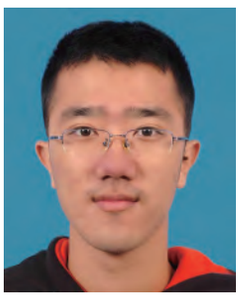
基于 Matlab/Simulink 的三相异步电动机参数识别

针对三相异步电动机系统的参数辨识提出一种准确、简便的方法，并通过对异步电动机进行的直流、空载和堵转测试以确定电动机的基本性能参数。利用上述试验获取两种不同型号异步电动机的等效电路参数，然后将这些参数在运行 Matlab/Simulink 的环境下建立用于上述不同类型试验测试的等效模型，并进行相应的虚拟仿真。此外，为了评估所建立等效模型的有效性及仿真准确度，将试验结果与仿真结果进行比较，其相对误差表明仿真结果和试验测试结果之间具有较好的相关性，并具有良好的动静态特性，最终验证了所建模型的准确性。

徐　文/海南大学机电工程学院　佟智勇/国网保定供电公司



徐　文/硕士研究生

关键词/Keywords
三相异步电动机·
Matlab/Simulink·
系统辨识·

三相异步电动机是工业中应用最为广泛的电动机，这是由于其具有简单、坚固、廉价和易于维护等诸多优点所决定的。然而，当载荷发生波动时异步电动机的性能可能受到影响，并且当电动机的工作载荷大于额定值时可能还会损坏电动机或者其部件。因此，异步电动机的等效电路对确定其负载变化时的响应是一个非常有用的工具。同时提出了对仿真模型的研究，利用 Matlab/Simulink 软件对异步电动机的参数进行辨识，并通过与试验结果的对比研究，确定所建立试验模型的准确度。

目前，许多的研究人员旨在辨识异步电动机的主要参数，例如对异步电动机的参数应用动态优化以对其进行矢量控制及故障检测[1]、在间接矢量控制驱动过程中使用人工神经网络对异步电动机定子和转子的阻抗进行在线评估[2-4]，另一个在线参数评估则采用最小二乘法[5-7]。本文采用三项基本测试的传统方法，其中包括直流测试、空载测试和制动测试，并将试验结果与仿真结果进行比较。直流、空载和堵转测试的仿真模型可通过 Matlab/Simulink 和电力系统模块集（Power System Blockset，PSB）获得[8-10]。在国内也有诸多的研究人员致力于在 Matlab/Simulink 环境下对异步电动机进行系统辨识和系统仿真的研究[11,12]。本文通过比较试验结果和计算机仿真结果的关联性，有利于不断提高虚拟异步电动机仿真的参数准确度。

系统辨识方法的基本原理

图 1 所示的辨识方法流程图描述了整个研究过程中所采用的相关方法，其由试验测试和 Matlab 仿真两个部分组成。

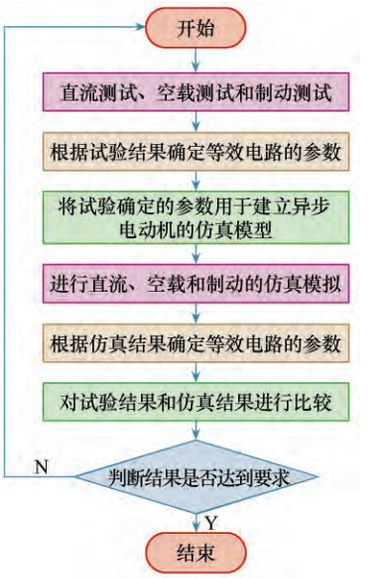


图 1　辨识方法流程图

三相异步电动机稳定状态的运行特征通常采用单相等效电路的方式进行研究，如图 2 所示。

在等效电路图中，R_1 和 X_1 分别为定子电阻和漏磁电抗；R_2 和 X_2 分别为与定子相应的转子电阻和漏磁电抗；电阻R_C为

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

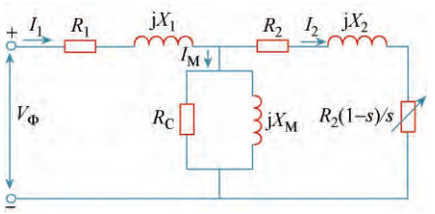


图 2　异步电动机的单相等效电路图

铁心损耗；X_M 为磁化电抗；s 为转差率。

等效电路通常用于促进各种运行参数的计算，例如定子电流、输入功率、损耗、感应转矩和效率等。当需要着重研究电源的运行相位时，分流电阻 R_C 通常可以忽略不计，铁心损耗包括摩擦、间隙和杂散损耗等引起的损耗。

试验测试

等效电路的参数能够通过直流、空载和堵转试验测试的方法获取，上述试验测试采用两种型号的绕线转子异步电动机（采用 Y 形联结，极数为 4），即 UiTM Shah Alam 公司的 2 AW 1666 和 MCD NO. SD54 429 两种型号的异步电动机进行测试，并分别用 M_1 和 M_2 表示，异步电动机的具体技术参数如表 1 所示。

表 1　异步电动机的技术参数

	功率 /kW	电压 /V	电流 /A	频率 /Hz	转速 /(r/min)
M_1	242	415	5	50	1 430
M_2	223.7	415	6	50	1 440

1. 直流测试

在异步电动机的定子绕组上施加直流电压 V_{dc}，然后进行直流测试验以计算定子绕组的电阻 R_1。由于通过定子绕组的电流为直流，因此在转子回路中没有产生任何电压，并且电动机的电抗为零，此时定子电阻 R_1 是电路中唯一能够影响电流的参数，其计算公式为

$$R_1 = \frac{V_{dc}}{2I_{dc}} \tag{1}$$

2. 空载测试

异步电动机的空载（No－Load，NL）测试旨在测量电动机的转动损耗及确定部分等效电路的参数（R_C、X_M），如图 3 所示。在空载测试中，定子接线端提供额定频率的平衡电压，并且同时要求电动机转子不能与任何的机械负载相连。并需要测量电动机的输入端的电压、电流和功率，总损耗包括铁心损耗、绕组损耗以及由间隙和摩擦引起的损耗等部分。

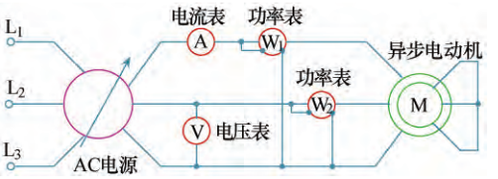


图 3　空载和制动测试的电气连接图

从图 3 中可以看出，等效的输入阻抗可以近似计算，其公式为

$$|Z_{eq}| = \frac{V_\theta}{I_1} \approx X_1 + X_M \tag{2}$$

式中，X_1 可以通过转子制动试验获得；X_M 为磁化阻抗，可从异步电动机技术参数中获知，并且忽略电阻 R_C。

3. 堵转测试

堵转（Blocked－Rotor，BR）测试的目的旨在确定等效电路的一些参数（包括 R_2 和 X_1+X_2），在该试验测试中，电动机的转子将处于受阻状态。然后对电动机定子施加平衡电压，其使用频率是额度频率的 25%，并且该平衡电压能够使电动机在额定电流条件下运行。测量电动机输入端的电压、电流及功率等参数，且电动机的输入功率可由式（3）计算得到

$$P = \sqrt{3}V_T I_L \cos\theta \tag{3}$$

因此堵转阻抗角 θ 为

$$\theta = \cos^{-1}\frac{P_{in}}{\sqrt{3}V_T I_L} \tag{4}$$

总的阻抗角也为 θ，因此

$$|Z_{BR}| = R_{BR} + jX'_{BR} = |Z_{BR}|\cos\theta + j|Z_{BR}|\sin\theta \tag{5}$$

式中，R_{BR}为堵转电阻，能够由下式获得

$$R_{BR} = R_1 + R_2 \tag{6}$$

因为 R_1 可由直流测试确定，故转子电阻 $R_2 = R_{BR} - R_1$，则获得堵转阻抗为

$$X_{BR} = \frac{f_{rated}}{f_{test}}X'_{BR} = X_1 + X_2 \tag{7}$$

式中，f_{rated}和f_{test}分别为额度频率和测试频率，但由于试验测试采用的是绕线式异步电动机，因此转子电抗有如下关系

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$R_{BR} = R_1 + R_2 \quad (8)$$

异步电动机的 Matlab/Simulink 仿真

试验测试参数辨识通过使用 Matlab/Simulink 虚拟异步电动机来证实，表 2 为用于仿真试验的辨识参数，图 4、图 5 分别为直流测试和空载测试的仿真模型，并可以获得定子电阻。

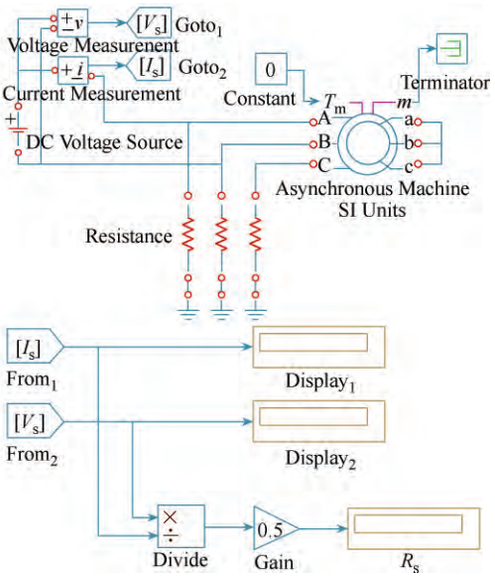


图 4 直流测试仿真的 Simulink 模型

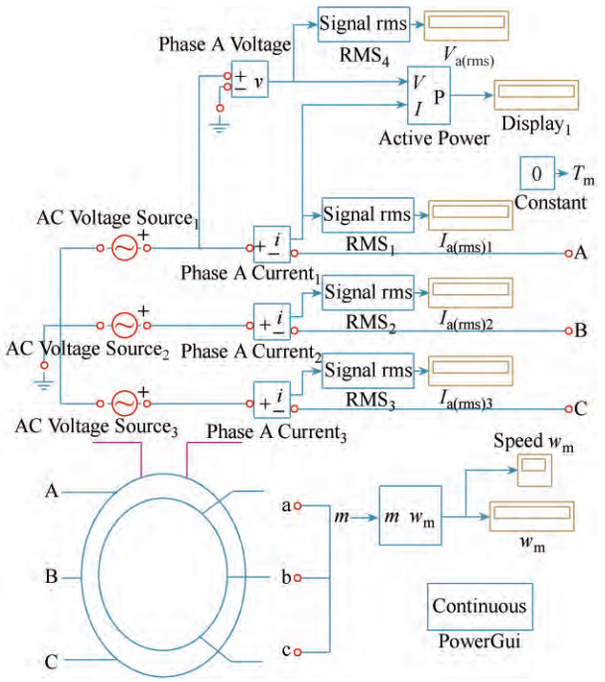


图 5 空载测试和堵转测试的 Simulink 仿真模型

虚拟的空载和堵转测试仿真均使用相同的 Simulink 模型，但是惯量和摩擦参数设置有一些不同，其中堵转测试仿真的惯量和摩擦力设定为无限值（惯量设为 10 000 kg·m^2，摩擦力设为 10 000 N·m·s/rad）。两台电动机的虚拟仿真参数如表 2 所示。

表 2 电动机虚拟测试仿真参数的设置

	M_1	M_2
额度功率、电压和频率	242 kW、415 V 和 50 Hz	223.7 kW、415 V 和 50 Hz
定子（R_1 和 L_1）	4.896 Ω；0.003 91 H	0.625 Ω；0.233 2 H
转子（R_1 和 L_1）	5.774 Ω；0.003 91 H	9.815 Ω；0.023 32 H
互感系数 L_M	0.217 15	0.033
惯量/kg·m^2	0.031 24	0.031 24
极对数	2	2
摩擦力/（N·m·s/rad）	0.003 58	0.003 58

结果分析及讨论

试验结果和仿真结果分别如表 3、表 4 所示，其中诸如电压、电流和功率等各种变量被用于计算电动机的等效参数。

表 3 异步电动机的试验结果

	测试项目	电压/V	电流/A	功率/W
M_1	直流	0.235	0.024	–
	空载	415	3.45	2 210
	堵转	94.8	5	800
M_2	直流	0.03	0.024	–
	空载	415	3	1 969
	堵转	187	6	1 128

表 4 异步电动机的仿真结果

	测试项目	电压/V	电流/A	功率/W
M_1	直流	0.235	0.024 3	–
	空载	415	3.447	2 218
	堵转	94.8	4.993	800.1
M_2	直流	0.03	0.024	–
	空载	415	2.996	1 967
	堵转	187	5.98	1 128

为了确定上述模型的仿真准确度和仿真效果，试验和仿真得到的各个参数值需要进行比较，并利用相对误差评估相应的仿真准确度和效果，具体的试验和仿真结果以及相对误差如表 5 所示。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5　等效电路参数的试验和仿真结果以及相对误差

		R_1/Ω	R_2/Ω	X_1/Ω	X_2/Ω	X_M/Ω
M_1	试验值	4.896	5.774	1.23	1.23	68.22
	仿真值	4.843	5.857	1.20	1.20	68.31
	误差（%）	1.08	1.44	2.44	2.44	0.13
M_2	试验值	0.625	9.815	7.325	7.325	72.545
	仿真值	0.625	9.885	7.335	7.335	72.635
	误差（%）	0.00	0.71	0.14	0.14	1.19

分析比较表 5 中等效电路参数的试验及仿真结果，可以看出，电动机 M_2 的相对误差要小于电动机 M_1，这说明本文提出的辨识方法能够更精确地辨识电动机 M_2 的参数，因而该辨识方法更适合类似于 M_2 的异步电动机。对于电动机 M_2 的参数 R_1 来说，其仿真结果与试验结果完全相同，然而电动机 M_1 的参数 R_1 却稍有不同。

此外，比较电动机 M_1 和 M_2 其他参数的试验和仿真结果，能够发现电动机 M_1 结果的相对误差要高于电动机 M_2，其中参数 X_1 和 X_2 两个参数的相对误差尤为明显，这可能是由于试验中使用的异步电动机相对老旧或者长时间没有使用，因而造成试验结果的不准确。但从总体来说，尽管在电动机 M_1 的参数 X_1 和 X_2 误差较大的情况下，上述的所有结果表明仿真和试验的平均相对误差均小于 3%，仍然在可以接受的误差范围内。根据仿真和试验结果的比较表明，本文提出的 Matlab/Simulink 辨识方法能够准确获取异步电动机的等效参数，在异步电动机的应用中具有一定实际意义。

结束语

研究的目的在于利用 Matlab/Simulink 建立一种准确有效的三相异步电动机模型，以及对三相异步电动机进行试验测试以确定其实际参数值。通过分析上述两种方法获得结果的相对误差，可以看出虚拟异步电动机的参数与实际参数有很好的关联性，从而验证了异步电动机模型的准确性和有效性。然而本文的不足之处在于仅仅对两台异步电动机进行试验对比研究，同时电动机间的偏差和环境噪声对试验结果也有一定影响。本文所研究的内容在诸多领域中均具有较大的实际应用意义。

参考文献

[1] Jong Wook Kim，Kim S W. Parameter identification of induction motor using dynamic encoding algorithm for searches [J]. IEEE Transcations on Energy Conversion，2005，20（1）：16-24.

[2] 刘蜀宁. 异步电机参数的在线辨识研究 [D]. 成都：四川大学，2001.

[3] 杜斌. 基于参数在线辨识技术的交流异步电动机热保护系统 [J]. 中国电机工程学报，1996，16（5）：328-331.

[4] 周熙炜，刘卫国，郎宝华. 异步电动机转子参数的在线辨识方法 [J]. 微特电机，2006，34（12）：16-18.

[5] Huynh DC，Dunnigan M，Finney S. On - line parameter estimation of an induction machine using a recursive least - squares algorithm with multiple time - varying forgetting factors [C]. Power and Energy（PECon），2010 IEEE International Conference on，2010：444-449.

[6] Kaiyu Wang，John Chiasson，Marc Bodson，et al. A nonlinear least - squares approach for identification of the induction motor parameters [J]. IEEE Transcations on Automatic Control，2005，50（10）：1622-1628.

[7] 王鸿山，张兴，杨淑英，等. 基于最小二乘法在线参数辨识的异步电动机矢量控制仿真 [J]. 合肥工业大学学报：自然科学版，2009，32（4）：495-499.

[8] Amar Bentounsi，Hind Djeghloud，Hocine Benalla，et al. Computer - aided teaching using Matlab/Simulink for enhancing an IM course with laboratory tests [J]. IEEE Transcations on Education，2011，54（3）：479-491.

[9] Bentounsi A，Djeghloud H. Hand - on experiments and computer - aided simulations for sustaining the IM course [C]. Electrical Machines（ICEM），2010 XIX International Conference on，2010：1-6.

[10] Ayasun S，Nwankpa Co. Induction motor tests using Matlab/Simulink and their integration into undergraduate electric machinery courses [J]. IEEE Transcations on Eduction，2005，48（1）：37-43.

[11] 李建军，盛洁波，王翠，等. 异步电动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.

[12] 李敏，肖兵. 异步电动机参数辨识 [J]. 信息技术 2013（6）：104-106.

（收稿日期：2014-04-25）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net