流型负荷, 电路中所用的整流元件具有非线性伏安特性, 因此, 其供电电流中必然会含有一系列高次谐波. 在式(1)中, 取  $n = 3, 5, 7, \dots$ , 便可得到牵引变压器高压侧三相基组的谐波电流, 也即电力牵引负荷注入电网的高次谐波电流. 表3列出了牵引变压器高压侧谐波电流的实测数据, 其中  $THD_i$  为电流总谐波畸变率,

$$THD_i = \frac{I_H}{I_1} \times 100\%, I_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}.$$

表3 牵引变压器高压侧谐波电流

Table 3 Harmonics current of the traction transformer A

序号	相别	$I_1$	$I_3$	$I_5$	$I_7$	$I_9$	$THD_i/\%$
1	$I_A$	111.0	3.57	6.58	2.79	0.53	8.09
	$I_B$	29.1	6.12	3.89	2.46	0.63	26.40
	$I_C$	121.3	7.98	6.06	2.40	1.74	9.77
2	$I_A$	88.1	7.12	8.66	3.84	2.20	14.05
	$I_B$	20.6	7.27	3.66	3.43	0.93	43.60
	$I_C$	72.9	5.71	5.47	3.42	0.45	8.34
3	$I_A$	68.9	2.76	3.08	2.93	0.94	7.63
	$I_B$	39.8	6.45	4.03	2.38	1.01	20.66
	$I_C$	103.0	7.93	6.91	5.05	0.50	11.96
4	$I_A$	37.3	4.33	6.11	3.08	0.81	22.38
	$I_B$	18.9	3.29	2.08	0.59	0.71	24.60
	$I_C$	60.6	2.32	4.51	3.35	1.41	11.10

谐波电流注入系统后, 便会在电网中产生相同频率的谐波电压, 表4列出了与表3对应的牵引变压器高压侧三相谐波电压实测数据, 其中

$$THD_u = \frac{U_H}{U_1} \times 100\%,$$

$$U_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}.$$

表 4 牵引变压器高压侧谐波电压实测数据  
Table 4 Harmonics voltage of the traction transformer

序号	相别	$U_1$	$U_3$	$U_5$	$U_7$	$U_9$	$THD_u/\%$
1	$U_A$	66.7	0.47	0.21	0.25	0.06	1.26
	$U_B$	62.4	0.59	0.41	0.37	0.10	1.51
	$U_C$	64.3	0.53	0.39	0.36	0.06	1.36
2	$U_A$	66.5	0.17	0.29	0.31	0.15	0.92
	$U_B$	62.6	0.86	0.32	0.38	0.05	1.64
	$U_C$	64.6	0.41	0.15	0.21	0.03	0.92
3	$U_A$	67.4	0.72	0.96	0.18	0.03	1.25
	$U_B$	62.4	0.49	0.32	0.31	0.07	1.23
	$U_C$	64.3	0.68	0.28	0.45	0.10	1.52
4	$U_A$	67.1	0.26	0.11	0.19	0.02	0.68
	$U_B$	62.4	0.41	0.38	0.24	0.06	1.04
	$U_C$	64.7	0.28	0.34	0.38	0.08	0.88

国标 GB/T 14549-93《电能质量 公用电网谐波》规定,110 kV 电网的电压总谐波畸变率限值为 2.0%。从表 4 中可看出,牵引变压器高压侧的电压总谐波畸变率为 0.68%~1.64%,这说明电压波形的畸变还没有超过允许的限度,但是表 3 中所列高次谐波电流大部分都已超过了国标的允许值,其中的 3 次谐波和 5 次谐波尤为严重。

#### 4 减少电力牵引负荷的负序和谐波

为了降低电力牵引负荷的负序,对于 Y/ $\Delta$ -11 接线的牵引变压器,在采用“换相连接”方式接入电网时,应合理地分配两供电臂的无功补偿容量。具体地说就是:对于按正相序连接的牵引变压器,应在保证电压不超过上限的前提下,根据牵引负荷的变化,把所需的无功补偿电容尽可能多地装在 a 供电臂,而 b 供电臂应该少装或不装;对于

按逆相序连接的牵引变压器,则要把所需的无功补偿电容尽可能多地装在 b 供电臂,而 a 供电臂应该少装或不装。有些牵引变电所由于没有注意到这一点,两供电臂的无功补偿容量分配不合理,因而增加了牵引变压器高压侧的负序电流。此外,采用 T 型接线的斯科特(Scott)变压器或阻抗匹配的平衡变压器,或利用斯坦美兹(Steinmetz)原理对其无功和负序进行综合补偿<sup>[2]</sup>,也都可以改善电力牵引负荷的对称性。

对于电力牵引负荷的谐波,可采用多段桥式整流电路,改善电力机车的谐波特性;或在电力机车上安装滤波器,就近吸收谐波;还可在牵引变电所的低压侧安装滤波器或静止无功补偿装置,减少其注入电网的谐波电流。

#### 5 结束语

除了负序和谐波之外,电力牵引负荷还有电压波动(即工频电压包络线的周期性变化)的问题,而且三者之间还具有一定的内在联系。因此,必须对其进行全面地分析研究,并提出综合治理措施,力求把电力牵引负荷对电能质量的影响降到最低程度。

#### 参考文献:

- [1] 孙树勤.干扰性负荷的供电[M].北京:中国电力出版社,1996,103-111.
- [2] 林海雪.电力系统的三相不平衡[M].北京:中国电力出版社,1998,133-137.
- [3] 周 勇.电网谐波源分析[M].北京:中国人口出版社,1995,127-132.

### The Effects of Traction Load on the Quality of Electric Energy

ZHOU Yong<sup>1</sup>, WANG Xu-xiong<sup>1</sup>, QIU Yong-qing<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Electric Workshop, Kaifeng Chemical Fertilizer and Industry (Group) Ltd, Kaifeng 475002, China)

**Abstract:** In this paper, the negative sequence current and harmonics current generated by the electric traction load are analysed through the example of Y/ $\Delta$ -11 transformer. The measured data is listed. Some ideals of improvement are put forward, which include the rationally dispatching capacitors of the two power supply sections, the comprehensive compensation of reactive power and negative sequence current by means of the Steinmetz principle, the filters or the static var compensators installed in the low voltage sides of traction substation.

**Key words:** electric traction load; quality of electric energy; negative sequence; harmonics