

考虑频率特性的感应电动机负荷模型的对比研究

梁伟, 鞠平, 余一平

(河海大学能源与电气学院, 可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 以往主要研究负荷的电压特性, 很少研究频率特性。而在小电网或者薄弱电网频率可能有明显变化, 所以需要研究电力负荷的频率特性。给出考虑频率特性的五阶电动机负荷模型和新三阶实用电动机负荷模型, 提出两种负荷模型的参数辨识方法, 通过蚁群算法辨识其中的重点参数。结合仿真算例, 分别对比考虑和不考虑频率变化时的五阶电动机负荷模型、新三阶实用电动机负荷模型, 还对比了两种负荷模型。根据新疆电网的实际扰动数据, 对考虑频率特性的必要性进行了校验, 结果表明, 考虑频率特性所得参数辨识结果更精确、拟合效果更好, 考虑频率特性时五阶电动机负荷模型效果更好。

关键词: 电力系统; 频率特性; 负荷模型; 感应电动机; Park 负荷模型; 实用负荷模型; 参数辨识

Comparative study of the induction motor load models with and without considering frequency characteristics

LIANG Wei, JU Ping, YU Yi-ping

(Research Center for Renewable Energy Generation Engineering of Ministry of Education, College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Previous studies mostly focused the voltage characteristics of load rather than the frequency characteristics. The frequency may vary obviously in the small or weak power grid, so the frequency characteristics should be studied. The fifth-order induction motor load model and the new third-order practical induction motor load model are given. A method for load parameter estimation is proposed, i.e. estimating the key load parameters through ant colony optimization (ACO). In a simulation case, the identification results of two load models are compared with and without considering frequency characteristics. Finally, the measured data under a disturbance in Xinjiang Power Grid are used to validate the necessity of considering frequency characteristics. It is indicated that the load parameter estimation and simulation results with considering frequency characteristics are better than that without considering frequency characteristics, and the fifth-order induction motor load model is better than the new third-order practical induction motor load model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51137002 and No. 51190102), National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A103), and State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid (No. SGCC-MPLG001 (001-031)-2012).

Key words: power system; frequency characteristics; electric load model; induction motor; Park load model; practical load model; parameter estimation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)09-0132-07

0 引言

大量的事故分析和试验结果^[1-5]表明, 电力负荷模型, 作为电力系统仿真计算的重要组成部分, 对电力系统的潮流计算、动态计算、稳定计算和电力

系统安全分析等均有一定的影响。然而, 由于电力负荷具有时变性、分散性、随机性和多样性等特点, 建立精确的电力负荷模型是有一定的难度的, 所以实际仿真系统中的负荷模型均是对实际负荷的简化。

近年来, 国内外的学者针对电力负荷建模的研究取得了不少新进展, 文献[6-13]对此进行了详细的介绍。其中, 综合负荷模型在电力工程中得到了广泛的应用。

在实际互联的电网系统中, 一般来讲, 电压的波动较大, 而频率的波动很小以至可以忽略不计。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51137002, 51190102); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2011AA05A103); 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题 (SGCC-MPLG001 (001-031)-2012)

因此以往的电力负荷建模和仿真中, 一般不考虑负荷的频率特性, 只考虑电压特性。然而随着可再生能源发电的大量接入, 其功率波动有可能会影响频率。此外, 在一些薄弱电网或者孤立的微电网中, 当大的负荷投切或者系统出现大扰动时, 系统频率有可能发生明显变化。所以, 考虑频率特性的负荷建模研究是很有必要的。

本文通过仿真算例, 对比分析两种模型(即五阶电动机负荷模型和新三阶实用电动机负荷模型)在两种情况(即考虑频率特性和不考虑频率特性)下的辨识结果。而且结合新疆电网的实测扰动数据, 进行了实际应用和校验。

1 考虑频率特性的综合负荷模型

综合负荷模型由静态负荷和感应电动机负荷并联组成, 其中感应电动机可以采用详细的 Park 模型或者简化的实用模型。

感应电动机的 Park 模型为五阶, 由磁链方程和转子运动方程组成^[14-15]。

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{ds}}{dt} = -R_s i_{ds} + \omega \psi_{qs} + u_{ds} \\ \frac{d\psi_{qs}}{dt} = -R_s i_{qs} - \omega \psi_{ds} + u_{qs} \\ \frac{d\psi_{dr}}{dt} = -R_r i_{dr} + (\omega - \omega_r) \psi_{qr} \\ \frac{d\psi_{qr}}{dt} = -R_r i_{qr} - (\omega - \omega_r) \psi_{dr} \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{T_j} (T_e - T_m) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \end{cases} \quad (2)$$

其中: ψ_{ds} 、 ψ_{qs} 分别为定子的直轴磁链和交轴磁链; ψ_{dr} 、 ψ_{qr} 分别为转子的直轴磁链和交轴磁链。

另一方面, 实用模型在工程中得到广泛应用。而传统的实用电动机模型实际上忽略了频率的导数项, 从而产生误差。为此, 文献[16]提出了一种新的三阶感应电动机实用模型。其中, 新的实用变量定义为

$$\begin{cases} E'_d = -\frac{L_m}{L_r + L_m} \psi_{qr}, \quad E'_q = \frac{L_m}{L_r + L_m} \psi_{dr} \\ L = L_s + L_m, \quad L' = L_s + L_m - \frac{L_m^2}{L_r + L_m} \\ T'_0 = \frac{L_r + L_m}{R_r} \end{cases} \quad (3)$$

与传统三阶电动机负荷模型相比, 新定义的电动势变量中不包含频率项, 电动势与磁链是线性关系。通过严格推导得到新的三阶实用模型, 其电动势方程为

$$\begin{cases} \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_0} [E'_d + (L - L') i_{qs}] + s \omega E'_q \\ \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_0} [E'_q - (L - L') i_{ds}] - s \omega E'_d \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{T_j} (T_e - T_m) \end{cases} \quad (4)$$

电压方程为

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} - \omega L' i_{qs} + \omega E'_d \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \omega L' i_{ds} + \omega E'_q \end{cases} \quad (5)$$

其中: L 为转子稳态电感; L' 为转子暂态电感; s 为滑差; ω 为转速; T_j 为惯性时间常数; E'_d 为直轴暂态电势; E'_q 为交轴暂态电势; T'_0 为电气暂态时间常数; T_e 为电磁转矩; T_m 为机械转矩。需要说明的是, 上述公式中所有变量和参数都采用了标么值, 而角速度的标么值和频率的标么值是相等的, 即 $\omega = f$ 。

静态负荷方程为

$$\begin{cases} P_s = P_{s0} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{p_u} \left(1 + L_{fp} \frac{(f_0 - f)}{f_0} \right) \\ Q_s = Q_{s0} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{q_u} \left(1 + L_{fq} \frac{(f_0 - f)}{f_0} \right) \end{cases} \quad (6)$$

其中: p_u 和 q_u 分别为有功电压特征系数和无功电压特征系数; L_{fp} 和 L_{fq} 分别为有功频率特征系数和无功频率特征系数; f_0 为额定频率。

2 考虑频率特性综合负荷模型的参数辨识

基于电动机 Park 模型的综合负荷模型的参数有: 定子电感 L_s 、定子电阻 R_s 、转子电感 L_r 、转子电阻 R_r 、激磁电感 L_m 、惯性时间常数 T_j 、转子回路时间常数 T'_0 、初始负载率 K_L 、机械转矩系数 A 、 B 、 C , 感应电动机所占的比例 P_{mp} 。对于考虑频率特性的静态负荷部分有四个参数, 即 p_u , q_u , L_{fp} , L_{fq} 。所以, 共有 16 个待确定的参数, 其中独立参数有 14 个。若同时进行辨识, 一方面计算量较大, 另一方面会影响参数辨识精度, 为此采用辨识重点负荷参数的思路^[17]。

在不同扰动下对综合负荷模型参数的轨迹灵敏度进行分析, 结果表明: 转子电阻 R_s 、惯性时间常数 T_j 、定子电感 L_s 和转子电感 L_r 的轨迹灵敏度均值

较大。但根据文献[18]提出的参数唯一可辨识性分析理论,定转子电感和惯性时间常数是同相位的,不可唯一辨识;转子电阻的灵敏度较大,但频域灵敏度较小,不易辨识。所以,选择灵敏度较大的定子电感 L_s 为重点辨识参数之一。加上对负荷模型影响较大的感应电动机比例 P_{mp} 和初始负载率 K_L ,两个频率特征系数 L_{fp} 和 L_{fq} 。因此,选择重点辨识参数为: $P_{mp}, L_s, K_L, L_{fp}, L_{fq}$ 。

根据实测数据,对重点参数进行辨识。由于负荷模型为非线性模型,所以辨识采用蚁群算法进行优化^[19-20],使误差目标函数最小化,具体参见文献[17],这里不再赘述。

3 仿真算例对比分析

3.1 仿真算例系统

在 Matlab/Simulink 平台上搭建仿真系统,如图 1。仿真系统是由一台同步发电机组和一台异步风力发电机组组成供电端,负荷侧是由恒阻抗负荷和感应电动机负荷并联组成,中间由双回线路来连接送端和受端。

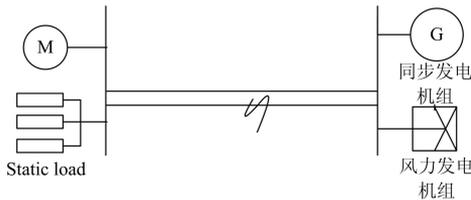


图 1 仿真系统示意图
Fig. 1 Simulation system

在 0.02 s 时,一回线路中间处发生三相短路故障,故障持续时间为 0.1 s,其电压和频率变化如图 2,其中图 2(a)、图 2(b)仿真时间为 1 s、图 2(c)仿真时间为 35 s。由图可见,频率在故障初期有明显下降,然后逐步恢复。以准确模型得到的结果作为“实测值”,据此进行参数辨识。

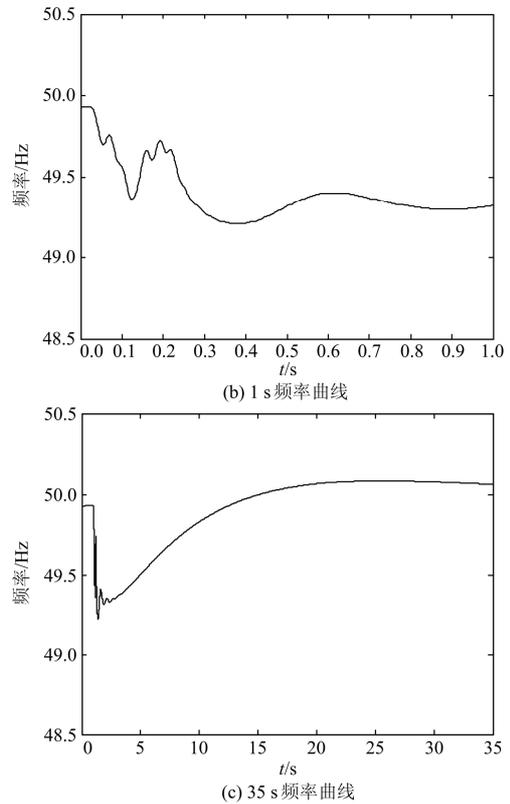
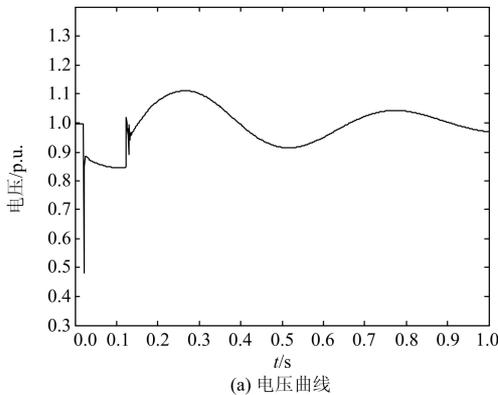


图 2 电压和频率曲线

Fig. 2 Voltage and frequency curves

3.2 五阶电动机负荷模型的对比

综合负荷模型的典型参数设定如表 1。根据实测数据,利用蚁群优化算法辨识重点参数。表 2 列出了五阶电动机负荷模型在考虑频率与否两种情况下的参数辨识结果,其中时间区间取故障后 1 s。经过对比,时间区间取故障后 1 s、3 s、5 s,辨识结果相差无几。

表 1 负荷模型参数设定值

Table 1 Default parameters of composite load model

参数	设定值	参数	设定值	参数	设定值
p_u	2.0	R_r	0.02	A	0.85
q_u	2.0	L_r	0.18	C	0.15
R_s	0.005	L_m	3.5	T_j	2.0

表 2 五阶电动机负荷模型的参数辨识结果

Table 2 Estimated parameters of fifth-order induction motor load model

参数	P_{mp}	L_s	K_L	L_{fp}	L_{fq}	平均偏差
真值	0.743 5	0.180 0	0.746 8	—	—	—
不考虑频率	0.707 8	0.183 6	0.855 4	—	—	7.11%
考虑频率	0.739 5	0.181 9	0.816 6	4.590 4	4.272 9	3.65%

由表 2 中的负荷参数辨识结果可以看出, 重点参数的辨识值均与其真值接近, 考虑频率特性时参数辨识值的偏差明显小于不考虑频率特性时参数辨识值的偏差。

有功功率和无功功率的拟合曲线见图 3 和图 4。定义均方根误差指标为

$$J = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N [(y_{mk} - y_{sk})^2]}{N}} \quad (7)$$

其中: N 为数据点数; y_{mk} 和 y_{sk} 分别为实测量和拟合量。有功功率和无功功率的拟合误差见表 3。从图 3、图 4 和表 3 数据可见, 考虑频率特性负荷模型的拟合误差明显小于不考虑频率特性负荷模型的拟合误差。另外, 当频率变化较为剧烈时, 考虑频率特性的拟合效果要比不考虑频率特性的曲线拟合效果好; 而当频率变化缓慢时, 考虑频率与否相差不大。

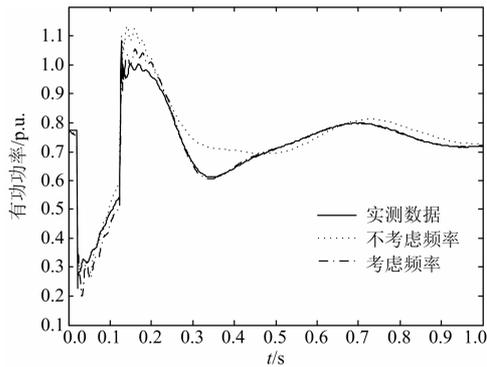


图 3 五阶电动机负荷模型下的有功功率曲线
Fig. 3 Active power curves with the fifth-order induction motor load model

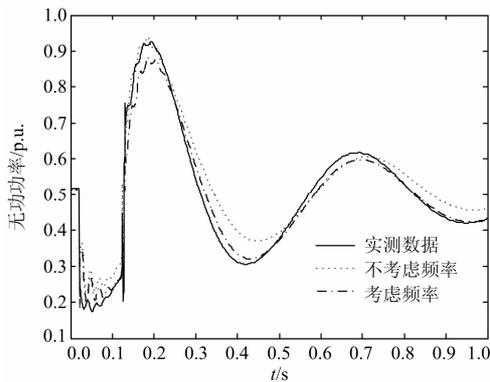


图 4 五阶电动机负荷模型下的无功功率曲线
Fig. 4 Reactive power curves with the fifth-order induction motor load model

表 3 有功功率和无功功率拟合误差

Table 3 Fitting errors of active power and reactive power		
负荷模型类型	有功拟合误差	无功拟合误差
不考虑频率特性	0.047 8	0.048 6
考虑频率特性	0.022 9	0.030 3

3.3 新三阶实用电动机负荷模型的对比

根据同一组实测数据, 采用新实用负荷模型, 在考虑和不考虑频率特性两种情况下进行参数辨识, 结果见表 4。由此可见, 重点参数的辨识值均与其真值接近, 考虑频率特性时参数辨识值的偏差明显小于不考虑频率特性时参数辨识值的偏差。

表 4 新三阶实用电动机负荷模型的参数辨识结果

Table 4 Estimated parameters of the new third-order practical load model						
参数	P_{mp}	L_s	K_L	L_{fp}	L_{fq}	平均偏差
真值	0.743 5	0.180 0	0.746 8	—	—	—
不考虑频率	0.687 8	0.190 2	0.868 8	—	—	9.83%
考虑频率	0.688 3	0.185 6	0.822 7	4.108 9	4.171 2	6.90%

有功功率和无功功率的拟合曲线见图 5 和图 6, 拟合误差见表 5。由此可见考虑频率特性模型的误差小。

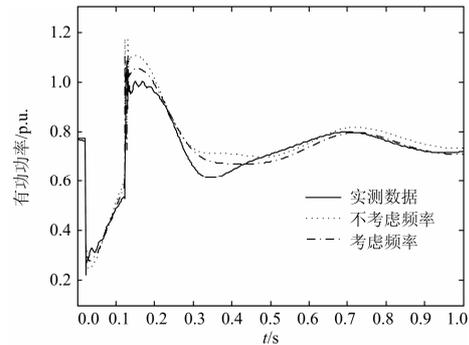


图 5 新三阶实用电动机负荷模型下的有功功率曲线
Fig. 5 Active power curves with the new third-order practical load model

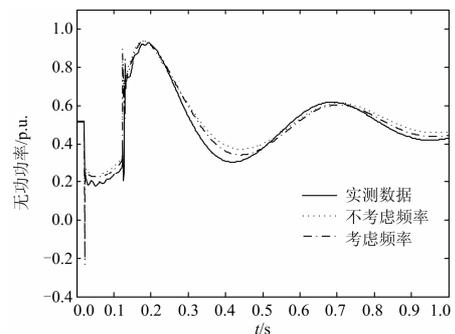


图 6 新三阶实用电动机负荷模型下的无功功率曲线
Fig. 6 Reactive power curves with the new third-order practical load model

表 5 有功功率和无功功率拟合误差

负荷模型类型	有功拟合误差	无功拟合误差
不考虑频率特性	0.051 3	0.055 3
考虑频率特性	0.036 5	0.043 7

3.4 两种负荷模型的对比

对比图 3 和图 5、图 4 和图 6、表 2 和表 4、表 3 和表 5 可见：

(1) 五阶电动机负荷模型的参数辨识偏差小于三阶实用电动机负荷模型；

(2) 五阶电动机负荷模型的拟合误差小于三阶实用电动机负荷模型。

所以，考虑频率特性情况下，推荐采用五阶电动机负荷模型。

4 应用实例对比分析

新疆电网由于区域辽阔而联系薄弱，所以在较严重故障下频率会产生波动。图 7 所示分别为新疆电网北京变在 2006 年 9 月 25 日 0 时 42 分 48 秒实测电压和频率的变化曲线。

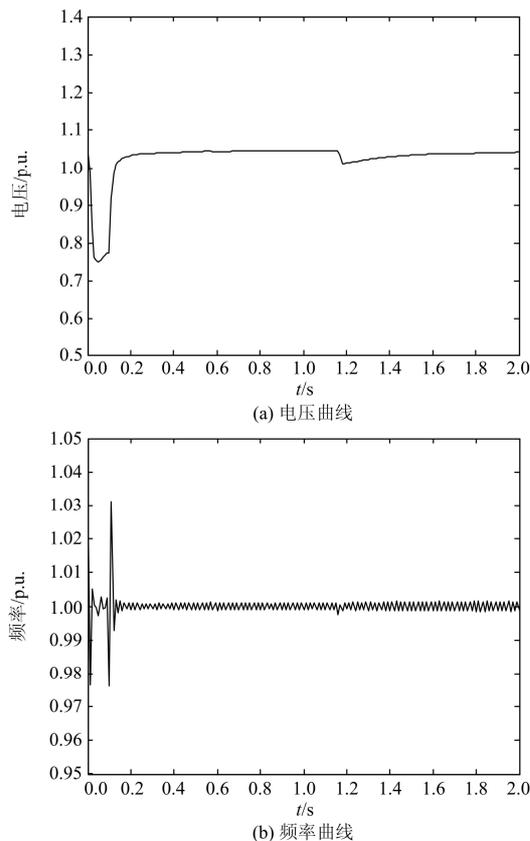


图 7 新疆电网电压和频率扰动曲线

Fig. 7 Recorded voltage and frequency in Xinjiang Power Grid

采用五阶电动机负荷模型，表 6 对比分析了考虑和不考虑频率特性两种情况下的参数辨识结果，图 8 和图 9 分别为有功功率和无功功率的拟合曲线。由此可以看出，考虑频率特性时的有功功率拟合效果明显好于不考虑频率特性；而无功功率的拟合效果相差不多。

表 6 新疆电网北京变的负荷参数辨识结果

Table 6 Estimated parameters of Beijing Substation of Xinjiang Power Grid

负荷模型参数	P_{mp}	L_s	K_L	L_{fp}	L_{fq}
不考虑频率	0.206 9	0.152 0	0.701 2	—	—
考虑频率特性	0.181 5	0.141 8	0.804 9	4.501 9	-0.66 6

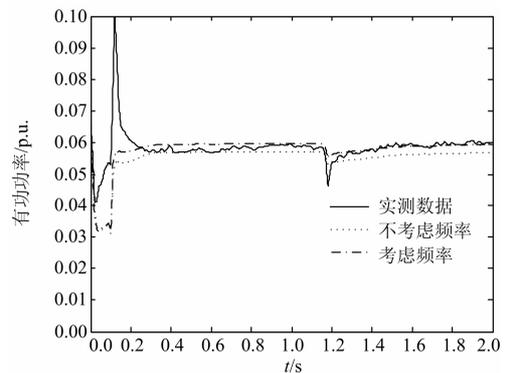


图 8 新疆电网有功功率曲线

Fig. 8 Active power curves in Xinjiang Power Grid

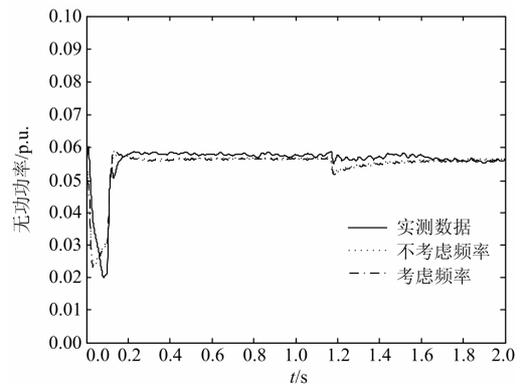


图 9 新疆电网无功功率曲线

Fig. 9 Reactive power curves in Xinjiang Power Grid

5 结论

(1) 对比分析了考虑和不考虑频率特性的 Park 模型，结果表明考虑频率特性所得参数辨识结果更精确、拟合效果更好。

(2) 对比分析了考虑和不考虑频率特性的实用模型，结果同样表明考虑频率特性所得参数辨识结

果更精确、拟合效果更好。

(3) 对比分析了 Park 模型和实用模型, 结果表明 Park 模型所得参数辨识结果更精确、拟合效果更好。

参考文献

- [1] 鹿国起, 张轶, 张焰, 等. 基于二分法的聚类负荷模型及其在电力系统可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 31-36.
LU Guo-qi, ZHANG Yi, ZHANG Yan, et al. Clustering load model based on the dichotomy and its application in power system reliability evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 31-36.
- [2] 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 Xin-ran, CHEN Hui-hua, 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.
- [3] 孙华东, 周孝信, 李若梅. 感应电动机负荷参数及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 Hua-dong, ZHOU Xiao-xin, LI Ruo-mei. Influence of induction motor parameters on power system transient voltage stability[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 1-6.
- [4] 鞠平, 谢会玲, 陈谦. 电力负荷建模研究的发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 1-4.
JU Ping, XIE Hui-ling, CHEN Qian. Research tendencies of electric load modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 1-4.
- [5] 李欣然, 钱军, 王立德, 等. 配电网集结等效的异步电动机综合负荷模型及其总体测辨建模[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 175-184.
LI Xin-ran, QIAN Jun, WANG Li-de, et al. Synthesis induction motor model of power composite load considering distribution network structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 175-184.
- [6] 宋人杰, 李文明. 一种提高静态负荷模型参数辨识精度方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 89-92.
SONG Ren-jie, LI Wen-ming. Research on improving the precision of static load model parameter identification[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 89-92.
- [7] CHOI K, CHANG D, LI H, et al. Measurement-based dynamic load models: derivation, comparison, and validation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1276-1283.
- [8] 郑晓雨, 贺仁睦, 马进, 等. 基于轨迹灵敏度的负荷分类[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 145-150.
ZHENG Xiao-yu, HE Ren-mu, MA Jin, et al. A method of load classification based on the trajectory sensitivity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 145-150.
- [9] 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]. 电力系统及其自动化, 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.
- [10] 孙国霞, 张剑, 吴海江. 包含多种分布式电源的广义负荷模型辨识与适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 105-111.
SUN Guo-xia, ZHANG Jian, WU Hai-jiang. A synthesis load model with distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 105-111.
- [11] 谢会玲, 鞠平, 陈谦, 等. 广域电力系统负荷整体建模方法[J]. 电力系统及其自动化, 2008, 32(1): 1-5.
XIE Hui-ling, JU Ping, CHEN Qian, et al. Electric load modeling for wide area power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 1-5.
- [12] 张孝, 鞠平, 陈谦, 等. 考虑频率特性的负荷模型研究及应用[J]. 河海大学学报, 2010, 38(3): 353-358.
ZHANG Xiao, JU Ping, CHEN Qian, et al. Study and application of load models considering frequency characteristics[J]. Journal of Hohai University, 2010, 38(3): 353-358.
- [13] 贺仁睦, 叶静, 徐欢, 等. 计及频率特性的实测负荷建模[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 165-170.

- HE Ren-mu, YE Jing, XU Huan, et al. Measurement based load modeling considering frequency characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 165-170.
- [14] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统理论与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [15] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. USA: The McGraw Hill Companies, 1994.
- [16] 蔡昌春, 鞠平, 张建勇. 计及频率变化的感应电动机实用模型[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 743-750.
- CAI Chang-chun, JU Ping, ZHANG Jian-yong. Practical induction motor model with consideration of frequency variation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 743-750.
- [17] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [18] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [19] 汪镭, 吴启迪. 蚁群算法在系统辨识中的应用[J]. 自动化学报, 2003, 29(1): 102-109.
- WANG Lei, WU Qi-di. Ant system algorithm based system identification[J]. Journal of Automation, 2003, 29(1): 102-109.
- [20] 王斌晓, 黄彦全, 宋廷珍, 等. 基于混沌蚁群算法的负荷模型参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 47-51.
- WANG Bin-xiao, HUANG Yan-quan, SONG Ting-zhen, et al. Load model parameters identification based on chaos ant colony optimization[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 47-51.
-
- 收稿日期: 2013-06-25; 修回日期: 2013-08-23
- 作者简介:
- 梁伟(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为广域电力系统建模; E-mail: wliang1988@163.com
- 鞠平(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统建模与控制;
- 余一平(1977-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。