

基于时变电流注入方法的特殊电力负荷建模研究

陈大宣¹, 余一平¹, 鞠平¹, 黄永宁², 张爽²

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 宁夏电力科学研究院, 宁夏 银川 750011)

摘要: 特殊电力负荷对电力系统稳定性、电能质量以及对电力设备安全性都有较大影响, 建立合适的特殊电力负荷模型对电力系统的分析十分必要。以电弧炉负荷实测数据为例, 分析了特殊电力负荷的自变特性。基于 PSASP 的用户程序接口 (UPI) 功能和自定义程序, 采取时变电流注入的特殊电力负荷建模方法; 通过电气换算, 将不同电气特性负荷以注入电流形式建立模型。根据宁夏地区某硅铁负荷的实测数据建立负荷模型, 仿真曲线和实测数据的对比分析验证了所建模型的有效性和可行性。

关键词: 特殊负荷; 建模; 实测数据; 时变电流注入; 电力负荷

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.020

0 引言

特殊电力负荷区别于常规电力负荷的“特殊性”主要在于负荷从电网汲取的功率变化主要由负荷的生产特点决定, 而电网的电压和频率变化则是次要因素^[1]; 部分特殊电力负荷对电网具有冲击性, 某些负荷点可以在极短的时间内 (秒级乃至毫秒级) 从电网汲取或释放几十兆瓦乃至百兆瓦的功率, 如金属冶炼、电动火车等。基于以上特性, 不妨将特殊电力负荷归纳为“具有自变性^[1]的负荷”。

特殊电力负荷给电网的运行带来了诸多挑战, 多年来人们也对其做了大量研究^[2-7]。文献[2]研究了大容量冲击负荷对地区电网暂态稳定性的影响, 并提出相应安全控制措施; 文献[3]以电弧炉为研究对象, 分析由此带来的电压波形畸变、电压闪烁等电能质量问题; 文献[4-7]则是给出了具有冲击性的负荷对电力系统相关电力设备的危害, 如发电机谐振、变压器发热升温造成绝缘破坏等。

计算机仿真分析作为电力系统设计、运行和控制中必要的手段^[8-9], 是以电力系统模型作为研究基础的, 模型的准确性对仿真有着重大意义^[10-15], 某些情况下, 能定性地改变结论^[16]。特殊负荷对电力系统的显著影响使得其相应的建模工作逐渐成为电力工作者关心的问题, 相关的研究工作已有开展。文献[6]提出了一种在 ATP/EMTP 中基于实测数据的冲击负

荷实用建模方法, 冲击模型接在 220 kV 高压侧母线, 体现的是多种冲击负荷的综合特性。文献[2]在电力系统仿真软件 BPA 中通过切机和切负荷的方式来实现特殊负荷冲击效应的建模, 但该方法忽略了冲击负荷的上升、下降速度, 使得负荷模型过于保守。文献[17]则是建立了一种能体现轧机功率需求主动性的冲击负荷模型, 通过在异步电机负载转矩上叠加一个反映轧机负载变化的外部转矩来模拟冲击负荷的主动性和冲击性。另有诸多文献对电弧炉模型进行了深入的研究^[3, 18-19], 以电弧半径或者电弧等效电阻作为中间变量, 分析电压畸变特性。

本文在前人研究的基础上, 以硅铁特殊负荷实测数据为例, 分析了特殊电力负荷的自变特性, 提出基于电力系统分析综合程序 (PSASP) 的用户程序接口 (UPI) 运用时变电流注入实现特殊负荷建模的方法, 并通过测试系统仿真验证了该方法的准确性。

1 硅铁负荷特性

硅铁的冶炼是在矿热炉中进行的, 矿热炉属电弧炉系列的一种。冶炼硅铁时, 从炉口加入混合好的原料, 电极深埋在炉料中, 依靠电弧电流通过炉料而产生的电阻热加热。熔化的金属和炉渣集聚通过出铁口定时出铁放渣。

硅铁冶炼过程操作复杂, 其功率的波动亦存在多方面原因^[20]。当原料中还原剂过少, 电弧炉中二氧化硅不能得到充分还原, 使得炉料发粘, 料面烧结, 疵火厉害, 而造成电流波动严重; 当原料中还原剂过多时, 炉料导电性增大, 电极上抬, 容易造成炉料坍塌, 继而导致电极短路, 电流瞬时增加。另外, 冶炼硅铁过程中, 每隔 2~2.5 h^[21]会有一次出铁过程, 出铁时电极下压使得金属液体从出铁口流出, 该操作会造成功率的大幅度变化, 从而影响电网的正常运行。在电网动态仿真中, 以往依据冶炼电弧炉的生产特

收稿日期: 2013-04-25; 修回日期: 2014-01-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2011AA-05A103); 国家自然科学基金资助项目 (51207046); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2013CB228204); 国家电网公司大电网重大专项资助项目 (SGCC-MPLG001(001-031)-2012)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA-05A103), the National Natural Science Foundation of China (51207046), the National Basic Research and Development Program of China (973 Program) (2013CB228204) and the State Grid Corporation of China Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid (SGCC-MPLG001(001-031)-2012)

点将硅铁冶炼这类铁合金负荷的模型视为恒阻抗负荷^[22]。但是很多情况下,恒阻抗负荷模型并没有计及出铁过程负荷剧烈自变的特性。而对于电网分析而言,往往更关心电网受端所连接的特殊负荷表现出来的总体功率特性。

本文通过对宁夏红山口变(110 kV/35 kV)电弧炉冶炼硅铁专线相关实测数据的调研分析,表明硅铁企业最显著的功率波动来自于硅铁の出铁过程,其余时段由于电弧始终被固定炉料层所封闭,功率相对比较平稳。图 1 所示为该硅铁专线测得的有功功率 P 和无功功率 Q 随时间的变化曲线,时间跨度为 1 h,图中 2579~3000 s 时段为硅铁负荷出铁时期的功率特性,由于上述种种原因,其余非出铁时期亦存在一定程度的功率波动,但是相对于出铁期则较为平稳。

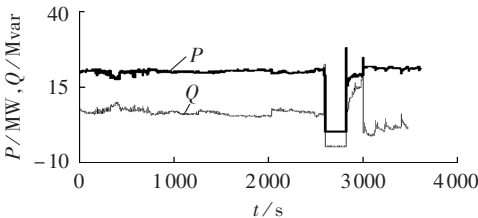


图 1 硅铁负荷功率随时间变化曲线

Fig.1 Curve of ferrosilicon load power vs. time

对于大型硅铁企业,由于安装有电容器、SVC 等无功补偿设备,从电网侧看,硅铁特殊负荷在整个生产过程包括出铁期,变电站节点的电压波动较小,约为 2%,如图 2 所示。依据硅铁企业专线的实测数据分析表明,在对该类特殊负荷进行建模分析其对电网的影响时,不将电压作为主变量,将硅铁负荷看作电流源。

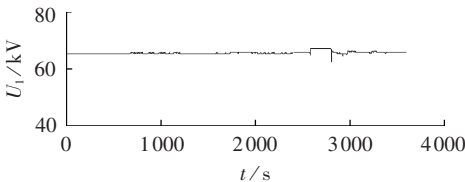


图 2 实测硅铁负荷正序相电压

Fig.2 Measured positive-sequence phase-voltage of ferrosilicon load

2 时变电流注入法建模

PSASP 是由中国电力科学研究院开发的一套功能强大、使用方便并在我国电网广泛应用的成熟电力系统分析软件^①。该软件提供了 UPI 功能,UPI 使 PSASP 和用户程序(UP)的执行模块通过接口文件传递数据,交替运行,共同完成一个计算任务,如图 3 所示。本文通过该模块实现基于时变电流注入的特殊负荷建模。

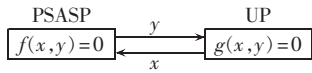


图 3 PSASP 与用户程序连接关系

Fig.3 Connections between PSASP and user program

特殊电力负荷时变电流注入法建模是基于电网侧负荷节点实测数据将特殊电力负荷等效为时变电流源,即等效电流源的电流注入是由已知的负荷节点 PMU 动态信息决定的。仿真软件采用数值积分的方法对电力系统进行仿真,其内部过程每个仿真步长计算一次,而电流源的输出电流也是每个仿真步长改变一次,与仿真软件数值积分保持一致。这样,对于仿真软件的每个仿真步长,都可以通过等效时变注入电流来模拟特殊电力负荷的自变特性。

值得注意的是,时变电流注入方法建模并不局限于采用实测电流进行注入,也适用于阻抗模型、功率源模型等其他形式的模型,在仿真过程中,这些模型皆可以电流注入的形式实现。以功率源模型为例,用户只需进行如式(1)和(2)所示变换,即可将冲击负荷的功率以电流形式注入仿真系统。其他形式的负荷模型按照电路原理计算,皆可转换为电流形式。

$$I_r = (S/U)\cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \tag{1}$$

$$I_i = (S/U)\sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \tag{2}$$

其中, I_r 和 I_i 分别为注入电流实部和虚部; S 为负荷视在功率(可由实测有功 P 和实测无功 Q 求得); U 为仿真系统中注入母线电压幅值; θ_1 为实测正序电流相角, θ_2 为实测正序电压相角; θ_3 为仿真系统中注入母线电压相角。

在 PSASP 混合仿真计算中,PSASP 数值计算和时变电流用户程序之间的交互计算流程如图 4 所示。图中, $X_{n+1}=F(X_n, Y_n, I_n)$ 为系统网络方程, $Y_{n+1}=G(X_n, Y_n, I_n)$ 为发电机、负荷等一次设备和二次自动装置的数学模型, $I_{n+1}=H(P_{n+1}, Q_{n+1}, U_{n+1}, \theta_{n+1})$ 为时变注入电流用户程序的数学模型, X 为系统状态变量, Y 为

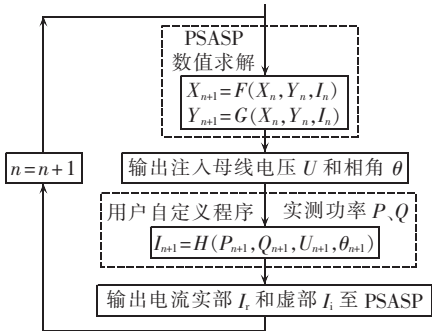


图 4 PSASP 与用户程序交互计算流程图

Fig.4 Flowchart of interaction between PSASP and user program

① 中国电力科学研究院. 电力系统分析综合程序用户手册(7.0). 2010.

发电机、负荷等节点输出变量; I 为用户自定义接口向 PSASP 的输入变量,也是自定义程序的输出变量。

3 硅铁负荷建模

本文采用时变电流注入形式建立硅铁负荷模型。硅铁负荷对电网的影响主要来自其出铁过程中功率的波动。功率在出铁初期急剧下降,出铁后期迅速上升(两者间隔约 5~8 min),对局部电网有较大冲击。无功功率在部分时段呈现负值,经调研是由于该负荷专线装有补偿电容器。

本文硅铁负荷建模的主要目标是模拟硅铁出铁过程中功率的变化。硅铁出铁过程时间相对于电力系统暂态过程时间要长得得多,鉴于出铁过程中间绝大部分时段有功和无功功率较为平稳,而出铁初期和后期功率变化显著,在建立负荷对外电网冲击模型时,只需关注这 2 个时段,模拟功率的突然变化对电网的影响,即可达到建模目的。本文根据功率突变情况以图 1 中 2579~2584 s 的 5 s 时段为出铁初期过程,如图 5 所示;以 2810~2815 s 的 5 s 时段为出铁后期过程,如图 6 所示。

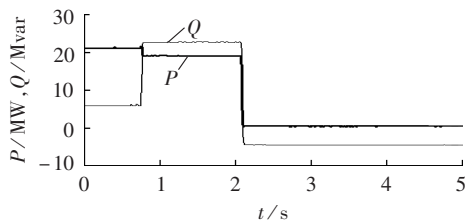


图 5 出铁初期功率变化

Fig.5 Power curves at early tapping stage

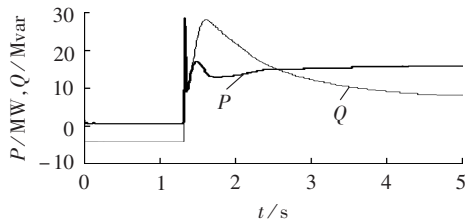


图 6 出铁后期功率变化

Fig.6 Power curves at late tapping stage

4 算例仿真分析

实际电网分析中,往往关注特殊负荷对局部电网动态特性的影响,本文以图 7 所示的 3 机 10 节点系统为例,外部大电网等效为无穷大机组,设其惯性时间常数 $M=1000$ s。小系统中发电机 G_1 、 G_2 和 G_3 容量为 50 MW/62.5 MV·A,发电机发出功率经升压变压器输送至 220 kV 电网,供系统内负荷使用。小系统内负荷由常规负荷和特殊电力负荷构成,其中 STNA-230、STNB-230 和 STNC-230 母线节点接入常规负荷,Impact Load 母线节点接入特殊电力负荷。

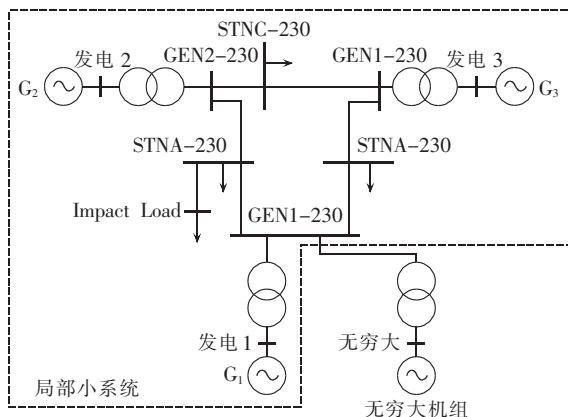


图 7 3 机 10 节点算例系统结构图

Fig.7 Structure of 3-generator 10-bus test system

硅铁负荷由 Impact Load 母线接入系统,非出铁期负荷稳态值为 $P=21$ MW、 $Q=6$ Mvar,出铁期负荷稳态值为 $P=0.6$ MW、 $Q=-4.5$ Mvar。

硅铁负荷注入模型体现了负荷功率突然自变,必然对系统造成冲击,用于动态分析计算。本文即采用时变电流注入的方式来模拟负荷的自变特性。将变化功率以电流的形式注入仿真系统,图 8 和图 9 分别为硅铁负荷出铁初期和后期仿真输出电流和实测电流的比较,两者基本重合,可认为该建模方法是准确有效的。

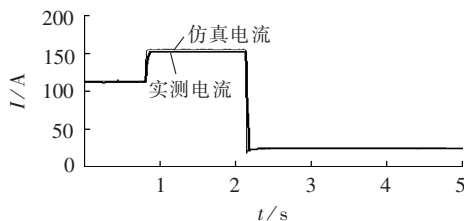


图 8 出铁初期仿真输出电流和实测电流对比

Fig.8 Comparison between simulative and measured output currents at early tapping stage

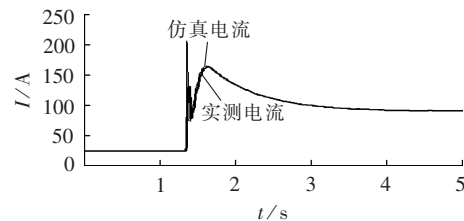


图 9 出铁后期仿真输出电流和实测电流对比

Fig.9 Comparison between simulative and measured output currents at late tapping stage

硅铁在出铁初期,功率可以在 0.1 s 的时间内由最大值降至最小值(或者在出铁后期由最小值升至最大值),如此大的功率变化率势必会对小系统中的发电机的动态产生影响,图 10 和图 11 分别给出了特殊负荷作用下发电机的出力变化曲线和发电机功角变化曲线。

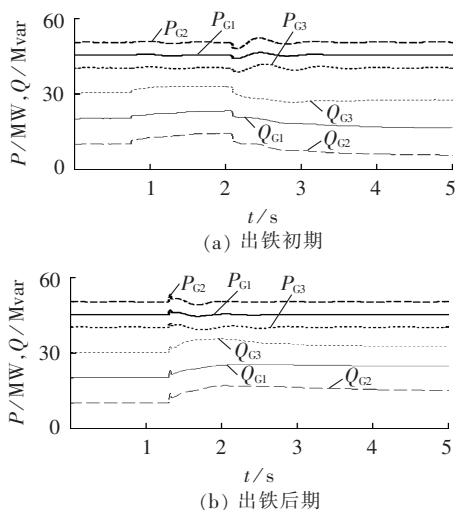


图 10 3 台发电机输出功率变化曲线

Fig.10 Output power curves of three generators

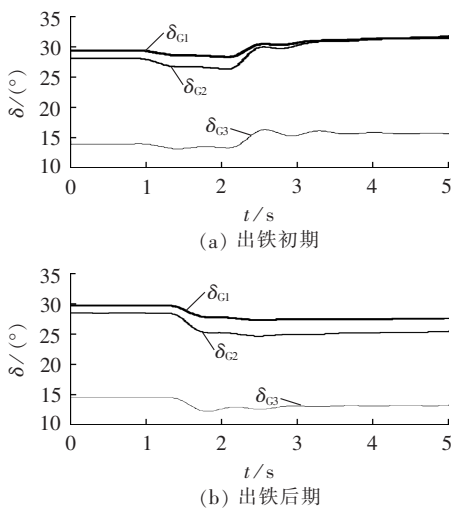


图 11 3 台发电机的功角曲线

Fig.11 Angle curves of three generators

5 结论

本文基于电网实测动态数据分析了硅铁特殊电力负荷的生产特点和自变特性,借助 PSASP 中的 UPI 功能,采取实测时变电流注入的方法建立了该特殊电力负荷的模型。实测电流注入的方法可以应用于特殊负荷对局部电网的动态影响分析,建模方式思路简明,建模的结果也更为客观实际。该建模方法亦可推广至其他特殊电力负荷的建模。基于实测时变电流注入的特殊负荷建模方法,后续将会进一步深入研究大型冶炼特殊冲击负荷对局部电网及机组功率振荡等的影响。

参考文献:

[1] 鞠平,秦川,黄桦,等. 面向智能电网的建模研究展望[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):1-6.
JU Ping,QIN Chuan,HUANG Hua,et al. Research trends of power system modeling geared to smart grid[J]. Automation of

Electric Power Systems,2012,36(11):1-6.

- [2] 高超,程浩忠,李宏仲,等. 大容量冲击负荷对地区电网暂态稳定性的影响[J]. 电网技术,2008,32(1):31-35.
GAO Chao,CHENG Haozhong,LI Hongzhong,et al. Influence of high-capacity impact loads on transient stability of regional power system[J]. Power System Technology,2008,32(1):31-35.
- [3] 刘小河. 电弧炉电气系统的模型、谐波分析及电极调节系统自适应控制的研究[D]. 西安:西安理工大学,2000.
LIU Xiaohu. Research on model and harmonic analysis of arc furnace electric power system,and adaptive control of electrode regulator system of arc furnace[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2000.
- [4] WU C J,YEN S S,CHANG W N,et al. Enhancement of static excitation system performance for generators near electric arc furnace loads[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1999,14(2):225-231.
- [5] FU W H,MCCALLEY J D,VITTAL V. Risk assessment for transformer loading[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2001,16(3):346-353.
- [6] 顾丹珍,艾芊,陈陈,等. 冲击负荷实用建模新方法[J]. 电力系统自动化,2006,30(20):10-14.
GU Danzhen,AI Qian,CHEN Chen,et al. A general modeling method for the impact load[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(20):10-14.
- [7] 周利军,吴广宁. 牵引负荷对变压器绝缘老化和寿命损失的影响[J]. 电力系统自动化,2005,29(18):90-93.
ZHOU Lijun,WU Guangning. Effect of traction loads on insulation aging and loss-of-life of transformers[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(18):90-93.
- [8] 周孝信. 研究开发面向 21 世纪的电力系统技术[J]. 电网技术,1997,21(11):11-15.
ZHOU Xiaoxin. To develop power system technology suitable to the need in 21st century[J]. Power System Technology,1997,21(11):11-15.
- [9] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化,2002,26(17):66-70.
TANG Yong. Present situation and development of power system simulation technologies[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(17):66-70.
- [10] 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. Effect of induction motor model structure and parameters on simulating computation of electric power system transient stability[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(8):29-33.
- [11] 鞠平,汤涌,沈伟伟,等. 带理想变压器的综合负荷模型[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):1-5.
JU Ping,TANG Yong,SHEN Weiwei,et al. Synthesis load model with ideal transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):1-5.
- [12] 李培强,李欣然,陈凤,等. 模糊聚类在统计综合法负荷建模中的应用[J]. 电力自动化设备,2003,23(5):43-45.
LI Peiqiang,LI Xinran,CHEN Feng,et al. Application of fuzzy clustering in component-based modeling approach[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(5):43-45.
- [13] 仲卫进,艾芊. 扩展卡尔曼滤波在动态负荷参数辨识中应用[J].

- 电力自动化设备,2007,27(2):47-50.
- ZHONG Weijin,AI Qian. Application of extended Kalman filter in parameter identification of dynamic load model[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(2):47-50.
- [14] 黄其新,孙黎霞,甄威,等. 同步发电机参数辨识的蚁群算法及扰动分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):50-53.
- HUANG Qixin,SUN Lixia,ZHEN Wei,et al. Ant colony optimization algorithm and disturbance analysis of synchronous generator parameter identification[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):50-53.
- [15] 鞠平,王耀,项丽,等. 考虑特殊负荷的宁夏电网负荷建模[J]. 电力自动化设备,2012,32(8):1-4,21.
- JU Ping,WANG Yao,XIANG Li,et al. Load modeling for Ningxia Grid with special loads[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(8):1-4,21.
- [16] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010:1-2.
- [17] 李志强,韩志勇,安宁. 体现轧机功率需求主动性的周期性冲击负荷模型[J]. 电网技术,2011,35(12):72-76.
- LI Zhiqiang,HAN Zhiyong,AN Ning. A periodic shock load model incarnating power demand initiative of rolling mill[J]. Power System Technology,2011,35(12):72-76.
- [18] 王丰华. 电弧炉建模研究及其应用[D]. 上海:上海交通大学,2006.
- WANG Fenghua. Study of modeling the electric ARC furnace and its application[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2006.
- [19] OZGUN O. Flicker study using a novel arc furnace model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2002,17(4):1158-1163.
- [20] 李春德. 铁合金冶金学[M]. 3版. 北京:冶金工业出版社,2001:24-25.
- [21] 汤涌,贺仁睦,鞠平,等. 电力受端系统的动态特性及安全性评价[M]. 北京:清华大学出版社,2010:200-202.
- [22] 杨超平,贺文,张慧玲,等. 宁夏电网安全稳定分析负荷建模[J]. 电力系统自动化,2007,31(7):104-107.
- YANG Chaoping,HE Wen,ZHANG Huiling,et al. Load modeling for Ningxia Power Grid security and stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(7):104-107.

作者简介:



陈大宣

陈大宣(1989-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统负荷建模(E-mail:cdxhhu@163.com);

余一平(1977-),男,浙江衢州人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统建模与控制(E-mail:yyiping@hhu.edu.cn);

鞠平(1962-),男,江苏靖江人,副校长,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统建模与控制(E-mail:pju@hhu.edu.cn)。

Modeling of special power load based on time-varying current injection method

CHEN Daxuan¹,YU Yiping¹,JU Ping¹,HUANG Yongning²,ZHANG Shuang²

(1. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 210098,China;

2. Ningxia Electric Power Research Institute,Yinchuan 750011,China)

Abstract: As special power load exerts large impact on the stability of power system,the power quality and the safety of power equipment,its suitable modeling is essential in power system analysis. With the measured data of ferrosilicon load as an example,the self-varying characteristics of special power load are analyzed. Based on the UPI function of PSASP and user program,the time-varying current injection method is adopted in the modeling of special power load,which represents different electrical characteristics of load in the form of injection currents by circuit calculation. The model of the ferrosilicon load of a region in Ningxia is built according to its measured data,the comparison between simulative curves and measured data verifies the effectiveness and feasibility of the established model.

Key words: special load; model buildings; measured data; time-varying current injection; electric loads