

文章编号 :1007-649X(2000)02-0067-04

三阶感应电动机负荷模型参数易辨识性研究

时 雨¹,张红斌²,章 健²,姜和恭²

(1.河南省第五建筑安装工程有限公司,河南 郑州 45007;2.郑州工业大学电气信息工程学院,河南 郑州 450002)

摘 要:三阶感应电动机负荷模型中部分参数易辨识,且辨识结果稳定,而另一部分参数难辨识,辨识结果存在较大离散性.通过对参数灵敏度进行分析,指出了参数灵敏度与参数易辨识性之间的关系,以及扰动强度与参数灵敏度从而参数易辨识性的关系.最后给出了对实际三阶感应电动机参数辨识的分步方法.利用较小的扰动强度数据来辨识具有较大灵敏度的参数,利用具有足够强度的扰动数据来辨识灵敏度小的参数.

关键词:三阶感应电动机;参数辨识;灵敏度分析;辨识策略

中图分类号:TM 712 文献标识码:A

本文针对三阶感应电动机负荷模型参数辨识中存在的问题,对参数灵敏度进行分析,指出了参数灵敏度与参数易辨识性之间的关系,以及扰动强度与参数灵敏度及参数易辨识性的关系.最后提出了三阶感应电动机参数的分步或逐步辨识方法,对于实际工作中指导三阶感应电动机模型的参数辨识具有重要意义.

1 三阶感应电动机负荷模型参数辨识中存在的问题

本文通过两个动模实验中三阶感应电动机负荷模型的参数辨识,来说明辨识中存在的问题.

表 1 动模实验一的三阶感应电动机模型参数辨识结果

组别	r_s	x_s	x'	$T'_{d1}(s)$	β	K_L	T_j
1	0.436	1.2868	0.1515	0.2097	88.4990	13.4633	0.1044
2	0.0991	1.5498	0.1670	0.2207	72.0294	12.4548	5.6701
3	0.1266	1.4480	0.1415	0.2217	49.7716	5.7994	4.7995
4	0.2486	1.1686	0.2112	0.1091	7.1968	1.7982	0.1631
5	0.2693	1.0050	0.1675	0.0928	10.3436	1.9422	0.1851

1.2 动模实验二^[2]

实验数据取自于清华大学动模实验室中所获得的辨识结果.实验负荷分别由 4.5 kW,2.8 kW,1.7 kW 3 台感应电动机及 4.5 kW 的白炽灯并联组成.

1.1 动模实验—^[1]

负荷建模数据来源于 1996 年清华大学国家重点实验室的动模实验.负荷由两台风机(均为 1.0 kW)一台感应电动机(1.2 kW)及两组白炽灯(1.2 kW,2.4 kW)构成,其中感应电动机负载为发电机带电炉.选择 5 组扰动强度不同的实验数据,分别辨识等值三阶感应电动机模型参数.第一组电压突降 10%,然后恢复;第二组电压突降 17%,然后恢复;第三组电压突降 30%,然后恢复;第四组电压突降 80%,然后恢复;第五组电压突降 80%,然后恢复至 73%.结果如表 1 所示.

通过在动模实验网络某处三相短路和某双回线切除一条线路来模拟大、小扰动.两种扰动在负荷母线处产生的电压变动幅度分别为 80% 和 15%.辨识等值三阶感应电动机模型参数的两组数据如表 2 所示.

收稿日期 2000-02-10,修订日期 2000-03-20

基金项目 河南省自然科学基金资助项目(984061500)

作者简介 时 雨(1962-),男,河南省郑州市人,河南省第五建筑安装工程有限公司工程师,主要从事电力系统及其自动化方面的研究.

表 2 动模实验二的三阶感应电动机模型参数辨识结果

故障情况	r_s	x_s	x'	$T'_{d0}(s)$	β	K_L	T_j
出线三相短路	0.0878	2.574	0.2601	0.2760	3.121	0.7126	0.3214
双回线切除一回线	0.05263	2.867	0.1998	0.3374	0.1079	0.8185	0.9081

由表 1、表 2 的辨识参数可以看出 :三阶感应电动机负荷模型中的有些参数(例如电气参数 r_s, x_s, x', T'_{d0})无论在大扰动还是小扰动情况下 ,都比较容易辨识 ,并且辨识结果也较稳定 .而有些参数(例如机械参数 K_L, β, T_j)则难以辨识 ,辨识结果不稳定 ,大扰动和小扰动情况下的辨识结果具有很大的离散性 .这一现象经常存在于建模过程中 .因此有必要进行深入分析 ,并在模型参数辨识的实践中确定相应的对策 .

2 三阶感应电动机负荷模型参数灵敏度分析

这里拟以带并联恒定阻抗、具有典型参数的三阶感应电动机负荷模型为例 ,对参数灵敏度分析 .三阶感应电动机负荷模型等值电路见图 1 .

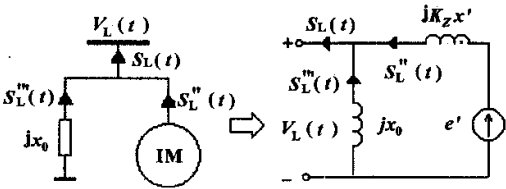


图 1 三阶感应电动机等值电路图

描述感应电动机负荷机电暂态过程的微分方程由转子运动方程和暂态电势变化方程组成 ,转子运动方程为

$$T_j \frac{ds}{dt} = T_m - T_e, \tag{1}$$

其中 机械负载力矩由下式确定

$$T_m = K_L(\alpha + (1 - \alpha)(1 - s)^2). \tag{2}$$

电磁力矩方程为

$$T_e = -R_e(e\hat{I}) \cdot K_p = -(e'_R I_R + e'_L I_L) \cdot K_p. \tag{3}$$

暂态电势变化方程

$$\frac{de'_L}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}}[-e'_L - jK_z(x - x')I - jT'_{d0}e'_L s 2\pi f_0], \tag{4}$$

实虚部分开表示的电势变化方程可写为

$$\begin{cases} \frac{de'_R}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}}[K_z(x - x')I_I + T'_{d0}e'_L s \cdot 2\pi f_0 - e'_R]; \\ \frac{de'_L}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}}[-K_z(x - x')I_R - T'_{d0}e'_R s \cdot 2\pi f_0 - e'_L]; \end{cases} \tag{5}$$

其中 :
$$x' = x_1 + \frac{x_2 x_\mu}{x_2 + x_\mu};$$
$$x = x_1 + x_\mu;$$
$$x_\mu = T'_{d0} R_2 \cdot 2\pi f_0 - x_2,$$

式中 : K_z 为等值电路中将机组本身基值的阻抗转换为系统基值阻抗的系数 .在保证感应电动机有功负荷等于给定值 $P_{L|0}$ 的条件下 , K_z 可由初值计算求出 .其计算步骤是 :

(1) 先求初始暂态电势 . $e'_{(0)} = e_{R(0)} + j e_{L(0)}$

根据 $\frac{de'}{dt} \Big|_0 = 0$ 的条件可得

$$0 = -e'_{(0)} - jK_z(x - x')I_{(0)} - jT'_{d0}e'_{(0)}s_0 2\pi f_0,$$

由于
$$I_{(0)} = \frac{e'_{(0)} - V_{L(0)}}{jK_z x'},$$

因而

$$e'_{(0)} = \frac{-\frac{x - x'}{x'} V_{L(0)}}{\left(-1 - \frac{x - x'}{x'}\right) - j2\pi f_0 s_0 T'_{d0} (C_R + jC_L)V_{L(0)}} =$$
$$(C_R + jC_L)V_{L(0)}. \tag{6}$$

(2) 计算系数 K_z . K_z 为等值电路中将机组本身基值的阻抗转换为系统基值阻抗的系数 :

$$K_z = -\frac{C_L V_{L(0)}}{P_{L(0)} x'}. \tag{7}$$

K_p 为将系统基值标么值转换为电动机本身基值标么值的系数 .计算公式为

$$K_p = \frac{P_{L(0)}^*}{P_{L(0)}}, \tag{8}$$

其中 : $P_{L(0)}$ 为初始条件下给定的感应电动机有功功率 ,为系统基值的标么值 ; $P_{L(0)}^*$ 是该有功功率以电动机本身容量为基值的标么值 .

机械负载力矩方程式(2)中 K_L 为感应电动机负荷率系数 ,可由下式求出

$$K_L = \frac{P_{L(0)}^*}{\alpha + (1 - \alpha)(1 - s_0)^2}, \tag{9}$$

并联阻抗中吸收的功率为

$$S''_L(t) = P''_L(t) + jQ''_L(t) = -j \frac{V_L^2(t)}{x_0}; \tag{10}$$

感应电动机吸收的功率为

$$S'_L(t) = P'_L(t) + jQ'_L(t) = -V_L(t) \hat{I}(t). \tag{11}$$

其中 :

$$\mathbf{I}(t) = I_R(t) + jI_L(t) = \frac{e'(t) - \mathbf{V}_L(t)}{jK_\infty x'}$$

母线负荷吸收的总功率为

$$S_L(t) = P_L(t) + jQ_L(t) = S'_L(t) + S''_L(t), \tag{12}$$

设参数为 $\theta^* = f(R_2^*, x_1^*, \alpha^*, \beta^*, s_0^*, T_j^*)$ 的电动机在激励 $V_L(t)$ 下的响应为 $P_L(t, \theta^*)$ 和 $Q_L(t, \theta^*)$,若改变参数为 $\theta = \theta^* + \Delta\theta$,则在相同激励 $V_L(t)$ 下的响应将改变为 $P_L(t, \theta) = P_L(t, \theta^* + \Delta\theta)$, $Q_L(t, \theta) = Q_L(t, \theta^* + \Delta\theta)$.
定义参数变化引起的响应偏差为

$$\Delta y(\theta) = \Delta y(\theta^* + \Delta\theta) = \sum_{t=1}^N \{ P_L(t, \theta^*) \}^2 +$$

表3 典型参数附近各参数单位变化引起的响应变化

扰动/%	R_2	x_1	x_2	α	β	s_0	T_j
10	0.3707	6.76×10^{-4}	9.21×10^{-4}	4.48×10^{-7}	7.62×10^{-8}	0.942	6.87×10^{-6}
30	1.581	4.17×10^{-3}	5.63×10^{-3}	2.21×10^{-6}	3.71×10^{-7}	4.133	8.05×10^{-5}
50	4.630	1.29×10^{-2}	1.75×10^{-2}	8.78×10^{-6}	1.46×10^{-6}	9.468	2.42×10^{-4}
70	12.767	3.28×10^{-2}	4.45×10^{-2}	2.86×10^{-5}	4.86×10^{-6}	20.533	5.05×10^{-4}

为了对各参数的灵敏度有一个全面的认识 ,下面研究各参数的灵敏度函数.在公式 (13) 中 ,仅允许一个参数可变 ,其余参数固定 ,则多元函数 $\Delta y(\theta^* + \Delta\theta)$ 变为一元函数 $\Delta y(\theta_i^* + \Delta\theta_i)$, $i = 1, 2, \dots, m$ 为模型参数个数. $\Delta y(\theta_i^* + \Delta\theta_i)$ 反映了响应偏差与参数增量的关系 ,这里称为灵敏度函数 ,而以 $\Delta\theta_i$ 为横坐标、 Δy 为纵坐标在平面上绘出的曲线称为灵敏度函数曲线.取 θ^* 为典型三阶感应电动机参数^[34] ,激励 $V_L(t)$ 为阶跃下降然后回复的形式 ,计算各参数灵敏度函数曲线 ,其中微分方程组采用四阶龙格 - 库塔求解.由于响应对模型各参数变化的敏感程度有很大的差异 ,故将相近灵敏度的参数对应的灵敏度函数曲线绘制在一起 ,如图 2、图 3 所示.

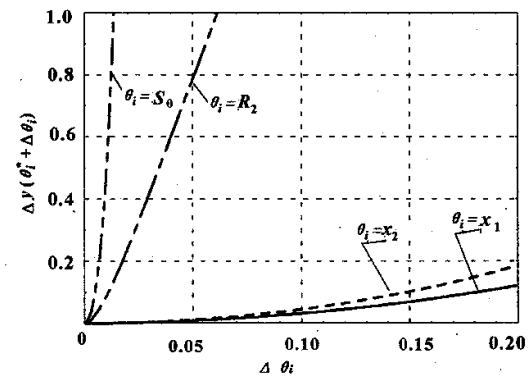


图2 高灵敏度参数的灵敏度函数曲线

$$\{ Q_L(t, \theta^* + \Delta\theta) - Q_L(t, \theta^*) \}^2 \} ; \tag{13}$$

定义响应偏差对某一个参数 θ^i 的灵敏度为

$$L_i = \frac{\Delta y(\theta_i^* + \Delta\theta_i)}{\Delta\theta_i}, \tag{14}$$

此式表示某参数的单位变化引起的响应变化 ,反映了响应对该参数变化的敏感程度.
取典型感应电动机参数^[34] ,在该典型参数附近 ,用公式 (14) 计算在扰动分别为 10% ,30% ,50% ,70% 等 4 种情况下各参数单位变化引起的响应变化 ,结果如表 3 所示.可以看出 ,各参数的灵敏度有很大的差异 ,且各参数的灵敏度都有随激励增强而增大的趋势.

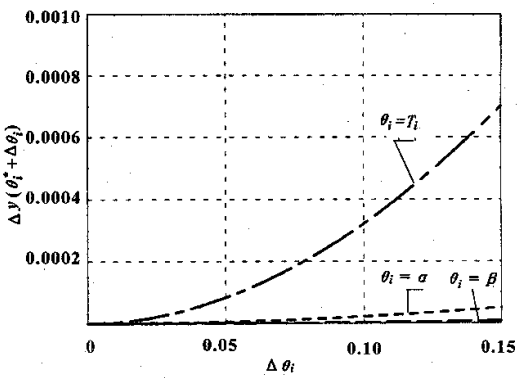
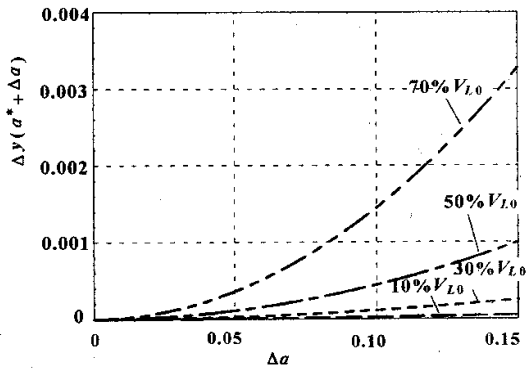
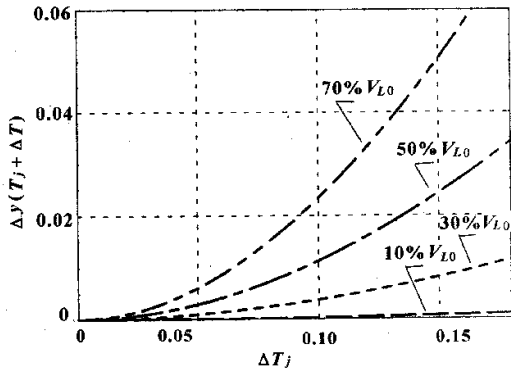


图3 低灵敏度参数的灵敏度函数曲线

由图 2、图 3 可以看出 ,两组参数中 , R_2, x_1, x_2, s_0 为高灵敏度参数组 ,即模型响应对这些参数的取值比较敏感. α, β, T_j 为低灵敏度参数组 ,模型响应对这些参数的敏感程度很低.
为研究激励强度对灵敏度的影响 ,由各电动机参数计算出不同激励强度下的灵敏度函数曲线.受篇幅所限 ,这里仅绘出各激励强度下机械参数 α 和惯性时间常数 T_j 的灵敏度函数曲线 ,如图 4、图 5 所示.
由图 4、图 5 可以看出 ,激励强度由 10% V_{L0} 到 70% V_{L0} 逐渐增强时 ,灵敏度函数曲线逐渐变陡 ,即参数灵敏度随激励的增强而增大.显然 ,这有利于参数的辨识.三阶感应电动机其余参数的灵敏度函数曲线也都有此规律 ,这里不再赘述.

图 4 不同激励强度的 $\Delta\alpha$ 灵敏度函数曲线图 5 不同激励强度的 ΔT_j 灵敏度函数曲线

3 结论

三阶感应电动机各参数单位变化量在相同激励情况下引起的响应变化是不同的,有些甚至具

有很大的差异.灵敏度大的参数(即响应对于该参数变化较敏感)相对比较容易辨识,并且辨识结果也较稳定,例如三阶感应电动机的定转子绕组的电气参数等.而灵敏度小的参数(即响应对于该参数变化不敏感)相对较难辨识,并且辨识结果也不稳定,例如三阶感应电动机的惯性时间常数、与转速有关的机械参数等.

在不同强度激励情况下,三阶感应电动机的每一个参数的灵敏度函数曲线将发生变化.随激励增强,灵敏度函数曲线逐渐变陡,即参数灵敏度随激励的增强而增大.这说明各参数都有随激励增强而逐渐容易辨识的趋势.

根据灵敏度大的参数易辨识,且辨识结果稳定参数随激励增强而逐渐容易辨识的特点,宜将三阶感应电动机参数辨识分为相对独立的两步:利用较小扰动强度的数据来辨识具有较大灵敏度的参数,利用具有足够强度的扰动数据来辨识灵敏度小的参数.

参考文献:

- [1] 章 健.电力系统负荷建模方法的研究[D].北京:华北电力大学,1997.
- [2] 沈善德.电力系统辨识[M].北京:清华大学出版社,1993.
- [3] 西安交通大学,清华大学,浙江大学,等.电力系统计算[M].北京:水利电力出版社,1978.
- [4] 倪以信.动态电力系统理论与分析[D].北京:清华大学,1995.

Parameter Sensitivity Analysis and Identification Strategy of Three Order Induction Motor Load Model

SHI Yu¹, ZHANG Hong-bin², ZHANG Jian², LOU He-gong²

(1. Henan No.5 Architectural Fitting Engineering Limited Company Zhengzhou 450007, China; 2. College of Electrical & Information Engineering Zhengzhou University of Technology Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In accordance with the problem that some parameters can be identified easily and other parameters are difficult to be identified in the load modeling of three order induction motor, this paper elucidates the relations between the parameter sensitivity and the parameter identifiability through sensitivity analysis. The problem that deals with the effects on parameter sensitivity of the intensity of excitation is also studied. Finally, the parameter identification strategy that is meaningful and valuable in modeling is advanced.

Key words: three order induction motor; parameter identification; sensitivity analysis; identification strategy