

基于感应电动机复数简化模型的参数辨识研究

姜杰¹, 王学斌¹, 殷家敏², 张太勤³, 陈波³

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆市电力公司长寿供电局, 重庆 401220;
3. 重庆新世纪电气有限公司, 重庆 400030)

摘要: 感应电动机数学模型的非线性、强耦合和模型中不可观测量的存在, 使得在辨识电机参数时需要求解复杂的非线性微分方程组而导致辨识困难。提出一种由定子电压和电流交直轴分量表示的感应电动机复数简化模型; 利用端口电流电压暂态量, 采用步长加速法进行模型参数辨识。该模型考虑了电动机的非线性, 避免了求解复杂的非线性微分方程组, 减化了参数辨识过程, 保证了算法的收敛性和结果的准确性, 提高了辨识的稳定性和效率。在两种电机控制方式下进行算例仿真及参数辨识, 验证表明该模型正确有效, 参数可辨识且精度高, 易于工程实现。

关键词: 感应电动机; 复数简化模型; 步长加速法; 参数辨识; 电机控制方式

Research on identification of induction motor based on its simplified complex quantity models

JIANG Jie¹, WANG Xue-bin¹, YIN Jia-min², ZHANG Tai-qin³, CHEN Bo³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Changshou Electric Power Bureau, Chongqing Power Grid Corporation, Chongqing 401220, China; 3. Chongqing Xinshiji Electric Power Corporation, Chongqing 400030, China)

Abstract: Because of nonlinear, strong coupling and immeasurable variables, induction motor parameter identification need solve complex nonlinear differential equations; it may lead to difficulties in the parameters identification process. A simplified complex-quantity model, which is expressed by straight axis and quadrature axis component of the voltage and current, is proposed for induction motor. Using step acceleration method, the parameters of the model are identified according to voltage and current transient data. This model simplifies the process of parameter identification by taking nonlinear characteristic of induction motor into account and avoiding solving the complex nonlinear differential equations. So the convergence of the algorithm and the accuracy of the results are ensured and the stability and efficiency of the identification process are improved. The examples are conducted under two kinds of motor control methods, and the simulation results show identifiability and high precision, which verify the correctness, effectiveness and practice of the model.

Key words: induction motor; simplified complex quantity models; step acceleration method; parameter identification; motor control methods

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0087-06

0 引言

现代交流传动系统中, 矢量控制是一种理想、技术较为成熟的控制方法, 它使交流电机获得了与直流电机一致的瞬态响应特性, 实现了对负载扰动和参考值变化的快速响应^[1-2]。

在矢量控制系统中, 准确的感应电动机模型参数对于转子磁链角、转子速度估算、控制器参数的自整定等重要环节具有重要影响^[3-4]。同时, 电机参数辨识对其他控制方式和系统运行状态的监测也具有重要的意义^[5-7]。

但是, 电机动态数学模型的非线性、强耦合和模型中不可观测量的存在使得电机的参数辨识异常困难。现有基于感应电动机动态数学模型的参数辨识方法按照是否考虑模型的非线性可分为以下两类。

文献[8]基于两相静止坐标系的电机数学模型, 忽略模型的非线性, 应用最小二乘原理估计电机参数, 辨识方法简单、计算量小、精度高。但是由于参数辨识模型假定电机转速稳定或只有小的变化, 辨识算法会对转速波动比较敏感, 从而限制了它的进一步应用。

文献[9-11]考虑了动态数学模型的非线性,分别采用先进智能控制算法如遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等对电机参数进行辨识。但是动态数学模型中转子直轴和交轴电流及其导数均为不可观测量,不可观测量的存在使得在辨识时需要求解复杂的非线性微分方程组,不仅使得辨识方法十分复杂、辨识效率低,而且影响辨识过程的稳定性和结果的准确性。

为了求得准确的电动机参数,同时又避免求解复杂的非线性微分方程组,简化参数辨识方法,提高运算效率和辨识的稳定性,本文建立定子电压、电流等可观测量表示的感应电动机复数简化模型,采用步长加速法对电机参数进行辨识,并验证其正确性和有效性。

1 感应电动机的复变量模型描述

在 d - q 两相旋转坐标系中,感应电动机的复变量模型描述为^[12-13]

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + \dot{\psi}_s \\ 0 = R_r i_r + \dot{\psi}_r - j\omega_r \psi_r \\ \psi_s = L_s i_s + M i_r = l_s i_s + M(i_s + i_r) \\ \psi_r = M i_s + L_r i_r = l_r i_r + M(i_s + i_r) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_s = u_{sd} + j u_{sq}$ 、 $i_s = i_{sd} + j i_{sq}$ 、 $i_r = i_{rd} + j i_{rq}$ 、 $\psi_s = \psi_{sd} + j \psi_{sq}$ 、 $\psi_r = \psi_{rd} + j \psi_{rq}$ 分别为 d - q 旋转坐标系中定子电压、定子电流、转子电流、定子磁链和转子磁链的复数向量; R_s 、 L_s 、 M 、 R_r 、 L_r 分别为定子电阻、定子电感、定转子间互感、转子电阻和转子电感; $l_s = L_s - M$ 和 $l_r = L_r - M$ 分别为定子和转子漏电感; ω_r 为转子电角速度,单位为 rad/s ; j 是复数单位。

由式(1)可得感应电动机的 T 形暂态等值电路,如图 1 所示。图中 $e_s = -j\omega_r(M i_s + L_r i_r)$, 其为感应电动机的速度感应电势,它的存在使推导参数辨识模型时需处理复杂的复数微分方程,计算量很大,推导过程变得困难。为提高效率,减少计算量,采用感应电动机无速度感应电势暂态等值电路^[14],如图 2 所示。

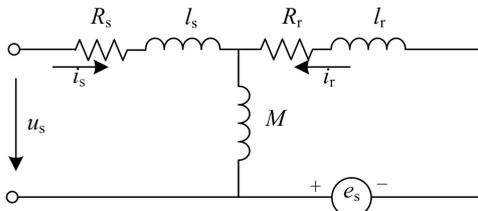


图 1 T 形暂态等值电路

Fig. 1 T-type transient equivalent circuit

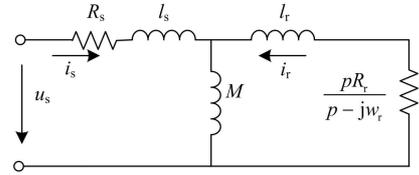


图 2 无速度感应电势 T 形暂态等值电路

Fig. 2 T-type transient equivalent circuit without speed EMF

下面关于感应电动机参数辨识方法的讨论中,假设可测量为定子电压、电流和电动机转速。

2 感应电动机复数简化模型

根据上节分析可知,感应电动机无速度感应电势复变量模型可描述为

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + p l_s i_s + p M (i_s + i_r) \\ 0 = \frac{p R_r}{p - j\omega_r} i_r + p l_r i_r + p M (i_s + i_r) \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可得到以定子电压、电流暂态量表示的感应电机微分方程模型为

$$\frac{u_s}{i_s} = \left\{ p [R_s (l_r + M) + R_r (l_s + M) - j\omega_r (l_r l_s + M l_s + M l_r)] + p^2 (l_r l_s + M l_s + M l_r) + [R_s R_r - j\omega_r R_s (l_r + M)] \right\} \cdot \frac{1}{p(l_r + M) + R_r - j\omega_r (l_r + M)} \quad (3)$$

式(3)是复变量实参数的,并不便于参数辨识算法使用,考虑将其实虚部分开。将 $u_s = u_{sd} + j u_{sq}$ 、 $i_s = i_{sd} + j i_{sq}$ 带入式(3)整理,并令

$$k_1 = \frac{l_r l_s + M l_s + M l_r}{R_r}, \quad k_2 = \frac{[R_s (l_r + M) + R_r (l_s + M)]}{R_r}$$

$$k_3 = R_s, \quad k_4 = \frac{R_s (l_r + M)}{R_r}, \quad k_5 = -\frac{(l_r + M)}{R_r}$$

由此得到参数辨识模型,如式(4)所示。矩阵第 1 行为实部模型,第 2 行为虚部模型。

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{sd}'' + w_r i_{sq}' & i_{sd}' & i_{sd} & w_r i_{sq} & u_{sd}' + w_r u_{sq} \\ i_{sq}'' - w_r i_{sd}' & i_{sq}' & i_{sq} & w_r i_{sd} & u_{sq}' - w_r u_{sd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \end{bmatrix} \quad (4)$$

参数辨识模型由感应电动机定子侧电压、电流交直轴分量 u_{sd} 、 u_{sq} 、 i_{sd} 、 i_{sq} , 其一阶导数 u_{sd}' 、 u_{sq}' 、 i_{sd}' 、 i_{sq}' 和二阶导数 i_{sd}'' 、 i_{sq}'' 表示,是一组常系数线性微分方程组。

根据线性辨识理论,式(4)中的所有系数 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 均可唯一辨识。根据 $k_1 \sim k_5$ 的定义,可得电机参数计算公式为

$$\begin{cases} R_s = k_3 \\ R_r = \frac{k_4 - k_2}{k_5} \\ l_s + M = k_2 - k_4 \\ (k_2 - k_4)l_r + Ml_s = \frac{k_5(k_4 - k_2)}{k_1} \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5) 4 个独立方程无法求得电动机的所有参数, 需对电机参数做一些假设条件, 这样才能得到 l_s 、 M 和 l_r 的辨识方法。

文献[15]研究表明, 在定、转子漏电抗之和保持不变的前提下, 定、转子漏电抗之间的大小比例关系对异步电动机的性能影响不大, 即在异步电动机数学模型中假定定、转子漏电感相等是可行的。在式(4)中, 令 $l_s=l_r$, 即可得到感应电动机复数简化模型。

本文在上述假设条件的前提下采用步长加速法进行具体的参数辨识。式(4)为连续时间模型, 直接将其离散化, 得到离散化模型。根据最小二乘估计准则, 感应电动机参数非线性优化中目标函数定义为

$$J = \sum_{k=1}^N w_d(k)(\hat{u}_{sd}(k) - u_{sd}(k))^2 + w_q(k)(\hat{u}_{sq}(k) - u_{sq}(k))^2 \quad (6)$$

式中: $\hat{u}_{sd}(k)$ 、 $\hat{u}_{sq}(k)$ 为由参数辨识模型计算所得的直轴和交轴电压值; $u_{sd}(k)$ 、 $u_{sq}(k)$ 为电压实测值, $w_d(k)$ 和 $w_q(k)$ 为对应的惯性权重。

3 数据处理及辨识算法

3.1 abc-to-dq 坐标变换

本文通过 abc-to-dq 坐标变换将感应电动机两相线电压线电流分量变换为交直轴分量, 变换关系为

$$\begin{bmatrix} u_{sq} \\ u_{sd} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2\cos\theta & \cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta \\ 2\sin\theta & \sin\theta - \sqrt{3}\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{abs} \\ u_{bcs} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{3}\cos\theta - \sin\theta & 2\sin\theta \\ \sqrt{3}\sin\theta - \cos\theta & -2\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.2 暂态数据求导运算

通过本文提出的复数简化模型进行电机参数辨识时, 除需定子交直轴电压、电流量外, 还需电流量的 1 阶、2 阶导数和电压量的 1 阶导数。本文采用中心差分数值算法, 局部截断误差为 $o(\Delta t^4)$, 是一个 3 阶方法, 其计算结果精度比较高。1 阶、2 阶导数的计算公式为^[16]

$$y_i' = \frac{-y_{i+2} + 8y_{i+1} - 8y_{i-1} + y_{i-2}}{12\Delta t} \quad (9)$$

$$y_i'' = \frac{-y_{i+2} + 16y_{i+1} - 30y_i + 16y_{i-1} - y_{i-2}}{12\Delta t^2} \quad (10)$$

3.3 步长加速法

为解决感应电动机复数简化模型的非线性问题, 本文采用步长加速法^[17]辨识感应电机参数。步长加速法是一种直接搜索法, 由两类移动组成, 一类是探测性移动; 另一类是模式移动。前者是沿各坐标方向探求一个函数值小于出发点函数值的对应点, 并得到一个有前途的方向, 后者按一定模式循着有利方向加速移动。两种移动交替进行, 直至求出满足给定精度要求的近似解。该方法求解中不用目标函数关于寻优变量的导数等解析性质, 仅计算目标函数值。虽然速度稍慢但对于寻优变量较少的优化问题还是十分有效的。篇幅所限, 不再赘述。算法具体步骤详见文献[17]。

4 仿真分析

4.1 仿真算例模型

图 3 为利用 Matlab 工具进行算例仿真的结构框图。图中理想电压源的额定电压为 380 V, 额定频率为 50 Hz。电源通过双回线路向感应电动机供电, 感应电动机采取恒定转速控制(将复数简化模型中 w_r 设为常数)和恒定转矩控制两种方式。

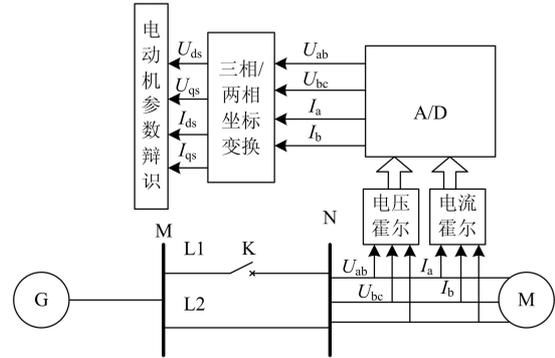


图 3 参数辨识结构框图

Fig. 3 Structure chart of parameter identification

电动机参数如表 1 所示, 其中所有阻抗参数均为有名值。

表 1 感应电动机参数
Table 1 Parameters of induction motor

变量	R_s/Ω	R_r/Ω	L_s/H	L_m/H	L_r/H
真值	0.435	0.816	0.004	0.069	0.004

4.2 算法精度验证

仿真计算时首先使电动机达到稳定运行状态。在 $t=2$ s 时断开一回线路 L_1 作为参数辨识的扰动信号, 仿真时间为 3 s, 采样间隔为 0.1 ms。参数辨识过程考虑两种不同水平的测量噪声的影响, 测量噪声被假定为白噪声, 即满足标准正态分布: $N(\mu, \sigma^2)$ 。表 2 为两种不同水平的噪声方差。

表 2 测量噪声方差 σ^2
Table 2 Measurement noise variance σ^2

	u_{sd}	i_{sd}	u_{sq}	i_{sq}	w_r
Case1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Case2	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1

随机误差噪声会影响求导的精度，使辨识结果出现误差，为消除噪声对辨识结果影响，本文选用自适应正弦滤波器^[8]对实测信号进行滤波，然后采用滤波信号及其微分信号进行计算。

在两种控制方式下，利用暂态信号辨识感应电机模型参数，所得结果如表 3、表 4 所示。识别参

数误差、最大识别参数误差及识别参数的适配值分别定义为

$$Error_i(\%) = \left| \frac{\theta_i - \hat{\theta}_i}{\theta_i} \right| \times 100\% (i=1,2,3,4) \quad (11)$$

$$Error_{max}(\%) = \max\{Error_1, Error_2, Error_3, Error_4\} \quad (12)$$

$$Fitness = \sum_{t_k} \sum_{j=1}^M [y_j(t_k) - \hat{y}_j(t_k)]^2 \quad (13)$$

式中： $\hat{\theta}_i$ 为识别参数； θ_i 为试验参数； $y_j(t_k)$ 为实测数据； $\hat{y}_j(t_k)$ 为 $\hat{\theta}_i$ 对应的模型输出数据。

表 3 感应电动机模型识别参数、最大识别参数误差及适配值（恒转速控制）

Table 3 Identified parameters with their maximum error and fitness based on the IM model (constant speed control)

测量数据 $\hat{y}_j(t_k) = [\hat{u}_{sd}(k) \ \hat{u}_{sq}(k)]^T \ (M=2)$							
	R_s/Ω	R_r/Ω	L_s/H	L_r/H	L_m/H	$Error_{max}$	$Fitness$
试验参数	0.435	0.816	0.004	0.004	0.069	0.00	0.00
Case1	0.435 6	0.817 2	0.004 5	0.004 5	0.072 2	12.5	0.32
Case2	0.437 0	0.821 1	0.004 7	0.004 7	0.074 0	17.5	1.58

表 4 感应电动机模型识别参数、最大识别参数误差及适配值（恒转矩控制）

Table 4 Identified parameters with their maximum error and fitness based on the IM model (constant torque control)

测量数据 $\hat{y}_j(t_k) = [\hat{u}_{sd}(k) \ \hat{u}_{sq}(k)]^T \ (M=2)$							
	R_s/Ω	R_r/Ω	L_s/H	L_r/H	L_m/H	$Error_{max}$	$Fitness$
试验参数	0.435	0.816	0.004	0.004	0.069	0.00	0.00
Case1	0.435 9	0.820 0	0.004 6	0.004 6	0.072 0	15	0.47
Case2	0.438 2	0.827 8	0.004 7	0.004 7	0.073 3	17.5	1.69

由表 3、表 4 可知，在两种不同水平的测量噪声下，采用步长加速法辨识参数模型，辨识值与真值比较接近，辨识结果比较理想，计算量小，且不受控制方式影响。两种控制方式下的辨识拟合曲线与实测曲线的比较如图 4~图 7 所示。

由图可知：在两种控制方式下，d、q 轴电压辨识曲线都能比较精确地拟合实测曲线。

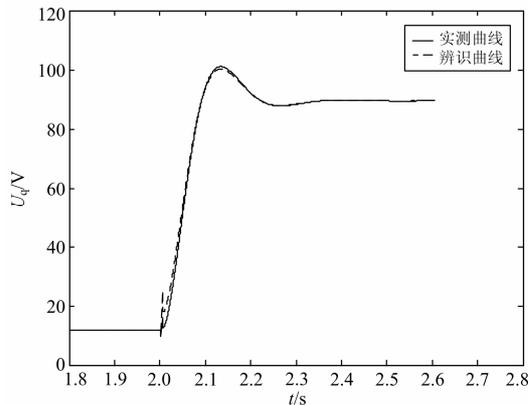


图 4 q 轴电压曲线（恒转速）

Fig. 4 Voltage curves of q-axis (constant speed control)

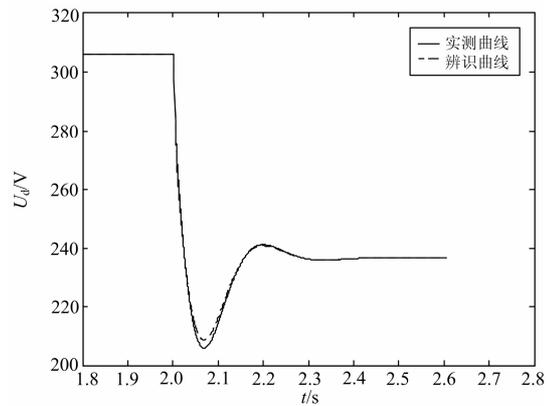


图 5 d 轴电压曲线（恒转速）

Fig. 5 Voltage curves of d-axis (constant speed control)

5 结论

本文提出了一种只由定子电压电流交直轴分量表示的感应电动机复数简化动态数学模型。选用自

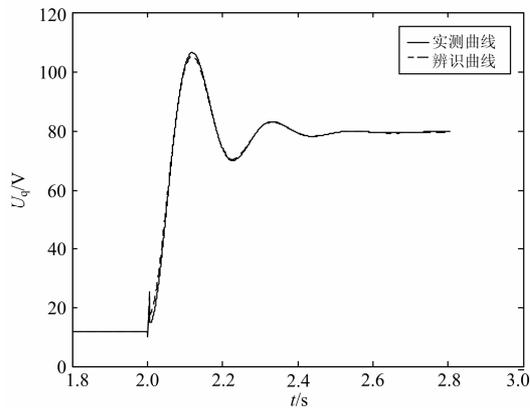


图6 q轴电压曲线(恒转矩)

Fig. 6 Voltage curves of q-axis (constant torque control)

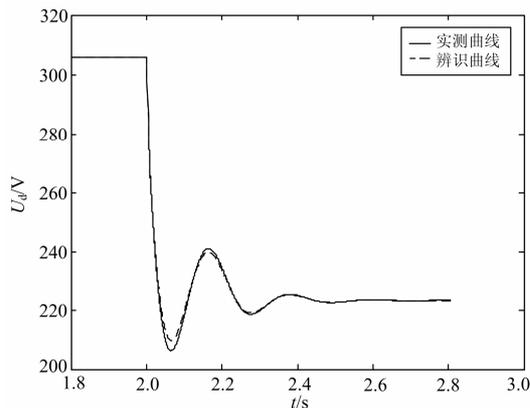


图7 d轴电压曲线(恒转矩)

Fig. 7 Voltage curves of d-axis (constant torque control)

适应正弦滤波器并获取微分信号,采用步长加速法辨识电机模型参数。该模型考虑了电动机的非线性,避免了求解复杂的非线性微分方程组,简化了参数辨识方法,保证了算法的收敛性和结果的准确性,提高了辨识的稳定性和效率,易于工程实现。

通过 Matlab 算例仿真可知:模型在两种电机控制方式下参数辨识结果准确、能精确拟合实测响应,充分验证了其正确性和有效性。

参考文献

- [1] 程启明, 程尹曼, 王映斐, 等. 交流电机控制策略的发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 145-154. CHENG Qi-ming, CHENG Yi-man, WANG Ying-fei, et al. Overview of control strategies for AC motor[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 145-154.
- [2] 王明渝, 洗成渝, 梅娅倩. 感应电动机矢量控制参数离线辨识技术[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 90-96. WANG Ming-yu, XIAN Cheng-yu, HUI Ya-qian. An

off-line parameter estimation technique for vector controlled induction machine drive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(8): 90-96.

- [3] 张虎, 李正熙, 童朝南. 基于递推最小二乘算法的感应电动机参数离线辨识[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 79-86. ZHANG Hu, LI Zheng-xi, TONG Chao-nan. Off-line parameter identification of induction motor based on recursive least-squares algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18): 79-86.
- [4] 许镇琳, 何启莲, 李国民, 等. 异步机矢量控制系统的电机参数自设定[J]. 电工技术学报, 1995, 10(1): 44-47. XU Zhen-lin, HE Qi-lian, LI Guo-min, et al. Self-setting of motor parameters of vector control systems of induction motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1995, 10(1): 44-47.
- [5] 刘钰山, 葛宝明, 毕大强, 等. 基于改进的直接转矩控制的风力机模拟系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 140-144. LIU Yu-shan, GE Bao-ming, BI Da-qiang, et al. Improved direct torque control based wind turbine simulation system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 140-144.
- [6] 宋帅, 张英敏, 李兴源. 考虑感应电动机故障中电磁转矩变化的节点暂态电压评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 103-108. SONG Shuai, ZHANG Ying-min, LI Xing-yuan. Assessment method of transient voltage stability of load bus considering the changing of induction motor electromagnetic torque in fault[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 103-108.
- [7] 林舜江, 刘明波. N-1 故障后系统小干扰电压稳定极限点计算[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 33-39. LIN Shun-jiang, LIU Ming-bo. Computation of small disturbance voltage stability limit point of power systems under N-1 contingencies[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 33-39.
- [8] 李建军, 盛洁波, 王翠, 等. 异步电机定转子参数的辨识方法研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 70-74. LI Jian-jun, SHENG Jie-bo, WANG Cui, et al. Research on parameter identification method for induction motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,

- 2006, 21(1): 70-74.
- [9] 黄开胜, 童怀, 郑泰胜, 等. 遗传算法在异步电动机动态模型参数识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 37-41.
HUANG Kai-sheng, TONG Huai, ZHENG Tai-sheng, et al. Parameter estimation for an induction motor's dynamic model using genetic algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 37-41.
- [10] CHEN Zhen-feng, ZHONG Yan-ru, LI Jie. Parameter identification of induction motors using ant colony optimization[C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation, Hong Kong, China, 2008: 1611-1616.
- [11] PICARDI C, ROGANO N. Parameter identification of induction motor based on particle swarm optimization[C] // IEEE International Congress on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Taormina, Italy: IEEE, 2006: 968-973.
- [12] 夏超英. 基于复数模型描述的感应电动机参数辨识算法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 1-6.
XIA Chao-ying. Some parameter identification methods of an induction motor based on its complex quantity descriptions[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12): 1-6.
- [13] 汤蕴璆, 张奕黄, 范瑜. 交流电机动态分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [14] 周明宝, 瞿文龙, 罗本东, 等. 异步电机暂态等值电路和暂态电磁转矩分析[J]. 清华大学学报, 1993, 33(4): 101-109.
ZHOU Ming-bao, QU Wen-long, LUO Ben-dong, et al. Transient equivalent circuits of induction motors and transient electromagnetic torque analysis[J]. Journal of Tsinghua University, 1993, 33(4): 101-109.
- [15] 黄开胜, 刘文峰, 童怀. 异步电动机准确数学模型及仿真[J]. 中小型电机, 2001, 28(4): 17-19.
HUANG Kai-sheng, LIU Wen-feng, TONG Huai. Accurate mathematical model and simulation for asynchronous motor[J]. S & M Electric Machines, 2001, 28(4): 17-19.
- [16] 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 69-71.
XUE Ding-yu, CHEN Yang-quan. Advanced applied mathematical problem solutions with MATLAB[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 69-71.
- [17] 钱颂迪. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [18] 罗建. 基于神经网络模型的母线保护研究和实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
LUO Jian. Research and realization of bus protection based on ANN model[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.

收稿日期: 2013-12-30; 修回日期: 2014-03-15

作者简介:

姜杰(1958-), 男, 副教授, 主要从事电力系统保护与综合自动化研究;

王学斌(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统建模与参数辨识. E-mail: xbw1989@qq.com