

# 弓网高频离线对牵引变压器直流偏磁的影响

王瑾 杨中平 林飞 刘文正 柏毅峰

(北京交通大学 电气工程学院 北京 100044)

**摘要:** 随着现代高速列车的速度不断提高,弓网离线越来越严重,弓网受流质量对列车速度提高及安全运行的制约也越来越突出。牵引变压器是列车牵引传动系统的重要环节之一,因此,研究列车高速运行时弓网受流特性对牵引变压器输出特性的影响对于研究其对整个牵引传动系统的影响尤为重要。本文建立了弓网耦合有限元模型与牵引变压器电磁场模型,根据时速400km/h下的接触压力曲线,基于场路耦合法对牵引变压器的直流偏磁规律、影响因素及电流、漏电感参数进行仿真分析。结果表明,弓网高频离线引起牵引变压器铁心中剩磁与磁链非周期衰减分量叠加,且随着铁心直流偏磁的增大,铁心饱和加剧,一次侧电流直流分量增加,2次及其以上谐波含量增大;同时一次侧漏电感减小,二次侧漏电感增大。

**关键词:** 弓网高频离线 牵引变压器 直流偏磁 动态漏电感

## 1 引言

目前国外干线铁路的运行速度在200km/h以上已经非常普遍,日本新干线上的一些列车运行速度已经达到300km/h,法国TGV的试验速度达到了574.8km/h。我国CRH380A最高运行时速于2010年12月03日的先导试验中高达486.1公里,500公里时速列车也已在青岛南车四方股份公司落成。然而,随着高速列车运行速度的提高,接触网导线不平顺、轨道不平顺、接触网振动、受电弓振动等因素也随之加剧,使得受电弓与接触网电接触状态严重恶化,弓网离线(受电弓与接触网导线之间由接触状态到分离状态)频率增加,导致弓网电弧频频发生<sup>[1]</sup>。法国TGV高速列车以574.8km/h的运行速度创下高速列车记录,在运行过程中,当列车速度达到400km/h以上时电弧发生较为频繁,弓网受流质量下降。同时,弓网高频离线及伴随产生的离线电弧引起牵引变流器中间直流环节脉动增加、谐波增大,导致牵引电机输出牵引转矩波动<sup>[2]</sup>,对高速列车的牵引/制动性能及安全运行产生一定的影响。

牵引变压器将受电弓从接触网上获得的高压电转换为供给四象限变流器及其他电器工作所适合的电压(图1)。引起列车牵引变压器直流偏磁的原因主

要有两个<sup>[3-4]</sup>:一是受电弓与接触网脱离接触(以下简称弓网离线);二是牵引变流器控制发生偏移。弓网高频离线引起牵引变压器输入电压正半周和负半周波形不对称,使主磁通和一次侧电流中出现直流分量,导致铁心饱和加剧,漏电感参数发生变化。漏电感的变化对牵引变流器网侧功率因数,网侧电流、牵引绕组电流和直流电压的THD有很大影响<sup>[5]</sup>。

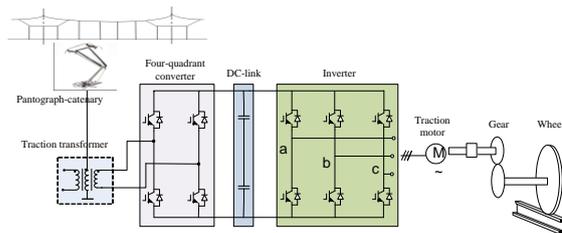


图1 高速列车牵引传动系统

本文建立了弓网耦合有限元模型和牵引变压器电磁场模型,以列车运行速度400km/h下的弓网离线规律为例,基于场路耦合法对牵引变压器的直流偏磁规律、影响因素及电流、漏电感等参数进行分析。这也为进一步研究弓网离线对四象限变流器的影响以及对整个牵引传动系统的影响奠定基础。

## 2 弓网离线规律

### 2.1 弓网耦合有限元模型

当列车运行速度达到350km/h或者更高时,接触线振动加剧,受电弓与接触网之间接触压力变化

也随之加剧，导致弓网离线频率增加，伴随产生离线电弧，接触线磨损加剧<sup>[6]</sup>。通过 MSC.Marc 仿真软件建立了弓网动态受流仿真模型，对全锚段双弓模型(如图 2)进行仿真<sup>[7]</sup>。

### 2.2 弓网离线规律

以 400km/h 为例，图 3 为仿真得到的弓网间接触压力曲线。当接触压力大于 0 时认为弓网接触、受流良好；接触压力等于 0 时认为弓网离线、受流中断<sup>[8]</sup>。相应的离线规律如图 4 所示，“1”表示弓网接触，“0”表示弓网离线。在 1.8s~4.5s 之间，共发

生 10 次离线，其中，C 段离线时间最长(0.11s)，F、G、H 段离线时间最短(0.03s)。

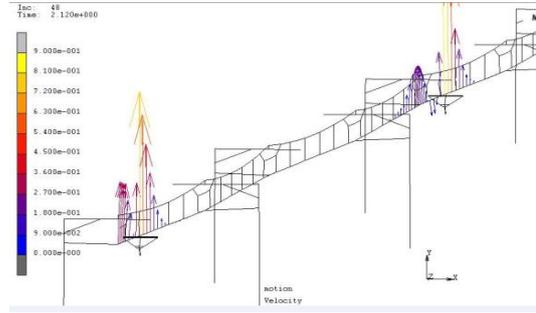


图 2 弓网耦合有限元模型

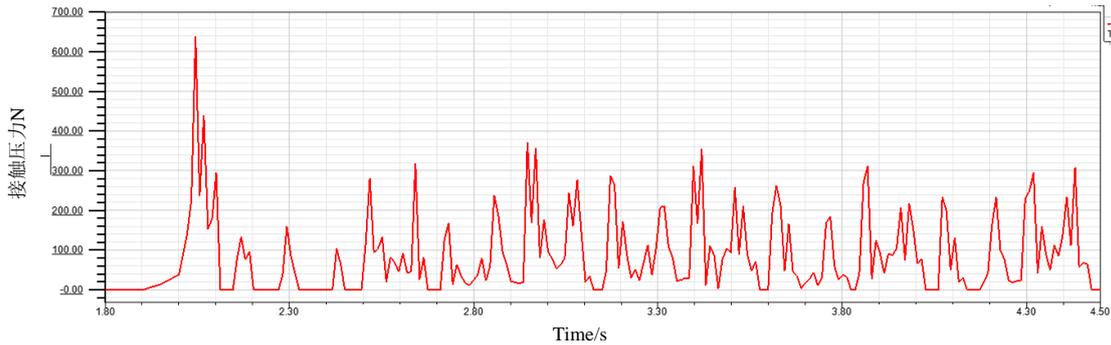


图 3 400km/h 时弓网间的接触压力

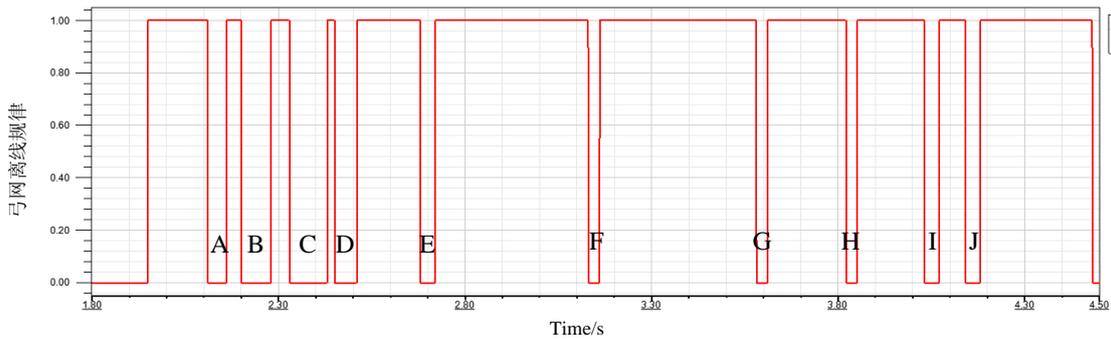


图 4 400km/h 时弓网间离线规律

## 3 牵引变压器电磁场模型

### 3.1 牵引变压器直流偏磁的基本原理

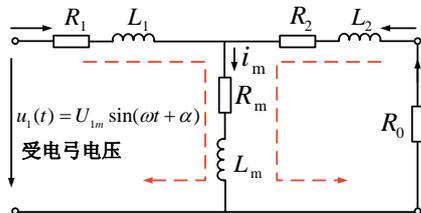


图 5 牵引变压器 T 型等效电路图

(1)弓网离线时：

输入电压  $U_1 = 0$ 。忽略牵引变压器的漏电阻和漏电感，励磁电流  $i_m$  满足微分方程：

$$i_m R_m + L_m \frac{d\psi(t)}{dt} = 0 \quad (1)$$

令  $\tau = L_m / (R_m + R_0)$ ，近似认为  $i_m = \psi / L_m$ 。若  $t_{fo}$  时刻弓网离线，则铁心内主磁通为：

$$\psi_r(t) = \psi_{t_{off}} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

(2)弓网接触时：

$\alpha$  为  $t = t_{on}$  时刻，即弓网重新接触时刻受电弓

电压的初始相位,  $\theta = \alpha - \arctan(\omega\tau)$ , 同理可得:

$$\psi(t) = \psi_m \sin(\omega t + \theta) + (\psi_r + \psi_m \sin \theta) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

式中:  $\psi_r$  为  $t = t_{on}$  时刻铁心剩磁;  $\psi_r = \psi_{r_{off}} e^{-t_{on}/\tau}$ ;

$$\psi_m \text{ 为磁链幅值; } \psi_m = U_{1m} / \sqrt{(1/\tau)^2 + \omega^2}.$$

由式(3)可得, 铁心磁链由两部分组成, 一部分是稳态磁链:  $\psi_{ste}(t) = \psi_m \sin(\omega t + \theta)$ , 其幅值  $\psi_m$  与弓网接触时的电压相位  $\alpha$  无关; 另一部分是暂态磁链(即直流偏磁):  $\psi_{tran}(t) = (\psi_r + \psi_m \sin \theta) e^{-t/\tau}$ 。暂态磁链与剩磁  $\psi_r$ 、弓网接触时受电弓电压相位  $\alpha$  及负载大小有关。

牵引变压器工作在略饱和状态时, 励磁电流增大, 但与额定电流相比, 其本身数值较小, 对一次侧电流的影响可以忽略不计; 若铁心饱和加剧, 励磁电流急剧增大, 其影响不可忽略, 导致一次侧电流畸变。

### 3.2 牵引变压器电磁场模型

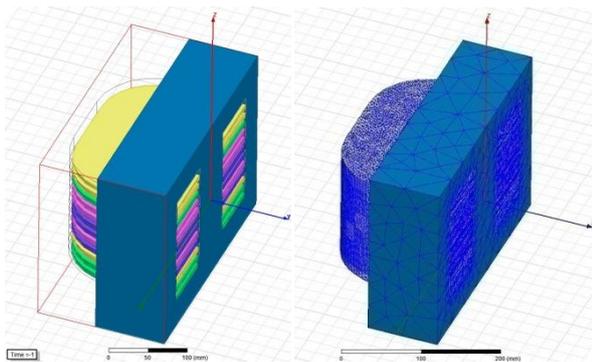


图6 牵引变压器电磁场仿真模型图

本文采用 Maxwell 电磁场分析软件, 对 CRH2 型动车组牵引变压器的简化模型进行仿真分析。为减小计算量, 根据牵引变压器结构的对称性及电磁分布的特性, 建立了 1/2 的电磁场仿真模型, 如图 6 所示。认为各绕组中的电流在绕组所占有的空间内均匀分布, 且忽略铁心涡流、绕组内的环流以及磁滞特性对磁场的影响<sup>[9]</sup>。模型边界条件为 Zero Tangential H Field(切向自然边界)和 Symmetry(法向对称边界)。由于下文将对漏磁场进行仿真分析, 需对绕组和绕组间隙进行精细剖分。

### 3.3 动态漏电感的计算

传统的磁场能量法计算漏电感参数时假设所有场量均随时间按正弦变化<sup>[10]</sup>, 忽略了励磁电流对漏磁势的影响<sup>[11]</sup>。实际上, 当牵引变压器稳态运行时, 漏磁通由负载电流与一次侧电流的负载分量之和建

立。牵引变压器铁心饱和时, 励磁电流畸变, 一次侧和二次侧磁势出现不平衡, 不平衡的这部分磁势变为漏磁势, 导致漏磁通增大, 使漏感、短路电感增大<sup>[12]</sup>。

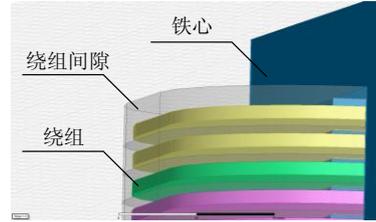


图7 三维模型局部放大图

因此, 当牵引变压器铁心饱和加剧时, 励磁电流畸变, 不能忽略它对漏磁场的影响。由于漏磁通路主要由非铁磁材料组成, 本文在计算各绕组漏磁场能量时, 认为其主要包括经过绕组和绕组间隙的能量(图 7 所示包裹绕组的气隙), 图示气隙之外的漏磁场能量忽略不计。通过 Maxwell 瞬态场仿真得到每个周期各绕组电流的有效值, 将其带入 Maxwell 静态场中可以得到每个周期的各绕组及绕组气隙的漏磁场能量, 根据  $W_o = 0.5L_o I^2$  即可求解牵引变压器不同工作状态下的动态漏电感的数值。

## 4 结果与分析

### 4.1 场路耦合仿真

采用场路耦合法, 将图 4 所示的离线规律信号作为牵引变压器输入电压的控制信号, 与电磁场模型进行联合仿真, 可得到图 8 所示的主磁通与电流波形图。A~J 段离线中, 剩磁与磁链非周期分量不同程度的叠加。如 C、E、F、G、I 段离线, 剩磁与磁链非周期衰减分量方向不同, 二者相抵消, 铁心饱和程度较小。因此励磁电流的变化较小, 对一次侧电流的影响可以忽略不计(V 段)。对于 A、B、D、H、J 段离线, 剩磁与磁链非周期分量方向相同, 引起铁心饱和加剧, 与直流偏磁同向的一边, 励磁电流畸变为尖顶波; 与直流偏磁反向的一边, 励磁电流幅值变小, 呈平顶波, 引起一次侧电流直流分量增加, 正负半波严重不对称, 畸变更明显(IV、VI、VII 段)。

### 4.2 直流偏磁影响因素分析

#### (1) 弓网离线时间

根据式(2), 弓网离线后, 铁心内主磁通呈指数衰减。如表 1 中, 额定电流下, 若主磁通达到 1.89pu

时发生弓网离线，经过 3s 衰减至 0。因此，弓网离

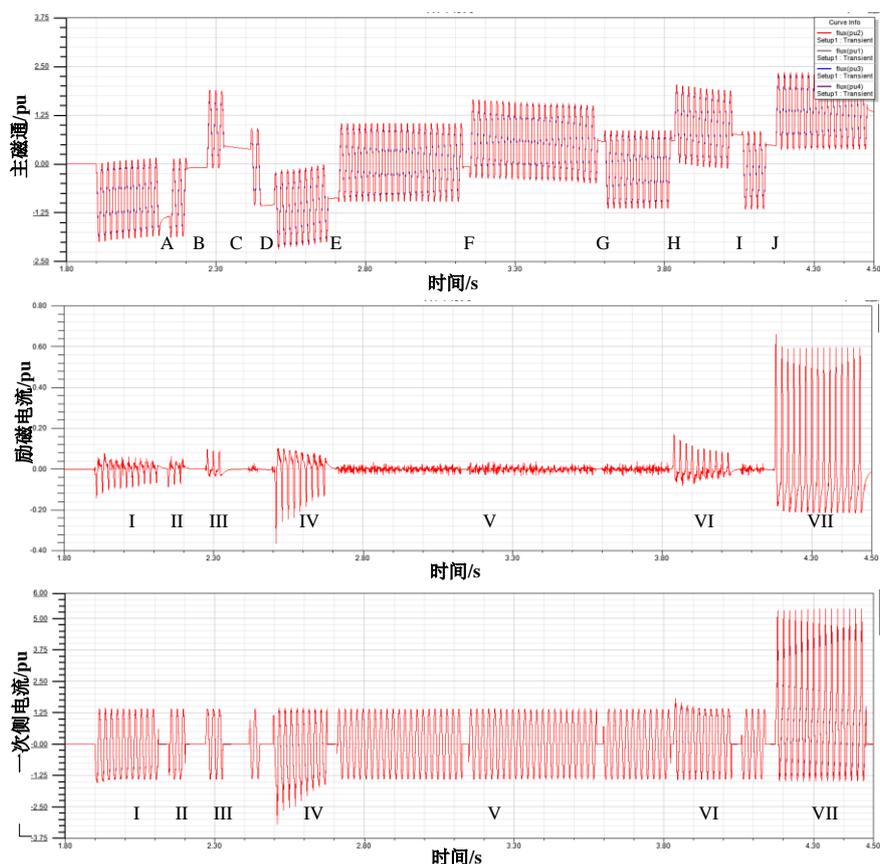


图 8 主磁通与电流波形图

线时间越长，铁心中剩磁越小。图 4 所示的 10 段离线中，最长离线时间为 0.11s，磁通不能完全衰减至 0，多次离线必然会导致磁通正向或反向叠加。

表 1 不同负载下磁通(pu)衰减时间

电流	0s	0.5s	1s	1.5s	2s	2.5s	3s
1.2pu	1.89	1.04	0.71	0.31	0.15	0.08	0.03
1.0pu	1.89	1.01	0.57	0.24	0.10	0.04	0.01
0.8pu	1.89	0.85	0.35	0.12	0.04	0	0

### (2) 负载大小

根据表 1 对不同负载电流下磁通衰减时间比较可知，当牵引变流器控制引起负载电流增大时，磁通衰减速率较慢；负载电流减小时，磁通衰减速率增加。

### (3) 弓网接触时电压相位

根据式(3)可知，由于磁通非周期分量的关系，当弓网接触时电压相位为  $0 \sim \pi/2$  时，此时铁心内的直流偏磁为正向；同理，当电压相位为  $\pi/2 \sim 3\pi/2$  时，直流偏磁为负向；当电压相位为  $3\pi/2 \sim \pi$  时，

直流偏磁为正向。

因此，结合图 9 可以得出以下结论，铁心中剩磁为正向时：

a. 若电压在负半周峰值至正半周峰值处任意位置接触时(图 9 中电压波形的虚线部分)，非周期分量为正向，暂态磁链同向叠加，直流偏磁增大；

b. 若电压在正半周峰值至负半周峰值处任意位置接触时(图 9 中电压波形的实现部分)，非周期分量为负向，暂态磁链相抵消，直流偏磁减小。

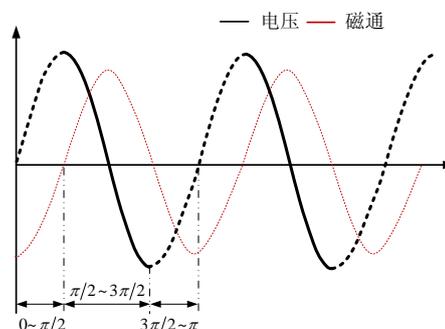


图 9 电压与磁通的相位关系

### 4.3 电流谐波分析

对图 8 所示的一次侧电流中的 I、IV、V、VI、VII 段分别进行谐波分析。由表 2 可以看出, 牵引变压器发生直流偏磁时, 一次侧电流不仅出现了奇次谐波, 而且还出现了较大的偶次谐波, 其中 2 次、3 次、4 次、5 次谐波较大。根据表 2 中各段电流的直流分量, 其饱和程度分别为  $V < I < VI < IV < VII$ , 说明基波电流随着直流偏磁增大而增大, 同时 2 次及其以上的谐波含量也随着铁心饱和程度的加深而增大。

表 2 电流谐波分析

段	基波 (rms)/pu	DC/pu	谐波(%)			
			2 次	3 次	4 次	5 次
I	1.06	0.171	13.7	8.1	3.63	0.95
IV	1.2278	0.409	31.61	17.75	7.85	3.12
V	1.001	0.0001	0.00	0.03	0.02	0.04
VI	1.0754	0.188	17.26	9.9	4.18	0.96
VII	1.839	1.03	49.27	24.63	8.95	1.98

图 10 所示为一次侧电流基波有效值曲线图。随着直流偏磁增加, 一次侧电流增大, 二次侧电流基本不变。偏磁严重时, 一次侧电流甚至可以增大到额定值的几倍, 影响牵引变压器的绕组绝缘。

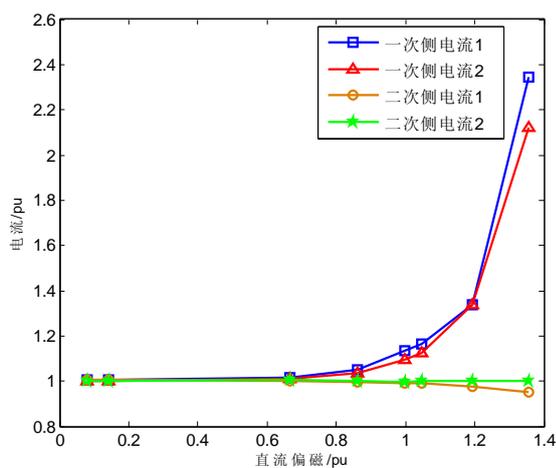


图 10 直流偏磁与一次侧电流关系图

### 4.4 动态漏电感参数

变压器稳态运行时, 无论是外加电压或负载电流都不发生急剧变化, 漏磁通与产生它的电流呈线

性关系。发生直流偏磁后, 如图 11 所示, 各绕组漏磁场能量增加。偏磁严重时, 铁心饱和加剧, 导致相对磁导率下降, 漏磁场能量几乎呈指数增长。因此, 对于副边绕组, 漏电感随着直流偏磁的增大而增大。对于原边绕组, 由于一次侧电流非线性增加, 原边绕组的漏电感随直流偏磁的增加而减小(图 12)。根据式(2)与图 10~12, 若铁心中剩磁为 0, 牵引变压器的直流偏磁仅由磁链非周期分量引起时, 直流偏磁最大可增加一倍, 此时漏磁场能量、一次侧电流及漏电感参数的变化程度并不明显。当剩磁与非周期分量同向叠加后, 直流偏磁可增大至一倍以上, 上述参数均有明显的变化, 可见磁通的叠加对于牵引变压器的电磁特性有较大的影响。

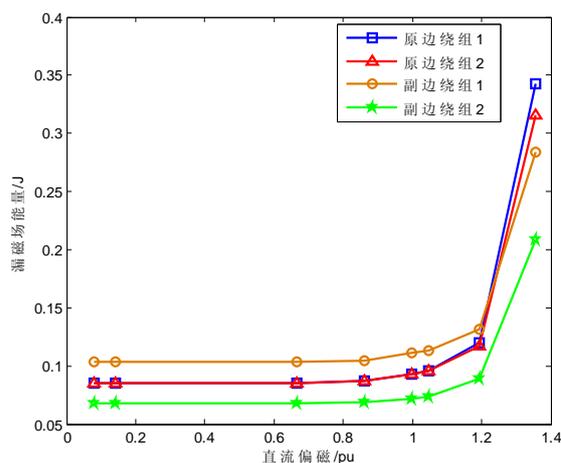


图 11 直流偏磁与漏磁场能量关系图

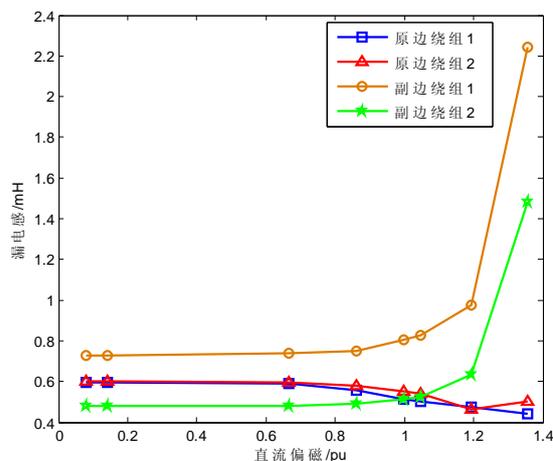


图 12 直流偏磁与动态漏电感关系图

## 5 结语

综上所述可以得出以下结论:

(1)若铁心中剩磁为 0, 牵引变压器的直流偏磁仅

由磁链非周期分量引起,漏磁场能量、一次侧电流与漏电感参数的变化不明显。

(2)弓网高频离线导致铁心中存在剩磁,若剩磁方向为正向,且接触电压在负半周峰值至正半周峰值处任意位置接触时,非周期分量亦为正向,暂态磁链同向叠加,直流偏磁增大;

(3)直流偏磁增大到1倍以上后会引引起铁心严重饱和,励磁电流畸变严重,一次侧电流直流分量增加,2次及其以上谐波含量增加;且各绕组漏磁场能量增大;一次侧漏电感减小;二次侧绕组漏电感增大。

高速列车运行时,频繁的离线势必影响牵引变压器的受流质量,造成牵引变压器输出特性与电磁特性的变化,不仅引起一次侧电流直流分量过大,影响牵引变压器的绝缘及网侧功率因数;甚至导致牵引传动系统工作的稳定性发生变化,特别是制动运行时,弓网离线影响牵引变压器的能量回馈程度,进而导致制动系统工作的稳定性发生变化,影响高速列车的安全运行。本文分析结果对列车受流质量较差时对牵引传动系统造成的影响提供依据。

#### 参考文献

- [1] 王万岗,吴广宁,高国强,王波. 高速铁路弓网电弧试验系统[J]. 铁道学报, 2012,34(4):22-27
- [2] Kevin Lee, Thomas M Jahns, William E. Berkopec and Thomas A.Lipo. Closed-Form Analysis of Adjustable-Speed Drive Performance under Input-Voltage Unbalance and Sag Conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications. VOL 42, NO.3, MAY/JUNE 2006, pp.733-741
- [3] 马录宝,姜悦礼,张金平. 交流传动机车牵引变压器设计时应考虑的几个问题[J]. 变压器, 2000, 37(5)
- [4] 林泓,朱仙福,盛专成. 交流传动机车牵引变压器若干问题的分析[J]. 机车电传动, 1999(4)
- [5] 叶强.交流传动电力机车变流器与车载电气设备相互影响的研究[D]. 西南交通大学研究生学位论文, 2009
- [6] Yang, H., Liu, W.: Simulation of the relationship between high-speed electrified railway catenary design parameters and the quality of the current collection. Chinese Railways 11, 60-64(2010)
- [7] Ran Liu, Wenzheng Liu, Huisheng Yang, Zhaofeng Gong and Weiliang Wang. Simulation of Dynamic Current Collection between Pantograph and Catenary of Elastic Catenary Suspension System[J]. In: Proceedings of the 1st International Workshop on High-Speed and Intercity Railways. (Lecture Notes in Electrical Engineering). Hong Kong, China, 19-22 July, 2011, pp.489-494
- [8] 李会杰,田志军. 弓网受流标准制定的几个问题探讨[J]. 科技交流, 2005, 3: 8-12
- [9] 王建民,贾建刚,刘兰荣,范亚娜. 移相整流变压器三维漏磁场和短路阻抗的数值仿真[J]. 变压器, 2009,46(4):1-4
- [10] 侯世勇,董景义,李杰,段玉柱.220kV 单相牵引变压器短路阻抗数值仿真计算[J]. 变压器, 2011,48(8):1-4
- [11] 尹克宁.变压器设计原理[M].中国电力出版社,北京, 2003
- [12] 周承鸣,姚纓英,李建明,戴玉松. 双绕组变压器漏感参数计算及其在阻抗电压设计中的应用[J].变压器, 2010, 47(12)

#### 作者简介

王瑾女, 1988年生, 在读硕士研究生, 主要从事高速列车牵引传动系统的研究。