

一种基于牛顿法的交流高速铁路牵引供电 潮流计算方法的研究

郭东, 杨健维, 何正友, 赵静

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 在采用 AT 供电方式的交流高速铁路系统中, 当有列车快速通过相邻的两个 AT 时, 分析牵引网的电压是非常困难的。在此背景下, 探讨了一种在 AT (autotransformer) 供电方式下, 高速铁路牵引供电系统潮流计算的新方法, 并在该算法的基础上提出了一种基于牛顿法的改进迭代求解方法。仿真结果说明, 改进算法能够达到原算法相同的计算结果, 且改进算法具有更快的收敛速度, 利用改进后的算法可以正确计算出列车运行时的牵引网电压分布。该改进的计算方法可望在高速铁路牵引供电系统仿真中得到应用。

关键词: 交流高速铁路系统; AT 供电; 牵引网潮流; 牛顿法

Research on a flow analysis method of power supply system for AC high speed railway based on Newton method

GUO Dong, YANG Jian-wei, HE Zheng-you, ZHAO Jing

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

Abstract: In AT-fed AC high-speed railway system, it is difficult to analyze traction network voltage when trains pass through two adjacent ATs. In this paper, a new flow analysis method of traction system is discussed, under AT-fed mold, and a new convergent solution based on Newton method is given. Simulation results show that improved algorithm can reach the same results as the original one, but it converges more quickly. With improved algorithm, traction network voltage distribution could be exactly calculated. The improved method could be applied in simulation of high speed railway traction system.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50407009).

Key words: AC high speed railway system; AT-fed; traction power network flow; Newton method

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)18-0016-05

0 引言

由于在牵引网中使用自耦变压器 AT (autotransformer) 可以减少牵引变电所的数量, 抑制通讯干扰, 更重要的是, 采用 AT 供电方式可以提高牵引输电网的电压, 进而减少输电线路的损耗、增加电能输送的效率, 所以, AT 供电方式在电气化铁路中得到了广泛的应用, 如日本、法国、比利时, 我国北京—秦皇岛、大同一秦皇岛等电气化铁路也采用这种供电方式。我国新建客运专线, 也计划采用 AT 供电方式^[1]。但是 AT 牵引网为多导体系统, 结构复杂, 导致牵引网的电压分布难以计算, 给牵引供电系统的设计带来了极大不便, 因此, 对 AT 牵引供

电系统进行准确建模、精确分析是非常必要的。

迄今为止, 国内外已有不少文献对 AT 供电系统的计算进行探讨。文献[2,3]对 AT 供电系统进行等值分析, 简化了牵引网的电流分布, 但采用的模型均为简化模型, 要对牵引网进行精确、实时分析还有很多工作需要探讨; 文献[4]研究了 AT 供电系统等值电路的推导方法, 但文中方法的推导过程比较复杂, 推导出的等值电路参数的物理意义不明显, 难以理解, 容易出错; 文献[5]中作者建立了在 AT 供电方式下电气化铁道牵引供电系统潮流计算的数学模型, 然后根据电力机车在牵引网中位置的概率分布, 利用蒙特卡罗模拟方法得到了多台机车行驶时各机车电压与变电所总供电功率; 文献[6]分析了单列车在恒流操作下单边和双边供电的电压计算算

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(50407009); 四川省杰出青年基金(06ZQ026-012); 教育部新世纪优秀人才项目(NCET-06-0799)

法, 但是文中只给出了一列车情况的简化模型, 仿真结果不足以反映真实运行状况; 文献[7]提出了一种新的 AT 系统的潮流算法, 该算法已经成功用于对台湾高速铁路牵引供电系统的仿真分析, 其结果为牵引供电系统的设计提供依据。该算法方法简单, 思路清晰, 可以快速而准确地求解出每条支路的电流。本文在此基础上, 提出了一种基于牛顿法的改进迭代求解方法, 对同一供电区间有不同数目列车运行的几种情况分别进行了仿真分析, 其结果说明, 改进算法能够达到原算法相同的计算结果, 且改进算法具有更快的收敛速度, 利用改进后的算法可以正确计算出列车运行时的牵引网电压分布, 同一供电区间列车数越多, 优势越明显。

1 AT 供电方式的原理

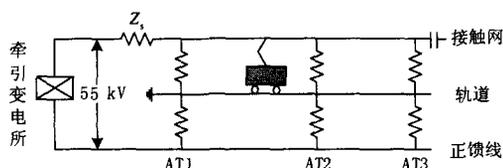


图1 AT 供电方式原理图

Fig.1 Principle of AT power supply

AT 供电方式原理如图 1 所示。AT1, AT2, AT3 为自耦变压器, 变比为 2:1, 其一端与接触网连接, 另一端与正馈线连接, 中点与轨道连接。牵引变电所通过接触网和正馈线为沿线 AT 提供 55 kV 的电压, AT 将其降低至 27.5 kV 为电力机车提供电能。由于 AT 供电方式的特有结构, 使牵引网对周围的电磁干扰大大降低, 而且在不提高牵引网的绝缘水平的前提下可将供电电压提高一倍, 极大地提高了输电效率^[1,4]。

2 算法分析

从一个 AT 的工作原理入手, 对列车的取流过程进行分析。列车从一个 AT 取流的示意图如图 2 所示。

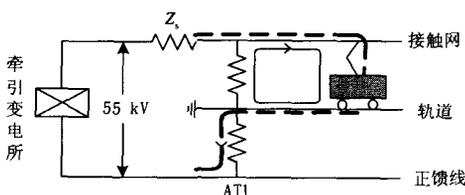


图2 列车从一个 AT 取流的示意图

Fig.2 Current supplied by one AT to a train

根据磁势平衡原理,

$$I_{\text{main}} = I_{\text{aux}} = 0.5 I_{\text{train}} \quad (1)$$

其中: I_{train} 为列车电流, I_{main} 为图中实线所示电流, I_{aux} 为虚线所示电流。

当一列车在供电区间运行时, 列车电流经过各个变压器, 把经过每一个 AT 的电流考虑成独立且相量值相等的两路电流, 就可以将整个电流分解成主回路(实线)和次回路(虚线)两部分来求解, 电流在各个 AT 间的分布如图 3 所示。

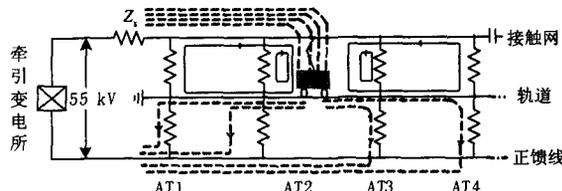


图3 电流在各个 AT 间的分布

Fig.3 Current sharing among the transformers

在得到主回路的电流的基础上, 再根据公式(1)求出次回路的电流, 一旦整个电路的电流分布求得, 便可通过迭代方式获得精确的列车电压。

2.1 主回路电流的求解

本文将列车看作恒功率模型。在每一个扫描时刻, AT 的电压值是不变的, 所以可将其看成一个电压源, 同理, 列车在此时可作为一个电流源。用如图 4 所示的等值主回路来求解流过每个 AT 的电流。

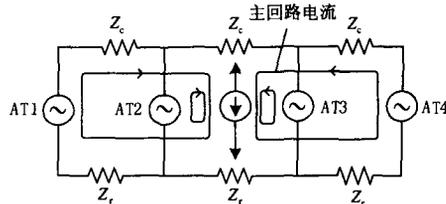


图4 等值主电路

Fig.4 Equivalent main circuit

根据式(2)可以估算出流过每个电压源的电流^[7]:

$$I_n = \frac{Y_n}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4} I_{\text{main}} \quad (2)$$

其中: Y_n ($n=1, 2, 3, 4$) 为回路 n 的总串联导纳。在公式(2)的推导过程中, 没有考虑辅电流和导体间互感的作用, 其导致的误差会在每次迭代的过程中逐步减小。

2.2 列车电压的求解

下面以图 3 为例, 推导求解单列车情况下的电压计算公式。

设某个供电区间存在 4 个 AT, 各个 AT 的位置分别为 0 km、 X_1 、 X_2 、 X_3 , 列车位置 X_0 , 牵引变电所二次侧电压为 55 kV。

牵引电流在接触网上产生的压降为:

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} \quad (3)$$

其中

$$V_{c1} = (I_{auxi} + I_1) \times Z_c \times X_1 - 2I_1 \times Z_{cr} \times X_1 - (I_{auxi} - I_1) \times Z_{cf} \times X_1 \quad (4)$$

$$V_{c2} = (I_{auxi} + I_1 + I_2) \times Z_c \times (X_p - X_1) - 2(I_1 + I_2) \times Z_{cr} \times (X_p - X_1) - (I_{auxi} - I_1 - I_2) \times Z_{cf} \times (X_p - X_1) \quad (5)$$

牵引电流在钢轨上产生的压降为:

$$V_r = V_{r1} + V_{r2} \quad (6)$$

其中,

$$V_{r1} = 2 \times I_1 \times Z_r \times X_1 - (I_{auxi} + I_1) \times Z_{cr} \times X_1 + (I_{auxi} - I_1) \times Z_{rf} \times X_1 \quad (7)$$

$$V_{r2} = 2 \times (I_1 + I_2) \times Z_r \times (X_p - X_1) - (I_{auxi} + I_1 + I_2) \times Z_{cr} \times (X_p - X_1) + (I_{auxi} - I_1 - I_2) \times Z_{rf} \times (X_p - X_1) \quad (8)$$

列车电压可表示为:

$$V_t = 27.5 - Z_s \times I_{auxi} - V_c - V_r \quad (9)$$

其中: Z_s 为系统阻抗, Z_c 为接触网的单位自阻抗, Z_r 为钢轨的单位自阻抗, Z_r 为正馈线的单位自阻抗, Z_{cr} 为接触网与钢轨之间的单位互阻抗, Z_{cf} 为接触网与正馈线之间的单位互阻抗, Z_{rf} 为钢轨与正馈线之间的单位互阻抗。

2.3 牛顿法求解

$$\text{令 } f(I_t^i) = \Delta P = P_t - I_t^i \cdot (V_t^i)^* \quad (10)$$

根据牛顿法, 有

$$I_t^{i+1} = I_t^i - f(I_t^i) / f'(I_t^i) \quad (11)$$

式(10)是边界条件, I_t^i 、 $(V_t^i)^*$ 分别为列车电流和电压共轭第 i 次迭代的值, P_t 为列车消耗的功率。

首先, 为 I_t 赋初值 I_0 , 根据公式(2)计算出各个主回路的电流, 再代入公式(9)、(10)、(11)可计算出 I_t^{i+1} , 代入下式 (ε 为误差)

$$\begin{aligned} |\text{Re}(I_t^n - I_t^{n+1})| < \varepsilon \\ |\text{Im}(I_t^n - I_t^{n+1})| < \varepsilon \end{aligned} \quad (12)$$

若满足式(12)则迭代停止, 不满足则用新的列车电流值, 开始新一轮循环, 直至满足收敛条件或循环次数达到最大值为止。

2.4 多列车的情况

以上的分析和推导都是在一列车的基础上进行的, 下面考虑在多列车的情况下, 求解列车电压的方法。

在多车情况下, 参照前面分析单列车的办法来分析, 现以两列车的情况为例进行说明, 设列车行驶方向为从左至右。

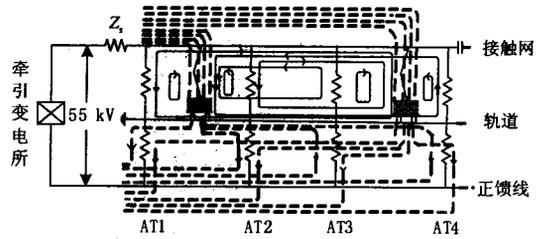


图5 两列车运行时的电流分布
Fig.5 Current profile of two trains

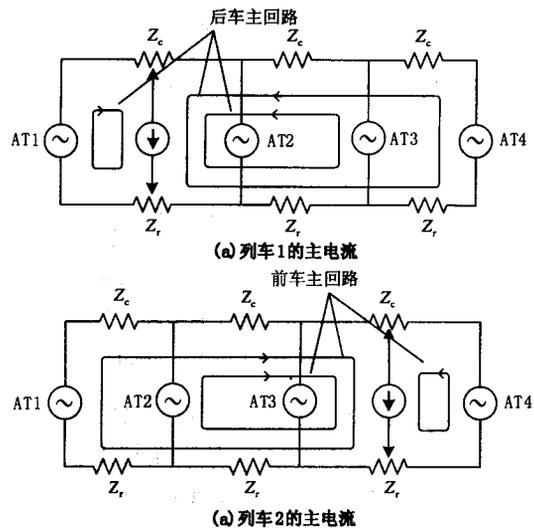


图6 多车情况的主回路图
Fig.6 Main circuits for trains

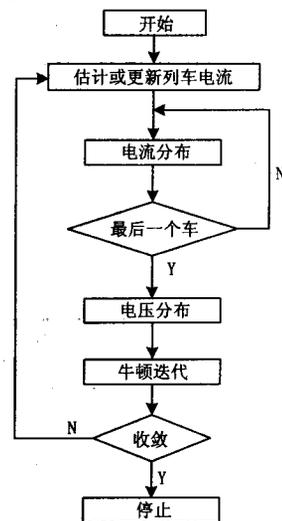


图7 改进算法的流程

Fig.7 Flow chart of the improved algorithm

两列车运行时电流分布情况如图5所示, 由图

可以看出该电流分布非常复杂, 但是, 参照前面分析单列车的办法, 将每列车在某个时刻都可看作是一个独立的电流源, 其主回路电流分布图如图 6 所示, 这样, 求解多车情况的电流分布, 便简化为先分别求解各个列车的电流分布, 然后将其叠加, 进而得到总的电流分布。

3 程序流程

程序流程图见图 7。

4 仿真分析

依照前面所述的数学模型和算法程序, 利用 Matlab7.0 对本文提出的改进算法进行仿真分析。设一个 40 km 的供电区间, 存在 5 个 AT, 相互间隔 10 km, 线路的参数如表 1 所示, 对表 2 的 3 种情况分别进行仿真分析。两种算法应用于每种 case 下的仿真数据如表 3~表 5 所示, 收敛曲线如图 8~图 10。且结果满足收敛条件、KCL、KVL。

表 1 模型参数^[8]

Tab. 1 Parameters for model^[8]

变电站电压和阻抗	$V_s: 27.5 \text{ kV}$ $Z_s: 2.36 + j19.5 \Omega$
牵引网自阻抗 [Ω/km]	$Z: 0.1192 + j10.7522$ $Z_r: 0.1618 + j0.6709$ $Z_l: 0.2036 + j0.8847$
牵引网互阻抗 [Ω/km]	$Z: 0.058 + j10.3690$ $Z_r: 0.051 + j0.3610$ $Z_l: 0.053 + j0.3730$

表 2 三种 case

Tab. 2 Three cases for simulation

Case	列车数	列车位置/km	功率/MW
Case1	1	25	10
Case2	2	18, 35	10
Case3	3	9, 19, 29, 39	10

表 3 case1 的仿真结果

Tab. 3 Simulation result for case 1

(a) 牛顿法

列车	列车电压/kV	列车电流/kA	功率/MW	迭代次数/n
#1	26.375	0.3791	10	6
	26.052-j4.1192 0.3745-j0.0592			

(b) 原迭代法

列车	列车电压/kV	列车电流/kA	功率/MW	迭代次数/n
#1	26.376	0.3791	10	7
	26.053-j4.1201 0.3745-j0.0592			

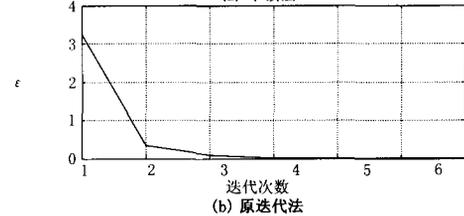
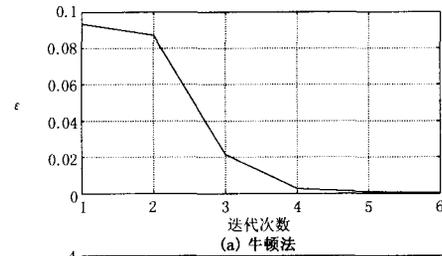


图 8 ε 的变化曲线 (#1 列车)

Fig.8 Variable curve of ε

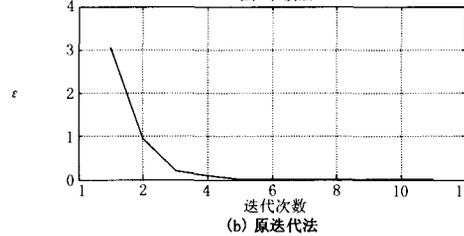
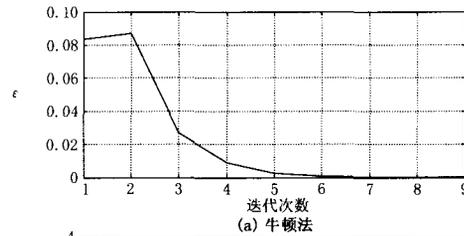


图 9 ε 的变化曲线 (#1 列车)

Fig.9 Variable curve of ε (#1 列车)

表 4 case2 的仿真结果

Tab.4 Simulation result for case 2

(a) 牛顿法

列车	列车电压/kV	列车电流/kA	功率/MW	迭代次数/n
#1	25.287	0.3955	10	9
	24.486-6.3157i 0.3829-0.0988i			
#2	24.847	0.4025	10	9
	23.632-7.6749i 0.38278-0.1243i			

(b) 原迭代法

列车	列车电压/kV	列车电流/kA	功率/MW	迭代次数/n
#1	25.287	0.3955	10	11
	24.486-6.3152i 0.3829-0.0988i			
#2	24.847	0.4025	10	11
	23.632-7.6743i 0.3828-0.1243i			

表 5 case3 的仿真结果

Tab.5 Simulation result for case 3

(a) 牛顿法

列车	列车电压/kV	列车电流/kA	功率/MW	迭代次数/n
#1	20.987 5	0.474 8	10	29
	18.698-j9.532 4	0.424 5-j0.216 4		
#2	20.135 8	0.496 6	10	
	16.794-j11.109	0.414 2-j0.274 0		
#3	19.665 8	0.508 5	10	46
	15.526 - j12.07	0.401 4-j0.312 1		
#4	19.483 3	0.513 3	10	
	14.958-j12.485	0.394 0-j0.328 9		

(b) 原迭代法

列车	列车电压/kV	列车电流/kA	功率/MW	迭代次数/n
# 1	20.981	0.476 6	10	46
	18.691 - j9.532 2	0.424 6-j0.216 5		
# 2	20.128	0.496 8	10	
	16.786-j11.108	0.414 3-j0.274 2		
# 3	19.658	0.5087	10	46
	15.516 - j12.07	0.4015-j0.312 3		
# 4	19.475	0.513 5	10	
	14.948-j12.484	0.394 1-j0.329 1		

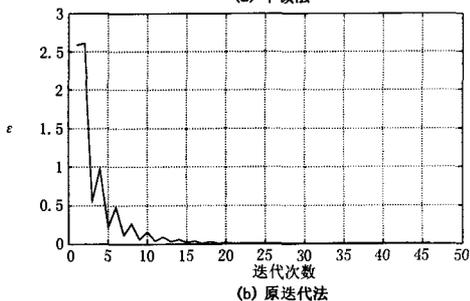
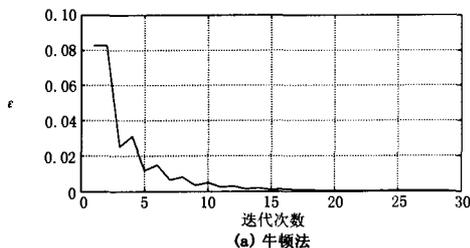


图 10 ϵ 的变化曲线 (#1 列车)

Fig.10 Variable curve of ϵ (#1 列车)

由表 3、表 4、表 5 可以看出：在误差允许范围内两种算法的计算结果基本相同；采用牛顿法，需要的迭代次数比原来的算法少；同一供电区间运行的列车数目越多，迭代次数的减少就越明显。为进一步说明该算法的实用性，利用改进算法对 case3 进行牵引网电压分布计算，仿真结果如图 11 所示。

由上述计算数据和图 11 可以看出，用该方法对

AT 供电系统进行潮流计算是可行的。

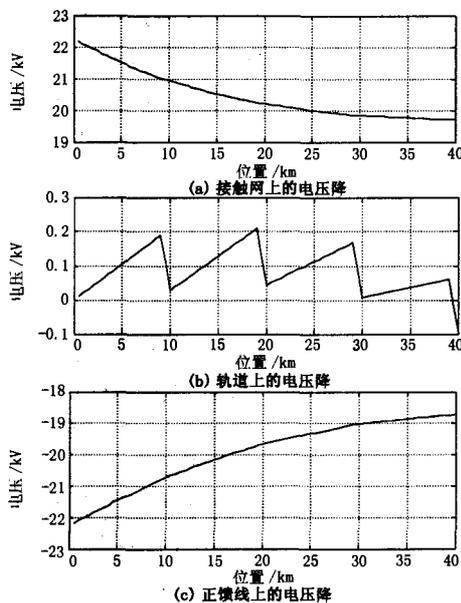


图 11 四列车运行时牵引网电压分布

Fig.11 Voltage profile of traction net for four trains

5 结论

在采用 AT 供电方式的交流高速铁路系统中，当有列车快速通过相邻的两个 AT 时，分析牵引网的电压是非常困难的，本文针对此问题，提出了一种基于牛顿法的改进迭代求解方法，进行了大量的仿真分析，仿真结果表明：在相同条件下，改进算法减少了迭代次数，从而提高 AT 供电方式下牵引网潮流计算的速度。

参考文献

- [1] 张秀峰. 高速铁路同相 AT 牵引供电系统研究[D].成都: 西南交通大学,2006.
ZHANG Xiu-feng. Research on Cophase AT Traction Power Supply System in High-speed Railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [2] 曹建猷. 电气化铁道供电系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [3] 李自良, 陈薇, 党平等. 电气化铁道自耦变压器供电方式的原理分析[J].电气化铁道,1998, (3): 12-18.
LI Zi-liang, CHEN Wei, DANG Ping, et al. The Theory Analysis of Auto-transformer Power Supply of Electric Railway[J]. Electric Railway,1998, (3): 12-18.
- [4] 辛成山. AT 供电系统等值电路推导方法[J]. 电气化铁道,1999, (1): 17- 20.

(下转第 29 页 continued on page 29)

故障状态下的宁夏电网进行稳定性计算, 如表 6。

表 6 单回输电线路故障电压稳定裕度

Tab. 6 Stability margin in single line fault

故障线路	功率极限/MW	裕度百分比
关帝—古城	4968.142	14.95%
大武口—一步桥	5017.824	16.1%
正谊—一步桥	5068	17.26%
宁安—固原	5017.824	16.1%
关帝—迎水桥	5068	17.26%
石二—陶乐	5068	17.26%

4.4.2 一台关键发电机退出运行

表 7 一台发电机故障全网电压稳定裕度

Tab. 7 Stability margin in one generator fault

故障发电机	功率极限/MW	裕度百分比
石二	4968.142	14.95%
马莲台	4918.953	13.8%
中二	5017.824	16.1%
大坝	4968.142	14.95%

仿真表明, 一台关键发电机退出运行对全网的电压稳定会产生较大影响, 尤其是马莲台电厂的一台发电机退出将导致全网的负荷裕度下降 3.46 个百分点, 如果伴随有重要线路故障以及负荷的突然增加, 将会使全网的电压稳定性严重恶化。

5 结语

根据宁夏的实际运行情况, 采用裕度分析法和灵敏度分析法等手段, 对宁夏电网的电压稳定性状态进行了详细的分析, 主要研究了宁夏电网的关键线路和发电机出现永久故障而停运时的系统稳定裕

度。基于这些研究, 给出了宁夏电网在电压稳定性方面存在的主要问题和相应的薄弱环节, 为宁夏电网的改造和更为稳定的运行, 提供了有益的信息。

参考文献

- [1] 2006 年度宁夏电力系统运行方式[Z].宁夏电力公司, 2006.
Ningxia Power Grid Operation Regulation in 2006[Z].Ningxia Electric Power Corporation,2006.
- [2] Power System Simulator for Engineering (PSS/E) Users Manual[Z].2004.
- [3] 晏璐. 基于BPA的北京电网电压安全稳定分析(硕士学位论文)[D].北京: 华北电力大学, 2005.
YAN Lu.Research on Voltage Safety and Stability of Beijing Electric Network Based on BPA,Thesis[D]. Beijing:North China Electric Power University,2005.
- [4] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖,等. 电力系统电压稳定性及其控制[M].北京: 中国电力出版社,2004.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al.Voltage Stability and Its Control in Power System[M]. Beijing:China Electric Power Press,2004.

收稿日期: 2007-03-23;

修回日期: 2007-06-11

作者简介:

卢继平(1960-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统自动化和电力系统继电保护;

孙华利(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压稳定; E-mail:shl2113@163.com

袁湘宁(1962-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力市场交易管理工作。

(上接第 20 页 continued from page 20)

- XIN Cheng-shan. The Method of Equivalent Circuit Deriving for AT-fed Power Supply System[J]. Electric Railway,1999,(1):17 - 20.
- [5] 池云莉,何天键,梁嘉杰. 电气化铁道系统概率潮流算法研究[J]. 电气化铁道, 2004, (6): 4 -20.
CHI Yun-li, HE Tian-jian, LIANG Jia-jie. Research on Probabilistic Load Flow Algorithm of Electrified Railway[J]. Electric Railway,2004, (6): 4 -20.
- [6] Hill R J,Cevik I H.On-line Simulation of Autotransformer-fed AC Electric Railroad Traction Networks[J]. IEEE Trans on Veh Technol, 1993,42(3): 365- 372.
- [7] His P H, Chen S L, Li R J. Simulating on-line Dynamic Voltages of Multiple Trains Under Real Operating Conditions for AC Railways[J]. IEEE Trans on Power

Systems, 1999, 452-459.

- [8] Lee S H, Kim J O, Jung H S.Analysis of Catenary Voltage of an AT-Fed AC HSR System[J]. IEEE Trans on Veh Technol,2004,53(6):1856-1862.

收稿日期: 2007-03-14;

修回日期: 2007-04-27

作者简介:

郭东(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方为轨道交通牵引供电系统; E-mail:gdong_110@163.com

杨健维(1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护;

何正友(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信号处理和信息理论在电力系统故障诊断中的应用、新型继电保护原理、配电网自动化等方向的研究工作。