

地磁暴对CRH2型动车组车载变压器的影响

地磁暴会在地球表面感应出电动势 (Earth Surface Potentials, ESP), ESP、接触网导线和大地三者构成的回路中就会产生地磁感应电流 (Geomagnetically Induced Current, GIC)。率先提出了地磁暴影响高铁系统的可能性, 并分析GIC侵入CRH2型动车组车载变压器的机理, 根据车载变压器的实际容量计算出变压器具体的尺寸参数。用Ansoft软件仿真了不同数值的GIC对车载变压器励磁电流、铁心磁通、谐波及内部磁场造成的变化, 结果表明GIC流入CRH2型动车组车载变压器中将导致车载变压器异常工作, 影响高铁车辆安全运营。

钱学成¹ 李 扬² 董美玲¹ 尹燕霖³ 张 科⁴/1. 国网江苏省电力公司常州供电公司 2. 国网冀北电力有限公司唐山市曹妃甸区供电分公司 3. 国网山西省电力公司晋城供电公司 4. 国网河南省电力公司新乡供电公司

0 引言

地磁暴是太阳剧烈活动的结果, 地磁暴发生后, 会对地球上的电气及信号系统造成影响^[1]。文献[2]报道了美国1921年5月铁路系统遭受地磁暴侵害事件; 1982年7月强地磁暴期间, 瑞典电气化铁路工作异常, 信号灯“闪红”, 排查故障造成该条电气化铁路停运11 h, 最后相关专家指出故障的原因是由于地磁感应电流造成信号机误动作^[3]; 我国对地磁暴影响动车组车载变压器的认知有限, 相关报道和研究尚属空白。但地磁暴对国内电力系统长距离输电线路、输油管道的的影响早已进行实测和探讨。因为高铁接触网导线距离很长, 并同样作为一段长导体暴露在野外, 类比于输电线路和石油管道等长导体, 推断出地磁暴也可能对高铁接触网造成影响, 并引

发GIC侵入动车组车载变压器中, 所以有必要预先对此影响展开研究。

本文模拟GIC对高铁动车组车载变压器电磁特性造成的不良影响。20 A的GIC侵入车载变压器中, 能够使车载变压器励磁电流幅值增加, 波形畸变, 且谐波畸变率可达到85.1%, 还能引发变压器铁心饱和, 使内部磁感应强度达到2 T。

1 GIC侵入车载变压器的机理

太阳风暴引起地磁场剧烈扰动, 在不同的地理位置产生的电位和电场不同。我国高铁营运大多采用AT供电方式, 在这种供电方式下, 牵引供电所的牵引绕组与自耦变压器的中性点均需与大地连接, 地磁暴发生时, 两接地点之间会感应出ESP, ESP、接触网导线和大地三者构成回路, 在接触网中就会存在流通的GIC, 如图1所示。高速列车通过受电弓滑板与接触网的滑动接触来获取电能, 从而GIC经过动车组受电弓侵入了车载变压器。GIC的频率在0.001~0.1 Hz之间, 为准直流^[4]。

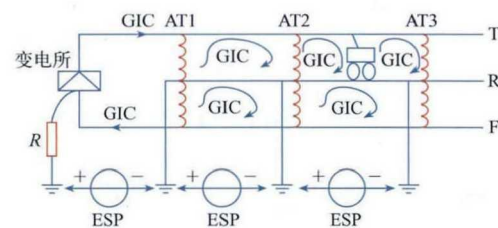


图1 接触网中的GIC流通

2 CRH2型动车组车载变压器的模型建立

目前CRH2型动车组在我国高铁车



钱学成/助理工程师

关键词/Keywords

地磁暴·
车载变压器·
动车组·
电磁特性·

国家自然科学基金项目：地磁暴侵害高铁电气系统的电路模型与算法（41374189）。

型中得到广泛运用,车载变压器用于牵引机车。车载变压器的实际容量参数取自文献[5],容量 $P=3\,060\text{ kV}\cdot\text{A}$;高压侧电压 $U_1=25\text{ kV}$,额定电流 122 A ;低压侧电压 $U_2=1\,500\text{ V}$,额定电流 857 A ;辅助绕组侧电压 $U_3=400\text{ V}$,额定容量 $490\text{ kV}\cdot\text{A}$ 。

2.1 铁心尺寸的确定

由于车载变压器为壳式结构,根据变压器额定容量 $P=3\,060\text{ kV}\cdot\text{A}$,则其中心柱截面积可利用经验公式简化计算为^[6]: $S=\sqrt{P}=\sqrt{3\,060\,000}\text{ cm}^2=1\,749\text{ cm}^2$,取心柱长宽比为 $a:b=5:3$,得到长 $a=50\text{ cm}$ 、宽 $b=34\text{ cm}$,硅钢片叠压系数为0.95,建模时叠压系数取值为1,等效宽度 $b=32\text{ cm}$ 。计算有效铁心截面积 $S_1=ab=1\,600\text{ cm}^2$,旁柱铁心长 $a_1=a/2=25\text{ cm}$,宽度 $b_1=b=32\text{ cm}$,上下铁轭宽度 $a_2=a=25\text{ cm}$,设计好的铁心尺寸如图2所示。

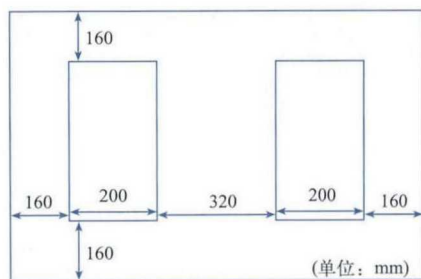


图2 变压器铁心铁轭尺寸

铁心窗口计算宽度为 $e=200\text{ mm}$;高度为 $f=430\text{ mm}$ 。

2.2 线圈匝数的确定

根据电磁感应原理,感应电动势的有效值与主磁通幅值 Φ_m 之间的大小关系: $U=2\pi f N \Phi_m / \sqrt{2}=4.44 f N \Phi_m$,其中, f 为频率,取为 50 Hz ; N 为线圈匝数。

设计铁心磁通密度为 $B=1.6\text{ T}$,铁心磁通为 $\Phi=BS=1.6\times 1\,600\times 10^{-4}=0.256\text{ wb}$;计算高压侧绕组匝数为 $N_1=E/(4.44f\Phi)=25\,000\times \sqrt{2}/(4.44\times 50\times 0.256)=622$,取整 $N_1=600$;低压侧绕组匝数为 $N_2=U_2/U_1\times 600=36$;辅助绕组匝数为 $N_3=U_3/U_1\times 600=9.6$,取整 $N_3=10$ 。

建立好后的CRH2型动车组车载变压器模型如图3所示。

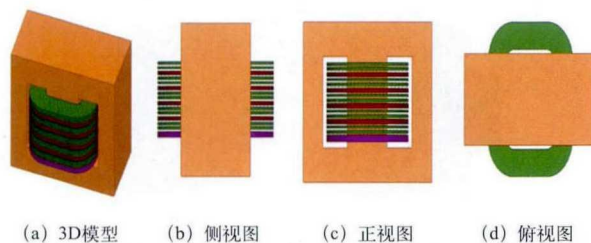


图3 CRH2型动车组车载变压器3D模型及其三视图

3 基于Ansoft软件的车载变压器直流偏磁特性仿真

3.1 直流偏磁下的励磁电流和铁心磁通

对车载变压器进行外电路加载,如图4所示。图中,LPhase_HV为车载变压器的高压绕组;Lphase_LV1和Lphase_LV2为车载变压器的低压绕组,通过改变电阻 R_{10} 和 R_{12} 的大小可以实现对变压器的空载仿真、负载仿真和短路仿真。

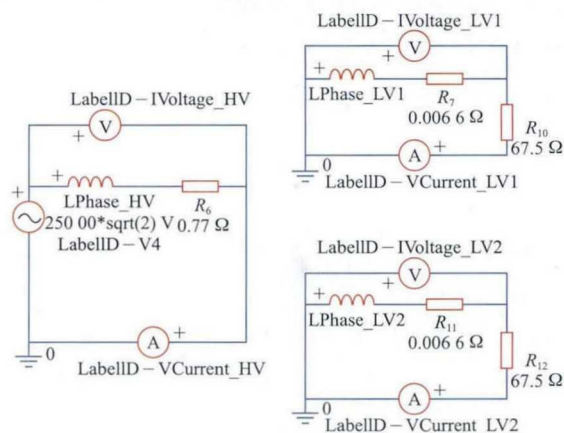


图4 有限元模型的外电路

本文采用两套偶对称边界,使全模型的车载变压器变成1/4模型,理论上求解量可以降低为全模型的1/4,求解时间提高4倍。图5为1/4有限元模型的网格剖分图。

图6为车载变压器的高压侧电压及低压侧电压波形。仿真结果显示:高压侧电压幅值为 35.5 kV ,低压侧电压幅值为 2.12 kV ,与实际变压器相符,从而验证了仿真模型的正确性。

文献[7]指出:在铁路系统中产生的GIC大小可能达到几安培甚至十几安培,因此在高压侧分别

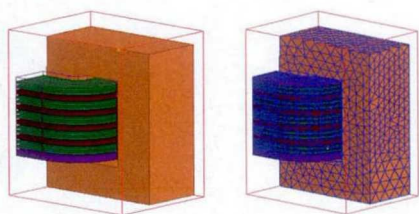


图5 CRH2车载变压器1/4有限元模型及其网格剖分

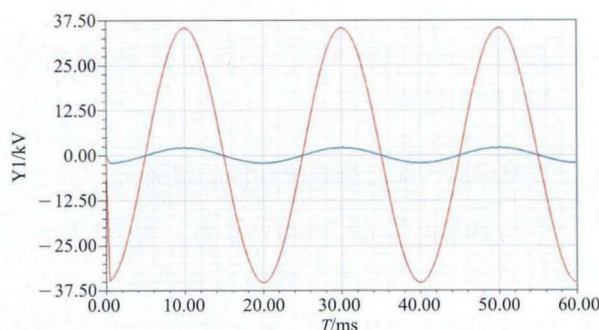


图6 变压器高、低压侧电压波形

通入0、0.5 A、1 A、5 A、10 A和20 A的直流电流来分析不同数值的GIC对车载变压器励磁电流和铁心磁通的影响,波形分布如图7、图8所示,通入的GIC越大,对应的曲线幅值也越大。

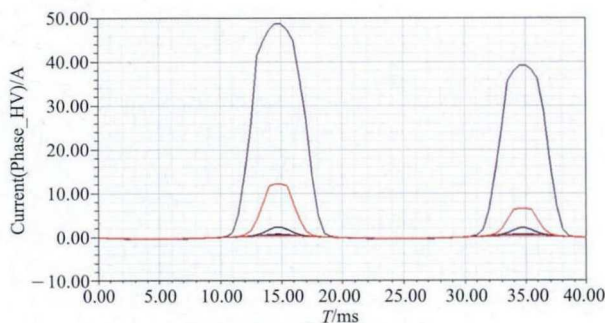


图7 励磁电流波形

由图7可知:车载变压器直流偏磁程度随着通入GIC的增加而增加,变压器励磁电流逐渐向正方向偏移,并且出现尖顶波,当直流量GIC达到20 A时,波形畸变已经非常严重,正峰值已经大于40 A,将导致车载变压器异常工作。

图8中铁心磁通的变化与励磁电流类似,铁心磁通随着通入直流量GIC的增加开始逐渐向正方向偏移,当直流量达到20 A时,铁心磁通的偏移比较明显,磁通的最大值接近200 Wb,此时铁心达到磁饱和。

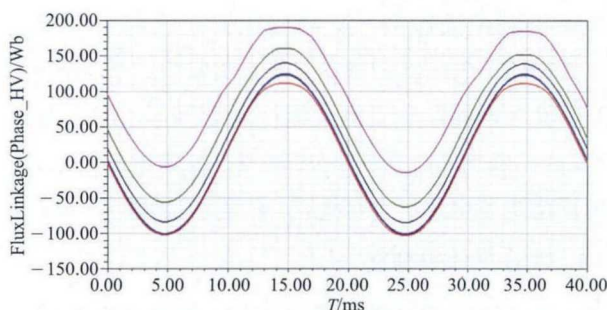
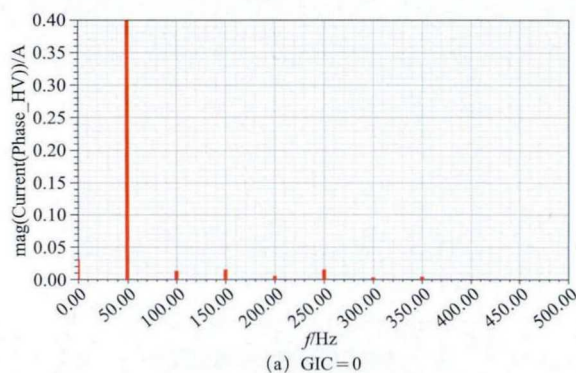
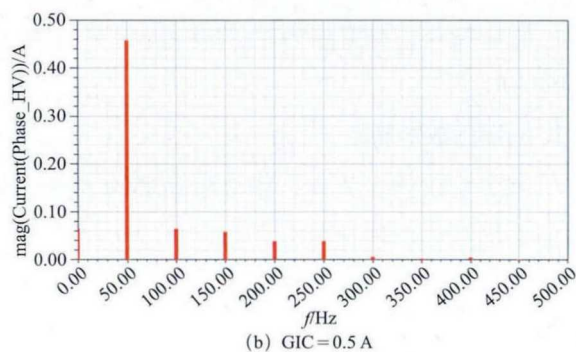
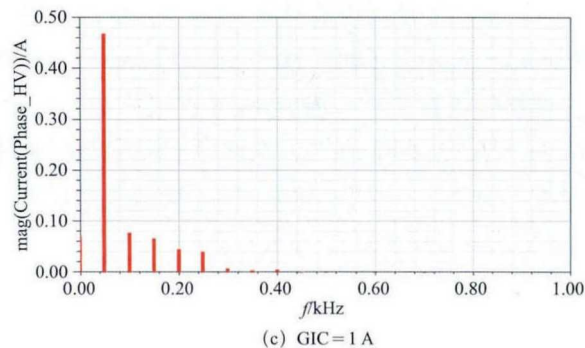


图8 铁心磁通波形

3.2 直流偏磁下的谐波分析

在车载变压器中分别通入0、0.5 A、1 A、5 A、10 A和20 A的GIC后,励磁电流谐波分布如图9所示。

由图9可知,无GIC时,车载变压器励磁电流各次谐波含量较少,主要由50 Hz基波构成,各次



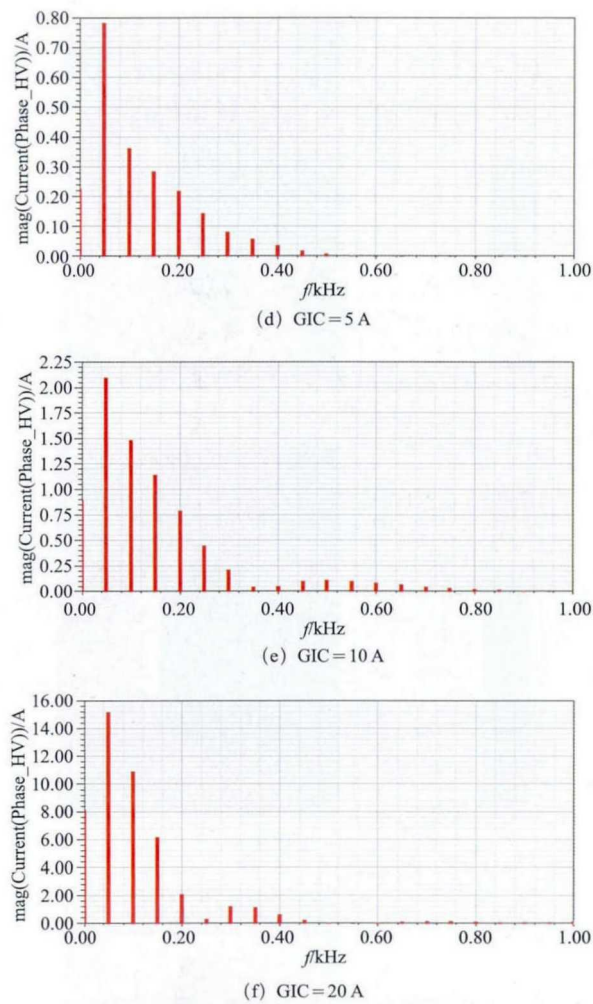


图9 不同数值的GIC对应的励磁电流谐波分布

谐波幅值很小，几乎不存在高次谐波。随着通入GIC的不断增加，励磁电流的各次谐波含量也相应增加。且GIC越大，谐波含量越高，谐波次数越多，相同谐波次数下对应的励磁电流幅值也越大。当GIC达到10 A时，仅二次谐波幅值就达到了1.5 A，接近于基波幅值2.1 A，并且已经有大量高次谐波存在。通入不同数值的GIC后的谐波含量幅值如表1所示。

表1 通入不同数值的GIC后，励磁电流各次谐波含量幅值
(单位：A)

谐波次数	GIC=0	GIC=0.5 A	GIC=1 A	GIC=5 A	GIC=10 A	GIC=20 A
1	0.399	0.458	0.468	0.782	2.095	15.149
2	0.015	0.066	0.078	0.364	1.482	10.926
3	0.017	0.060	0.067	0.285	1.146	6.207
4	0.007	0.040	0.046	0.220	0.791	2.136

(续)

谐波次数	GIC=0	GIC=0.5 A	GIC=1 A	GIC=5 A	GIC=10 A	GIC=20 A
5	0.017	0.039	0.041	0.145	0.454	0.369
6	0.004	0.007	0.008	0.083	0.216	1.284
7	0.006	0.004	0.005	0.059	0.053	1.177
8	0.001	0.006	0.007	0.037	0.055	0.686
9	0.001	0.003	0.003	0.020	0.106	0.271
10	0.001	0.001	0.001	0.010	0.118	0.070
11	0.001	0.001	0.000	0.004	0.107	0.024
12	0.001	0.001	0.001	0.002	0.089	0.079

由表1可以看出，励磁电流中不仅含有奇次谐波还含有偶次谐波，在无GIC时，谐波次数较少，且含量很低，但是随着GIC的增加，谐波的次数和谐波含量均不断增大，将含直流量的励磁电流波形进行傅里叶分解，就能够得到其谐波畸变率

($THD = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2} / I_1$)，从而得到励磁电流在通入

不同数值GIC后的谐波畸变率，如表2所示。

表2 通入不同数值的GIC后，励磁电流的谐波畸变率

谐波次数	谐波畸变率 (%)
GIC=0	0.075
GIC=0.5 A	0.23
GIC=1 A	0.257
GIC=5 A	0.695
GIC=10 A	0.756
GIC=20 A	0.851

从表2可以看出，励磁电流的谐波畸变率随着直流偏磁程度的增加而增加，当GIC为20 A时，励磁电流的谐波畸变率已经达到了85.1%，此时在直流量的作用下，铁心已经过度磁饱和。

运行于谐波环境下的车载变压器会受到如下损害：

- 1) 绕组损耗（铜损耗）增加，当高、低压侧电流中含有高次谐波时，绕组材料发热严重，造成损耗增加，加重绝缘的负担，损耗使车载变压器发热严重。
- 2) 铁心损耗增加，铁心损耗主要是由磁滞损耗和涡流损耗构成，而这些损耗会随着变压器频率的增加而增加。

3.3 车载变压器在直流偏磁下的内部磁场分析

在CRH2型动车组车载变压器中分别通入0、0.5 A、1 A、5 A、10 A和20 A的直流电流，内部1/4铁心磁感应强度分布如图10所示。

由图10可以看出，随着GIC的增加，变压器铁心的磁感应强度不断增大。一开始无GIC时，变压器的磁感应强度最大值为1.372 1 T，此时的变压器铁心工作在线性段，磁感应强度没有超过磁饱和

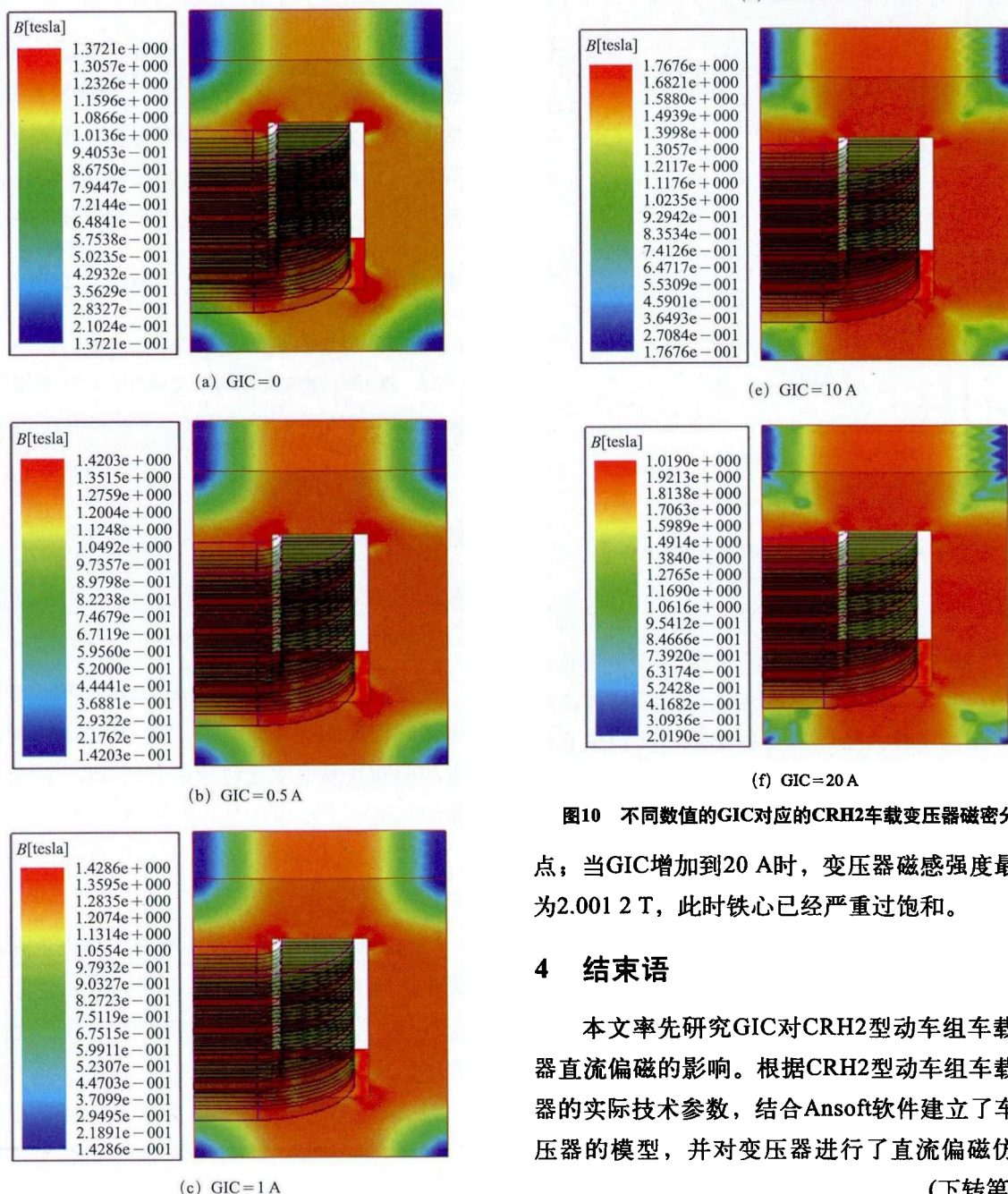


图10 不同数值的GIC对应的CRH2车载变压器磁密分布

点；当GIC增加到20 A时，变压器磁感强度最大值为2.001 2 T，此时铁心已经严重过饱和。

4 结束语

本文率先研究GIC对CRH2型动车组车载变压器直流偏磁的影响。根据CRH2型动车组车载变压器的实际技术参数，结合Ansoft软件建立了车载变压器的模型，并对变压器进行了直流偏磁仿真，

(下转第33页)

此基础上,研制了一种具有实时快速切换模式的电源快速切换装置,该方案引入实时快速切换模式,可增加快速切换区域的切换成功率,并引入故障识别和电动机启动识别的闭锁逻辑,可在母线内部故障和母线上有电动机启动时防止快速切换装置误动作。实践证明,该装置在现场运行效果良好,同时验证了方案的有效性。

参考文献

- [1] 苗世华,李杰,宗洪良.工业企业电源快速切换装置在低压母线的应用[J].电力系统保护与控制,2011,39(6):76-79.
- [2] 马小兰,李杰,苗世华,等.新型电源快速切换装置在工业企业变电站的应用[J].电力自动化设备,2011,31(4):139-142.
- [3] 党杰,刘涤尘,叶念国.发电厂厂用电源切换技术研究[J].电力自动化设备,2005,25(6):89-90.
- [4] 梁俊涛,陈曙玲.厂矿企业电源无扰动切换方案

的探讨[C].第十届全国石油和化学工业电气技术年会,昆明,2009:43-47.

- [5] 李建河,叶鹏珍,汪广玲,等.电泵联锁启动过程中快切动作分析及处理[J].黑龙江电力,2014,36(6):557-564.
- [6] 邓敏.电机启动导致主变差动保护误动分析[J].机械与电子,2013(17):138.
- [7] 秦雷鸣,曹祯,高迪军,等.新型电源快速切换方法的研究与实现[J].电气技术,2012(6):16-20.
- [8] 司小庆,王徐延,叶婷,等.大容量电机启动方式对电网的影响[J].电力建设,2014,35(7):121-124.
- [9] 刘蒙聪,杨琦,和立辉,等.马达负荷模型与快切装置关联性分析[J].陕西电力,2012,40(10):01-06.
- [10] 许俊巧,邹圣权.电机启动对厂用电系统电压的影响分析[J].湖北电力,2005,29(5):22-23.

(收稿日期:2017-02-10) EA

(上接第24页)

结果表明:直流偏磁下,励磁电流波形呈现正负半波不对称的形状,励磁电流幅值随着通入GIC的增加而增加;铁心磁通波形也随着直流流量的增加向坐标轴正半轴方向偏移,且随着GIC的增加,励磁电流的各次谐波畸变率随之增加,变压器铁心的磁感应强度增大,铁心出现过饱和的情况,车载变压器将异常工作。

参考文献

- [1] 刘连光,等.中国广东电网的几次强磁暴影响事件[J].地球物理学报,2008,51(4):976-981.
- [2] Ptitsyna N G, Kasinskii V V, Villoresi G, et al. Geomagnetic effects on mid-latitude railways: a statistical study of anomalies in the operation of signaling and train control equipment on the east-

siberian railway[J]. MedSci Entry for Advances in Space Research, 2008, 42(9):1510-1514.

- [3] Wik M, Pirjola R, Lundstedt H, et al. Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on swedish technical systems[J]. MedSci Entry for Annals of Geophysics, 2009, 43(6):1775-1787.
- [4] 钱学成,等.地磁暴对轨道电路电磁干扰的机理分析[J].铁道学报,2015,37(5):42-46.
- [5] 张曙光.CRH2型动车组[M].北京:中国铁道出版社,2008:167-172.
- [6] 路长柏,等.电力变压器计算[M].哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1986:18-58.
- [7] 范婷霞.强磁暴对轨道电路的影响分析[J].铁道通信信号,2012,48(7):6-7.

(收稿日期:2017-05-15) EA