

# 6K 型电力机车电路的谐波分析\*

周 勇

(郑州工学院)

**摘 要:** 电力机车是电力系统中的主要谐波源之一。本文介绍了6K型电力机车的电路特征,分析了机车电流的变化规律,并给出了谐波电流的计算方法。

**关键词:** 电力机车; 谐波电流

**中图分类号:** TM714

随着铁路电气化的发展,电力机车已成为电力系统中的主要谐波源之一,电铁负荷的谐波问题已引起有关部门的高度重视。6K型电力机车是陇海线郑州至三门峡区段的主要车型,本文将对其主电路的特征、电流变化规律和谐波电流的计算方法进行探讨。

## 1 主电路及其工作原理

6K型电力机车额定功率为4800KW,由6台800KW的直流牵引电动机拖动,其主电路如图1所示。

该电路采用多段半控桥对直流牵引电动机D进行无级调压,直流额定电压 $U_e=925V$ ,主变压器两侧均有两个副绕组,其额定电压分别为 $300V \times 2$ 和 $600V$ ,第一副绕组有中间抽头,因此可实现四段调压。第一段,首先投入第一副绕组上段( $a_1b_1$ 段), $D_1$ 、 $D_2$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 组成半控桥,可使输出电压由0平滑地调到 $\frac{1}{4}U_e$ ;第二段为 $T_1$ 、 $T_2$ 满开放,同时触发 $T_3$ 、 $T_4$ ,可使输出电压由 $\frac{1}{4}U_e$ 平滑地调到 $\frac{1}{2}U_e$ ;第三段为 $T_3$ 、 $T_4$ 闭锁, $T_5$ 、 $T_6$ 满开放,投入第二

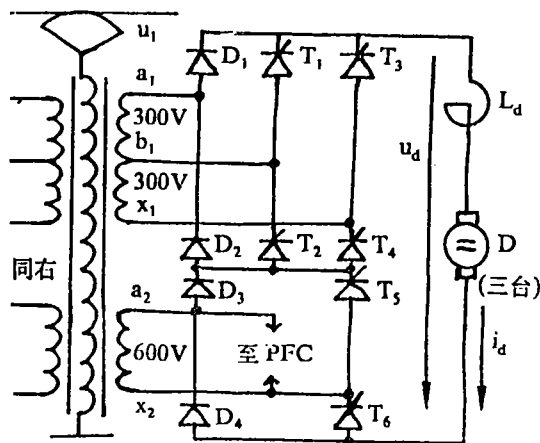


图1 6K型电力机车主电路图

\* 收稿日期: 1994-10-26

副绕组  $a_2x_2$  段, 同时触发  $T_1$ 、 $T_2$ , 可使输出电压由  $\frac{1}{2}U_e$  平滑地调到  $\frac{3}{4}U_e$ ; 第四段为  $T_1$ 、

$T_2$ 、 $T_5$ 、 $T_6$  满开放, 同时触发  $T_3$ 、 $T_4$ , 可使输出电压由  $\frac{3}{4}U_e$  平滑地调到  $U_e$ 。

从以上分析可以看出, 在主电路中只用了四支二极管和六支晶闸管, 就实现了四段调压。因此, 人们将这种电路称为经济四段桥无级调压。这就是 6K 型电力机车的主要特征之一。此外, 在主变压器的第二副绕组上还装有功率因数补偿装置 (简称 PFC), 它可以根据机车电流的大小进行自动投切, 并有对三次谐波的滤波作用。

## 2 原绕组电流分析

为了便于分析, 假定电源电压为正弦波。由于机车在满负荷时产生的谐波电流最大, 因此, 下面的分析将针对第四段调压状态进行, 其它调压状态可依此类推。当机车处于第四段调压状态时, 电路可分为满开放整流和可控整流两部分, 我们首先分别讨论这两种整流电路, 然后再把这两部分的结论按照对应的时间阶段进行迭加, 即可得到原绕组电流的表达式。在分析过程中还应该注意直流回路中的电流是以  $\pi$  为周期的脉动电流。

### 2.1 满开放整流( $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_5$ 、 $T_6$ )电路分析

晶闸管满开放整流的简化等效电路如图 2 所示。

#### 2.1.1 换相角和换相期间的电流

当电源电压过零时, 整流电路中的二极管便开始由导通转为截止, 或由截止转为导通, 这个过程叫做换相。我们把与换相经历的时间所对应的角度称为换相角, 记为  $\gamma$ 。

假设  $\omega t=0$  时,  $D_1$ 、 $D_4$  开始由截止转为导通,  $D_2$ 、 $D_3$  开始由导通转为截止。由于在换相期

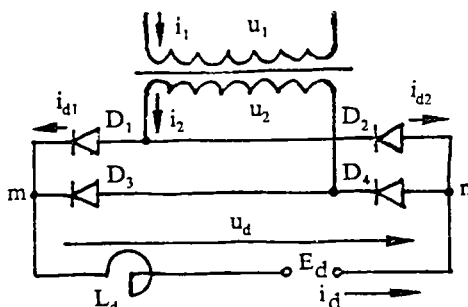


图 2 晶闸管满开放时的等效电路

间  $U_d \approx 0$ , 根据图 2 可以得到下列方程:

$$\frac{X_c}{\omega} \frac{di_{d1}}{dt} = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \quad (0 \leq \omega t \leq \gamma) \quad (1)$$

$$\frac{X_c}{\omega} \frac{di_{d2}}{dt} = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \quad (0 \leq \omega t \leq \gamma) \quad (2)$$

上两式中的  $x_c$  为主变压器的基波漏抗, 对应于第四段调压状态,  $U_2 = 900V$ 。

由(1)式可得:

$$di_{d1} = \frac{\sqrt{2} U_2 \omega}{x_c} \sin \omega t dt \quad (0 \leq \omega t \leq \gamma) \quad (3)$$

当  $\omega t=0$  时,  $i_{d1}=0$ ,  $D_1$ 、 $D_4$  开始换相; 当  $\omega t=\gamma$  时,  $i_{d1}=I_d$  ( $I_d$  为直流回路中的平均电流), 换相结束。因此, 我们对(3)式两边积分, 并代入对应的上下限可得:

$$\int_0^{I_d} di_{d1} = \int_0^{\gamma} \frac{\sqrt{2}U_2 \omega}{x_c} \sin \omega t$$

$$\text{即: } I_d = \frac{\sqrt{2}U_2}{x_c} (1 - \cos \gamma) \quad (4)$$

由(4)式可得:

$$\cos \gamma = 1 - \frac{x_c I_d}{\sqrt{2}U_2} \quad (5)$$

$$\text{或 } \gamma = \arccos(1 - \frac{x_c I_d}{\sqrt{2}U_2})$$

接下来我们求解换相期间的电流。分别对(1)式和(2)积分可得:

$$i_{d1} = \frac{\sqrt{2}U_2}{x_c} \sin \omega t + c_1 \quad (0 \leq \omega t \leq \gamma) \quad (6)$$

$$i_{d2} = \frac{\sqrt{2}U_2}{x_c} \sin \omega t + c_2 \quad (0 \leq \omega t \leq \gamma) \quad (7)$$

当  $\omega t = 0$  时,  $i_1 = 0$ ,  $i_{d2} \approx -I_d$ , 分别代入(6)式和(7)式可得:

$$c_1 = \frac{\sqrt{2}U_2}{x_c}, \quad c_2 = \frac{\sqrt{2}U_2}{x_c} - I_d$$

将  $c_1$  代入(6)式,  $c_2$  代入(7)式可得:

$$i_{d1} = \frac{\sqrt{2}U_2}{x_c} (1 - \cos \omega t) \quad (0 \leq \omega t \leq \gamma) \quad (8)$$

$$i_{d2} = \frac{\sqrt{2}U_2}{x_c} (1 - \cos \omega t) - I_d \quad (0 \leq \omega t \leq \gamma) \quad (9)$$

从而可得主变压器副绕组中的电流为:

$$i_{21} = i_{d1} + i_{d2} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{x_c} (1 - \cos \omega t) - I_d \quad (0 \leq \omega t \leq \gamma) \quad (10)$$

主变压器原绕组中的电流为:

$$i_{11} = \frac{i_{21}}{K} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{Kx_c} (1 - \cos \omega t) - \frac{I_d}{K} \quad (0 \leq \omega t \leq \gamma) \quad (11)$$

上式中的  $K$  为主变压器的变比。

### 2.1.2 整流期间的电流

换相结束后, 电路转入整流状态。假设直流回路中的电阻为  $R$ 、平波电抗器  $L_d$  的基波电抗为  $X_d$ 、直流牵引电动机的反电势为  $E_d$ , 根据图 2 可列出这时的电压平衡方程式为:

$$\sqrt{2}U_2 \sin \omega t = \frac{X_c + X_d}{\omega} \frac{di_d}{dt} + Ri_d + E_d \quad (\gamma \leq \omega t \leq \pi) \quad (12)$$

求解上式可得主变压器副绕组中的电流为:

$$i_{22} = \frac{\sqrt{2}U_2}{Z} [\sin(\omega t + \gamma - \varphi) - \frac{2\sin(\gamma - \varphi)}{1 - e^{-\pi/\lg\varphi}} e^{-\omega t/\lg\varphi}] - \frac{E_d}{R} \quad (13)$$

主变压器原绕组中的电流为:

$$i_{12} = \frac{\sqrt{2}U_2}{KZ} [\sin(\omega t + \gamma - \varphi) - \frac{2\sin(\gamma - \varphi)}{1 - e^{-\pi/\lg\varphi}} e^{-\omega t/\lg\varphi}] - \frac{E_d}{KR} \quad (14)$$

在上两式中,  $\gamma \leq \omega t \leq \pi$ ,  $U_2 = 900V$ ,  $Z = \sqrt{R^2 + (X_c + X_d)^2}$ ,

$$\varphi = \lg^{-1} \frac{R}{X_c + X_d}.$$

## 2.2 可控整流 ( $T_3$ 、 $T_4$ ) 电路分析

可控整流部分的等效电路如图 3 所示。通过改变晶闸管的导通角  $\alpha$  即可调节直流电压。

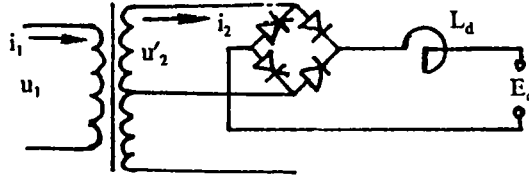


图 3 可控整流部分的等效电路

仿(13)式和(14)式的推导过程, 可得主变压器副绕组中的电流为:

$$i_{23} = \frac{\sqrt{2}U'_2}{Z'} [\sin(\omega t + \alpha - \varphi') - \frac{2\sin(\alpha - \varphi')}{1 - e^{-\pi/\lg\varphi'}} e^{-\omega t/\lg\varphi'}] - \frac{E_d}{R} \quad (15)$$

主变压器原绕组中的电流为:

$$i_{13} = \frac{\sqrt{2}U'_2}{K'Z'} [\sin(\omega t + \alpha - \varphi') - \frac{2\sin(\alpha - \varphi')}{1 - e^{-\pi/\lg\varphi'}} e^{-\omega t/\lg\varphi'}] - \frac{E_d}{K'R} \quad (16)$$

上两式中,  $\alpha \leq \omega t \leq \pi$ ,  $U'_2 = 300V$ ,  $K' = \frac{1}{4}K$ ,  $Z' = \sqrt{R^2 + (\frac{1}{4}X_c + X_d)^2}$ ,

$$\varphi' = \lg^{-1} \frac{R}{X_c/4 + X_d}.$$

## 2.3 直流回路中的电流( $i_d$ )表达式

根据以上的分析可得:

$$i_d = \begin{cases} i_{d1} - i_{d2} & 0 \leq \omega t \leq \gamma \\ i_{22} & \gamma \leq \omega t \leq \alpha \\ i_{22} + i_{23} & \alpha \leq \omega t \leq \pi \end{cases} \quad (17)$$

对应的电流波形如图 4 所示。

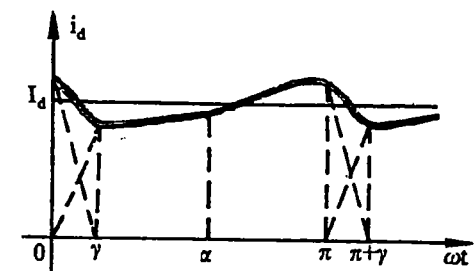


图 4 直流回路的电流波形图

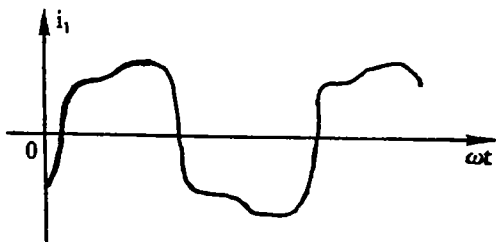


图 5 原绕组的电流波形图

2.4 原绕组全电流( $i_1$ )的表达式

根据以上的分析可得:

$$i_1 = \begin{cases} i_{11} & 0 \leq \omega t \leq \gamma \\ i_{12} & \gamma \leq \omega t \leq \alpha \\ i_{12} + i_{13} & \alpha \leq \omega t \leq \pi \\ -i_{11} & \pi \leq \omega t \leq \pi + \gamma \\ -i_{12} & \pi + \gamma \leq \omega t \leq \pi + \alpha \\ -i_{12} - i_{13} & \pi + \alpha \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (18)$$

对应的电流波形如图 5 所示。

3 原绕组的谐波电流

根据电力机车的不同运行工况，将主电路的有关参数代入(18)式，并将其展开成富氏级数可得:

$$i_1 = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (19)$$

$$\text{上式中} \quad a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i_1 \cos n\omega t dt \quad (n=1, 3, 5\cdots)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i_1 \sin n\omega t dt \quad (n=1, 3, 5\cdots)$$

分别取  $n=1, 3, 5, \cdots$ ，求出对应的  $a_n$  和  $b_n$ ，进而可求得对应的基波电流 ( $n=1$ ) 和高次谐波电流 ( $n>1$ ) 的幅值和相位分别为:

$$I_{nm} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (n=1, 3, 5, \cdots) \quad (20)$$

$$\varphi_n = \text{tg}^{-1} \frac{a_n}{b_n} \quad (n=1, 3, 5, \cdots) \quad (21)$$

将  $I_{nm}$  和  $\varphi_n$  代入(19)式可得:

$$i_1 = \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (22)$$

计算  $a_n$  和  $b_n$  时要注意  $i_1$  是分段函数, 同时还要考虑功率因数补偿装置(PFC)投入和退出时对3次谐波的影响。由于计算过程复杂, 而且工作量很大, 我们编写了专用的6K型电力机车谐波分析软件, 利用微机对机车在不同运行工况下的谐波含量进行了计算。根据计算结果, 我们画出了在额定负荷下主变压器原绕组中3、5、7、9次谐波电流的含有率随导通角  $\alpha$  变化的曲线如图6所示。

图6中的曲线1和曲线3分别为PFC退出和投入时3次谐波电流含有率, 曲线2、曲线4和曲线5分别为5次、7次和9次谐波电流含有率。

#### 4 结束语

采用晶闸管无级调压会增加电路的谐波电流含量, 降低机车的功率因数。但6K型电力机车由于采用了经济四段桥整流电路, 使这两种现象均得到改善。晶闸管的导通角  $\alpha$  对谐波电流的含量也有一定的影响, 随着  $\alpha$  的增大, 谐波电流含量呈现周期性波动, 频率越高, 波动周期越短。

投入功率因数补偿装置(PFC)后, 不仅可以进行无功补偿, 同时还对3次谐波具有滤波作用。由图6可以看出, PFC投入后, 3次谐波电流的含量明显下降, 但在轻负荷时, 也即PFC退出时, 3次谐波电流的含量是比较高的。另外, 5、7、9次谐波电流也有一定的含量。因此, 当一个供电臂上有多台机车运行时, 它们的谐波电流迭加之后, 就有可能导致注入电网的谐波电流超过国家规定的标准。建议有关部门要加强对谐波的监测, 一旦发现谐波超标, 应及时采取措施予以治理。

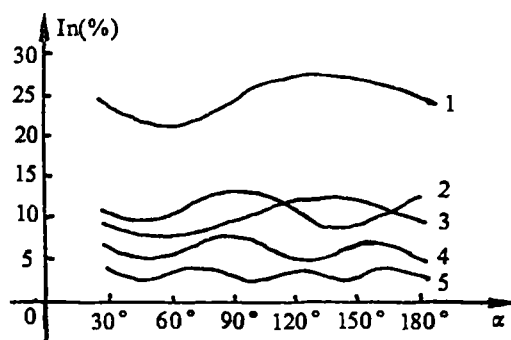


图6 谐波电流含有率与导通角  $\alpha$  的关系曲线

#### 参 考 文 献

- 1 上海铁道学院.电传动机车控制.中国铁道出版社.1984年
- 2 赵书强等.韶山Ⅲ型电力机车谐波分析.河南电力.1991年第1期.

## Harmonic analysis of type 6K electrified locomotive circuit

Zhou Yong

(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** Electrified locomotive is one of the main harmonic source in the electric power system. In this paper, the circuit character of type 6K electrified locomotive is introduced, the change law of locomotive current is analysed and the calculation method of harmonic current is given.

**Keywords:** electrified locomotive, harmonic current

---

(上接 33 页)

## The Characteristic and Diagnosis of Struck—cylinder Fault of Internal Combustion Engine of Trains

Sun Huiguo   Zhang Ruilin   Wang Honghai

(Vibration Research Center)

**Abstract:** The paper studied the principle of struck—cylinder fault, based on the analysis of complexity of ICE faults. In the mean time, it found the characteristic of struck—cylinder fault and put forward the methods of fault diagnosis, according to processing and analysis of a large of on—line data.

**Keywords:** Internal combustion engine of trains, Struck—cylinder fault, Fault diagnosis