

感应电动机负荷模型参数灵敏度分析及参数易辨识性的研究

章健¹, 张红斌¹, 贺仁睦²

(1. 郑州工业大学电气信息工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 华北电力大学电力系, 北京 100085)

摘要: 针对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的问题, 本文通过参数灵敏度分析, 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。最后提出了对实际感应电动机参数辨识具有重要指导意义的分步或逐步辨识策略。

关键词: 感应电动机; 参数辨识; 灵敏度分析; 辨识策略

中图分类号: TM345⁺ 2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2000)09-0015-04

1 引言

感应电动机是电力系统数字仿真中最常用的动态负荷模型之一, 目前实际生产部门在仿真计算中普遍采用有关软件包或文献中提供的典型参数^[4]感应电动机负荷模型。而实际系统的电力负荷具有时变性、变结构性以及不同地域或不同类型负荷特性的差异性。因此不分场合、不分对象都用同一组典型参数的感应电动机来描述所有负荷的动态行为必将使仿真结果产生很大误差。

总体测辨法通过现场实测电力负荷的特性数据, 利用系统辨识技术辨识具体负荷群的等值感应电动机负荷模型参数是克服上述缺点的行之有效的办法。但参数辨识实践表明^[1, 2]: 感应电动机负荷模型中的有些参数(例如定、转子绕组的电气参数等)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(例如惯性时间常数、机械参数等)则难以辨识, 辨识结果不稳定, 大扰动和小扰动情况下辨识结果具有很大的离散性, 有时甚至相差十几倍到百倍。对此现象有些学者解释为大扰动下机械特性的非线性本质反映强烈所致, 有学者从可辨识性角度对该问题进行了理论研究, 并且有学者提出了利用遗传算法来全局寻优模型参数的方法。

本文针对感应电动机负荷模型参数辨识中存在的问题, 进行了参数灵敏度分析, 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。最后提出了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感应电动机模型的参数辨识具有重要意义。

2 感应电动机负荷模型参数辨识中存在的问题

这里通过两个动模实验的感应电动机负荷模型的参数辨识来说明在辨识中存在的问题。

2.1 动模实验一^[2]

负荷建模数据来源于1996年8月我们在清华大学国家重点实验室所做的动模实验。负荷由两台风机(均为1.0kW)、一台感应电动机(1.2kW)及两组白炽灯(1.2kW, 2.4kW)构成, 其中感应电动机负载为发电机带电炉。

选择五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。其中, 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%。参数辨识结果如表1所示。

表1 动模实验一的感应电动机模型参数辨识结果

	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组
r_s	0.1436	0.0991	0.1266	0.2486	0.2693
x_s	1.2868	1.5498	1.4480	1.1686	1.0050
x	0.1515	0.1670	0.1415	0.2112	0.1675
$T_{\omega}(s)$	0.2097	0.2207	0.2217	0.1091	0.0928
	88.4990	72.0294	49.7716	7.1968	10.3436
K_L	13.4633	12.4548	5.7994	1.7982	1.9422
T_J	0.1044	5.6701	4.7995	0.1631	0.1851

2.2 动模实验二^[1]

该例子取自于文献^[1]的作者在清华大学动模实验室中所获得的辨识结果。实验负荷由4.5kW、2.8kW、1.7kW三台感应电动机及4.5kW的白炽灯并联组成。

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 %。两组数据分别辨识等值三阶感应电动机模型的参数如表 2 所示。

表 2 动模实验二的感应电动机模型参数辨识结果

	出线三相短路	双回线切除一回线
r_s	0.0878	0.05263
x_s	2.574	2.867
x	0.2601	0.1998
$T_{\omega}(s)$	0.2760	0.3374
	3.121	0.1079
K_L	0.7126	0.8185
T_j	0.3214	0.9081

由表 1、表 2 的辨识参数可以看出,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_{ω})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 、 T_j)则难以辨识,辨识结果不稳定,大扰动和小扰动情况下辨识结果具有很大的离散性。这一现象或问题经常存在于我们的建模过程中。因此有必要对其进行深入分析,并在模型参数辨识的实践中确定相应的对策。

3 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的具有典型参数的一阶感应电动机负荷模型为例进行参数灵敏度分析,对于三阶模型可按相似的方法分析。一阶感应电动机负荷模型等值电路如图 1 所示。

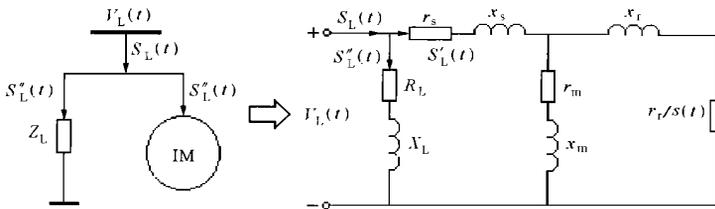


图 1 一阶感应电动机负荷模型等值电路

转子运动方程为:

$$T_j \frac{d\Delta}{dt} = T_m - T_e \quad (1)$$

其中,机械转矩为:

$$T_m = K_L [\frac{1}{s} + (1 - s)] \quad (2)$$

电磁转矩为:

$$T_e = \frac{2 T_{emax}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}} \left[\frac{V_L(t)}{V_{L0}} \right]^2 \quad (3)$$

并联阻抗中吸收的功率为:

$$S_L(t) = P_L(t) + jQ_L(t) = \frac{V_L^2(t)}{Z_L} \quad (4)$$

感应电动机吸收的功率为:

$$S_L(t) = P_L(t) + jQ_L(t) = \frac{V_L^2(t)}{Z_D(t)} \quad (5)$$

其中,

$$Z_D(t) = K_H Z_D^*(t) = K_H [(r_s + jx_s) + (r_m + jx_m) (r_r/s(t) + jx_r)] \quad (6)$$

母线负荷吸收的总功率为:

$$S_L(t) = P_L(t) + jQ_L(t) = S_L(t) + S_L(t) = [P_L(t) + P_L(t)] + j [Q_L(t) + Q_L(t)] \quad (7)$$

设参数为

$\mathbf{p}^* = (r_s^*, x_s^*, r_r^*, x_r^*, r_m^*, x_m^*, s_{cr}^*, T_{emax}^*, T_j^*, s_0^*, K_d^*)^T$ 的电动机在激励 $V_L(t)$ 下的响应为 $P_L(t, \mathbf{p}^*)$ 和 $Q_L(t, \mathbf{p}^*)$,若改变参数为 $\mathbf{p} = \mathbf{p}^* + \Delta \mathbf{p}$,则在相同激励 $V_L(t)$ 下的响应将改变为 $P_L(t, \mathbf{p}) = P_L(t, \mathbf{p}^* + \Delta \mathbf{p})$, $Q_L(t, \mathbf{p}) = Q_L(t, \mathbf{p}^* + \Delta \mathbf{p})$ 。

定义参数变化引起的响应偏差为:

$$y(\mathbf{p}) = y(\mathbf{p}^* + \Delta \mathbf{p}) = \int_{t=1}^N \{ [P_L(t, \mathbf{p}^* + \Delta \mathbf{p}) - P_L(t, \mathbf{p}^*)]^2 + [Q_L(t, \mathbf{p}^* + \Delta \mathbf{p}) - Q_L(t, \mathbf{p}^*)]^2 \} \quad (8)$$

定义响应偏差对某一个参数 p_i 的灵敏度为:

$$L_i = \frac{y(\mathbf{p}^* + \Delta p_i)}{p_i} \quad (9)$$

此式表示某参数的单位变化引起的响应变化,也即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^[3,4],在该典型参数附近用上述公式(9)计算在扰动分别为 10 %、30 %、50 %、70 % 四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。

为了对各参数的灵敏度有一个全面的认识,我们研究各参数的灵敏度函数。在公式(8)中,仅允许一个参数可变,其余参数固定,则多元函数 $y(\mathbf{p}^* + \Delta \mathbf{p})$ 变为一元函数 $y(p_i^* + \Delta p_i)$, $i=1, 2, \dots, n$, n 为模型参数个数。 $y(p_i^* + \Delta p_i)$ 反映了响应偏差与参数增量的关系,这里称为灵敏度函数,该函数以 p_i 为横坐标、 y 为纵坐标在平面上绘出的曲线称

为灵敏度函数曲线。取 * 为典型感应电动机参数^[3,4], 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, 其中转子运动方程采用四阶龙格-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。

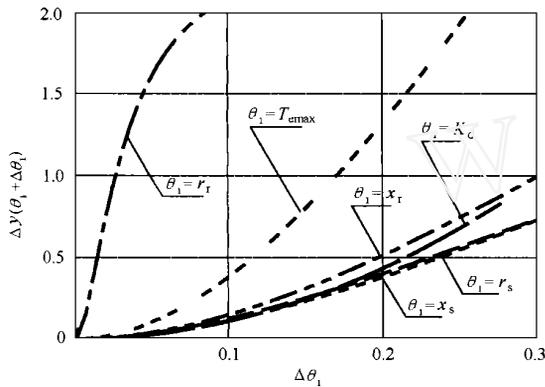


图2 高灵敏度参数的灵敏度函数曲线

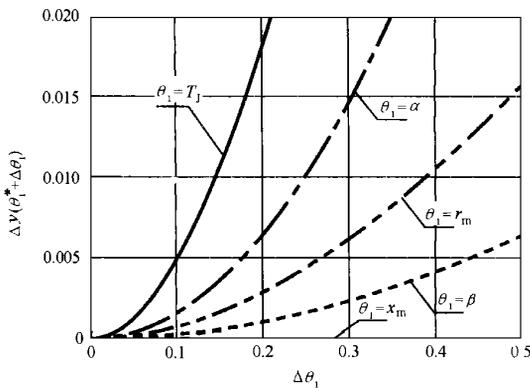


图3 低灵敏度参数的灵敏度函数曲线

由图2、图3可以看出, 两组参数中, r_s 、 x_s 、 r_r 、 x_r 、 T_{emax} 、 K_d (动态负荷有功占总负荷有功的比例) 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。 r_m 、 x_m 、 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。

进一步我们研究激励强度对灵敏度的影响。为此, 对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

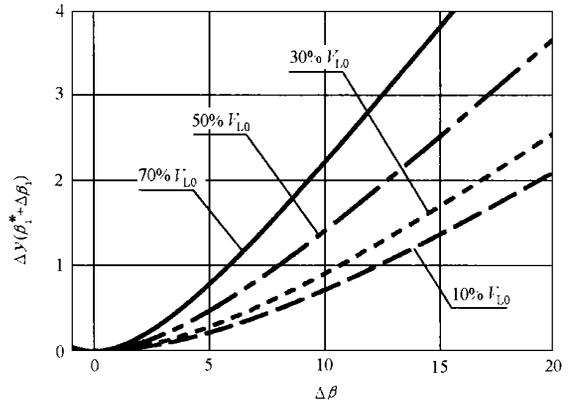


图4 不同激励强度的灵敏度函数曲线

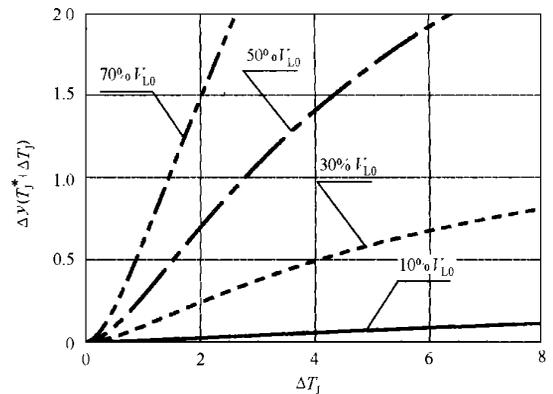


图5 不同激励强度的 T_J 灵敏度函数曲线

参数的辨识。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。

表3 典型参数附近各参数单位变化引起的响应变化

	10% V_0	30% V_0	50% V_0	70% V_0
r_s	2.152×10^{-4}	9.836×10^{-4}	3.175×10^{-3}	7.343×10^{-3}
x_s	2.017×10^{-4}	8.777×10^{-4}	2.656×10^{-3}	5.844×10^{-3}
r_r	8.986×10^{-2}	0.392	1.189	2.623
x_r	2.537×10^{-4}	1.121×10^{-3}	3.439×10^{-3}	7.638×10^{-3}
r_m	1.981×10^{-6}	6.628×10^{-6}	1.541×10^{-5}	2.844×10^{-5}
x_m	9.635×10^{-8}	2.995×10^{-7}	6.245×10^{-7}	1.039×10^{-6}
T_{emax}	7.089×10^{-3}	7.667×10^{-3}	8.916×10^{-3}	1.019×10^{-2}
α	1.211×10^{-5}	1.680×10^{-5}	3.110×10^{-5}	5.778×10^{-5}
β	2.118×10^{-6}	2.919×10^{-6}	5.316×10^{-6}	9.696×10^{-6}
T_J	2.791×10^{-6}	3.506×10^{-5}	1.044×10^{-4}	2.423×10^{-4}
K_d	2.837×10^{-4}	9.399×10^{-4}	2.174×10^{-3}	4.017×10^{-3}

4 感应电动机负荷模型参数的易辨识性及辨识策略

我们的建模实践表明, 感应电动机负荷模型中的有些参数 (例如定、转子绕组的电气参数等) 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 (例如惯性时间常

数、机械参数等)则难以辨识,辨识结果不稳定,大扰动和小扰动情况下辨识结果具有很大的离散性,有时甚至相差十几倍到百倍。通过上述灵敏度分析发现,易辨识参数对应的灵敏度一般较大,这说明模型响应对这些参数的取值非常敏感。而难辨识参数灵敏度一般较小,模型响应对这些参数的取值感受较为迟钝。众所周知,总体测辨法负荷建模与机理建模不同,它在建模时仅仅依赖于待辨识对象的外部观测数据,它追求模型对被辨识对象外部的较好等值。在参数辨识过程中,若由于参数灵敏度过小而在模型响应中看不到某参数变化而产生的贡献,则也就很难对该参数进行辨识了,反之,若模型响应能很敏锐地感受到某参数变化而带来的贡献,则该参数也就相对容易辨识了。

从数值计算方面分析,我们通常把参数辨识归结为一个优化问题,一般优化问题在寻优过程中往往需要确定目标函数关于寻优变量的梯度,从而由梯度确定寻优方向。显然,较大灵敏度参数所对应的梯度绝对值也较大,相应寻优的方向性也较强,该参数也较容易辨识。若灵敏度相差悬殊的参数放在一起辨识的话,则梯度向量中的各分量数值将有很大的差异(很有些类似于“刚性系统”),在这种情况下要准确辨识全部参数是有困难的,那些有较小灵敏度的参数往往难以辨识。

上述第2部分的灵敏度分析还说明,感应电动机各参数灵敏度随激励的增强而增大,这意味着各参数都有随激励增强而逐渐容易辨识的趋势。这为强激励情况下辨识那些较小灵敏度的、通常难辨识的参数提供了依据。

在参数的实际辨识过程中由于上面分析中所述各电动机参数灵敏度具有较大差异以及不同扰动强度下激励出的模型特性也同等原因,期望利用少量几组负荷特性观测数据来准确辨识全部模型参数是困难的。为此我们可以确定这样的策略: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,逐步揭示负荷的特性,完成参数的辨识。

5 结论

5.1 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,例如感应电动机的惯性时间常数、与转速有关的机械参数等。

5.2 在不同强度激励情况下,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。

5.3 根据灵敏度大的参数易辨识、且辨识结果稳定,及参数随激励增强而逐渐容易辨识的特点,宜将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] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京:清华大学出版社, 1993.
- [2] 章健. 电力系统负荷建模方法的研究[D]. [博士论文]. 北京:华北电力大学, 1997.
- [3] 西安交通大学等. 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:清华大学电机电子工程系, 1995.

收稿日期: 2000-03-21

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(984061500)

作者简介: 章健(1963-),男,福建省福州市人,郑州工业大学副教授,博士,主要从事电力系统分析与辨识研究。

Parameter sensitivity analysis and identification strategy of induction motor load model

ZHANG Jian¹, ZHANG Hong-bin¹, HE Ren-mu²

(1. College of Electrical & Information Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China;

2. North China Electric Power University, Beijing 100085, 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 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: induction motor; parameter identification; sensitivity analysis; identification strategy