

考虑牵引负荷模型的暂态稳定计算

李金鑫¹, 李欣然¹, 张永旺², 邓威¹, 徐振华¹, 刘乾勇¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 利用 PSASP 的用户程序接口 (UPI) 功能, 在 Windows 环境下, 采用动态链接库交换文件数据信息, 实现将一种牵引负荷模型接入电网进行暂态稳定仿真计算。对比牵引负荷模型与传统负荷模型对系统暂态稳定计算的影响, 结果表明: 牵引负荷模型对电压扰动的敏感度大于恒阻抗模型而小于感应电动机模型; 牵引负荷模型的功角阻尼特性优于恒阻抗模型而次于感应电动机模型, 且随着牵引负荷比例的提高, 阻尼比增大, 故障极限清除时间减小; 与感应电动机模型相比, 采用牵引负荷模型时的暂态稳定性更高。

关键词: 牵引; 负荷; 模型; PSASP/UPI; 暂态分析; 稳定性; 仿真

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.020

0 引言

电力系统数字仿真在电力系统规划、设计和运行调度等方面有着重要的作用, 保证仿真精确程度的重要基础是对系统各种元件采用准确的模型。研究表明, 负荷模型对仿真结果具有重要的影响^[1-5]。

目前国内铁路电气化快速发展, 电气化铁路牵引负荷在电网中的比重也随之提高。而目前有关电气化铁路牵引负荷的研究主要集中在负序、谐波和无功补偿等方面^[6-9], 较少涉及牵引变电站综合负荷特性的研究。文献[10]提出一种基于电气化铁路牵引供电系统实际负荷构成特性的“感应电动机并联牵引电机和恒阻抗”的机理负荷模型(以下称牵引负荷模型), 对牵引变电站负荷的动态过程有良好的描述效果, 可作为研究电气化铁路牵引负荷对电力系统影响的实用负荷模型。

本文利用 PSASP 开发的用户程序接口 (UPI) 功能, 即 PSASP/UPI 功能实现将牵引负荷模型用户程序与 PSASP 暂态稳定计算相连接进行计算。以 EPRI 36 节点系统为例, 分析牵引负荷模型(不同比例)与传统负荷模型对系统暂态仿真的影响。

1 牵引负荷数学模型

1.1 牵引负荷整体结构

文献[10]中提出的牵引负荷模型包括静态负荷、感应电动机负荷和牵引电机 3 个部分。牵引负荷总的功率平衡关系如下:

$$\begin{cases} P = P_s + P_m + P_{im} \\ Q = Q_s + Q_{im} \end{cases} \quad (1)$$

其中, P 和 Q 分别为综合负荷从电网中吸收的总有功和无功功率; P_m 为牵引电机从电网中吸收的有功功率; P_{im} 和 Q_{im} 分别为感应电机从电网中吸收的有功功率和无功功率; P_s 和 Q_s 分别为等值静态负荷从电网中吸收的有功功率和无功功率。

1.2 牵引负荷数学描述

1.2.1 牵引电机数学模型

牵引电机的状态方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} L \frac{dI_d}{dt} = U_d - RI_d - C_T \omega I_d \\ J \frac{d\omega}{dt} = C_M \omega I_d^2 - T_L \end{cases} \quad (2)$$

其中, L 和 R 分别为牵引回路的电感和电阻; J 为牵引电机的转动惯量; I_d 和 ω 分别为牵引电机的电流和转速; U_d 为牵引电机端电压; C_T 和 C_M 为牵引电机广义等值参数; T_L 为机械负载转矩, 采用转速二次函数模型, 如式(3)所示。

$$T_L = T_{l0}(A\omega^2 + B\omega + C) \quad (3)$$

其中, A 、 B 、 C 为特性参数, 满足 $A+B+C=1$; T_{l0} 为牵引电机负载率。

以牵引电机电流 I_d 为状态变量, 输出方程为:

$$P_m = U_d I_d \quad (4)$$

由系统的状态方程与稳态方程可得牵引电机的初始稳态条件如式(5)所示。

$$\begin{cases} I_d(0) = P_m(0) / U_d \\ \omega(0) = [U_d(0) - RI_d(0)] / [C_T I_d(0)] \end{cases} \quad (5)$$

综上, 牵引电机模型结构参数向量为 $[R, C_T, A, B, C, C_M, T_{l0}, L, J]^T$ 。

1.2.2 感应电动机及静态负荷部分的数学描述

根据文献[10]感应电动机采用忽略电磁暂态的 3 阶模型, 感应电动机模型参数向量为 $[R_s, X_s, R_r, X_r, X_m, R_m, T_J, n]$ 。

静态负荷部分采用恒阻抗模型, 式(6)为由其

复导纳 Y_s 表示的负荷功率,其中 $\hat{Y}_s$ 为 Y_s 的共轭复数。

$$\begin{cases} P_s(t)=\text{Re}[U^2(t)\hat{Y}_s]=U^2(t)G \\ Q_s(t)=\text{Im}[U^2(t)\hat{Y}_s]=U^2(t)B \end{cases} \quad (6)$$

1.2.3 模型的系统变换关系

牵引负荷模型与系统侧(三相电压侧)的基准变换关系如式(7)所示。

$$\begin{cases} U_d=K_u U \\ U_m=K_v U \end{cases} \quad (7)$$

其中, U 为系统侧电压有效值, U_m 为感应电动机负荷部分端电压, K_u 和 K_v 分别为牵引电机和感应电动机的电压变换系数。

牵引负荷模型中的初始有功功率分配关系为:

$$\begin{cases} P_m(0)=P(0)K_{lm} \\ P_{im}(0)=P(0)K_{im} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $P(0)$ 为系统初始总有功功率, K_{lm} 、 K_{im} 分别为牵引电机和感应电动机的初始有功功率比重。

关于各个参数的物理意义、求取方法和模型的辨识策略在文献[10]中有较为详细的描述,本文不再重复。利用在牵引变电站采集到的实测数据进行总体测辨建模即可得到模型参数。

2 牵引负荷模型在 PSASP 中的实现

2.1 牵引负荷模型的 UPI 实现

PSASP 是由中国电力科学研究院开发的、可进行多种电力系统计算分析的程序^[11]。PSASP/UPI 实现了 PSASP 和用户程序模块交替运行,共同完成某一计算任务。

根据暂态稳定分析的数值计算方法及 PSASP 与用户程序之间的约定规则,利用负荷注入母线的电流(实部和虚部)作为负荷变量^[12-14],UPI 的流程如图 1 所示,利用 C++ 语言实现牵引负荷模型用户程序,生成动态链接库文件(DLL)。在 PSASP 调用 UPI,

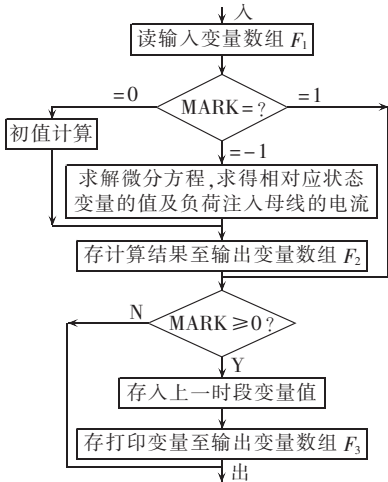


图 1 牵引负荷模型用户程序接口流程

Fig.1 Flowchart of UPI of traction load model

执行“暂态稳定/UPI 计算”,即可实现牵引负荷模型参与暂态仿真计算。

2.2 接口正确性的验证

基于不同牵引变电站实测数据,利用总体测辨法建模,得到列车不同运行工况下的模型参数,表 1 为 2 组辨识所得参数。经验证,模型对实测响应同样具有较好的泛化能力。表 1 中工况 1 为单辆机车无功欠补偿工况,工况 2 为多辆机车工况。

表 1 不同工况下的模型参数

Tab.1 Model parameters for different work conditions

参数	工况 1	工况 2	参数	工况 1	工况 2
K_u	0.2000	0.5552	X_s	3.3685	0.5034
K_v	0.9812	0.8000	R_r	0.0109	0.3430
R	0.0106	0.0339	X_r	0.4161	2.3618
C_T	6.0932	1.8136	L	0.1370	9.9960
A	0.6529	0.7511	J	5.8300	5.7015
B	0.7576	0.3528	K_{lm}	0.1000	0.0439
R_s	1.5754	0.3528	K_{im}	0.8000	0.8000

在将牵引负荷模型应用于实际电网进行仿真计算前,必须验证 UPI 的正确性。根据文献[13,15],本文利用独立编写的负荷动特性仿真程序检验接口的正确性。以 EPRI 36 节点系统为例进行仿真计算,系统接线方式如图 2 所示。仿真中用到的模型参数为表 1 中工况 1 参数。

将牵引负荷模型接入母线 21,并在此母线设置三相短路接地故障,故障时间 0~0.25 s,监视母线电压的变化。以 PSASP 监视到的母线电压作为激励,利用牵引负荷动特性仿真程序求出模型响应 P_{m2} 、 Q_{m2} ,将此响应序列与 PSASP/UPI 中用户打印变量得到的模型响应序列 P_{m1} 、 Q_{m1} 进行对比,可知独立负荷动

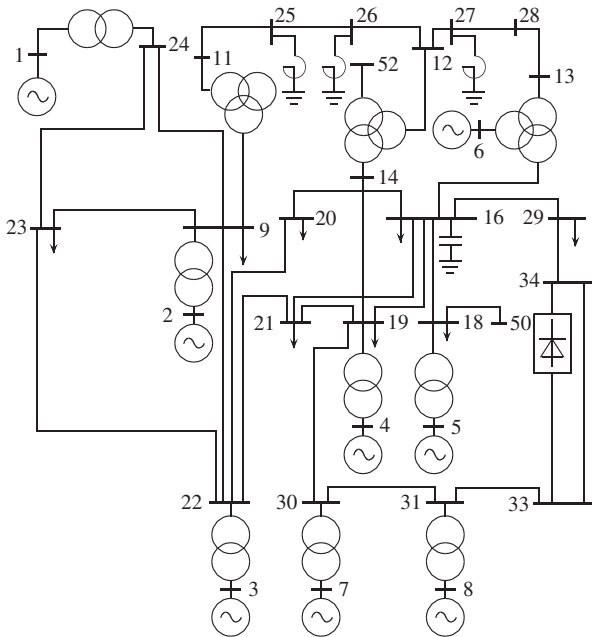


图 2 EPRI 36 节点系统结构

Fig.2 Configuration of EPRI 36-bus system

特性程序得到的功率响应 P_{m2} 、 Q_{m2} 与 UPI 中得到的模型响应 P_{m1} 、 Q_{m1} 曲线完全重合,说明本文中牵引负荷模型与 PSASP 暂态稳定计算程序正确连接。

3 牵引负荷对系统暂态稳定计算影响分析

电力机车按照运行工况可分为级位运行、惰行、制动、停车。本节以 EPRI 36 节点系统为例,研究采用牵引负荷模型(不同参数及比例)对系统暂态稳定仿真的影响。

3.1 不同工况参数

将牵引负荷模型接入母线 19,并在该母线设置三相短路,故障在 0 s 开始,16 个周期后故障清除。算例选用表 1 中工况 1 和工况 2 参数分别进行计算,仿真结果见图 3 和图 4,其中电压曲线为母线 19 电压(标幺值)变化,功角曲线为母线 4 相对平衡节点母线 1 的变化。

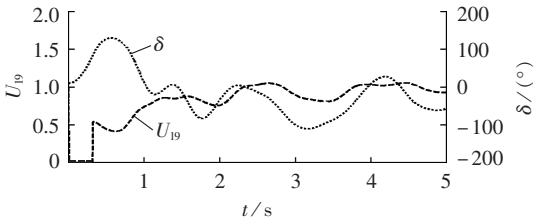


图 3 工况 1 参数仿真结果

Fig.3 Simulative result with parameters of condition 1

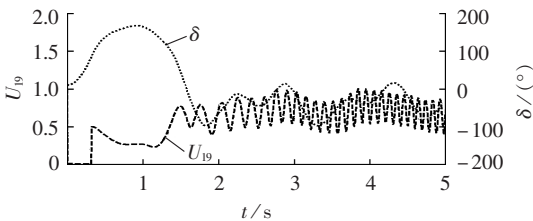


图 4 工况 2 参数仿真结果

Fig.4 Simulative result with parameters of condition 2

由图 3 和图 4 可见,当模型采用工况 1 参数时母线电压可以恢复稳定,而采用工况 2 参数时,母线电压下降很多且出现振荡,完全不能恢复,电压已失稳。采用不同的模型参数会得到不同的母线暂态电压稳定结果。通过其他工况下模型参数的仿真计算结果来看,采用工况 2 参数时负荷节点母线电压在大扰动下最难恢复稳定。以下采用工况 2 参数,研究牵引负荷模型对系统暂态稳定的影响及其与其他负荷模型的差别。

3.2 不同负荷模型

在 EPRI 36 节点系统中,在母线 19 处设置三相短路接地故障,故障时间 1~1.28 s,1.28 s 故障清除。牵引负荷模型接在母线 21 上,模型所用到的参数见表 1 中工况 2 参数。分别采用不同负荷模型时的母线 21 电压(标幺值)变化如图 5 所示。其中 QY 代表

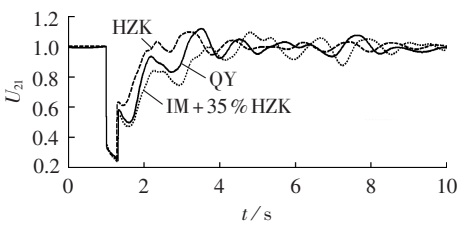


图 5 不同负荷模型对母线电压恢复特性的影响
Fig.5 Effect on bus voltage recovery of different load models

牵引负荷模型,HZK 代表恒阻抗模型,IM+35% HZK 代表感应电动机并联 35% 恒阻抗,感应电动机采用 3 阶模型,参数选择 PSASP 中典型参数。

从图 5 可见,在故障期间,负荷模型不同时的母线电压的下降幅度一致,主要区别在故障清除后的电压恢复特性上,即模型对电压扰动的敏感度存在差异。从故障清除后的第一摆曲线可见,HZK 模型的电压恢复速度较快,QY 模型次之,IM+35% HZK 模型最慢。在牵引负荷模型中大部分的无功功率需要恒阻抗部分来平衡,整体而言,牵引负荷的无功功率特性中恒阻抗模型占有一定的主导地位,故其电压恢复特性介于另外二者之间^[16]。在故障结束后,不同模型对应电压曲线振荡平息的时间基本一致,电压值恢复到同一水平。

3.3 牵引负荷不同比例

在原有潮流作业的基础上,改变其中某些节点的负荷类型,将牵引负荷在全网中的比例分别提高至 20%、35%、50%,分析牵引负荷比例不同时对系统暂态稳定计算结果的影响。

故障 1:母线 22-母线 23 线路靠近母线 22 出口处短路,0.2 s 故障切除。得到的功角曲线(母线 3 相对于母线 1)如图 6 所示。利用 PSASP 中的 Prony 分析功能得到的功角曲线的阻尼比和摆幅见表 2。

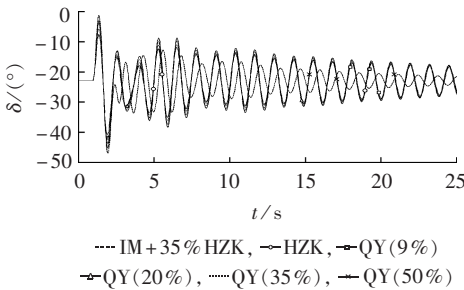


图 6 不同负荷模型功角曲线

Fig.6 Angle curves of different load models

表 2 功角曲线的阻尼特性和摆幅
Tab.2 Damp characteristic and swing of angle curve

模型	阻尼比	摆幅/(°)	模型	阻尼比	摆幅/(°)
IM+35%HZK	0.4707	24.2012	QY(20%)	0.2363	22.5317
HZK	0.0221	19.6432	QY(35%)	0.2909	23.2874
QY(9%)	0.0232	19.7550	QY(50%)	0.3209	23.6934

由图 6 及表 2, 牵引负荷比例提高时, 系统功角曲线的阻尼比增大, 同时功角曲线的摆幅也随之增大。说明在暂态稳定计算中牵引负荷模型的功角阻尼特性优于恒阻抗模型, 且牵引负荷的比例越高, 阻尼特性变大。

故障 2: 在母线 9-母线 23 线路靠近母线 9 处设置三相短路故障。得到的极限切除时间见表 3。

表 3 不同负荷模型下稳定计算的极限切除时间

Tab.3 Critical clearance time of stability calculation for different load models

模型	时间/s	模型	时间/s
IM+35%HZK	0.104	QY(20%)	0.163
HZK	0.184	QY(35%)	0.146
QY(9%)	0.178	QY(50%)	0.132

由表 3 可见, 牵引负荷及其比例对系统暂态稳定计算有重要影响。随着牵引负荷在电网中的比重不断提高, 故障的极限切除时间随之减小。同时也表明, 与 IM+35%HZK 模型相比, 采用牵引负荷模型时, 系统的稳定性将提高。

由以上分析可以得到以下结论。

a. 采用不同工况下的模型参数对系统稳定影响程度不同。在采用多辆机车运行工况下的模型参数进行仿真时, 对电网暂态稳定仿真影响最大。

b. 在仿真算例中, 不同负荷模型对电网的稳定影响母线电压恢复特性存在差异。牵引负荷模型对电压扰动的敏感度介于恒阻抗模型和感应电动机模型之间。

c. 当只改变较少母线的负荷类型时, 对稳定计算的结果影响较为有限。算例中逐步增大牵引负荷在网络中的负荷比例时, 对故障极限切除时间减小, 功角摇摆幅度及其阻尼比增大。

4 结语

本文利用 PSASP/UIP 实现了将牵引负荷模型接入 PSASP 参与暂态稳定仿真的目的。分析了牵引负荷模型采用不同参数仿真时对电网稳定的影响, 并研究了牵引负荷模型与常见传统负荷模型动态特性的差异及其比例对系统暂态计算的影响。本文研究在牵引负荷模型实用化方面具有重要意义, 为进一步研究电铁牵引负荷对实际电网安全稳定运行的影响奠定了基础。

参考文献:

[1] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Load representation for dynamic performance analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 18(2): 472-482.

[2] 贺仁睦. 电力系统动态仿真准确度的探究[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 1-4.

HE Renmu. Research into veracity of power system dynamic

simulation[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 1-4.

[3] 鞠平. 电力系统负荷建模理论与实践[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(19): 1-7.

JU Ping. Theory and practice of load modeling in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 1-7.

[4] 陈凤, 李欣然, 陈辉华, 等. 电动机模型结构及参数对暂态稳定仿真的影响[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(8): 29-33.

CHEN Feng, LI Xinran, CHEN Huihua, et al. Present situation and prospect of load modeling technique[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(8): 29-33.

[5] 李欣然, 贺仁睦, 章健, 等. 负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 26-30.

LI Xinran, HE Renmu, ZHANG Jian, et al. Effect of load characteristics on power system steady-state voltage stability and the practical criterion on of voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 26-30.

[6] 卢志海, 厉吉文, 周剑. 电气化铁路对电力系统的影响[J]. 继电器, 2004, 32(11): 33-36.

LU Zhihai, LI Jiwen, ZHOU Jian. The impact of electrified railway on electric power system[J]. Relay, 2004, 32(11): 33-36.

[7] 刘晓菊, 李群湛, 康健, 等. 同相牵引供电系统的补偿原理及再生制动特性[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 99-103.

LIU Xiaoju, LI Qunzhan, KANG Jie, et al. Compensation principle of cophase traction power supply system and its regenerative braking characteristics[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 99-103.

[8] 朱红萍, 罗隆福. 新型电气化铁道电能质量综合治理装置[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 72-76.

ZHU Hongping, LUO Longfu. Power quality improving device for electric railroads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 72-76.

[9] 曹建设. 谐振引起的牵引变电所无功补投切故障分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 94-97.

CAO Jianshe. Analysis of dynamic reactive compensator switching fault induced by resonance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 94-97.

[10] 李欣然, 张广东, 朱湘有, 等. 牵引供电系统综合负荷模型结构[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 71-75.

LI Xinran, ZHANG Guangdong, ZHU Xiangyou, et al. A load model of traction power supply system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 71-75.

[11] 电力科学研究院. 电力系统分析综合程序——用户手册[M]. 北京: 中国电力科学研究院, 2000: 1-4.

[12] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 311-317.

[13] 韩民晓, 朱军飞, 贺仁睦. 自定义负荷模型与综合程序接口的实现[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(7): 26-30.

HAN Minxiao, ZHU Junfei, HE Renmu. Interfacing of user defined load models with power system simulation software package[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(7): 26-30.

[14] 张进, 贺仁睦, 王鹏, 等. 一种新型差分方程负荷模型与电力系统仿真程序的接口方法[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 57-60.

ZHANG Jin, HE Renmu, WANG Peng, et al. A new method to interface load model in the form of difference equation with power system simulation programs[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 57-60.

[15] 李欣然, 翟文杰, 周二专. 面向对象的电网仿真程序中负荷模型

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: lijixin0653@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