

基于改进DE算法的负荷建模参数辨识

许津津¹, 马进¹, 唐永红², 贺仁睦¹

(1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206;

2. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 负荷建模对电力系统运行及其控制起着重要的影响, 主要有基于元件和基于量测两种建模方法。基于量测的负荷建模已广泛用于实践中, 当考虑负荷的时变性后, 基于量测的负荷建模即成为数学优化问题。因此, 寻找到有效可靠的优化方法用于负荷建模参数辨识具有重要的现实意义。微分进化(DE)算法具有全局寻优能力, 对初值不敏感, 经改进后还可以加快收敛速度并防止出现早熟现象, 因此可用于负荷建模参数辨识实践中。将DE算法用于负荷建模参数辨识实践中, 在现有改进算法的基础上, 借鉴遗传算法引入移民策略以防止早熟现象, 通过对两个实测建模参数辨识实例的分析, 表明经改进后的DE算法具有比改进遗传算法、蚁群算法和粒子群算法更好的性能。

关键词: 改进微分进化; 改进遗传算法; 参数辨识; 负荷建模; 电力系统

Parameters identification of load modeling based on improved differential evolution algorithm

XU Jin-jin¹, MA Jin¹, TANG Yong-hong², HE Ren-mu¹

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control of Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Sichuan Electrical Power Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: Load modeling plays an important impact on the power system operation and control, and there are two ways to form the model, components-based modeling and measurement-based modeling. Load modeling based on measurements has been widely used in practice, when considering the load variability, it's a mathematical optimization problem. Therefore, to find effective and reliable method for optimizing load modeling parameter is important and of realistic significance. Differential Evolution (DE) algorithm has global optimization capabilities, which is not sensitive to the initial value. The improved one can speed up the convergence rate and prevent premature, therefore, it can be used to load modeling to identify parameters in practice. Through the analysis of two measured identification results, improved differential evolution has better convergence, preventing pre-mature and precocious performance than improved genetic algorithm.

Key words: improved differential evolution algorithm; improved genetic evolution algorithm; parameters identification; load modeling; power system

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)24-0036-04

0 引言

迄今为止, 数字仿真在电网规划、运行、控制和人员培训等工作中仍起着不可替代的作用^[1]。仿真结果的可信度取决于所采用的元件模型和参数是否与实际情况相符。发电机、励磁、输电线路等模型都已相当成熟, 但对于负荷模型却知之甚少。由

于负荷的时变性、多样性和复杂性, 精确建立每个负荷的模型是不现实的, 因此, 在动态仿真过程中, 需用一个模型来表征某区域的所有负荷, 以用于电力系统仿真计算中。

负荷建模主要有两种方法——基于元件和基于量测。基于元件的负荷建模需要先统计出每类典型负荷的特性、各类负荷用电设备的比例、负荷组成成分^[2], 再推导出各类典型负荷的数学模型和参数, 然后再综合出综合统计点的数据, 得到该负荷节点的模型。负荷组成成分随时间变化而变化, 统计每种典型负荷特性工作量大, 负荷成分比较复杂, 若把所有类型的负荷都考虑进去, 总的模型难以应用;

基金项目: 国家自然科学基金项目(50707009); 高等学校博士学科点专项科研基金(20070079014), 北京市科技新星计划, 电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室开放项目(SKLD09KM04), “111”引智计划(B08013)

另外, 无功功率电压特性较难准确获取, 因此, 实际应用中较少应用基于元看成是一个随机系统, 确定模型结构后根据量测数据辨识出模型参数, 然后验证该模型的泛化能力^[3-5]。该法需要在负荷节点装设负荷特性记录装置, 并且只有在出现较大扰动的情况下才能获取用于辨识的数据。尽管基于量测的负荷建模方法存在以上缺点, 但该法无需大量统计工作, 用输入输出模型来描述可以解决负荷成分复杂的问题, 因此, 基于量测的负荷建模方法在实践中得到了广泛应用。

微分进化 DE (differential evolution) 算法是由 Storn 和 Price 提出的一种优化算法^[6], 可以有效解决许多复杂的优化问题, 如寻找维数高、非线性程度高且存在多个局部优化点的复杂系统的最优解。而且, DE 算法对目标函数无特殊要求, 因此, 在参数辨识、优化等许多领域得到了广泛应用。文献[7]将 DE 算法用于电力系统规划, 说明了该算法可以更好地解决电力系统规划问题。文献[8]根据进化情况动态调整参数, 对种群重叠个体利用混沌搜索策略来进一步提高 DE 算法的全局寻优能力, 并将改进的 DE 算法用于无功优化问题, 说明了改进后的算法高效且全局寻优能力增强。文献[9]通过引入局部增强算子, 使种群中部分个体在当前最优个体附近寻优, 加快了算法的收敛速度。

本文将改进 DE 算法用于负荷建模参数辨识实践中, 并借鉴遗传算法引入移民策略的, 通过大量实践, 表明该算法可以提高辨识精度与速度, 能更好地解决负荷建模参数辨识问题。

1 综合负荷模型结构

综合负荷模型由静态 ZIP 并联三阶感应电动机模型组成, 待辨识的参数有 13 个, 模型等值电路图如图 1 所示^[4,10,11]。

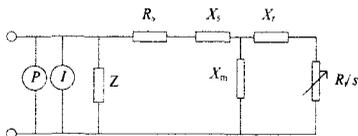


图 1 改进综合负荷模型等值结构图

Fig.1 Improved load modeling equivalent circuit

静态 ZIP 部分可以描述为:

$$\begin{cases} P_s = P_z \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 + P_1 \left(\frac{U}{U_0}\right) + P_p \\ Q_s = Q_z \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 + Q_1 \left(\frac{U}{U_0}\right) + Q_q \end{cases}$$

其中感应电动机部分可以描述为:

$$\begin{cases} \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'} [E'_d + (X - X')I_q] - (w-1)E'_q \\ \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'} [E'_q - (X - X')I_d] + (w-1)E'_d \\ \frac{dw}{dt} = -\frac{1}{2H} [T_m - (E'_d I_d + E'_q I_q)] \end{cases}$$

$$T' = \frac{X_r + X_m}{R_r}$$

$$X = X_s + X_m$$

$$X' = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r}$$

$$P_z + P_1 + P_p = 1 - K_{pm}$$

$$Q_z + Q_1 + Q_q = 1 - \frac{Q_{motor}}{Q_0}$$

$$K_{pm} = \frac{P_0'}{P_0}$$

其中: R_s 、 X_s 为定子绕组的电阻和漏抗; R_r 、 X_r 为转子绕组的电阻和漏抗; X_m 为定转子互感抗, 均为自身容量基值下的标么值; P_0 为负荷测点的初始有功功率; P_0' 为等值电动机的初始有功功率; E'_q 为等值电动机 q 轴次暂态电势; E'_d 为等值电动机 d 轴次暂态电势; w 为等值电动机的转速; H 为等值电动机的惯性时间常数。

其中待辨识的参数有 R_s 、 X_s 、 X_m 、 X_r 、 R_r 、 P_z 、 P_p 、 Q_z 、 Q_p 、 K_{pm} 、 H 、 A 与 B 。以负荷节点稳态运行时的容量作为电动机的基准容量, 这样可以比文献[4]所采用的改进综合负荷模型少一个参数, 而且同样可以实现感应电动机的容量能自动跟踪负荷总的有功功率, 因此该模型是一种容量自适应的模型结构。

$$S_{motorbase} = \sqrt{P_0'^2 + Q_0'^2}$$

2 负荷模型参数辨识

2.1 参数辨识原理

确定了模型结构后, 选用一种高效可靠的优化算法以辨识模型参数。在输入和输出数据的基础上, 估计出系统的数学模型, 本质上为数据拟合问题。参数辨识原理图如图 2 所示。

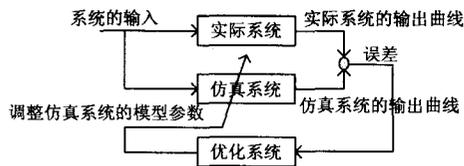


图2 参数辨识系统原理示意图

Fig.2 Identifying parameters of the composite load model

其中：系统的输入为电压；实际系统的输出曲线为有电压扰动情况下的负荷实测有功和无功功率；仿真系统的输出曲线为有电压扰动情况下仿真所得的负荷有功和无功功率。

先确定模型结构和目标函数，根据输入输出数据，以目标函数值最小为优化原则，采用优化方法辨识参数。近年来，许多优化算法，如单纯形法、遗传算法、粒子群算法、模拟进化法、微分进化等，都被用于系统辨识中。

2.2 微分进化算法

2.2.1 初始化种群

种群数量 N 通常取参数维数的 5~10 倍。设第 i 代包含了 m 维参数，则第 i 代第 j 个个体参数向量为

$$X_{j,i} = [x_{1,j,i}, x_{2,j,i}, \dots, x_{m,j,i}]$$

微分算法与遗传算法、粒子群算法一样，首先要生成初始种群，在参数范围内随机赋值给每个个体，如式 (1) 所示。

$$x_{k,j,i} = x_{k,j,i \min} + \text{rand}(1)(x_{k,j,i \max} - x_{k,j,i \min}) \quad (1)$$

其中： k 为第 j 个个体中第 k 个分量。

2.2.2 变异

以当代某个个体为基准，与其他两个随机个体向量差加权求和，可确定下一代新的临时个体。实现方法如式 (2) 所示。

$$V_{k,j,i+1} = X_{k,s1,i} + F_W(X_{k,s2,i} - X_{k,s3,i}) \quad (2)$$

其中： F_W 为变异概率； $s1, s2, s3$ 为 1 到 N 之间的随机整数。

STORN 提出的变异策略共有 6 种，可根据问题需要选择最适合的方式。

2.2.3 交叉

将通过变异产生的临时个体与旧个体进行交叉操作，如式 (3) 所示。

$$u_{k,j,i+1} = \begin{cases} x_{k,j,i} & (\text{其他}) \\ v_{k,j,i+1} & (\text{rand}(F_CR) < F_CR) \end{cases} \quad (3)$$

其中： F_CR 为交叉概率。

2.2.4 选择

求临时个体与旧个体的适应度值，取适应度值较小的进入新一代个体。

2.3 改进策略

在微分进化算法的基础上，引入了自适应变异概率和交叉概率^[12]。进化初期，个体之间的向量差较大，变异概率和交叉概率可以适当取小，进化后期，各个个体都逐渐向最优值靠拢，个体之间向量差小，因此，变异概率和交叉概率应当取大一些。为解决微分进化方法局部搜索能力不强的问题，引用了文献[9]提出的带局部增强算子的改进算法，加快了收敛速度。为解决早熟问题，参照改进遗传算法所提出的移民策略，在改进微分进化算法中引入移民策略。

对当前代 i 个体求其适应度，再求得最优个体适应度 f_{\min} 和个体总平均适应度，如式 (4) 所示。

$$f_{i,av} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_{i,k} \quad (4)$$

将适应度小于个体总平均适应度的个体的适应度再取平均 f_{av} ，定义 $\Delta = f_{av} - f_{\min}$ 。进化过程中依据早熟程度自动调整交叉和变异概率，调整方法如式 (5) 所示。

$$p_c = \begin{cases} \frac{f_{i,av} - F[i]}{\Delta} \cdot k_1, & p_c > p_{c \min} \\ p_{c \min}, & p_c \leq p_{c \min} \end{cases} \quad (5)$$

$$p_m = \begin{cases} \frac{f_{i,av} - F[i]}{\Delta} \cdot k_2, & p_m > p_{m \min} \\ p_{m \min}, & p_m \leq p_{m \min} \end{cases}$$

其中： F 为当代种群各个个体的适应度值； p_c 为交叉概率； p_m 为变异概率。

$$p_{c \min} = 0.45, \quad k_1 = 0.85$$

$$p_{m \min} = 0.06, \quad k_2 = 0.1$$

当 $\Delta < 0.005$ 时认为出现了早熟现象，淘汰掉适应度值大的个体，个数为 $\frac{1}{\Delta}$ ，新增适应度值小的个

体，便于种群向最优解靠拢。

改进微分进化算法的实现方法如图 3 所示。

2.4 改进微分进化算法在负荷建模中的应用

依据上述方法编制辨识程序，适应度函数如式 (6) 所示。

$$\min \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M W_i (\bar{e}_{p_i} + \bar{e}_{q_i})$$

$$e_{p_i} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N W_p(k)[\hat{P}(k) - P(k)]^2}{N}} \quad (6)$$

$$e_{q_i} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N W_Q(k)[\hat{Q}(k) - Q(k)]^2}{N}}$$

其中: N 为量测采样个数; $\hat{P}(k)$, $\hat{Q}(k)$ 为模型输出的第 k 组数据的有功和无功量; $P(k)$, $Q(k)$ 为量测第 k 组数据有功和无功量; W_p , W_Q 为有功和无功负荷的权重向量。

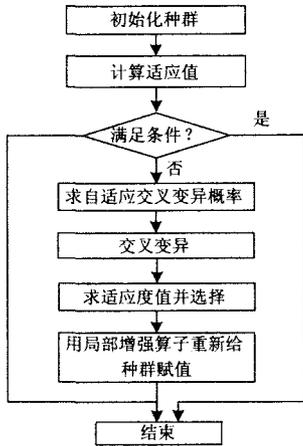


图3 改进微分算法流程图
Fig.3 Flowchart of improved DE

3 实例分析

优化算法参数的选取对优化结果有较大的影

响, 参数的选取均采用一些较优值, 种群规模都选为 100 个。遗传算法中, 对优化结果影响较大的是交叉率、变异率和选择概率, 本文采用文献[13]提出的自适应策略。蚁群算法中, 采用自适应策略^[14]。粒子群算法中, 对优化结果影响较大的参数有惯性权重 w 、加速常数 $c1$ 和 $c2$, 其参数值取为 0.5、2、2^[15]。DE 算法中, 交叉和变异概率 F 和 CR 的取值采用上文提到的自适应算法, 可以减小参数敏感性对优化结果的影响。

3.1 虎石台 2003 年 8 月 28 日 15:54 实测数据

为了验证本文采用的改进微分进化算法用于负荷建模参数辨识的性能, 分别用改进遗传算法、蚁群算法、粒子群算法和改进微分进化算法对东北虎石台 2003 年 8 月 28 日 15 点 54 分记录的实测数据进行辨识, 参数辨识结果如表 1 所示, 其中各参数单位均为 p.u. 实际量测数据与仿真数据拟合情况分别如图 4 所示。

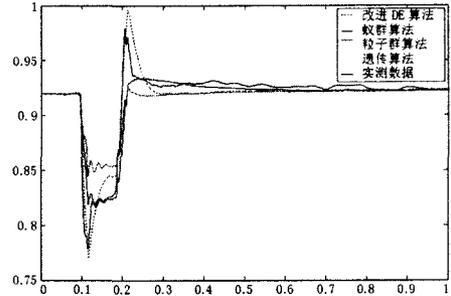


图4 辨识拟合图

Fig.4 Simulation diagram of optimization algorithm

表 1 虎石台 2003 年 8 月 28 日 15 点 54 分实测数据辨识结果

Tab.1 Identification results of Hushitai station on 15:54, Aug 28th,2003

策略	最小适应度	收敛时间/s	R_s	X_s	X_m	R_r	X_r	H	A	B	K_{pm}	P_z	P_p	Q_z	Q_q
改进遗传算法	0.000 39	179	0.268	0.175	2.010	0.067	0.178	1.009	0.465	0.504	0.358	0.148	0.785	0.834	2.265
蚁群算法	0.000 53	952	0.35	0.1	2.627	0.08	0.18	0.935	0.794	0.526	0.480	0.381	0.711	0.174	1.339
粒子群算法	0.000 35	166	0.35	0.102	2	0.01	0.18	0.5	1	0	0.518	0.1	1	0.1	0.228
改进微分进化算法	0.000 217	156	0.100	0.113	3.519	0.072	0.109	1.413	0.765	0.147	0.348	0.278	0.720	0.405	3.976

3.2 虎石台 2004 年 10 月 25 日 16:53 实测数据

对东北虎石台 2004 年 10 月 25 日 16 点 53 分记录的实测数据进行辨识, 参数辨识结果如表 2 所示, 其中各参数单位均为 p.u. 实际量测数据与仿真数据

拟合情况分别如图 5 所示。

通过大量实践, 上文仅列出了两个实例的辨识情况, 表明改进微分进化方法用于负荷建模参数辨识中比其他三种算法具有更好的精度和速度。

表2 虎石台 2004 年 10 月 25 日 16 点 53 分实测数据辨识结果
Tab.2 Identification results of Hushitai station on 16:53, Oct 25th,2004

策略	最小适应度	收敛时间/s	R_s	X_s	X_m	R_r	X_r	H	A	B	K_{pm}	P_z	P_p	Q_z	Q_q
改进遗传算法	0.000 38	185	0.292	0.103	2.049	0.065	0.151	0.724	0.299	0.223	0.223	0.190	0.559	0.738	2.08
蚁群算法	0.000 49	968	0.102	0.149	3.794	0.075	0.167	1.297	0.856	0.425	0.424	0.204	0.962	0.466	2.352
粒子群算法	0.000 37	176	0.101	0.103	3.8	0.08	0.07	1.489	0.977	0.017	0.201	0.103	0.994	0.1	2.051
改进微分进化算法	0.000 207	167	0.232	0.041	0.474	0.042	0.226	3.15	0.542	0.029	1.254	0.221 2	1.106 1	0.236	0.283

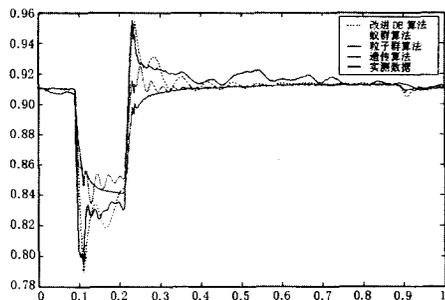


图5 辨识拟合图

Fig.5 Simulation diagram of optimization algorithm

4 结论

本文将微分进化算法应用于负荷建模参数辨识实践中,并在原有算法的基础上借鉴遗传算法引入了移民策略,避免早熟现象。经负荷建模辨识结果表明,该算法在精度和速度方面都比其他三种算法有所改进,因此,可以用于负荷建模参数辨识实践中,以进一步提高基于量测的负荷建模精度。

参考文献

[1] Kundur P. Power System Stability and Control[J]. NY: McGraw-Hill, 1993.
 [2] Price W W,Wirgau K A,Murdoch A,et al.Load Modeling for Load Flow and Transient Stability Computer Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems,1988.180-187.
 [3] MA Jin,HE Ren-mu, Hill D J. Load Modeling Based on Support Vector Techniques and Fields Measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems,2006:726-735.
 [4] HE Renmu, MA Jin, Hill D J.Composite Load Modeling via Measurement Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006,21(2):662-672.
 [5] Lin C J,Jiang Y H D,et al. Dynamic Load Models in Power Systems Using the Measurement Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993,8(1).

[6] Storn R , Price K. Differential Evolution2a Simple and Efficient Heuristic for Hlobal Optimization over Continuous Spaces[J] . J Global Optim ,1997 ,11:34-59
 [7] ZHAO Yang-dong, MIAO Lu, ZHE Lu, et al. A Differential Evolution Based Method for Power System Planning[J]. IEEE Congress on Evolutionary Computation,2006:2699-2706.
 [8] 顾志刚, 杨马英.DE 算法的改进及其在系统辨识中的应用[J]. 浙江工业大学学报,2007,35(4):422-426.
 GU Zhi-gang, YANG Ma-ying.An Improved DE Algorithm and the Application in System Identification[J]. Journal of Zhejiang University of Technology,2007,35(4):422-426.
 [9] 赵光权,彭喜元,孙宁.带局部增强算子的微分进化改进算法[J].电子学报,2007,35(5):849-853.
 ZHAO Guang-quan ,PENG Xi-yuan. SUN Ning. A Modified Differential Evolution Algorithm with Local Enhanced Operator[J]. ACTA Electronica Sinica,2007,35(5):849-853.
 [10] MA Jin, HAN Dong, HE Ren-mu, et al. Reducing Identified Parameters of Measurement-based Composite Load Model[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008,23(1): 76-83.
 [11] 马进, 盛文进, 贺仁睦,等. 基于广域测量系统的电力系统动态仿真验证策略[J].电力系统自动化,2007,31(18):11-15.
 MA Jin, SHENG Wen-jin, HE Ren-mu, et al. A Simulation Validation Strategy based on Wide Area Measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(18):11-15.
 [12] 刘自发, 闫景信, 张建华,等. 基于改进微分进化算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2007,31(18):68-72.
 LIU Zi-fa, YAN Jing-xin, ZHANG Jian-hua,et al. Power System Reactive Power Optimization Based on Improved Differential Evolution Algorithm[J]. Power System Technology, 2007,31(18): 68-72.

(下转第 45 页 continued on page 45)

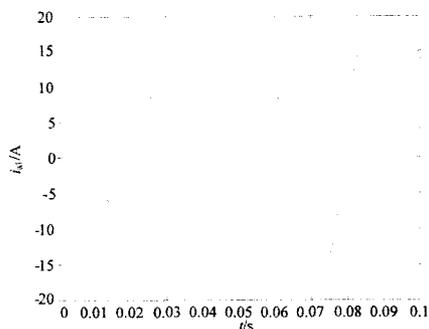


图9 无反馈的 a 相基波电流检测结果

Fig.9 A-phase fundamental current without feedback

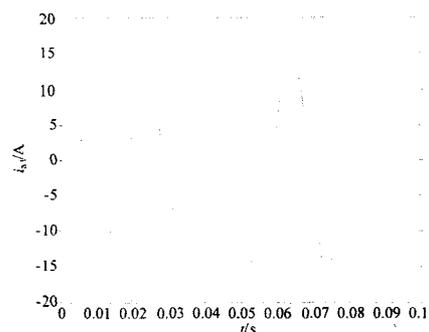


图10 有反馈的 a 相基波电流检测结果

Fig.10 A-phase fundamental current with feedback

4 结论

本文在基于瞬时无功功率理论的检测法的基础上,提出了一种新型的三相电路谐波电流检测方法,该方法去掉了锁相环,引入了反馈,解决了锁相环对检测准确性的影响,加快了动态响应速度,减少了检测方法的延时。理论分析和仿真验证表明,该检测方法原理简单,易于实现,并且具有较好的准

确性和实时性。

参考文献

- [1] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功补偿[M].北京:机械工业出版社,1998.209-238.
WANG Zhao-an,YANG Jun,LIU Jin-jun.Harmonic and Reactive Power Compensation[M]. Beijing:China Mechine Press,1998.209-238.
- [2] 孙弛,魏光辉,毕增军.基于同步坐标变换的三相不对称系统的无功与谐波电流的检测[J].中国电机工程学报,2003,23(12):43-48.
SUN Chi,WEI Guang-hui,BI Zeng-jun.Reactive and Harmonic Current Detection Based on Synchronize Coordinate Transformation in Three-phase System of Asymmetric[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(12):43-48.
- [3] 刘开培,张俊敏,宣扬.基于重采样理论和均值滤波的三相电路谐波检测方法[J].中国电机工程学报,2003,23(9):78-82.
LIU Kai-pei,ZHANG Jun-min,XUAN Yang.Harmonic Detection for Three-phase Circuits Based on Resampling and Feedback Theory[J]. Proceedings of the CSEE,2003,2003,23(9):78-82.
- [4] 颜秋容,葛加武.基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法之误差分析[J].电气传动,2007,37(5):57-60.
YAN Qiu-rong,GE Jia-wu.Error Analysis of Harmonic Detection Based on the Instantaneous Reactive Power Theory[J].Electric Drive,2007,37(5):57-60.

收稿日期:2008-12-26

作者简介:

丁菊霞(1977-),女,硕士,讲师,从事于电力电子与电力传动、电能质量方面的教学与研究。E-mail:northdingding@163.com

(上接第40页 continued from page 40)

- [13] 金群,李欣然.遗传算法参数设置及其在负荷建模中应用[J].电力自动化设备,2006,26(5):23-27.
JIN Qun, LI Xin-ran. GA Parameter Setting and Its Application in Load Modeling[J]. Electric Power Automatic Equipment,2006,26(5):23-27.
- [14] 陈玲,沈洁,秦玲.蚁群算法进行连续参数优化的新途径[J].系统工程理论与新实践,2003,3:48-53.
- [15] 程颖,鞠平,吴峰.负荷模型参数辨识的粒子群优化法及其与基因算法比较[J].电力系统自动化,2003,27(11):25-29.
CHENG Ying, JU Ping, WU Feng. PS Algorithm in Load Parameter Identification and its Comparison with General Algorithm[J].Automation of Electric Power

Systems,2003,27(11):25-29.

- [16] 程颖.电力负荷建模的工程实现与应用研究(硕士论文)[D].南京:河海大学,2003.
CHENG Ying. Research on the Engineering Realization and Application of Electrical Load Modeling, Thesis[D]. Nanjing: Hohai University,2003.

收稿日期:2008-12-20; 修回日期:2009-01-22

作者简介:

许津津(1987-),女,硕士研究生,研究方向为电力稳定分析与控制; E-mail:bvyk@163.com

马进(1976-),男,副教授,研究方向为电力系统动态仿真。