

# 电力机车负荷注入电网的负序和谐波\*

周 勇

(郑州工学院计自系 450002)

**摘 要:** 本文研究了西陇海电气化铁路上运行的四种电力机车的主要特点, 分析了它们注入电网的负序电流和谐波电流, 并列出了有关的计算结果和实测数据。

**关键词:** 电力机车 电网 负序 谐波

**中图分类号:** TM714

电力机车属单相整流型负荷, 三相不对称, 而且具有非线性的伏安特性, 它们在运行过程中对电网注入了大量的负序电流和谐波电流, 从而引起电压电流波形畸变, 使电能质量下降, 严重时还会引起继电保护和自动装置误动, 影响电网的正常运行<sup>〔1〕</sup>。本文对电力机车在各种工况下注入电网的负序电流和谐波电流进行了计算, 得出了一些有参考价值的结论。

## 1 牵引变压器高低压绕组中的电流分布

西陇海电气化铁路采用了带回流线的吸流变压器(Booster Transformer 简称 BT)的供电方式, 其接线如图 1 所示。

图中 BT 为吸流变压器, HL 为回流线, X 为吸上线, J 为接触网, G 为钢轨, D 为分相绝缘器。为了保证供电可靠性, 由 110kV 电网向牵引变电站提供双电源, 经牵引变压器降到 27.5kV 后, 再通过接触网的 a、b 两个供电臂向电力机车供电。

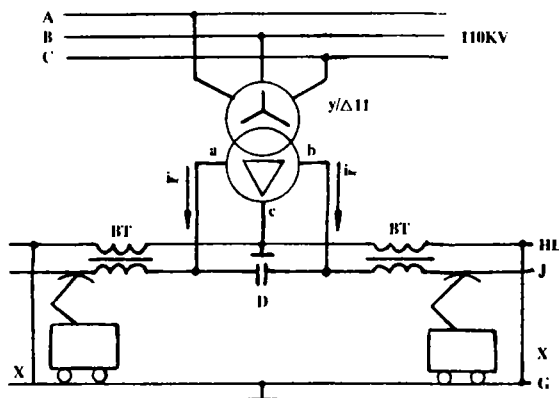


图1 带回流线的 BT 供电方式接线图

以电压  $\dot{u}_{ac}$  为基准, 则 a 供电臂和 b 供电臂的基波电流 (下标  $n=1$ ) 以及各次谐波电流 (下标  $n=3, 5, 7, \dots$ ) 可分别写为:

$$\dot{I}_{acn} = I_{acn} e^{-j\varphi_{an}}$$

$$\dot{I}_{bcn} = I_{bcn} e^{-j\varphi_{bn}} \quad (n=1, 3, 5, \dots)$$

$I_{acn}$ 、 $I_{bcn}$  为基波电流和各次谐波电流的幅值,  $\varphi_{acn}$ 、 $\varphi_{bcn}$  为基波电流和各次谐波电流的相位。

当只有 a 供电臂有机车 (即  $I_{bc} = 0$ ) 时或只有 b 供电臂有机车 (即  $I_{ac} = 0$ ) 时, 牵

\* 收稿日期: 1996-01-26

引变压器低压绕组中的电流分布分别如图 2 (a) 和 (b) 所示。

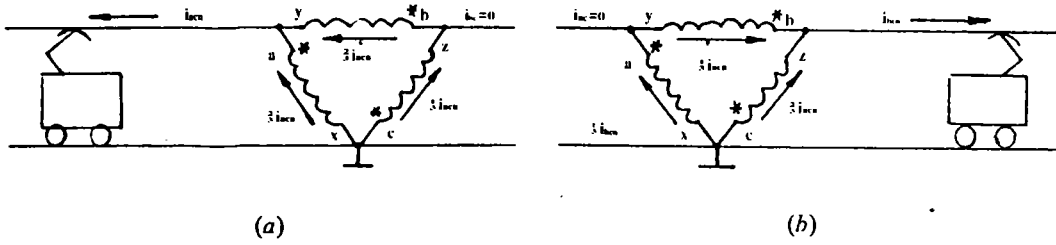


图2 牵引变压器低压绕组中的电流分布

假定流出同名端的电流为正, 牵引变压器低压侧三相绕组中的基波电流和各次谐波电流可表示为:

$$\begin{cases} I_{axn} = \frac{2}{3} I_{acn} + \frac{1}{3} I_{hcn} \\ I_{byn} = -\frac{1}{3} I_{acn} + \frac{1}{3} I_{hcn} \\ I_{czn} = -\frac{1}{3} I_{acn} - \frac{2}{3} I_{hcn} \end{cases} \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (1)$$

因为牵引变压器为  $Y/\Delta-11$  接线, 所以对应的高压侧三相绕组中的基波电流和各次谐波电流为:

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

式中  $k$  为牵引变压器变比,  $k = 110/27.5$ 。

## 2 电力机车负荷注入电网的负序电流

取 (2) 式中的  $n = 1$ , 利用对称分量法的公式, 求得电力机车负荷注入电网的基波负序电流为:

$$I_{21} = \frac{1}{3} (I_{A1} + a^2 I_{B1} + a I_{C1}) \quad (3)$$

(3) 式中的  $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ,  $a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ 。表 1 列出了几组负序电流的实测值和计算结果。

表 1 电力机车负荷注入电网的负序电流(A)

$I_{A1}$	$I_{B1}$	$I_{A1}$	$I_{B1}$	$I_{C1}$	计算 $I_{21}$	实测 $I_{21}$
460	33	133.2	65.3	68.3	60.3	61.8
349	27	103.3	42.4	58.3	50.7	51.4
79	1118	189.9	150.8	323.1	127.1	128.3
65	675	124.8	95.8	195.2	65.7	66.8
1201	815	315.6	350.8	293.9	33.7	34.1
1227	901	346.1	354.7	328.2	26.3	27.8

由表 1 可以看出, 负序电流是比较大的, 在两个供电臂负荷一轻一重时尤为明显。这些负序电流注入电网后, 将会对发电机、电动机、继电保护和自动装置等产生不利的影响。因此, 必须采取有效措施对其进行治理。首先应该要求铁路调度合理安排行车方式, 避免某些区段机车过密, 某些区段机车过稀; 牵引变压器高压侧接入电网的相序可以按正相序和负相序依次交替轮换, 也即“相序轮换”连接方式; 此外, 还可将牵引变压器改用斯科特 (Scott) 变压器或阻抗平衡变压器<sup>(2)</sup>; 供电部门应该合理安排供电方案, 既要保证对电力机车的供电可靠性, 又要避免使注入电网的负序电流集中流入少数几台发电机中。

### 3 电力机车负荷注入电网的谐波电流

不同型号的电力机车, 由于结构不同、调速方式不同、运行状态不同, 供电电流中的谐波电流的含量也各不相同, 通过分析对比谐波电流的含有率  $HRI_n (HRI_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\%, n = 3, 5, 7 \cdots)$ , 就可以看出其中的差别和规律。

SS-1 型电力机车主电路为中抽式全波整流电路, 选择不同的运行极位  $n_s (n_s = 1 \sim 33)$ , 即可改变整流变压器的变比, 从而达到调速的目的。提高运行极位, 可增加机车运行的速度, 使供电电流的谐波含有率下降。正常运行时, 一般选在 29 极位。

SS-3 型电力机车主电路为桥式整流电路, 调压极位减少到 8 个, 极间采用可控硅电路实现平滑调速。提高运行极位, 或减小可控硅的触发角, 均可增加机车运行的速度, 降低供电电流的谐波含有率。

SS-6 型电力机车主电路为两段半控桥式整流电路, 整流变压器没有抽头, 完全通过可控硅电路实现无级调速。此外, 在整流变压器的副边, 还装有可根据负荷电流的大小进行自动投切的无功补偿和三次谐波滤波器。

6K 型电力机车主电路为经济四段桥式整流电路, 通过改变可控硅的触发角, 可以构成四段桥式整流电路, 并实现无级调速。整流变压器的副边也装有无功补偿和三次谐波滤波器, 也可根据负荷电流的大小自动投切。

我们根据这几种电力机车的特点, 分别建立了它们的主电路的数学模型, 编制了谐波分析程序, 通过上机计算, 并结合现场测试, 确定了这几种电力机车在不同工况下的谐波电流含有率如表 2 所示。

表 2 电力机车供电电流的谐波电流含有率(%)

车型	工况	$HRI_3$	$HRI_5$	$HRI_7$	$HRI_9$	$HRI_{11}$	$HRI_{13}$
SS-1	重载	20~25	11~15	7~9	4~6	2.5~3	1.4~1.7
	轻载	24~28	13~17	8~10	5~7	3~3.5	1.6~1.8
SS-3	重载	22~26	11~14	6~9	4~6	3.5~4	1.6~1.8
	轻载	24~29	14~17	9~11	5~7	4~4.5	1.7~1.9
SS-6	重载	5~9	14~18	9~11	6~8	3.5~4	1.8~2
	轻载	26~30	15~19	10~12	7~9	4.5~5	2~2.2
6K	重载	8~12	13~17	8~10	5~7	3~3.5	1.6~1.8
	轻载	25~29	14~18	9~11	6~8	4~4.5	1.8~2

在实际运行过程中, 一个供电臂上可能会有多台电力机车运行, 因此, 首先要分别

计算出每台电力机车的谐波电流, 然后再把同频率的谐波电流分别进行相量迭加, 可得到供电臂上总的谐波电流  $I_{acn}$  和  $I_{hcn}$  ( $n = 3, 5, 7, \dots$ ), 也就是在牵引变压器低压侧测到的谐波电流。将  $I_{acn}$  和  $I_{hcn}$  代入 (2) 式, 即可求出电力机车负荷注入 110kV 电网的谐波电流。

表 3 列出了牵引变压器高压侧测到的几组数据。

表 3 电力机车负荷注入电网的谐波电流(A)

$I_1$	$I_3$	$I_5$	$I_7$	$I_9$	$I_{11}$	$I_{13}$
77.1	9.8	4.9	3.5	2.7	2.3	1.9
103.3	10.6	4.3	3.1	2.4	2.1	1.7
92.6	8.7	3.8	3.3	2.5	1.9	1.6
113.1	10.3	3.7	2.9	2.1	1.7	1.3
160.9	12.7	5.7	3.9	3.1	2.4	2.1
127.4	10.6	3.2	3.0	2.2	1.8	1.5

由表 3 可以看出, 电力机车负荷注入电网的谐波电流已超过了公用电网谐波的国家标准 (GB/T14549-93) 中规定的限值, 因此, 必须对其采取有效的抑制措施。在牵引站与电网的联结处安装滤波器, 可以有效地减少注入电网的高次谐波; 将牵引变压器交替采用 Y/Δ-11 和 V/V 接线, 也可以抑制 5、7 次谐波电流<sup>(3)</sup>。

### 参 考 文 献

- 1 吴竞昌等, 电力系统谐波, 水利电力出版社, 1988, 11
- 2 周勇, 电网谐波源分析, 中国人口出版社, 1995, 6
- 3 韦钢等, 抑制电气铁道谐波电流的一种方法, 华东电力, 1995 年第 1 期

## Negative Order Current and Harmonic Current Inputed into Electric Network by Electrified Locomotive

Zhou Yong

(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** In this paper, the main property of four kinds of electrified locomotive on the Long-Hai rail is studied, the negative order current and harmonic current inputed into electric network by them is analysed, and some calculated results and measured datas is listed.

**Keywords:** electrified locomotive, electric network, negative order current, harmonic current.