

动车组不分闸过分相时牵引变压器差动保护误动分析

许 龙,崔艳龙,魏建忠,高仕斌,韩正庆

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:我国高速铁路动车组在通过电分相时采用地面开关式自动过分相方式。以往的试验统计数据显示,在机车通过电分相时,由于地面开关的切换将产生高达负荷电流 6 倍的冲击电流。对机车不分闸过分相时冲击电流的产生机理进行了理论分析,指出机车主变压器励磁涌流与负荷电流的叠加是造成冲击电流产生的原因。通过 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型,仿真结果验证了理论分析的正确性。结合仿真试验对牵引变压器差动保护误动原因进行了分析,发现牵引变压器电流互感器饱和是造成的差动保护二次谐波制动失效的原因。

关键词:高速铁路;冲击电流;牵引;变压器;差动保护

中图分类号: TM 922.73

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.019

0 引言

在牵引供电系统中,为使电力系统三相负荷对称,各变电所之间采用相序轮换的方式供电。为保证变电所之间的电气隔离,一般每隔 20~30 km,在牵引变电所处和两变电所之间装设电分相装置^[1]。如果采用普速铁路的方式通过电分相,动车组每次通过电分相时需要将主断路器分闸一段时间,以断开与牵引网的电连接,防止产生异相短路故障^[2]。这会使动车组在通过电分相时短时失去动力,不利于高速行驶。因此,随着列车速度的大幅提高,高速铁路将全面采用地面开关自动切换方式^[3],动车组将不分闸通过电分相。动车组在运行过程中,频繁地通过牵引供电接触网各个供电段之间的电分相装置,地面配合开关相应地频繁切换,这个过程中接触网-动车组-电分相系统的电气参数不断地改变,电力机车、牵引供电接触网和电分相系统的状态持续变化,必然产生电压、电流等电磁参量变化复杂的电气过程^[4],可能会引起牵引变电所保护不正确动作,这些问题将给动车组的正常运行和运营部门的工作造成巨大的困难,严重地影响到电气化铁路的安全运营。本文深入分析动车组不分闸通过电分相时冲击电流的产生原理,并研究此种情况下牵引变压器差动保护误动原因。

1 动车组不分闸过分相过程

地面开关式自动过分相方案以日本新干线为代表,采用关节式电分相装置,最大限度地减少了硬点以改善受电弓受流质量,断电时间通常在 0.15~0.3 s 之间^[5],速度损失很小,其工作原理如图 1 所示。

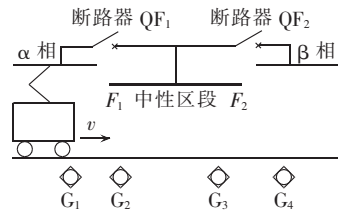


图 1 地面开关式自动过分相原理图

Fig.1 Schematic diagram of automatic phase-separation passing mode with switches on ground

当区段无机车通过时,断路器 QF_1 闭合, QF_2 断开;当机车驶向中性段,感应器 G_1 感应到机车位置,此时中性段由 α 相供电;当机车到达 G_2 但未达到 G_3 时,断路器 QF_1 断开,此时 QF_2 仍处于断开状态;当机车到达 G_3 时,断路器 QF_2 闭合,此时中性段由 β 相供电;当感应器 G_4 感应到机车时,断路器 QF_1 闭合, QF_2 断开,恢复至无机车通过时的状态。

2 冲击电流产生原理分析

由上述分析,当机车行至 G_2 时断路器 QF_1 断开,在到达 G_3 之前断路器 QF_2 也处于断开状态,此时中性区段应处于无电状态。但对于高速动车组,当 QF_1 断开时其机车主变压器低压侧与其牵引逆变器和异步电机仍形成闭合回路,异步电机仍有转速,部分异步电机处于发电状态^[6],将电机绕组电压耦合至机车主变压器高压侧,表现为中性段残压。当机车到达 G_3 时,由于残压的存在使得机车主变压器铁芯含有剩磁。由于高速动车组通过电分相的时间较短,约为 0.15~0.25 s,并且高速铁路采用 220 kV 以上的外部电源,其时间常数较普速铁路明显变大,因此为方便分析,在机车到达 G_3 时可将中性段残压视为幅值和频率都不变的量。设残压 $u_z = U_m \sin(\omega_z t + \theta)$,由电压和磁通的关系式 $u = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$,可得在中性段时机车主变磁通为:

收稿日期:2012-03-13;修回日期:2013-02-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50907055);四川省科技支撑计划(2011GZ0079)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50907055) and Science and Technology Support Program of Sichuan Province(2011GZ0079)

$$\Phi_z = -\frac{U_m}{N_1 \omega_z} \cos(\omega_z t + \theta) + C_z \quad (1)$$

其中, C_z 为衰减的非周期分量, 若不考虑损耗, 则为直流分量; N_1 为主变压器高压侧绕组匝数。

当机车行驶至 G_3 、断路器 QF_2 合闸时, 令 β 相电源电压 $u_\beta = U_m \sin(\omega t + \theta)$, 同样利用电压和磁通关系式可得此时机车主变磁通:

$$\Phi_1 = -\frac{U_m}{N_1 \omega} \cos(\omega t + \varphi) + C_1 \quad (2)$$

设 QF_1 在 $t=0$ 时刻合闸, 根据磁通不能突变原理, 此时 $\Phi_1 = \Phi_z$, 即:

$$-\frac{U_m}{N_1 \omega} \cos \varphi + C_1 = -\frac{U_m}{N_1 \omega_z} \cos \theta + C_z \quad (3)$$

由式(3)可得:

$$C_1 = -\frac{U_m}{N_1 \omega_z} \cos \theta + \frac{U_m}{N_1 \omega} \cos \varphi + C_z \quad (4)$$

将式(4)代入式(2), 可得:

$$\Phi_1 = -\frac{U_m}{N_1 \omega} \cos(\omega t + \varphi) - \frac{U_m}{N_1 \omega_z} \cos \theta + \frac{U_m}{N_1 \omega} \cos \varphi + C_z \quad (5)$$

由式(5)不难看出, 当断路器 QF_2 合闸时, 机车主变磁通主要由两部分构成, 即稳态磁通和直流分量产生的磁通。并且在实际过程中中性段残压为随时间衰减的分量, 因此, 机车主变磁通可由下式表示:

$$\Phi_1 = \Phi_s + \Phi_d + \Phi_{dh} \quad (6)$$

其中, Φ_s 为稳态磁通, Φ_d 为稳态直流磁通, Φ_{dh} 为衰减的直流磁通。

通过上述的推导过程可知, 若考虑最坏情况, 即当合闸相位角 $\omega t + \varphi = \varphi + 2kT$ (T 为机车主变励磁涌流基波分量周期, 工频条件下为 20 ms) 时, 机车主变磁通将达到最大值 $2\Phi_s + \Phi_{dh}$, 将远超过主变饱和磁通 Φ_{sat} , 其铁芯将高度饱和, 由图 2 变压器近似磁化曲线可知, 励磁涌流 i_μ 会大幅增加^[7-8]。根据现场录波数据, 产生的励磁涌流和线路的负荷电流叠加后, 机车主变合闸侧涌流可达到额定电流的 4~6 倍。

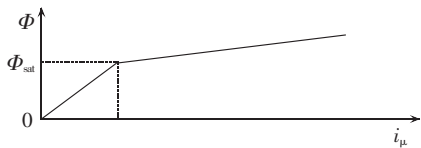


图 2 变压器近似磁化曲线

Fig.2 Approximate magnetization curve of transformer

3 仿真分析

通过 MATLAB/Simulink 建立模型对上述理论分析进行仿真。仿真牵引变压器容量为 40 MV·A, 变比为 220 kV/27.5 kV, 电分相两侧供电臂长度为 25 km, 等效单位阻抗为 $0.11 + j0.3 \Omega/\text{km}$, 中性段等效阻抗为 $0.0755 + j0.223 \Omega/\text{km}$, 动车组机车主变压器容量

为 5 MV·A, 变比为 27.5 kV/1.5 kV。当机车行驶至 G_3 、断路器 QF_2 闭合时, 机车主变压器励磁涌流波形如图 3 所示, 机车主变压器合闸侧电流波形见图 4。

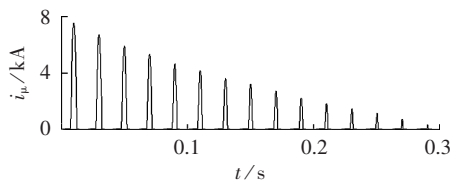


图 3 主变压器励磁涌流

Fig.3 Excitation inrush of main transformer

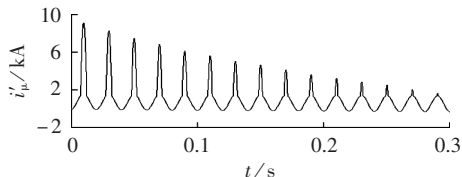


图 4 主变压器合闸侧涌流

Fig.4 Inrush at closing side of main transformer

通过以上的仿真结果可以看出, 在断路器 QF_2 合闸后, 在中性段残压和合闸过电压的共同激励下, 动车组机车主变压器铁芯磁链被迅速抬高到饱和点之上, 产生幅值很高的励磁涌流, 其波形与变压器空载合闸时类似, 存在明显的间断角。但由于机车变压器负荷侧与牵引逆变器和异步电机形成闭合回路, 合闸侧涌流为励磁涌流与负荷侧电流的叠加, 因此合闸侧涌流不存在明显的间断角, 但由于非周期分量的存在, 波形发生明显的畸变。

4 牵引变压器差动保护误动分析

目前我国新建的高速铁路或者由原有电气化铁路改造的高速铁路所用牵引变压器主保护大部分采用差动保护^[7]。当动车组不分闸过分相时, 对于机车主变压器而言, 当断路器 QF_2 闭合时相当于一次变压器的有载合闸, 由前述理论和仿真分析可知, 在其合闸侧可能会产生幅值较高且波形严重畸变的冲击电流, 并且会直接注入 β 相牵引变压器的低压侧。由于冲击电流幅值大且由非周期分量引起的波形畸变较大, 会造成牵引变压器低压侧电流互感器(TA)铁芯暂态饱和^[10-13], 二次电流波形和数值严重失真, 不能准确反映一次电流波形, 直至退出饱和; 而由于牵引变压器对稳态周期分量和非周期分量传变特性的不同, 两侧非周期分量呈现较大差别, 牵引变压器高压侧电流波形非周期含量要远低于低压侧电流, 高压侧 TA 二次电流不会有太大失真。此时由低压侧 TA 暂态饱和引起的不平衡电流较大, 可能大于差动保护动作值。

采用 PSCAD 现有的 TA 模型进行仿真分析, TA 参数设为: 低压侧 TA 变比 $k=2000 \text{ A}/5 \text{ A}$, $l=0.5 \text{ m}$,

$S=51.2\text{ cm}^2$, $R=0.13\ \Omega$; 高压侧 TA 变比 $k=250\text{ A}/5\text{ A}$, $l=0.7\text{ m}$, $S=23.2\text{ cm}^2$, $R=0.06\ \Omega$ 。其中, l 为 TA 铁芯长度, S 为 TA 铁芯截面积, R 为 TA 二次侧等效电阻。励磁支路饱和和倍数均为 $\psi_s/\psi_m=1.2$ 。将上述机车主变合闸侧涌流作为 TA 的一次电流导入, TA 二次电流仿真结果如图 5 所示。

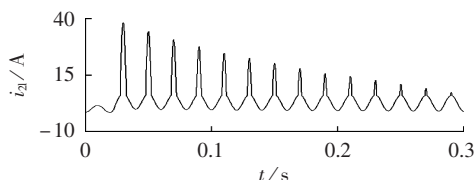


图 5 牵引变压器低压侧 TA 二次侧电流

Fig.5 Secondary current of traction transformer CT at low-voltage side

由图 5 可以看出,在动车过分相合闸瞬间,由于 TA 铁芯磁通不会突变,因此在合闸后的前一个周期内 TA 二次电流未出现明显失真;随着 TA 铁芯在非周期分量作用下出现饱和,从第 2 个周期开始二次电流出现了严重的波形畸变。

牵引变压器高压侧电流非周期分量所占比例很少,波形几乎不发生畸变,其周期分量几乎等于高压侧 TA 额定值,因此高压侧 TA 能够线性传变,二次电流值可以反映一次电流大小,波形几乎不出现畸变,如图 6 所示。

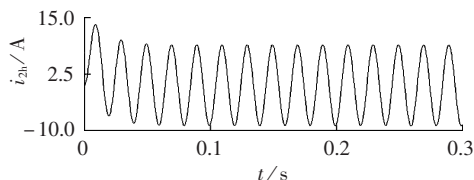


图 6 牵引变压器高压侧 TA 二次侧电流

Fig.6 Secondary current of traction transformer CT at high-voltage side

差动电流为牵引变压器低压侧和高压侧 TA 二次侧电流的合成,流入差动继电器的差动电流波形如图 7 所示。由于牵引变压器低压侧 TA 二次电流产生严重畸变,由图 7 可以看出,在合成差动电流时,该特征也体现得比较明显;一段时间后随着非周期分量的明显衰减,差流畸变情况明显降低,波形开始规整。

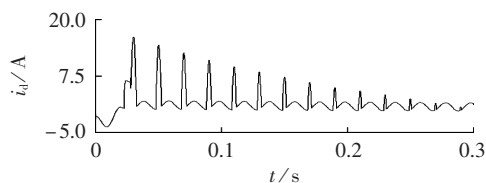


图 7 差动电流波形

Fig.7 Waveform of differential current

差动电流基波幅值波形如图 8 所示。由于非周期分量造成低压侧电流畸变,产生较大的不平衡电

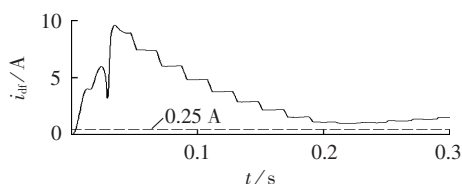


图 8 差动电流基波幅值波形

Fig.8 Fundamental amplitude waveform of differential current

流,由图 8 可以发现,此时差动电流基波幅值大于差动保护启动整定值 0.25 A 。为避免外部不平衡电流导致的差动保护误动,常规差动保护均采用 2 次谐波闭锁来防止不平衡电流引起的保护误动,2 次谐波制动比整定范围为 $15\%\sim 20\%$ [15-16]。利用傅里叶变换进一步分析差动电流 2 次谐波幅值所占百分比,结果如图 9 所示。

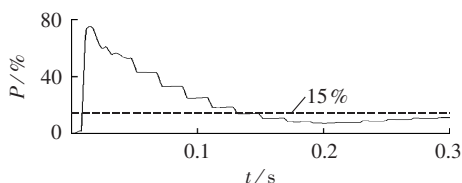


图 9 差动电流中 2 次谐波幅值所占百分比

Fig.9 Percentage of second harmonic amplitude in differential current

从图 9 可以看出,由于不分闸过分相情况下在牵引变压器低压侧产生的涌流中含有所占比重可观的机车主变负荷侧电流分量,造成差动电流 2 次谐波含量小于制动整定值 15% ,无法实现可靠闭锁。目前高速铁路牵引变压器差动保护普遍采用“三折线”比率制动特性 [17-18],以武广线某牵引变电所为例,其最小动作电流 $I_{\text{set.min}}=0.25\text{ A}$,拐点制动电流 $I_{\text{rs.g1}}=0.57\text{ A}$, $I_{\text{rs.g2}}=1.70\text{ A}$,比率制动系数 $K_1=0.4$, $K_2=0.6$,则机车过分相时比率差动判据的动作轨迹见图 10。

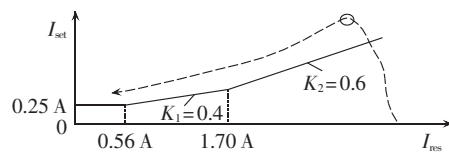


图 10 比率制动差动保护动作轨迹

Fig.10 Operating trace of ratio braking differential protection

由图 10 可见,在 S_2 合闸初期(图中圆圈所示),虽然差动电流位于比率制动特性曲线上方动作区,但由于此时 2 次谐波含量较高,可以实现可靠闭锁;随着非周期分量的衰减,2 次谐波含量小于整定值,而差动电流值仍满足差动保护动作条件,仍处于比率制动曲线的动作区,此时可能造成差动保护误动(虚线左端箭头处)。

5 结论

为适应高速行驶的需要,在通过电分相时高速

铁路全面采用地面开关式自动过分相方式。随着机车通过电分相,地面开关配合自动切换,通过本文的分析可知,在这个过程中由于机车主变压器进行了一次有载合闸,其合闸侧即牵引变压器低压侧可能会出现幅值较高的冲击电流。由于此冲击电流含有大量的非周期分量,牵引变压器低压侧 TA 出现暂态饱和,造成流过差动继电器的不平衡电流大于整定动作值;同时冲击电流中除了机车主变压器产生的励磁电流外,还含有比重较大的机车负荷电流,这样使得差动电流中的 2 次谐波含量低于其整定值,无法有效制动,差动电流位于比率制动曲线的动作区,差动保护误动,无法保证差动保护动作的可靠性。因此,在对高速铁路牵引变压器进行保护配置时,要对机车过分相时冲击电流造成的差动保护误动采取有效防范措施,提高差动保护的灵敏性和可靠性。

参考文献:

- [1] 陈小川. 铁路供电继电保护与自动化[M]. 北京:中国铁道出版社,2010:103-112.
- [2] 高仕斌,王毅非,张劲. 牵引变电所异相短路故障及常规馈线保护动作行为分析[J]. 铁道学报,2000,22(4):24-27.
GAO Shibin,WANG Yifei,ZHANG Jin. Analysis on fault and operating features of feeder protection against wrong-phase short circuit for AC traction substation[J]. Journal of the China Railway Society,2000,22(4):24-27.
- [3] 李官军,冯晓云,王利军,等. 高速动车组自动过分相控制策略研究与仿真[J]. 电工技术学报,2007,22(7):181-185.
LI Guanjun,FENG Xiaoyun,WANG Lijun,et al. Research and simulation on auto-passing separation control strategy of high-speed EMU[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(7):181-185.
- [4] 庄秋月,刘明光,李凡红,等. 基于 ATPDraw 的高铁线路合闸过电压研究[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):80-82.
ZHUANG Qiuyue,LIU Mingguang,LI Fanhong,et al. Study of closing over-voltage based on ATPDraw for high-speed railway line[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):80-82.
- [5] 孙万启,单圣熊,郑国藩. 国内外自动过分相装置的比较[J]. 电气化铁道,2002(2):12-16.
SUN Wanqi,SHAN Shengxiong,ZHENG Guofan. Comparison between home and aboard of automatic passing over of neutral section device[J]. Electric Railway,2002(2):12-16.
- [6] YANG Shaobing,HUANG Mei,WU Mingli. High speed EMU modeling based on the measured data[J]. Sustainable Power Generation and Supply,2009,12(4):1-4.
- [7] 王维俭,侯炳堃. 大型机组继电保护理论基础[M]. 北京:中国电力出版社,1989:134,176.
- [8] SIDHU T S,SACHDEV M S. Online identification of magnetizing inrush and internal faults in three phase transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1992,7(4):1885-1891.
- [9] 熊媛,高仕斌. 牵引变压器空投时差动保护误动分析及改进[J]. 电力自动化设备,2000,20(6):17-19.
- XIONG Yuan,GAO Shibin. Analysis on the malfunction of differential protection for traction transformer and its improvement[J]. Electric Power Automation Equipment,2000,20(6):17-19.
- [10] 翁汉刚,林湘宁,刘沛. 变压器有载合闸时纵联差动保护误动的分析[J]. 中国电机工程学报,2006,26(20):27-32.
WENG Hanli,LIN Xiangning,LIU Pei. A novel explanation to the mal-operation of differential protection during the loaded transformer energization[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(20):27-32.
- [11] 李瑞生,路光辉,王强. 用于线路差动保护的电流互感器饱和判据[J]. 电力自动化设备,2004,24(4):70-73.
LI Ruisheng,LU Guanghui,WANG Qiang. Transformer saturation criterion for line differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(4):70-73.
- [14] 符杨,蓝之达,陈巧. 电流互感器暂态时域仿真[J]. 电力系统自动化,1995,19(3):25-31.
FU Yang,LAN Zhida,CHEN Qiao. Simulation of transient in current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems,1995,19(3):25-31.
- [15] 陈易,金军. 关于差动保护二次谐波制动比测量过程的探讨[J]. 继电器,2000,28(11):58-59.
CHEN Yi,JIN Jun. Discussion of the testing process on the second harmonic restraint of differential protection[J]. Relay,2000,28(11):58-59.
- [16] 孙向飞,束洪春,于继来. 变压器并联与串联和应涌流对差动保护影响的比较研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):36-41.
SUN Xiangfei,SHU Hongchun,YU Jilai. Comparison of sympathetic inrush influence on differential protection between parallel and series transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(3):36-41.
- [17] 林国松,李群湛. 牵引变压器差动保护误动原因分析及解决方案[J]. 电力自动化设备,2007,27(5):122-125.
LIN Guosong,LI Qunzhan. Analysis of traction transformer differential protection misoperation and its solution[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(5):122-125.
- [18] 刘巍. V/V 接线变压器差动保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(10):130-134.
LIU Wei. Study on differential protection scheme for V/V connection transformer[J]. Power System Protection and Control,2011,39(10):130-134.

作者简介:

- 许 龙(1988-),男,四川南充人,硕士研究生,研究方向为微机继电保护及变电站自动化(E-mail:xulong0502@163.com);
- 崔艳龙(1988-),男,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为牵引供电系统自动化;
- 魏建忠(1987-),男,山西汾阳人,硕士研究生,研究方向为微机继电保护及变电站自动化;
- 高仕斌(1963-),男,湖北随州人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为微机继电保护及电气设备在线监测;
- 韩正庆(1977-),男,山东潍坊人,副教授,博士,研究方向为继电保护及变电站自动化。

(下转第 113 页 continued on page 113)

扩展方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2009,21(2):96-103.

LI Xinran,ZHAI Wenjie,ZHOU Michael. Extension approach for load model in object-oriented power system simulation software[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2009,21(2):96-103.

[16] 张鹏飞,罗承廉,孟远景,等. 河南电网送端和受端负荷模型对稳定极限的影响[J]. 电网技术,2007,31(6):51-55.

ZHANG Pengfei,LUO Chenglian,MENG Yuanjing,et al. Influence of load models in sending and receiving ends of Henan Power Grid on tie-line stability limit of sending end[J]. Power System Technology,2007,31(6):51-55.

作者简介:

李金鑫(1986-),男,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统动态负荷建模、电力系统分析与控制(E-mail: lijinxin0653@sina.com);

李欣然(1957-),男,湖南涟源人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统分析与控制及负荷建模的教学和研究工作;

张永旺(1984-),男,河北邯郸人,硕士,主要研究方向为电力系统动态负荷建模、电力系统分析与控制。

Transient stability calculation considering traction load model

LI Jinxin¹,LI Xinran¹,ZHANG Yongwang²,DENG Wei¹,XU Zhenhua¹,LIU Qianying¹

(1. College of Electrical and Information Engineering,Hunan University,Changsha 410082,China;
2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation,Guangzhou 510080,China)

Abstract: The UPI(User Program Interface) function of PSASP is adopted to embed the traction load model into power grid for the calculation of transient stability simulation in Windows environment by exchanging the file and data information with the dynamic link library. Its impact on system transient stability is compared between traction load model and conventional load model,and results show that,the sensitivity of traction load model to voltage disturbance is bigger than that of constant impedance model while smaller than that of inductive motor model;the power-angle and damping characteristic of traction load model is superior to that of constant impedance model while inferior to that of inductive motor model;along with the increase of traction load penetration,the damping rate raises while the critical clearance time decreases;the transient stability calculated with traction load model is higher than that calculated with inductive motor model.

Key words: electric traction; electric loads; models; PSASP/UIP; transient analysis; stability; computer simulation

(上接第 108 页 continued from page 108)

Misoperation of traction transformer differential protection when train passes phase-separation with electrical load

XU Long,CUI Yanlong,WEI Jianzhong,GAO Shibin,HAN Zhengqing

(College of Electrical Engineering,Southwest Jiaotong University,Chengdu 610031,China)

Abstract: The high-speed railway applies the automatic phase-separation passing mode,which coordinately operates the switches on ground when train passes the phase-separation. Test statistics show that the automatic switching operation generates the impact current 6 times of the load current. The cause of impact current is analyzed,which shows that it is the superposition of the load current and the excitation inrush of train main transformer. The simulation model is established with MATLAB/Simulink and the simulative results prove the validity of theoretical analysis,based on which,the misoperation of traction transformer differential protection is analyzed and the conclusion is that the CT saturation of traction transformer results in the failure of the second harmonic braking of traction transformer differential protection.

Key words: high-speed railway; impact current; electric traction; electric transformers; differential protection