

研
究
开
发CRH3 型高速动车组牵引变压器
励磁涌流仿真研究

姜东杰, 王师昂

(唐山轨道客车有限责任公司 产品研发中心, 河北 唐山 063035)



作者简介: 姜东杰 (1969-), 男, 高级工程师, 研究方向为高速动车组牵引控制。

摘 要: 通过对牵引变压器励磁涌流产生机理及性质进行简要分析, 结合 CRH3 型高速动车组牵引变压器特性, 使用 MATLAB 软件对其进行了仿真建模分析, 仿真结果和实际的工程技术参数相符, 验证了所建模型的正确性, 同时通过傅里叶分析器对励磁涌流进行了谐波分析, 分析结果表明高速动车组牵引变压器采用二次谐波制动比的差动保护方法是可行的。

关键词: 牵引变压器; 励磁涌流; 差动保护; 电动车组

中图分类号: U264.3; U266.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)01-0014-03

Research and Simulation of the Inrush Current
for the CRH3 EMUs Traction Transformer

JIANG Dong-jie, WANG Shi-ang

(Product Research and Design Center, CNR Tangshan Railway Vehicle Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063035, China)

Abstract: Based on the analysis of the mechanism and properties of the traction transformer inrush current, and specially on the characteristic of the CRH3 EMUs traction transformer, the simulation was carried out by the the MATLAB software, the result of the simulation in accordance with the actually technical parameter, which validated the model. Meanwhile analyzed the inrush current with Fourier method, and the result of the analysis proves that the method of EMUs traction transformer differential protection by estimation secondary harmonic proportion is possible.

Key words: traction transformer; inrush current; differential protection; EMU

0 引言

牵引变压器是高速动车组高压系统中的重要设备, 它的安全性和稳定性对动车组安全运行起着重要作用。稳态运行时, 变压器的励磁电流不到其额定电流的10%, 但当受电弓升起, 合主断路器的瞬间, 由于变压器铁心磁通的饱和以及铁心材料的非线性特征, 会产生很大的励磁涌流, 其幅值能达到励磁电流的几十倍。这种励磁涌流会给接触网电压、动车组高压系统以及变压器本身带来一系列的危害: 如会损坏变压器的绝缘, 使变压器绕组机械应力变大, 导致变压器绕组变形^[1]; 导致变压器差动保护的误动作; 造成接触网电能质量的下降(励磁涌流包含大量的谐波电

流), 引起供电网谐振; 引起电磁干扰, 影响变压器周围设备的运行等。因此正确认识、深入研究牵引变压器的励磁涌流对于主机厂进行动车组高压系统的设计有很重要的意义。

1 牵引变压器励磁涌流产生机理分析

CRH3 高速动车组(简称 CRH3 型车)牵引变压器为单相变压器, 变压器二次侧开路, 一次侧在 $t=0$ 主断路器合闸时, 电压为

$$u_1(t) = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

式中: U_1 为网压有效值; α 为 $t=0$ 时 u_1 的初始相位。

在 $t \geq 0$ 期间, 变压器一次绕组中励磁电流 i_1 满足如下微分方程:

$$i_1 R_1 + N_1 \frac{d\psi}{dt} = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

式中: ψ 为变压器主磁通; N_1 、 R_1 为变压器一次绕组线

收稿日期: 2010-06-18; 收修改稿日期: 2010-12-12

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目(2009J006-D)

圈匝数与电阻, 本身较小, 可以近似认为

$$i_1 = \frac{N_1 \psi}{L_1} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)得

$$R_1 \frac{N_1 \psi(t)}{L_1} + N_1 \frac{d\psi(t)}{dt} = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha) \quad (4)$$

主断路器合闸时, 变压器铁心有剩磁 ψ_r , 即

$$\psi(0) = \psi_r \quad (5)$$

求解式(4)微分方程, 并代入式(5)的初始条件, 求得磁通 ψ 的解析式为:

$$\psi(t) = -\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\psi_m \cos \alpha + \psi_r) \cdot e^{-\frac{R_1}{L_1} t} \quad (6)$$

式中: $-\psi_m \cos(\omega t + \alpha)$ 为稳态磁通, 其中 $\psi_m = \frac{\sqrt{2} U_1}{\omega N_1}$, 为稳态磁通最大值, 其幅值与投入时的电压相位无关;

而 $(\psi_m \cos \alpha + \psi_r) \cdot e^{-\frac{R_1}{L_1} t}$ 为在 $t=0$ 时刻磁通不能发生突变而由此产生的暂态磁通, 从公式就可以看出它是个非周期的衰减分量, 它的大小与主断路器闭合时电压的相位 α 有关。

从式(6)不难看出当 $\alpha=0^\circ$; $t=\frac{\pi}{\omega}$ 时, 铁心中的磁通达到最大值, 接近 $2\psi_m + \psi_r$, 这将使铁心高度饱和, 励磁绕组电感降低, 从而产生冲击电流, 即励磁涌流。当 $\alpha=0^\circ$; $t=\frac{\pi}{\omega}$ 时, 式(1)中电压 $u_1(t) = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha)$ 为0, 所以主断路器在电压过零瞬间闭合时, 剩磁 ψ_r 与主磁通方向相同时, 发生励磁涌流。在电压值为最大值时, 磁通瞬间值正好为零(磁通落后电压 90° 相位角), 变压器不产生励磁涌流。根据网压参数及变压器一次侧线圈匝数、变压器最大剩磁等参数可以计算出过饱和时的最大磁通 $2\psi_m + \psi_r$, 并依据变压器厂家提供的硅钢片磁化特性曲线对应求出变压器的最大励磁涌流。

2 高速动车组高压系统仿真模型的建立及分析

由于高压系统的不易操作性以及主断路器机械动作时间不易准确控制, 所以很难选择一个最佳点对励磁涌流进行实时检测研究, 但利用 Simulink 中的 SimPowerSysms 电力电子模块进行建模仿真分析却很好地解决了上述难题, 并且采用 Simulink 能很好地捕捉瞬态过程和进行动态仿真^[2]。图1是在 Simulink 环境下建立的仿真模型。

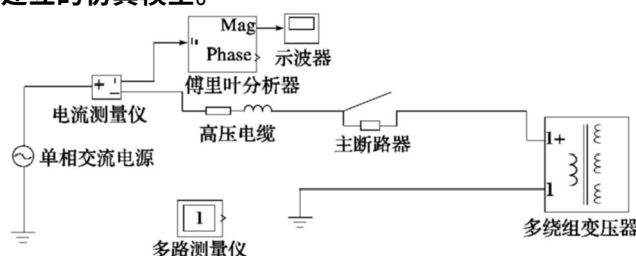


图1 高速动车组高压系统仿真模型

仿真模型有 25 kV、50 Hz 单相交流电源、电流测量仪、傅里叶分析器、示波器、模拟的高压电缆、主断路器、牵引变压器、多路测量仪等组成。牵引变压器模块完全按照 CRH3 高速动车组牵引变压器实际阻抗特性进行设置, 二次侧有 4 个牵引绕组组成, 其参数设置如图2所示。参数设置包括变压器容量、一次侧电压、二次侧电压、线圈电阻、二次侧漏电感、磁化特性等, 根据变压器的磁化特性曲线尽可能多地采集离散点, 填入变压器的饱和特性参数中, 这样仿真结果更接近实际值。

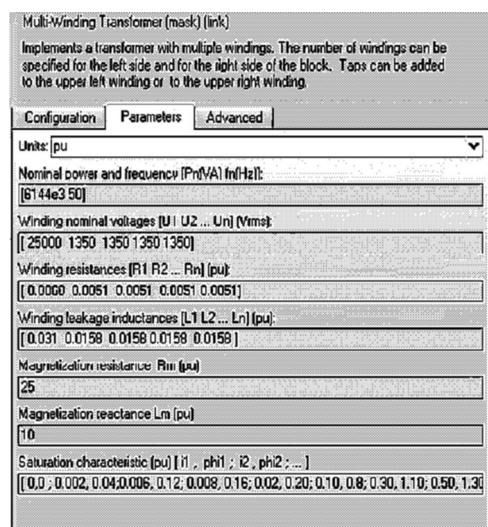


图2 牵引变压器参数设置

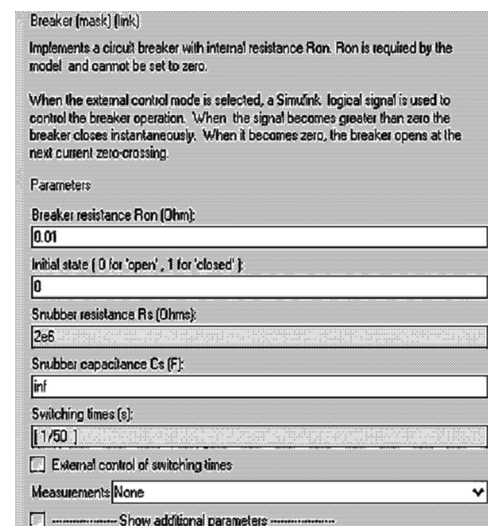


图3 主断路器参数设置

在图3所示的主断路器参数的设置中, 包括通态电阻、初始状态、缓冲电阻、缓冲电容、动作时间等参数的设置, 通过对主断路器模块中的动作时间的设置, 很容易模拟仿真牵引变压器在不同工况下产生的励磁涌流。通过设置 R L 串联模块的参数可以模拟 CRH3 型车高压电缆阻抗特性, 其中电阻值为 $0.6 \text{ m}\Omega$, 电感值为 0.0017 mH 。利用 MATLAB 软件中的傅里叶分析器, 通过简单的参数设定, 可以得到各次谐波的幅值与相位。如上所述, 所有模块都按照 CRH3 型车高压

系统中的参数进行设置,网压为25 kV时,仿真结果如图4、图5、图6所示。

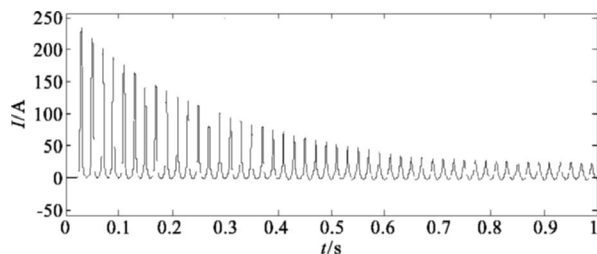


图4 瞬间电压为0时的励磁涌流

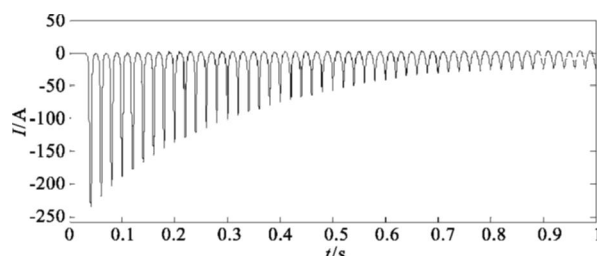


图5 瞬间电压为0时(闭合时间滞后图4半个周期)的励磁涌流

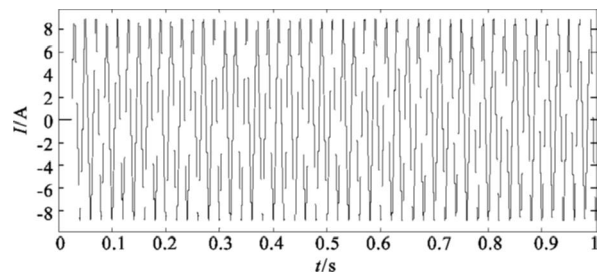


图6 瞬间电压为最大值时的励磁电流

从上面的3个仿真波形图可以看出仿真结果和理论分析是相符的,并且和变压器生产厂家提供的技术资料相吻合。变压器励磁涌流的大小还和电源容量有很大关系,图7是在接触网电压为31 kV时的牵引变压器最大励磁涌流波形。从仿真结果可以看出,接触网电压越大,由变压器产生的励磁涌流也越大,通过这个模型,可以模拟在网压17.5~31 kV范围内最大励磁涌流,为动车组高压系统设计中电流互感器、主断路器等重要设备的选型提供重要的参考数据。

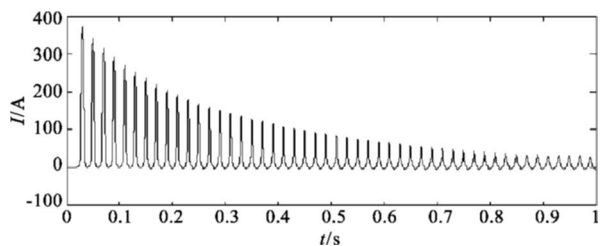


图7 电压为31 kV时的励磁涌流波形

3 牵引变压器励磁涌流傅里叶分析

变压器的励磁涌流中含有大量的谐波及直流分量,它会污染电网,造成变压器差动保护误动作,因此对变压器的励磁涌流进行傅里叶分析有重要的意义。谐波的傅里叶计算非常繁杂,但通过计算机仿真进行

傅里叶分析却简单易行^[3]。利用仿真工具对CRH3型车变压器励磁涌流进行傅里叶分析结果如图8~图11所示。

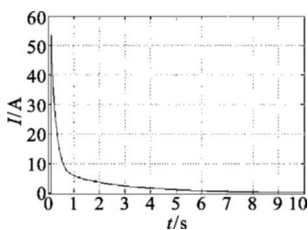


图8 变压器励磁涌流的直流分量

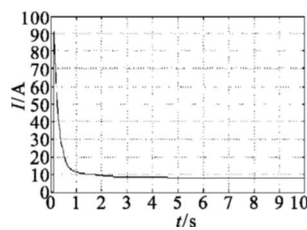


图9 变压器励磁涌流的基波分量

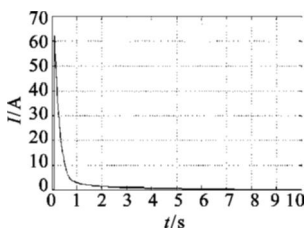


图10 变压器励磁涌流的二次谐波分量

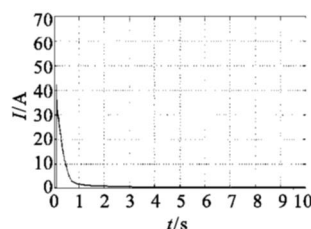


图11 变压器励磁涌流的三次谐波分量

从仿真结果可以看出,大约在0.6 s以后,变压器励磁电流进入稳态。并且可以得出基波电流和二次谐波电流的比值大约为 $K=62/91=0.68$ 。根据变压器差动保护二次谐波制动比常取为0.15~0.2^[4],远远低于仿真得出的数据,证明变压器最大励磁涌流不会引起变压器差动保护,同时也验证了基于二次谐波制动比的变压器差动保护的可行性。通过对励磁涌流的谐波含量的分析,可以判断产生的瞬间大电流是否由变压器的内部故障造成的,这对变压器保护有重要意义。

4 结论

仿真分析结果证明了所建模型是正确的,通过修改模型中的技术参数可以模拟计算CRH3高速动车组牵引变压器在不同运行工况下的励磁涌流及谐波分量,为高速动车组高压系统网侧电流保护系统的设计提供了详实的数据和理论支持,为动车组高压系统主电路的设计及重要部件的选型提供了依据;同时得出的仿真结果有助于寻求避免、抑制主断路器闭合所引起的励磁涌流的方法,起到对牵引变压器的保护作用。

参考文献:

- [1] 陈 瑞. 预充磁在抑制变压器空载合闸励磁涌流中的作用[J]. 船电技术, 2009(1): 13-16.
- [2] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 144-151.
- [3] B K Bose. Power Electronics and AC Drives[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1986: 119-149.
- [4] 郝志国. 变压器励磁涌流鉴别技术的现状和发展[J]. 变压器, 2005(7): 21-23.