

考虑配电网络的综合负荷模型

汤涌, 张红斌, 侯俊贤, 张东霞

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100085)

A Synthesis Load Model with Distribution Network

TANG Yong, ZHANG Hong-bin, HOU Jun-xian, ZHANG Dong-xia

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: The load models for power system simulation in the different power utilities are introduced. The structures of these load models and their implementations in power system simulation programs are analyzed, and the insufficiencies of the existing load models are pointed out. Based on the analysis of the existing load models, a synthesis load model (SLM) with distribution network, which is consistent with the structure of power substation loads, is presented. The SLM is reasonable in structure and convenient in use. SLM can simulate the load components and distribution system including distribution network, var compensation and the generators connected to low voltage networks. The validity of SLM is validated by four field tests of three-phase short circuit in Northeast Power Grid of China in the years of 2004 and 2005 respectively.

KEY WORDS: synthesis load model; power system; simulation; distribution network

摘要: 介绍了电力系统稳定计算分析程序中常用的负荷模型, 分析了上述负荷模型的结构及其在电力系统计算分析程序中的实现过程, 指出了上述负荷模型的不足。根据变电站负荷的实际构成, 提出了物理意义明确的综合负荷模型。该模型物理结构合理, 可操作性强, 可方便地模拟负荷元件和包括配电网络、无功补偿系统和接入低压电网的发电机的供电系统。2004年和2005年东北电网的4次三相短路试验验证了该综合负荷模型的有效性。

关键词: 综合负荷模型; 电力系统; 仿真; 配电网

0 引言

目前, 电力系统数字仿真已成为电力系统规划设计、调度运行和分析研究的主要工具。电力系统各元件的数学模型及其构成的系统数学模型是进

行电力系统数字仿真实验的基础。负荷模型的准确与否直接影响电力系统的数字仿真结果和最终的决策方案。我国互联电网发展所呈现的特点为: 电网结构日趋复杂、同步交流联接电网为长距离链型的电网结构、交直流并联的西电东送通道和大规模受端负荷中心电网逐步形成等。因此电网动态稳定和电压稳定等问题日益突出, 负荷模型和参数对系统稳定性的影响受到了专家学者的普遍关注^[1-8]。

本文将介绍国内外电力系统计算分析程序中常用的负荷模型, 分析现有负荷模型及其在电力系统计算分析程序中的实现过程, 指出现有负荷模型的不足, 根据变电站负荷的实际构成情况提出物理意义明确的考虑配电网络的综合负荷模型(synthesis load model, SLM), 并通过2004年和2005年东北电网的4次三相短路试验验证SLM的有效性。

1 电力系统计算分析中常用的负荷模型

1.1 我国电网常用的负荷模型

目前我国各电网、各部门在电力系统计算分析程序中采用的负荷模型如下^[9]:

(1) 规划设计部门中, 除西北设计院采用动态负荷模型外, 我国其余电网的规划设计部门均采用静态负荷模型, 其中南方电网采用恒电流+恒功率+恒阻抗模型, 其它电网均采用恒阻抗+恒功率模型, 华东、川渝、福建和华北电网的规划设计部门所采用的负荷模型没有考虑负荷的频率特性, 山东、东北、南方和华中电网的规划设计部门所采用的负荷模型考虑了负荷的频率特性。

(2) 调度运行部门中, 华北、华中、东北和西北电网的电力调度部门在进行电力系统计算分析时, 选用恒阻抗+电动机的动态负荷模型, 其中电动机模型在整个负荷模型中的比例为40%~65%。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50595412); 国家电网公司科技项目(SGKJ[2003]283)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50595412).

华东和南方电网的电力调度部门在进行电力系统计算分析时,选用不考虑负荷频率特性的静态负荷模型,其中华东电网采用恒阻抗+恒功率负荷模型,南方电网采用恒电流+恒功率+恒阻抗负荷模型。

1.2 国外电网常用的负荷模型

1.2.1 美国WSCC推荐的负荷模型

在对美国西部电网 1996 年和 2000 年的电网事故进行仿真拟合的基础上,美国 WSCC(western systems coordinating council)对原有负荷模型进行了改进^[10-11],要求接入高压母线负荷中的电动机在整个负荷模型中的比例为 20%~30%。WSCC 推荐的典型电动机参数见表 1。表中: R_a 为定子电阻; L_l 为定子漏感; L_m 为激磁电感; L_s 为同步电感; R_2 为转子电阻; L_2 为转子漏感; H 为惯性常数(包括电动机和负载的惯性); T_0' 为转子暂态时间常数; L' 为电动机暂态电感; D 为反映电动机负载速度特性的负载特性指数。

1.2.2 加拿大安达略水电局推荐的负荷模型

加拿大安达略水电局给出了进行电力系统离线计算分析的负荷模型,其中有功负荷采用 50%恒

定阻抗+50%恒定电流的负荷模型,无功负荷采用 100%恒定阻抗的负荷模型。同时要求对于对负荷模型较敏感的电网,应采用更详细的暂态负荷模型。

1.2.3 日本电气学会推荐的标准负荷模型

文献[11]给出了日本电气学会推荐的标准负荷模型:当有功负荷的电压在 1.0 pu 附近时,采用恒定电流的负荷模型;当有功负荷的电压低于某设定值(一般为 0.7 pu)时,采用恒定阻抗的负荷模型;无功负荷则采用 100%恒定阻抗的数学模型。

1.2.4 IEEE 推荐的负荷模型

IEEE 负荷模型工作组于 1995 年提出了标准的负荷模型^[12]。其静态模型适应性强,在实际应用中可根据具体情况由该模型的重要项派生出若干实用模型。

IEEE 负荷模型工作组推荐的感应电动机负荷模型参数如表 2 所示。表中: R_s 、 x_{s0} 、 x_m 、 R_r 、 x_{r0} 和 T_j 分别表示电动机定子电阻、定子漏抗、激磁电抗、转子电阻、转子电抗和惯性时间常数; A 和 B 为电动机的机械转矩系数; L_{fm} 为电动机的负载率,即电动机负荷与电动机额定容量的比值。

表1 WSCC推荐的典型电动机参数

Tab. 1 Typical induction motor data recommended by WSCC

参数	缺省值	大型工业电动机	小型工业电动机	参数	缺省值	大型工业电动机	小型工业电动机
R_a /pu	0.006 8	0.013 0	0.031 0	L_2 /pu	0.070 0	0.170 0	0.180 0
L_l /pu	0.100 0	0.067 0	0.100 0	H /(MW·s/MVA)	0.500 0	1.500 0	0.700 0
L_m /pu	3.400 0	3.800 0	3.200 0	T_0' /s	0.530 0	1.170 0	0.500 0
L_s /pu	3.500 0	3.870 0	3.300 0	L' /pu	0.170 0	0.230 0	0.270 0
R_2 /pu	0.018 0	0.009 0	0.018 0	D /pu	2.000 0	2.000 0	2.000 0

表2 IEEE 负荷建模工作组推荐的电动机模型参数

Tab. 2 Typical induction motor data recommended by IEEE load modeling task force

负荷类型	模 型				参 数			
	R_s /pu	x_{s0} /pu	x_m /pu	R_r /pu	x_{r0} /pu	A	B	T_j /s
工业小电动机	0.031 0	0.100 0	3.200 0	0.018 0	0.180 0	1.0	0	0.700 0
工业大电动机	0.013 0	0.067 0	3.800 0	0.009 0	0.170 0	1.0	0	1.500 0
水泵	0.013 0	0.140 0	2.400 0	0.009 0	0.120 0	1.0	0	0.800 0
厂用电	0.013 0	0.140 0	2.400 0	0.009 0	0.120 0	1.0	0	1.500 0
民用综合电动机	0.077 0	0.107 0	2.220 0	0.079 0	0.098 0	1.0	0	0.740 0
民用和工业综合电动机	0.035 0	0.094 0	2.800 0	0.048 0	0.163 0	1.0	0	0.930 0
空调综合电动机	0.064 0	0.091 0	2.230 0	0.059 0	0.071 0	0.2	0	0.340 0

2 现有负荷模型的不足

目前我国常用的负荷模型结构^[13-16]如图 1 所示。该负荷模型的输入数据包括感应电动机参数、配电网等值阻抗并入电动机的定子电阻和电抗及其在负荷总有功功率 P_L 和负荷总无功功率 Q_L 中的占比、静态负荷分量在负荷静态有功功率 P_{static} 和负荷静态无功功率 Q_{static} 中的占比。当不考虑感应电动机时,该负荷模型为恒阻抗+恒电流+恒功

率的静态负荷模型;当考虑感应电动机时,该负荷模型为动态负荷模型。对于动态负荷模型,计算程序通过初始化感应电动机方程得到感应电动机吸收的初始无功功率 Q_{IM0} ,从而得到静态负荷的有功功率和无功功率,即

$$\begin{cases} P_{static} = P_L - P_{IM0} = P_{Z0} + P_{I0} + P_{P0} \\ Q_{static} = Q_L - Q_{IM0} = Q_{Z0} + Q_{I0} + Q_{P0} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{IM0} 为感应电动机的负荷功率; P_{Z0} 、 P_{I0} 和

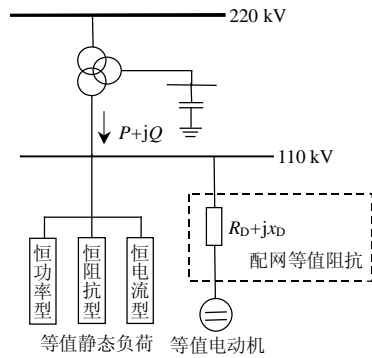


图1 现有负荷模型的结构

Fig. 1 The structure of exiting load model

P_{p0} 分别为静态恒定阻抗有功负荷、静态恒定电流有功负荷和静态恒定功率有功负荷; Q_{z0} 、 Q_{i0} 和 Q_{p0} 分别为静态恒定阻抗无功负荷、静态恒定电流无功负荷和静态恒定功率无功负荷。

通过对现有负荷模型结构及其在电力系统计算程序中的实现方法的分析, 本文认为现有负荷模型存在以下不足: ①现有负荷模型的静态部分没有考虑配电系统阻抗的影响。在等值负荷模型中, 等值电动机和静态负荷均应考虑配电系统的等值阻抗。受负荷非线性的影响, 采用现有的数学方法无法将静态负荷从配电网中等效移出。②现有负荷模型的电动机定子电抗中没有考虑配电网无功补偿和静态负荷的影响, 在此条件下将配电系统等值阻抗直接与等值电动机的定子阻抗合并是可行的。但是由于不考虑配电网无功补偿的影响, 上述等值方法会增加配电网等值阻抗的电压降, 恶化电动机的运行条件。③现有负荷模型静态部分的无功功率一般包括恒电流和恒功率 2 部分, 因此可能将静态无功负荷等效成负值, 即无功电源, 而使模型失真。

由现有负荷模型的初始化计算结果可知, 当等值电动机吸收的无功功率大于系统向负荷提供的无功功率时, 静态负荷的无功功率为负值, 因此将现有负荷模型的恒定阻抗部分等效成无功补偿是合理的。对于现有负荷模型的恒定电流和恒定功率部分, 可将其等效为无功电源, 从而大幅度提高系统的稳定水平。但由于实际系统中并不存在这样的无功电源, 这种等效是不合理的。

3 综合负荷模型

3.1 220 kV 变电站的供电系统

在电力系统仿真计算程序中, 负荷一般接在 220 kV 变电站的 220 kV 或 110 kV 母线侧。但电动机负荷、照明和生活用电负荷都不可能由 220 kV 或

110 kV 母线直接供电, 因此在负荷模型中考虑配电网的影响是必要的。220 kV 变电站的供电系统接线示意图见图 2。

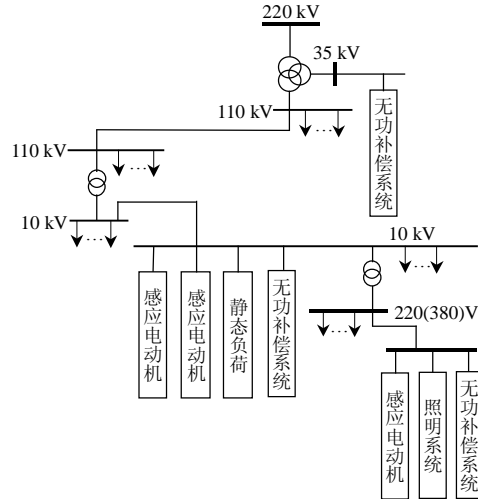


图2 220 kV 变电站的供电系统示意图

Fig. 2 A structure sketch map of 220 kV substation

3.2 综合负荷模型的结构

本文提出的考虑配电网的综合负荷模型的等值电路如图 3 所示。

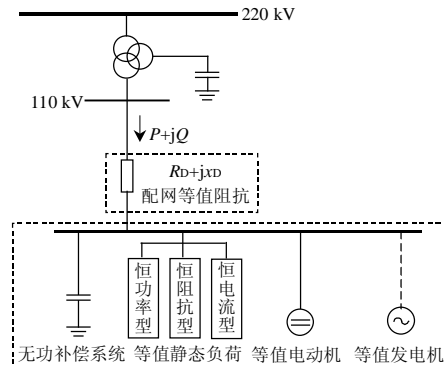


图3 配电网综合负荷模型的等值电路

Fig. 3 The equivalent circuit of synthesis load model with distribution network

该负荷模型的输入数据包括感应电动机参数及其在 P_L 中的占比、静态负荷分量在 P_{static} 和 Q_{static} 中的占比、静态负荷的功率因数 h_{pfac} 、以等值支路初始负荷容量为基准功率得到的配电网等值阻抗 (标么值)、等值发电机输出的有功功率 P_G 和无功功率 Q_G 、由发电机卡给出的机组参数和励磁调速系统参数。

3.3 SLM 在程序实现过程的初始化步骤

PSD-BPA 电力系统暂态稳定程序中的 SLM 初始化步骤如下:

(1) 根据潮流计算得到的负荷功率、等值发电

机的出力和配电网等值阻抗的损耗得到负荷的初始功率

$$\begin{cases} P_L = P_0 + P_G - P_{D0} \\ Q_L = Q_0 + Q_G - Q_{D0} \end{cases} \quad (2)$$

式中 P_{D0} 和 Q_{D0} 分别为配电网等值阻抗的有功损耗和无功损耗。

(2) 分别按感应电动机参数、静态负荷和发电机参数初始化导纳矩阵。

(3) 求出负荷母线电压

$$\dot{U}_{L0} = \dot{U}_{S0} - \frac{P_0 - jQ_0}{\dot{U}_{S0}^*} (R_D + jx_D) \quad (3)$$

式中: \dot{U}_{S0} 为系统母线电压; \dot{U}_{S0}^* 为系统母线电压的共轭。如果 $|\dot{U}_{S0} - \dot{U}_{L0}| > 5\%$, 系统给出警告信息。

(4) 求出配电网等值阻抗的功率损耗

$$P_{D0} + jQ_{D0} = \frac{P_0^2 + Q_0^2}{U_{S0}^2} (R_D + jx_D) \quad (4)$$

(5) 根据感应电动机的部分初始化参数得到 Q_{IM0} 。

(6) 求出负荷静态有功功率和负荷静态无功功率

$$\begin{cases} P_{static} = P_L - P_{IM0} = P_{Z0} + P_{I0} + P_{P0} \\ Q_{static} = P_{static} \cdot \tan \varphi = Q_{Z0} + Q_{I0} + Q_{P0} \end{cases} \quad (5)$$

式中 j 为静态负荷的功率因数角, $j = \cos^{-1}(h_{pfac})$ 。

(7) 根据负荷功率平衡式(6)检查有功功率平衡, 并求出静止无功补偿的补偿容量 Q_{SC0}

$$\begin{cases} 0 = P_0 - P_{D0} - (P_{IM0} + P_{Z0} + P_{I0} + P_{P0} - P_{G0}) \\ -Q_{SC0} = Q_0 - Q_{D0} - (Q_{IM0} + Q_{Z0} + Q_{I0} + Q_{P0} - Q_{G0}) \end{cases} \quad (6)$$

如果计算出的 Q_{SC0} 为正值, 系统将给出警告信息。

(8) 初始化等值发电机。

3.4 综合负荷模型的特点

与传统负荷模型相比, SLM 可较完整地模拟负荷和配电系统, 在稳定计算程序中的实现采用迭代求解方法, 计算量增加很少。SLM 的特点如下: ①静态负荷和电动机负荷都可以考虑配电系统阻抗的影响。对配电系统采用阻抗模拟方法, 保证了模型结构更符合实际配电系统和用电负荷的关系。可以采用适当的等值方法, 得到较准确的配电系统等值阻抗^[16]。②模拟了配电系统的无功补偿。配电网和电力用户都配置了大量的无功补偿装置, 其动态特性对系统的稳定性具有重要影响, 应该进行详细模拟, SLM 为配电系统无功补偿的模型提供了有效的模拟方法。③可以方便地考虑配电系统的小机

组。在电力系统仿真分析(特别是扰动试验和事故分析)中, 有时需要考虑接入配电网的小机组, 综合模型结构中包含了小机组, 可以使小机组的模拟更加方便。④静态无功负荷不会出现负的恒定电流和恒定功率。负荷功率因数的引入, 保证了静态负荷无功部分不会出现负的恒定电流和负的恒定功率, 使模型更符合实际。

4 结论

(1) 本文提出的 SLM 较好地弥补了现有负荷模型的不足, 其物理结构合理, 可操作性强, 可方便地模拟包括配电网、无功补偿系统和接入低压电网的发电机系统的供电系统。

(2) 采用 SLM 对东北电网 2004 年和 2005 年的 4 次三相短路试验进行仿真计算, 结果表明采用该 SLM 得到的仿真曲线与东北电网 4 次大扰动试验的实测曲线基本吻合, 验证了该 SLM 的准确性和有效性^[17]。

(3) 今后可基于 SLM 进一步开展综合负荷模型的推广应用和配电网等值、低压网络小发电机组等值、电动机负荷的聚合、负荷模型参数的选配原则等研究工作, 并对 SLM 在全国联网系统的适应性进行研究。

参考文献

- [1] 汤涌, 候俊贤, 刘文焯. 电力系统数字仿真负荷模型中配电网及无功补偿与感应电动机的模拟[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 8-12.
Tang Yong, Hou Junxian, Liu Wenzhuo. The modeling of distribution network and var compensator and induction motor in the load model for power system digital simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 8-12(in Chinese).
- [2] 顾丹珍, 艾芊, 陈陈, 等. 适用于快速暂态稳定计算的新型负荷模型和参数辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 78-84.
Gu Danzhen, Ai Qian, Chen Chen, et al. New load models for fast transient stability calculations and parameter identification method [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 78-84(in Chinese).
- [3] 李欣然, 贺仁睦, 周文. 一种具有全电压范围适应性的综合负荷模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 71-75.
Li Xinran, He Renmu, Zhou Wen. Synthetic load model suiting for voltage stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 71-75(in Chinese).
- [4] 汤涌, 宋新立, 刘文焯, 等. 电力系统全过程动态仿真的数值方法——电力系统全过程动态仿真软件开发之一[J]. 电网技术, 2002, 26(9): 7-13.
Tang Yong, Song Lixin, Liu Wenzhuo, et al. Power system full dynamic simulation—part I: numerical method[J]. Power System Technology, 2002, 26(9): 7-13(in Chinese).
- [5] 吴红斌, 丁明, 李生虎, 等. 发电机和负荷模型对暂态稳定性影响的概率分析[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 19-21.

- Wu Hongbin, Ding Ming, Li Shenghu, et al. Probabilistic analysis on influences of generator model and load model on transient stability[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 19-21(in Chinese).
- [6] 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(in Chinese).
- [7] 孙华东, 周孝信, 李若梅, 等. 感应电动机负荷参数对电力系统暂态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 1-6.
- Sun Huadong, Zhou Xiaoxin, Li Ruomei, et al. Influence of induction motor load parameters on power system transient voltage stability[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 1-6(in Chinese).
- [8] 张东霞, 汤涌, 朱方, 等. 接于高压母线的电动机负荷等值模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 14-18.
- Zhang Dongxia, Tang Yong, Zhu Fang, et al. Equivalent model for induction-motor load connected to high voltage bus[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 14-18(in Chinese).
- [9] 张东霞, 汤涌, 张红斌, 等. 负荷模型应用和研究调查报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004
- [10] Les Pereira, Dmitry Kosterev, Peter Makin, et al. An interim dynamic induction motor model for stability studies in the WSCC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002: 17(4).
- [11] 日本電気学会電力系統モデル標準化調査専門委員会. 電力系統の標準モデル[S]. 電気学会技術報告(第754号), 1999.
- [12] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995.
- [13] PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [14] PSASP 电力系统分析综合程序用户手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [15] 汤涌. 近期东北—华北—华中同步互联系统仿真计算中电动机参数选取的建议[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [16] 张红斌, 汤涌, 张东霞, 等. 考虑配电网的感应电动机负荷模型聚合方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 1-4.
- Zhang hongbin, Tang yong, Zhang dongxia, et al. Study on aggregation of induction motors with distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 1-4(in Chinese).
- [17] 汤涌, 张东霞, 朱方, 等. 东北电网大扰动试验仿真分析研究报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.

收稿日期: 2007-01-10。

作者简介:

汤涌(1959—), 男, 工学博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事电力系统分析软件开发和电力系统分析工程等工作, E-mail: tangyong@epri.ac.cn;

张红斌(1969—), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要从事电力系统分析和负荷建模等方面的工作;

侯俊贤(1978—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事电力系统分析、控制和软件研发等方面的工作;

张东霞(1964—), 女, 工学博士, 高级工程师, 主要从事电力系统分析与控制等方面的工作。

(编辑 杜宁)

(上接第 20 页 continued from page 20)

- [3] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1302-1313.
- [4] 马进, 贺仁睦, 周彦军. 负荷模型泛化能力的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 29-35.
- Ma Jin, He Renmu, Zhou Yanjun. Research on generalization capability of load model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 29-35(in Chinese).
- [5] 顾丹珍, 艾芊, 陈陈, 等. 适用于快速暂态稳定计算的新型负荷模型和参数辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 78-85.
- Gu Danzhen, Ai Qian, Chen Chen, et al. New load models for fast transient stability calculations and parameter identification method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 78-85(in Chinese).
- [6] 国家电网公司. 国家电网公司电力系统稳定计算规定[Z]. 北京: 国家电网公司, 2006.
- [7] 阿扎里也夫 Д И. 电力系统的数字模拟[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965.
- [8] 汤涌. 东北—华北—华中(川渝)同步互联电网 2005 年运行方式计算中模型与参数选择的分析与建议[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [9] 石景海, 贺仁睦. 基于量测的负荷建模—分类算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 78-82.
- Shi Jinghai, He Renmu. Measurement-based load modeling-sorting algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 78-82(in Chinese).
- [10] 鞠平, 金艳, 吴峰, 等. 综合负荷特性的分类综合方法及其应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 64-68.
- Ju Ping, Jin Yan, Wu Feng, et al. Studies on classification and synthesis of composite dynamic loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 64-68(in Chinese).
- [11] 杨华春, 贺仁睦, 王鹏, 等. 基于聚合理论的大区电网负荷建模[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 53-56.
- Yang Huachun, He Renmu, Wang Peng, et al. Load-modeling in large-scale grid based on the aggregation theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 53-56(in Chinese).
- [12] 贺仁睦, 魏孝铭, 韩民晓. 电力负荷特性实测建模的外推和内插[J]. 中国电机工程学报, 1996, 19(3): 151-154.
- He Renmu, Wei Xiaoming, Han Mingxiao. Power system dynamic load modeling based on the measurements in the field[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 19(3): 151-154(in Chinese).
- [13] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [14] 吴中习, 郭剑. 电力系统分析综合程序用户手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004.

收稿日期: 2007-01-15。

作者简介:

李勇(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电网安全稳定计算和管理工作;

徐友平(1971—), 男, 本科, 高级工程师, 从事电网安全稳定计算和安全自动装置管理工作;

肖华(1966—), 男, 本科, 高级工程师, 从事电网安全稳定计算分析工作;

姜文立(1962—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电网安全稳定计算分析和稳定计算参数管理工作。

(责任编辑 马晓华)