

# 高铁自动过分相过电压机理与抑制方法研究

徐海<sup>1</sup>, 耿路<sup>2</sup>, 高翔<sup>2</sup>, 颜伟<sup>2</sup>, 王思荣<sup>2</sup>, 冶小刚<sup>2</sup>

(1.江苏科能电力工程咨询有限公司,江苏 南京 210036)

(2.南京师范大学电气与自动化工程学院,江苏 南京 210046)

**[摘要]** 高铁通过电分相时,主断路器切断动作会产生牵引变压器过电压,对牵引网及车载设备具有较大危害.分析了 CRH2 型动车组过分相时产生过电压的机理,利用 SIMULINK 建立了动车组牵引传动系统模型,研究了高铁过分相运行状态及电路特性,提出基于 RC 吸收法治理措施及其优化参数设计.同时,还研究了合闸电压初相角对过电压的影响,提出了基于自动准同期装置控制合闸相位角的过电压治理方案,为高铁过分相时牵引变压器过电压的抑制提供了理论依据与工程指导.

**[关键词]** 牵引变压器,静态过电压,牵引传动系统,RC 吸收法,自动准同期装置

**[中图分类号]** TB95 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2017)03-0029-10

## Research on Auto-Passing Phase Separation Overvoltage Mechanism and Suppression Method of High-Speed EMU

Xu Hai<sup>1</sup>, Geng Lu<sup>2</sup>, Gao Xiang<sup>2</sup>, Yan Wei<sup>2</sup>, Wang Enrong<sup>2</sup>, Ye Xiaogang<sup>2</sup>

(1.Jiangsu Keneng Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 210036, China)

(2.School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** The overvoltage of the traction transformer is generated due to the cut on or off operation of the main circuit breaker, when high speed train passes the neutral section. It has a great harm on the power systems and other trains. The overvoltage mechanism is analyzed due to CRH2 electric multiple units passing the neutral section. The traction drive system models are established on the basis of SIMULINK for CRH2 electric multiple units. The operation performance and circuit characteristics are studied. The overvoltage treatment scheme is introduced on the basis of the RC absorption and its parameter optimization strategy is proposed. Moreover, the relationship between the voltage phase and overvoltage is analyzed while CRH2 electric multiple units passing the neutral section. The automatic quasi synchronization device is proposed to control the voltage phase and decrease the overvoltage, which provides the theoretical basis and engineering guidance to solve the overvoltage and increases the safety and reliability of high speed train operation.

**Key words:** traction transformer, static overvoltage, traction drive system, RC absorption method, automatic quasisynchronization device

我国高铁运营里程突破 2 万 km,大大提高了人们出行的便利性,但高铁运行会对电网产生大量冲击,将严重影响电力系统与高铁运行的安全可靠.为了使电力系统三相负荷尽可能平衡,电气化铁路采用牵引变电所换相连接的供电方式,一般实行 A、B 相轮流供电.在不同相供电臂间设置电分相,把各牵引变电所的单相牵引负荷轮换接入电力系统中的不同相,使整个大区电网三相牵引负荷大致对称,从而降低负序电流的影响,有助于提高供电设备容量利用率和供电可靠性.

高铁在通过电分相时,受电弓在有电区和无电区来回运动,会产生静态过电压,对受电弓及牵引网都有很大的危害.为了保护车载设备,车辆以惯性方式通过无电区,即在进入无电区之前停止牵引,断开主断路器,依靠惯性驶过无电区,驶出无电区后,主断路器合闸,再进入牵引工况.由于高铁采用断电自动过分相模式,所以在过分相时主断路器会有相应的动作.主断路器断开时,牵引变压器产生截流过电压,主

收稿日期:2016-09-09.

基金项目:国家自然科学基金(51475246)、江苏省自然科学基金(BK20161019)、江苏省高校自然科学基金(15KJB470011).

通讯联系人:高翔,硕士,实验师,研究方向:电气工程. E-mail:gaoxiang@njnu.edu.cn

断路器合上时牵引变压器产生合闸过电压。

目前,国外对动车组(electric multiple units, EMU)分闸自动过分相过电压的研究中比较关注产生的电弧问题<sup>[1]</sup>,机车过分相过程中往往伴随着电弧的产生与熄灭,分相过电压与分相电弧密切相关,其主要从电弧烧伤角度研究。国内学者主要从过电压产生机理进行分析,文献[2]认为分相过电压是由于机车与接触网谐振引起的。文献[3]利用铁磁谐振原理,解释分相过电压的形成机理和寻找应对措施。文献[4]认为分相电压是由于中性段出现感应电压产生的。文献[5]认为是机车在过分相过程中,由于中性段与车载高压电压互感器的谐振引起的。文献[6]从理论上分析了机车过分相的机理及过电压的暂态响应公式。目前针对高铁过分相暂态冲击和变压器过电压及励磁涌流有较多的研究,但将两者结合起来利用过分相来分析牵引变压器暂态过程的研究较少,且对于高铁过分相时过电压产生机理没有统一的认识。

本文对高铁过分相工况下的暂态过程进行仿真,进而分析过分相对牵引变压器造成的冲击影响,提出基于RC吸收法治理措施及其优化参数设计,研究合闸电压初相角对过电压的影响,提出基于自动准同期装置控制合闸相位角的过电压治理方案。

## 1 车载断电自动过分相原理

国内的交流电气化铁路一般每隔20~30 km设置一个电分相,在电分相两端由不同的两相(电源)供电,在实现异相供电臂的机械连接的同时对两个供电臂进行电气隔离,确保稳定的弓网关系并有效防止异相短路。CRH2动车组自动过分相装置原理如图1所示。

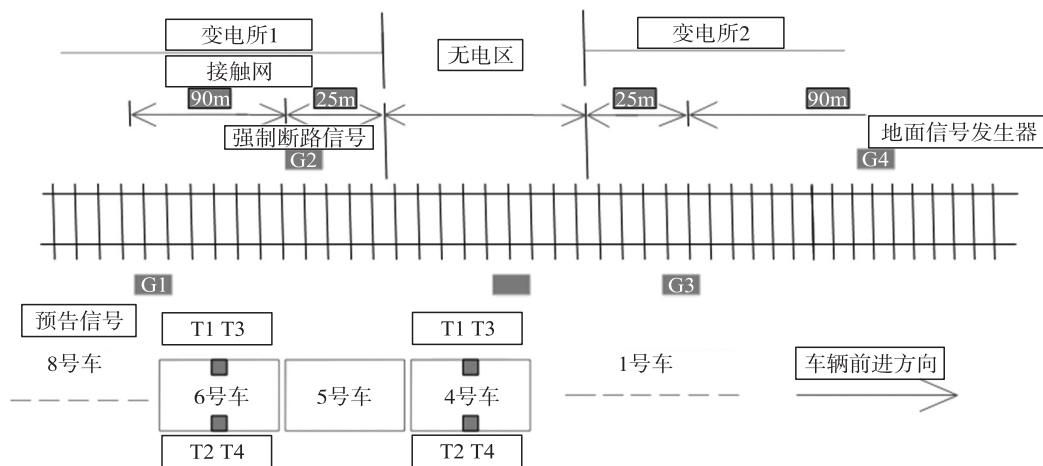


图1 CRH2动车组自动过分相装置原理图

Fig. 1 The principle of auto-passing phase separation device for CRH2 EMU

过分相检测系统由地面信号发生器、车载信号接收器及过分相检测装置组成。地面信号发生器由4根呈斜对角布置的磁枕(在普通混凝土枕的一端适当位置嵌入永久性磁性装置)组成,安装在电分相区的前方左右侧各一个,后方左右侧各一个,为电力机车断电自动过分相提供准确的位置信息。车载信号接收器接收地面信号发生器的位置信号,其中车载信号接收器中的2个(T2及T4)设置在机车右侧与地面上的G1及G3相对应,T1与T3设置在机车左侧与G2及G4相对应。其中,T1、T3或T2、T4都是作为双重系统使用的。过分相检测装置对T1、T2、T3及T4接收到的信号进行处理,并向动车组控制系统传输预告信号、强制中断信号、故障信号及工作信号。

当动车组在到达分相区前车载信号接收器T2及T4接收到地面磁钢发出的信号并送至过分相检测装置,过分相检测装置处理之后向控制系统发送预告信号,动车组立即停止牵引或再生制动,断开VCB(主断路器),惰行通过分相区。动车组惰行时牵引系统转换为再生发电状态,为辅助系统供电,就不会有短时间停电了。但是这个过程中,牵引变压器会产生分闸过电压(截流过电压)和合闸过电压及合闸过电流。当动车组通过分相区后车载信号接收器会接收到地面磁钢发出的信号并送至过分相检测装置,过分相检测装置向动车组控制系统发出工作信号,主断路器合闸。

2 CRH2 动车组牵引传动系统综合负荷建模

8 节编组的 CRH2 动车组包含 2 个基本动力单元,一个基本动力单元的牵引传动系统主要由网侧高压电气设备、1 个牵引变压器、2 个牵引变流器、8 台三相交流异步牵引电动机组成,包含 2 个动车,每个动车有 4 台并联牵引电机,全车共 4 节动车、4 节拖车,如图 2 和表 1 所示.

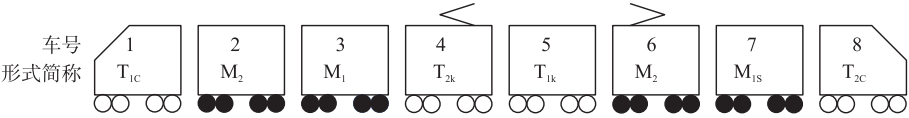


图 2 CRH2 动车组车厢结构  
Fig. 2 The compartment structure of CRH2 EMU

牵引供电网电压为单相 AC 25 kV/50 Hz,牵引变压器二次侧电压为单相 AC 1.5 kV/50 Hz,牵引整流器直流侧支撑电容为 16 mF,中间直流环节电压为 DC 2.6 kV (牵引)/DC 3.0 kV (再生制动).

表 1 CRH2 动车组车厢分布  
Table 1 The compartment distribution of CRH2 EMU

T	M	C	K	S
拖车	动车	司机室	餐、座合车	一等车

根据牵引传动系统原理图搭建仿真模型,牵引变电所从国家电网引入 220 kV 三相交流电,将三相电转换为适合动车组使用的单相交流 25 kV 并送上接触网. 受电弓从接触网取流获取电能,经主断路器后送牵引变压器,牵引变压器输出 1.5 kV 交流到两台牵引变流器. 牵引变流器受流后完成整流、逆变等工作,牵引整流器采用基于 SPWM 调制和瞬态电流控制的单相三电平整流器,将 1.5 kV 单相工频交流电整流为 3 kV 直流电. 牵引逆变器采用基于 SVPWM 调制的三相三电平逆变器,将直流电转换为三相交流电驱动牵引电机工作. 牵引电机采用基于转子磁场定向的间接矢量控制三相交流异步电机<sup>[7]</sup>,用于驱动列车运行,其额定功率为 300 kW,牵引传动系统结构如图 3 所示.

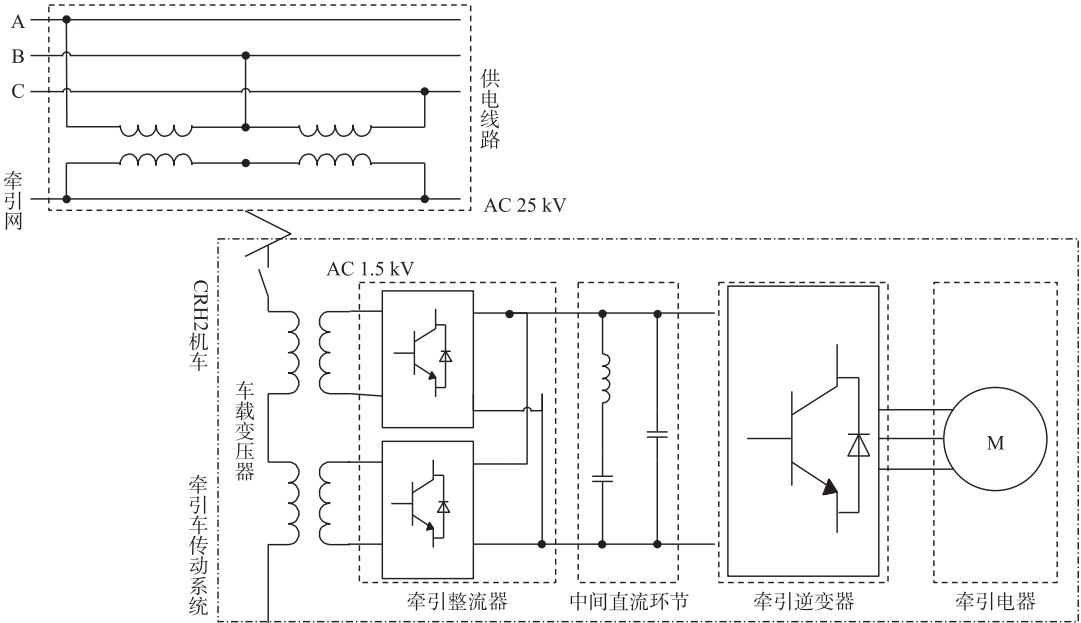


图 3 CRH2 动车组牵引传动系统  
Fig. 3 The traction drive system of CRH2 EMU

2.1 基本阻力和负载转矩模型

动车组在运行过程中主要分为牵引、再生制动和恒速运行三种模式. 在 CRH2 动车组运行过程中,其基本阻力为

$$f_L = m(8.63 + 0.072\ 95v + 0.001\ 12v^2).$$
 (1)

式中,  $f_L$  为基本阻力,  $v$  为动车组运行速度,  $m$  为动车组质量.

由式(1)可得每台牵引电机的负载转矩  $T_L$  为

$$T_L=\frac{f_Ld}{2Na\eta_{Gear}}.$$

(2)

式中,  $T_L$  为每台电机的负载转矩,  $d$  为动车组轮径,  $N$  为牵引电机总台数,  $a$  为牵引电机传动比,  $\eta_{Gear}$  为牵引电机传动效率. 上述 8 节编组的 CRH2 动车组 (4M4T, 时速 200~250 km/h) 牵引传动系统的具体电气参数如表 2 所示.

表 2 CRH2 动车组牵引传动系统参数

Table 2 The traction drive system parameters of CRH2 EMU

系统参数	数值	系统参数	数值
牵引变压器二次侧漏感 $L_N$	2 mH	牵引变压器二次侧漏电阻 $R$	0.2 $\Omega$
中间直流电压 $U_{dc}$	2 600 V (牵引)/3 000 V (再生制动)	支撑电容 $C_1=C_2$	16 mF
动车总质量 $m$	408.5 t	机车轮径 $d$	0.82 m
牵引电机总台数 $N$	16	传动比 $a$	3.036
传动效率 $\eta_{Gear}$	0.95	牵引电机额定功率 $P_N$	300 kW
牵引电机额定电压 $U_N$	2 000 V	牵引电机额定频率 $f_N$	140 Hz
定子电阻 $R_s$	0.114 $\Omega$	定子漏感 $L_s$	0.001 417 H
转子电阻 $R_r$	0.146 $\Omega$	转子漏感 $L_r$	0.001 294 H
互感 $L_m$	0.032 848 H	极对数 $p$	2
转动惯量 $J$	5 kg/m <sup>2</sup>		

2.2 转子磁通和电磁转矩模型

动车组在运行过程中主要分为牵引、再生制动和恒速运行三种工况. 每种工况对应不同的转子磁通和电磁转矩. CRH2 动车组牵引工况的牵引力和转子磁通如图 4 所示. 其中, 牵引电机的额定磁通为

$$\varphi_{rN}=\frac{\sqrt{2/3}U_N}{2\pi f_N}=\frac{\sqrt{2/3}\times2\,000}{2\pi\times140}=1.857\,6\text{ Wb}.$$

(3)

当动车组运行在牵引工况时, 整列动车组 (16 台电机) 轮轨牵引力为

$$\begin{cases} F_{tr}=176\,000-360v, & v\leq125\text{ km/h}, \\ F_{tr}=16\,250\,000/v, & v>125\text{ km/h}. \end{cases}$$

(4)

式中,  $F_{tr}$  为牵引工况时整列动车组的轮轨牵引力, 如图 4(a) 所示.

由式(4)可得牵引工况时, 每台牵引电机的电磁转矩为

$$T_{etr}=\frac{F_{tr}d}{2Na\eta_{Gear}}.$$

(5)

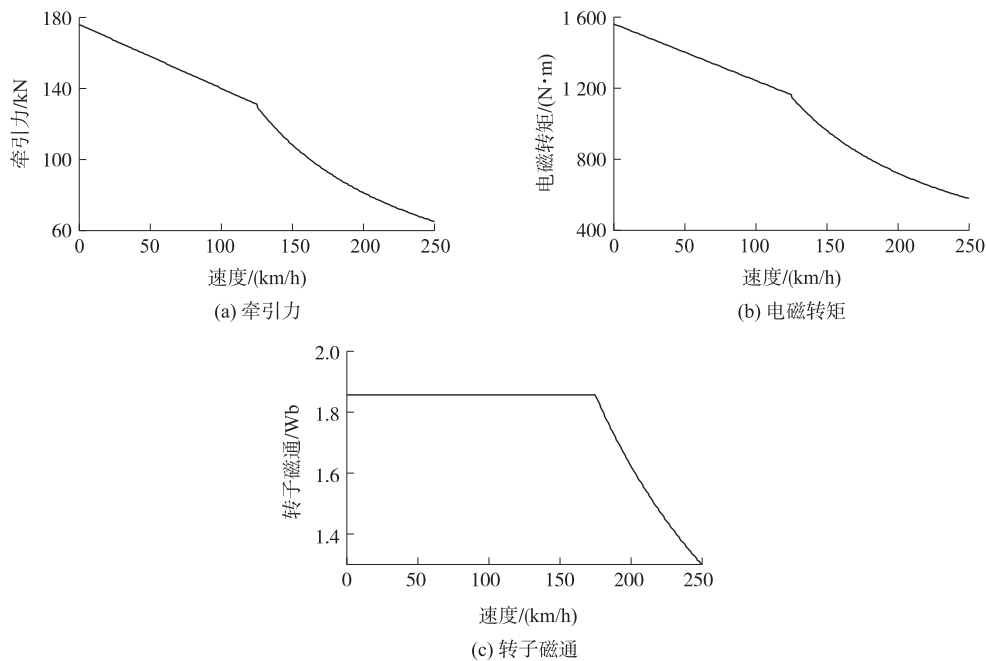


图 4 CRH2 动车组牵引工况的牵引力和转子磁通

Fig. 4 The traction force and rotor flux of CRH2 EMU traction condition

式中,  $T_{etr}$  为牵引工况时每台牵引电机的电磁转矩, 如图 4(b) 所示.

转子磁通为

$$\begin{cases} \varphi_{tr} = 1.8576, & v \leq 175 \text{ km/h}, \\ \varphi_{tr} = 175 \times 1.8576 / v, & v > 175 \text{ km/h}. \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\varphi_{tr}$  为牵引工况时每台牵引电机的转子磁通, 如图 4(c) 所示.

当动车组运行在 0~125 km/h 时, 电机运行未达到额定频率, 牵引电机电压随列车速度的增大而增大, 输出功率相应增加, 因此采用恒磁通、准恒力矩控制.

当动车组加速至 125~175 km/h 时, 电机运行在基准频率以上, 定子电压不允许超过额定值, 电机恒功率运转, 因此采用恒功率、恒磁通控制.

当动车组继续加速至 175 km/h 以上时, 电机主磁通必须减小, 相应地转矩也减小, 因此采用恒功率弱磁控制.

### 3 高铁过分相时牵引变压器过电压生成机理

#### 3.1 建模与机理分析

断路器合闸瞬间车载变压器产生过电压, 而断路器分闸瞬间车载变压器会产生更加严重的过电压. 列车位于中性区时, 当开关  $S_A$  闭合, 列车由  $U_a$  供电, 此时接触网与列车的等效电路如图 5 所示.

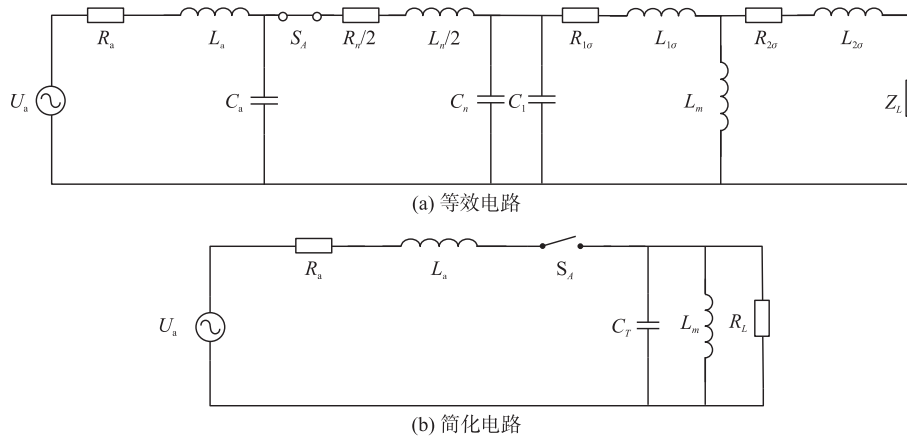


图 5 主断路器断开时的电路原理图

Fig. 5 The circuit principle when the main circuit breaker is disconnected

图 5(a) 中,  $R_a$  为电源和线路总电阻,  $L_a$  为电源和线路总电感,  $C_a$  为供电臂 A 对地等值电容,  $S_A$  为地面开关,  $C_n$  为中性段对地等值电容,  $C_1$  为列车主变对地等值电容.  $R_{l\sigma}$  和  $L_{l\sigma}$  为主变压器原边的绕组电阻和漏感,  $R_{2\sigma}$  和  $L_{2\sigma}$  为主变压器副边的绕组电阻和漏感,  $L_m$  为主变压器励磁电感. 由于  $R_{l\sigma}$ 、 $L_{l\sigma}$ 、 $R_{2\sigma}$  和  $L_{2\sigma}$  都很小, 可以忽略其影响, 等效电路简化如图 5(b).  $C_T$  为  $C_n$  和  $C_1$  并联等效电容,  $Z_L$  为列车等效阻抗, 由于列车牵引系统是四象限变流器, 电压电流同相位, 可将  $Z_L$  认为是一个电阻负载  $R_L$ .

由如 5(a) 可见, 右侧电路是一个电感和一个电容以及一个阻抗并联的电路,  $S_A$  断开后, 相当于二阶电路零输入响应.

为方便分析并不失一般性, 假设电感  $L_m$  的电流为正弦电流,

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha). \quad (7)$$

式中,  $I_m$  为电流幅值,  $\omega$  为电流角频率,  $\alpha$  为电流的初始相位角. 则电容电压为,

$$U_{C_T} = L_m \frac{di}{dt} = U_m \cos \alpha. \quad (8)$$

根据能量原则可知

$$\begin{aligned} Q_{C_T} &= \frac{1}{2} C_T U_T^2 = \frac{1}{2} C_T U_m^2 \cos^2 \alpha, \\ Q_{L_T} &= \frac{1}{2} L_m I_T^2 = \frac{1}{2} L_m I_m^2 \sin^2 \alpha. \end{aligned} \quad (9)$$



开关  $S_A$  断开后,回路发生振荡,自振荡频率为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_T}} \quad (10)$$

回路中的能量为式(9)中的两个能量之和,当所有能量都转化为电容储存的电能为  $U_{\max}$  最大值. 此时电容的电能为

$$Q'_{C_T} = \frac{1}{2}C_T U_{\max}^2 = \frac{1}{2}C_T U_m^2 \cos^2 \alpha + \frac{1}{2}L_m I_m^2 \sin^2 \alpha \quad (11)$$

求解得

$$U_{\max} = \sqrt{U_m^2 \cos^2 \alpha + \frac{L_m}{C_T} I_m^2 \sin^2 \alpha} \quad (12)$$

由于电感  $L_m$  的电压与电流关系为

$$\frac{U_m}{I_m} = \omega L_m = 2\pi f_0 L_m \quad (13)$$

将式(11)和式(13)代入式(12)得

$$U_{\max} = U_m \sqrt{\cos^2 \alpha + (f/f_0)^2 \sin^2 \alpha} \quad (14)$$

由式(14)可知,截流过电压的大小与开关  $S_A$  断开时的电流相位  $\alpha$  有关. 当变压器激磁电流在幅值处被切断,即  $\alpha = 90^\circ$  时,过电压数值达到最大值,为

$$U_{\max} = \frac{f}{f_0} U_m \quad (15)$$

由式(15)可见,当变压器激磁电流在幅值处被切断时,冲击过电压为电压幅值的数倍,该倍数与电路振荡频率及电源电压基频有关.

由于电子开关关断时刻是在电流过零点自然关断,即  $S_A$  关断时  $\alpha = 0^\circ$  时,此时由式(14)可得

$$U_{\max} = U_m \quad (16)$$

式(16)表明,此时列车输入端的电压最大值等于接触网电压幅值,说明在列车的输入端没有产生过电压冲击. 此外,谐振频率越高,产生的过电压越高. 在电流  $0^\circ$  和  $180^\circ$  关断开关,不会产生过电压,在其它相位时刻关断开关,都会出现过电压.

### 3.2 动车组过分相牵引变压器仿真

高铁过分相过电压仿真:模拟过分相过程,主断路器切断 0.5 s 后合上(接触网电压相位角  $0^\circ$  时合闸),牵引变压器原边绕组在主断路器切断时和闭合时的仿真结果如图 6 所示. 仿真结果表明主断路器切断时,牵引变压器原边绕组产生了明显的截流过电压,在主断路器闭合时产生的过电压不明显.

牵引变压器副边绕组在主断路器切断时和闭合时的仿真结果如图 7 所示. 在 0.3 s 主断路器断开时可以观察到牵引变压器副边绕组产生了明显的过电压,在 0.8 s 主断路器闭合时牵引变压器副边绕组产生了过电压.

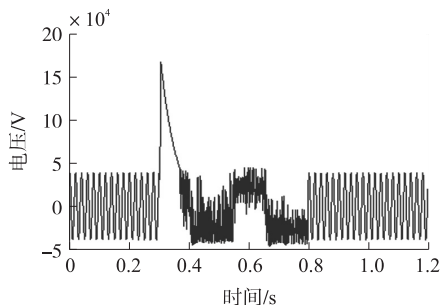


图 6 原边绕组分闸过电压波形  
Fig. 6 The overvoltage of the primary winding when transformer switching on and off

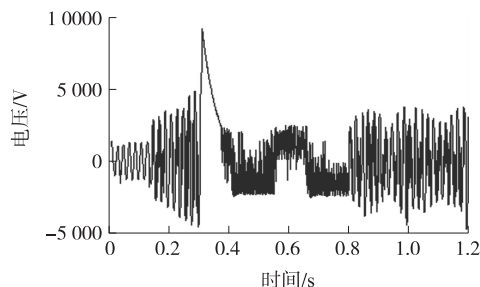


图 7 副边绕组分闸过电压波形  
Fig. 7 The overvoltage of the secondary winding when transformer switching on and off

## 4 牵引变压器过电压治理方案

针对高速铁路自动过分相引起的过电压问题,本文提出了基于  $RC$  吸收法的高铁自动过分相过电压治理方案以及基于自动准同期装置的过电压治理方案。

根据前文的分析,合闸冲击电压由稳态分量和暂态分量叠加得到,其中稳态分量由系统电源决定的,暂态分量按系数  $e^{-\delta t}$  衰减。由于机车参数变化,过电压幅值不仅与电路的各项参数有关,而且与电压的合闸相位角以及对地电容上原有的残压值有关。

### 4.1 $RC$ 吸收法原理

根据机车过分相过电压产生的特点可知,过分相过电压和牵引网参数、牵引网结构、过分相型式有关,通过研究优化系统参数设置,可以有效降低过电压幅值,但是其效果并不明显,此过电压的性质类似于操作过电压,只要存在电压相位差,过电压必然会产生。通过前面分析,分合闸是由于能量振荡产生的,所以可尝试改变在受电弓端或中性线端并联电容来改变其振荡过程,并加之电阻来限制电容器的充放电过程,在电路的高压互感器两端加设阻容串联支路,以阻容的变化来抑制过电压。在此,我们运用  $RC$  吸收装置来抑制自动过分相的过电压,其原理如图 8 所示。

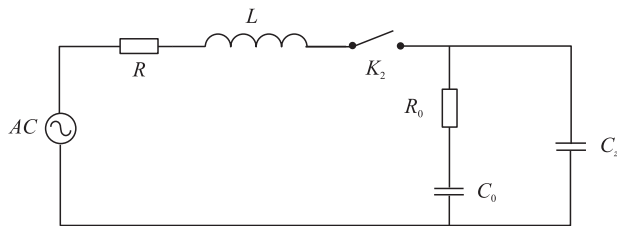


图 8 等效  $RC$  吸收电路

Fig. 8 Equivalent  $RC$  absorption circuit

在关节式电分相中, $RC$  吸收装置的作用主要在于:

- (1) 增加电路回路的电容,降低电路振荡频率;
- (2) 使用电阻  $R_0$  消耗吸收能量,使电路产生阻尼振荡,加速电压衰减;
- (3) 降低中性线上的感应电压。

由于吸收电容的作用,整个电路的电气参数发生变化,开断后触头间恢复电压上升陡度降低,因而改变了高频振荡回路,抑制了重燃的机率。在吸收电阻的作用下,即使发生了重燃,高频电流幅值的增长也得到了抑制,并使回路高频电流以  $RC$  时间常数衰减,延长电流过零时间,增大触头开距,有效避免重燃。同时以欠阻尼变化为临界阻尼或者过阻尼振荡,使过电压降低或者不产生过电压。

### 4.2 加入 $RC$ 吸收法抑制后的分合闸过电压仿真

在牵引变压器之后并联  $RC$  吸收装置。在前期理论分析的基础上,分别在  $R$  为  $200\ \Omega$ 、 $500\ \Omega$ 、 $1\ 000\ \Omega$  及  $C$  为  $2\ \mu\text{F}$ 、 $5\ \mu\text{F}$ 、 $10\ \mu\text{F}$  时进行仿真。先将  $C$  设为  $5\ \mu\text{F}$ ,依次设置  $R$  为  $200\ \Omega$ 、 $500\ \Omega$ 、 $1\ 000\ \Omega$ ,进行仿真,以寻找  $RC$  吸收装置中  $R$  的最优值。原边绕组及副边绕组电压仿真结果如图 9 和图 10 所示。

仿真结果表明,当  $C$  为  $5\ \mu\text{F}$  且  $R$  为  $1\ 000\ \Omega$  时,原边绕组电压超过  $130\ \text{kV}$ 。 $R$  为  $500\ \Omega$  时原边绕组电压达  $100\ \text{kV}$  且  $R$  为  $200\ \Omega$  时, $RC$  吸收装置对原边绕组的过电压有很好的抑制效果,原边绕组电压小于  $40\ \text{kV}$ 。

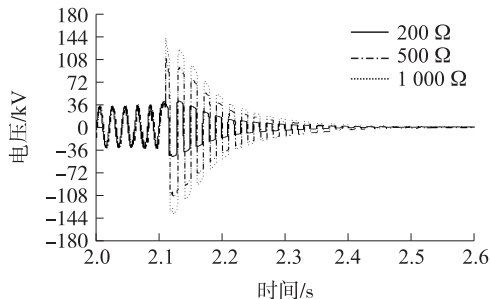


图 9 电容为  $5\ \mu\text{F}$  时,原边绕组波形

Fig. 9 The primary winding waveform when  $C=5\ \mu\text{F}$

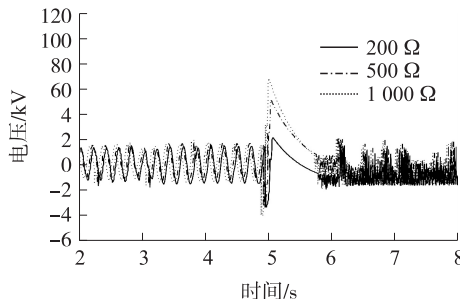


图 10 电容为  $5\ \mu\text{F}$  时,副边绕组波形

Fig. 10 The secondary side winding waveform when  $C=5\ \mu\text{F}$

仿真结果表明,当  $C$  为  $5\ \mu\text{F}$  且  $R$  为  $1\ 000\ \Omega$  时,副边绕组电压超过  $7\ \text{kV}$ .  $R$  为  $500\ \Omega$  时副边绕组电压达  $6\ \text{kV}$ .  $R$  为  $200\ \Omega$  时,  $RC$  吸收装置对副边绕组的过电压有很好的抑制效果,副边绕组电压小于  $2\ \text{kV}$ .

在  $R$  为  $200\ \Omega$  时,分别将  $C$  设为  $2\ \mu\text{F}$ 、 $5\ \mu\text{F}$ 、 $10\ \mu\text{F}$  进行仿真以确定  $RC$  吸收装置中  $C$  的最优参数. 原边绕组及副边绕组电压仿真结果如图 11 和图 12 所示.

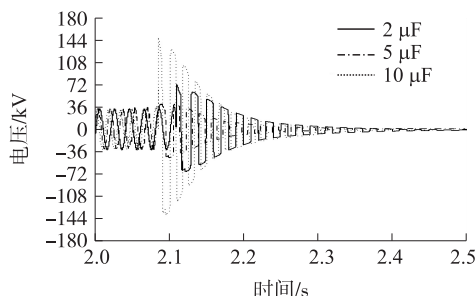


图 11 电阻为  $200\ \Omega$  时,原边绕组波形

Fig. 11 The primary winding waveform when  $R=200\ \Omega$

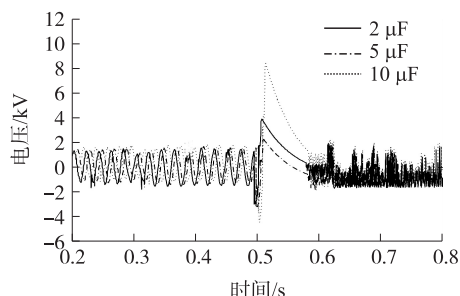


图 12 电阻为  $200\ \Omega$  时,副边绕组波形(时)

Fig. 12 The secondary side winding waveform when  $R=200\ \Omega$

仿真结果表明,在电阻为  $200\ \Omega$  的情况下,电容为  $10\ \mu\text{F}$  时牵引变压器原边绕组电压超过了  $140\ \text{kV}$ . 电容为  $2\ \mu\text{F}$  时牵引变压器副边绕组电压达  $70\ \text{kV}$ . 电容为  $5\ \mu\text{F}$  时牵引变压器副边绕组电压小于  $40\ \text{kV}$ ,过相时牵引变压器原边绕组过电压得到了很好的抑制.

仿真结果表明,在电阻为  $200\ \Omega$  的情况下,电容为  $10\ \mu\text{F}$  时牵引变压器副边绕组电压超过了  $8\ \text{kV}$ . 电容为  $2\ \mu\text{F}$  时牵引变压器副边绕组电压达  $4\ \text{kV}$ . 电容为  $5\ \mu\text{F}$  时牵引变压器副边绕组电压小于  $2\ \text{kV}$ ,过相时牵引变压器副边绕组过电压得到了很好的抑制.

#### 4.3 基于自动准同期装置的过电压抑制方案

以上高铁过分相仿真中,主断路器的分闸、合闸均是在接触网电压相位角为  $0^\circ$  时进行的. 不同电压相位角分闸、合闸时牵引变压器上的电压也可能不同. 本文将在牵引网电压相位角为  $90^\circ$  时进行分闸、合闸实验,以便得出牵引网电压相位角对牵引变压器电压造成的影响.

在  $RC$  吸收装置取得最优值得情况下,也就是  $R$  取  $200\ \Omega$ 、 $C$  取  $5\ \mu\text{F}$  时,对主断路器分闸、合闸时间进行调整,使其在牵引网电压为  $90^\circ$  时进行分闸、合闸操作. 具体分闸、合闸时间为  $0^\circ$  分闸、合闸时间加上  $1/4$  个电压周期的时间. 仿真结果如图 13 所示.

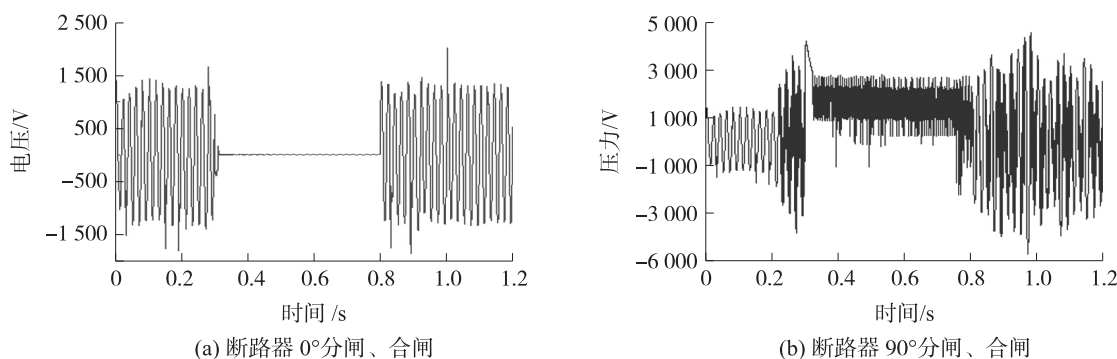


图 13 主断路器不同角度合闸时牵引变压器电压

Fig. 13 The traction transformer voltage when main circuit breaker switched with different voltage phase

仿真结果表明,接触网电压相位角为  $90^\circ$  时牵引变压器上电压幅值达  $4.5\ \text{kV}$ ,是牵引变压器二次绕组额定电压的 3 倍,变压器绕组频繁的经受过电压的冲击可导致绕组变形,同时过电压会使得变压器绕组温度升高,甚至烧毁绕组. 此冲击分量的抑制对牵引变压器尤为重要,加入自动准同期装置可以实现主断路器在接触网电压相位角为  $0^\circ$  时完成分闸、合闸操作,从而使过分相对牵引变压器及其他车载设备造成的冲击降到最低.

自动准同期装置控制合闸相位角的原理如图 14 所示,即利用频差检查、压差检查及恒定导前时间的



原理,自动监视电压差、频率差,分析计算出合适的同期时刻并提前一个前导时间发出合闸命令,确保在理想的角度完成同期并网,即电压初相角为 $0^\circ$ 时合闸。

自动准同期装置通过时间程序与逻辑电路,按照一定的控制策略进行综合而成,能圆满地完成准同期并列的基本要求。自动准同期装置的应用可以方便的实现接触网电压相位角 $0^\circ$ 时合闸。为使合闸时牵引变压器上的残压相位角也为 $0^\circ$ ,自动准同期装置还设有自动调节电压和频率的单元,在电压差和频率差不满足条件时发出控制脉冲。若电压差不满足要求时,自动调节 $RC$ 吸收装置中电阻的大小,促成同期来临(如图15所示)。

在加入 $RC$ 吸收装置的前提下,当主断路器在接触网电压相位角为 $90^\circ$ 合闸时,其电流幅值只有正常工作时的1.4倍。主断路器在接触网电压相位角为 $0^\circ$ 时合闸,牵引变压器上电流幅值达450 A,是一台牵引变压器正常工作电流的3.7倍,变压器绕组频繁的经受励磁涌流的冲击可导致绕组变形,同时过电压会使得变压器绕组温度升高,甚至烧毁绕组。此冲击分量的抑制对牵引变压器尤为重要,加入自动准同期装置可以实现主断路器在接触网电压相位角为 $0^\circ$ 时完成分闸、合闸操作,从而使过分相对牵引变压器及其他车载设备造成的冲击降到最低。

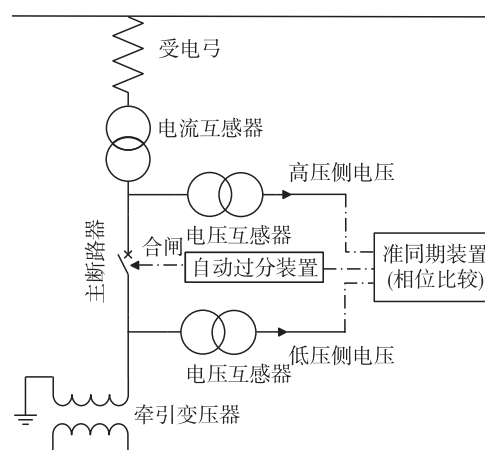


图14 自动准同期装置控制原理

Fig. 14 The control principle of automatic quasi synchronization device

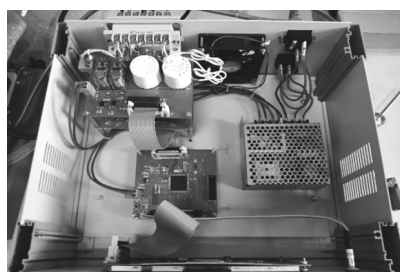


图15 自动过分相冲击分量模拟检测装置

Fig. 15 The simulation detection device of automatic over phase impact component

## 5 结语

根据实验仿真发现在加装抑制装置后,牵引变压器分相过电压迅速衰减,在 $RC$ 吸收装置取最优参数时,原边绕组峰值限制在40 kV以下,副边绕组峰值限制在2 kV以下,过电压治理效果较好。此时,电压不会对电力机车、接触网、关节式电分相结构及牵引变电所产生威胁。本文通过分析合闸角对过电压的影响,提出了基于自动准同期装置控制合闸相位角的新方法,为高铁过分相时牵引变压器过电压的抑制提供了理论依据,具有一定的理论意义与工程应用价值。

## [参考文献] (References)

- [1] DÁN D, PÉTER K. Effect on power quality of the high power electric traction[J]. Electric utility deregulation and restructuring and power technologies, 2006, 1(4): 138-143.
- [2] 张雪原. 高速重载铁路车网耦合下过电压产生机理与防护方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2009.  
ZHANG X Y. Research on overvoltage mechanism and prevention in the network-locomotive coupling of the high speed and heavy haul railways[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [3] 丰战凯. 电气化铁路过电压产生的原因及对策[J]. 两铁科技, 2007(2): 16-18.  
FENG Z K. Causes and countermeasures of over voltage of electrified railway[J]. Two iron technology, 2007(2): 16-18. (in Chinese)

- [4] 赵峰,张泰伟,张忠. 接触网关节式电分相过电压的研究[J]. 兰州交通大学学报,2009,28(1):52-55.  
ZHAO F,ZHANG T W,ZHANG Z. Research on over-voltage of the articulated phase insulator on overhead contact system[J]. Journal of Lanzhou jiaotong university,2009,28(1):52-55.(in Chinese)
- [5] 陈朝珍. 电力机车过电分相电气过程的机理分析[D]. 成都:西南交通大学,2007.  
CHEN C Z. Mechanism analysis of electric locomotive passing through phase separation[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2007.(in Chinese)
- [6] 马德明,高仕斌. 断电过电分相的过电压暂态过程分析[J]. 电气化铁道,2008(3):1-4.  
MA D M,GAO S B. Over voltage transient process analysis of power cut off phase[J]. Electric railway,2008(3):1-4.(in Chinese)
- [7] 铁路职工岗位培训教材编审委员会. CRH2 型动车组机械师[M]. 北京:中国铁道出版社,2009:99-116.  
Railway staff training teaching materials editing committee. Type CRH2 motor train unit[M]. Beijing:China Railway Publishing House,2009:99-116.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]