

基于铭牌数据和序列二次规划算法的感应电动机模型参数辨识

毛晓明, 廖卫平

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要:为克服基于铭牌数据辨识电动机模型参数时人工增加近似约束条件的不足,提出新的辨识电动机单笼和双笼模型参数的优化数学模型。该模型以计算效率偏差最小为目标,以电动机定子电流、输入无功、最大电磁转矩和起动参数等重要性能指标等于铭牌值为约束条件,并采用序列二次规划算法进行求解。算例验证了所提模型和算法的科学性。与其他方法的比较表明,采用所提模型与算法计算得到的模型参数能够更好地反映电动机的工作特性。

关键词:感应电动机; 铭牌数据; 参数辨识; 序列二次规划

中图分类号: TM 71

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.12.014

0 引言

随着“西电东送”战略的实施和深化,我国逐步形成了京、沪、穗等多个大型受端系统。受端系统区外供电比例大,空调等恒功率性质负荷比例高,使得电压稳定性问题日益突出^[1-2]。

电压稳定性问题本质上是一个动态问题,系统中诸多动态因素均起着重要的作用。其中,负荷特性有着显著的影响^[3],负荷模型及参数的准确性已成为制约电力系统电压稳定性分析精度的关键^[4]。

感应电动机在电力系统负荷中占有较大比重。在不少电力系统计算分析软件包中,综合负荷均采用感应电动机和静态负荷并联的模型。基于实验实测获取感应电动机的模型参数最为准确,但电力系统中电动机负荷的种类、数量非常多,实测法在应用中受到限制^[5]。根据电动机的铭牌数据,如额定功率、额定功率因数、最大电磁转矩等,估算用于电力系统分析计算用电动机模型参数,是一种很有应用前景的方法^[5-11]。

电力系统电磁暂态分析软件 ATP/EMTP 和 PSCAD/EMTDC 采用文献[6]所提出的方法计算感应电动机双笼模型参数,但该方法并没有使用电动机最大电磁转矩倍数这一表述电动机过载性能指标的重要参数。文献[5]计及最大电磁转矩倍数,采用迭代方法求解电动机单笼模型参数,计算时近似认为定子电抗 X_s 等于转子电抗 X_r 。同样假定 $X_s = X_r$,文献[7-9]建立了电动机重要性能指标与铭牌值偏差最小为目标的优化辨识模型,但根据辨识参数计

算得到的性能指标并不理想。文献[10-11]考虑了最大电磁转矩、起动转矩和起动电流,采用牛顿-拉夫逊法求解非线性方程组计算得到电动机双笼模型参数,计算时认为定子电阻 R_s 、电抗 X_s 与转子内笼参数 R_{r1} 、 X_{r1} 成比例,得到的电机参数也不理想。可见,如何根据铭牌数据准确地计算电动机模型参数的问题至今并没有得到很好的解决。

本文在分析电动机铭牌数据计算原理的基础上,建立了电动机模型参数优化辨识的新模型。采用序列二次规划 SQP(Sequential Quadratic Programming)算法对模型进行求解,得到电动机单笼和双笼模型参数。以多台电动机模型参数的计算为例,验证了模型和算法的科学性。

1 感应电动机模型及铭牌数据

一般而言,绕线式和单笼式电动机采用图 1(a)所示单笼模型,深槽式和双笼式电动机采用图 1(b)所示双笼模型。为准确模拟起动特性,宜采用双笼

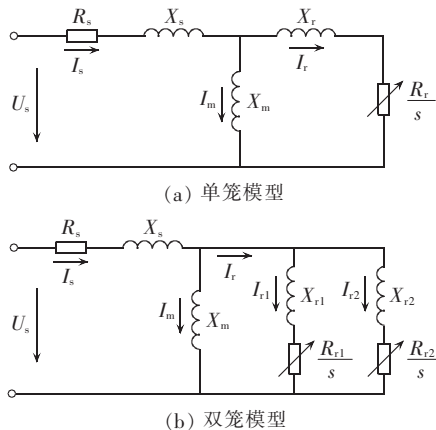


图 1 感应电动机单笼和双笼模型稳态等值电路
Fig.1 Steady-state equivalent circuits of single-cage and double-cage induction motor models

模型取代单笼模型^[5]。

图 1 中, U_s 为感应电动机机端电压; s 为滑差; R_s 和 X_s 分别为定子电阻和电抗; X_m 为激磁电抗; R_r 和 X_r 分别为单笼模型转子电阻和电抗; R_{r1} 和 X_{r1} 分别为双笼模型内笼电阻和电抗; R_{r2} 和 X_{r2} 分别为双笼模型外笼电阻和电抗。一般而言, $R_{r1} < R_{r2}$, $X_{r1} > X_{r2}$ 。起动时, 转子电流频率较高, 内笼电流小, 功率因数低, 产生的电磁转矩也较小, 外笼起主要作用; 正常运行时, 转子电流频率降低, 内笼电流较大, 内笼起主要作用。因而双笼模型可以较为准确地模拟电动机的起动特性^[12]。

感应电动机铭牌数据一般包括: 额定机械功率 P_n (kW), 额定电压 U_n (kV), 额定电流 I_n (A), 额定转速 n_n (r/min), 额定效率 η_n (%), 额定功率因数 $\cos \theta_n$, 最大转矩倍数 K_m ($K_m = T_{em} / T_n$, T_{em} 为最大或临界电磁转矩, T_n 为额定转矩), 堵转或起动转矩倍数 K_{st} ($K_{st} = T_{st} / T_n$, T_{st} 为起动转矩) 和堵转或起动电流倍数 K_{lst} ($K_{lst} = I_{st} / I_n$, I_{st} 为起动电流)。如果知道 U_n , n_n 及模型参数, 其他铭牌指标均可通过等值电路求得。

2 单笼模型参数辨识

图 1(a) 所示感应电动机单笼模型等值电路中忽略了铁芯损耗, 模型中有 R_s 、 X_s 、 X_m 、 R_r 、 X_r 共 5 个待辨识参数。铭牌数据中 K_{st} 和 K_{lst} 用于反映感应电动机的起动特性, 不适用于电动机单笼模型参数的辨识。感应电动机的有功输入一部分消耗在定子电阻 R_s 上, 剩余大部分电功率通过气隙磁场传递给转子, 称为电磁功率 P_{en} 。 P_{en} 一部分消耗在转子电阻上, 如忽略杂耗其余部分为机械输出功率 P_n 。因此, 可按文献[5]的方法先计算出 R_s 。

电动机铭牌数据中, U_n 、 n_n 为基本参数。输入功率 P_1 和 Q_1 取决于定子电流和功率因数, K_m 则是表征电动机过载能力的重要性能指标^[12]。因此, 本文在辨识中, 将定子电流、输入无功功率和最大电磁转矩等于相应的铭牌值作为等式约束条件, 将计算效率与铭牌值的相对偏差最小作为目标函数。再考虑到电动机参数都为正实数, 形成辨识电动机单笼模型参数 $\mathbf{X} = [X_s, X_m, X_r, R_r]$ 的数学模型如式(1)和式(2)所示。

$$\min F(\mathbf{X}) = \left(\frac{\eta_n - \eta(s_n)}{\eta_n} \right)^2 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } H_1(\mathbf{X}) &= I_n - I_s(s_n) = 0 \\ H_2(\mathbf{X}) &= Q_1 - Q_1(s_n) = 0 \\ H_3(\mathbf{X}) &= T_{em} - T_e(s_m) = 0 \\ X &> 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, η_n 、 I_n 、 Q_1 、 T_{em} 根据铭牌数据易知; $\eta(s_n)$ 、 $I_s(s_n)$ 、 $Q_1(s_n)$ 、 $T_e(s_m)$ 则可根据辨识得到的等值电路参数计

算得到, 方法如下。

计算电动机额定滑差 s_n 、额定转矩 T_n 、最大电磁转矩 T_{em} 如式(3)所示。

$$\begin{cases} s_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1} \\ T_n = \frac{P_n}{1 - s_n} \frac{1}{\Omega_s} \\ T_{em} = K_m T_n \end{cases} \quad (3)$$

其中, n_1 为同步转速 (r/min); Ω_s 为同步机械角速度 (rad/s)。

将感应电动机单笼模型的定子阻抗和激磁电抗部分进行戴维南等值, 等值阻抗为:

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} = \frac{jX_m(R_s + jX_s)}{R_s + j(X_s + X_m)} \quad (4)$$

根据戴维南等值电路, 计算临界转差率 s_m :

$$s_m = \frac{R_r}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_r + X_{th})^2}} \quad (5)$$

从感应电动机定子侧看进去的等值阻抗 $Z_m(s)$ 为:

$$Z_m(s) = R_s + jX_s + \frac{jX_m Z_r(s)}{jX_m + Z_r(s)} \quad (6)$$

其中, $Z_r(s) = R_r/s + jX_r$ 为感应电动机转子阻抗。

定子电流 $I_s(s)$ 和转子电流 $I_r(s)$ 为:

$$\begin{cases} I_s(s) = \frac{U_s}{Z_m(s)} \\ I_r(s) = \frac{jX_m}{jX_m + Z_r(s)} I_s(s) \end{cases} \quad (7)$$

电磁转矩 $T_e(s)$ 为:

$$T_e(s) = \frac{1}{\Omega_s} \frac{3R_r}{s} |I_r(s)|^2 \quad (8)$$

根据电动机单笼模型计算得到有功输入功率 $P_1(s)$ 、无功输入功率 $Q_1(s)$ 和机械输出功率 $P_n(s)$ 为:

$$\begin{cases} P_1(s) = 3 \operatorname{Re}(U_s [I_s(s)]^*) \\ Q_1(s) = 3 \operatorname{Im}(U_s [I_s(s)]^*) \\ P_n(s) = T_e(s) (1 - s) \Omega_s \end{cases} \quad (9)$$

将式(3)计算得到的额定滑差 s_n 代入式(7)、式(9), 得到对应于 s_n 的定子电流、输入无功功率 $Q_1(s_n)$ 和输出机械功率 $P_n(s_n)$ 。将式(5)计算得到的临界滑差 s_m 代入式(8)得到最大电磁转矩 $T_e(s_m)$ 。电动机效率 $\eta(s_n) = P_n(s_n) / P_1(s_n)$ 。

3 双笼模型参数辨识

图 1(b) 感应电动机双笼模型中共有 7 个待辨识参数。如果采用求解方程组的方法, 需要列出 5 个独立的方程, 并且需要人工增加 2 个近似方程^[10-11], 采用数学优化算法更具优势。

根据上节的分析, 仍将模型计算得到的定子电流 $I_s(s_n)$ 、无功功率 $Q_1(s_n)$ 和最大电磁转矩 $T_e(s_m)$ 等于相应的铭牌值作为等式约束条件。为了准确模拟起动特性, 本文增加计算起动转矩、起动电流等于铭

牌值 2 个等式约束条件。同样地,仍将模型计算效率与铭牌值的相对偏差最小作为目标函数。再考虑到双笼模型中外笼电阻大于内笼电阻、内笼电抗大于外笼电抗^[12],且待辨识的参数都必须是正实数,建立辨识电动机双笼模型参数 $\mathbf{X}=[X_s, X_m, R_{r1}, X_{r1}, R_{r2}, X_{r2}]$ 的数学模型如式(10)和式(11)所示。

$$\min F(\mathbf{X}) = \left(\frac{\eta_n - \eta(s_n)}{\eta_n} \right)^2 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & H_1(\mathbf{X}) = I_n - I_s(s_n) = 0 \\ & H_2(\mathbf{X}) = Q_1 - Q_1(s_n) = 0 \\ & H_3(\mathbf{X}) = T_{em} - T_e(s_m) = 0 \\ & H_4(\mathbf{X}) = T_{st} - T_{st}(1) = 0 \\ & H_5(\mathbf{X}) = I_{st} - I_{st}(1) = 0 \\ & R_{r2} > R_{r1} \\ & X_{r1} > X_{r2} \\ & \mathbf{X} > 0 \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\eta_n, I_n, Q_1, T_{em}, T_{st}, I_{st}$ 根据铭牌数据易知; $\eta(s_n), I_s(s_n), Q_1(s_n), T_e(s_m), T_{st}(1), I_{st}(1)$ 则可根据等值电路计算得到,方法如下。

用式(3)计算电动机额定滑差 s_n 、额定转矩 T_n 、最大电磁转矩 T_{em} 。

将感应电动机双笼模型中的内、外笼阻抗 $Z_{r1}(s)$ 、 $Z_{r2}(s)$ 等值为转子阻抗 $Z_r(s)$:

$$Z_r(s) = R_r + jX_r = \frac{Z_{r1}(s)Z_{r2}(s)}{Z_{r1}(s) + Z_{r2}(s)} \quad (12)$$

$$\begin{cases} Z_{r1}(s) = \frac{R_{r1}}{s} + jX_{r1} \\ Z_{r2}(s) = \frac{R_{r2}}{s} + jX_{r2} \end{cases} \quad (13)$$

然后,将感应电动机双笼模型的定子阻抗和励磁电抗进行戴维南等值,等值阻抗计算式仍为式(4),双笼模型临界转差的计算式仍为式(5)。从双笼模型等值电路定子侧看进去的等值阻抗 $Z_m(s)$ 仍为式(6),定子电流 $I_s(s)$ 和转子电流 $I_r(s)$ 的计算式仍为式(7)。

内笼转子电流 $I_{r1}(s)$ 和外笼转子电流 $I_{r2}(s)$ 的计算式为:

$$\begin{cases} I_{r1}(s) = \frac{Z_{r2}(s)}{Z_{r1}(s) + Z_{r2}(s)} I_r(s) \\ I_{r2}(s) = \frac{Z_{r1}(s)}{Z_{r1}(s) + Z_{r2}(s)} I_r(s) \end{cases} \quad (14)$$

电磁转矩 $T_e(s)$ 的计算式为:

$$T_e(s) = \frac{3}{\Omega_s} \left(\frac{R_{r1}}{s} |I_{r1}(s)|^2 + \frac{R_{r2}}{s} |I_{r2}(s)|^2 \right) \quad (15)$$

将式(3)计算的额定滑差 s_n 代入式(7)和式(9),得到对应于 s_n 的定子电流、输入无功功率 $Q_1(s_n)$ 和输出机械功率 $P_n(s_n)$ 。将临界滑差 s_m 和 $s=1$ 代入式(15),得到最大电磁转矩 $T_e(s_m)$ 和起动转矩 $T_{st}(1)$ 。将 $s=1$ 代入式(7)的第 1 式,得到起动电流 $I_{st}(1)$ 。

4 SQP 算法的基本原理

SQP 算法由于其强大的非线性处理能力和良好的数值稳定性,在求解非线性优化问题中得到广泛应用^[13-14]。其基本思想是在每一迭代步通过求解一个二次规划子问题来确定一个下降方向,以减小价值函数来取得步长,反复迭代直到求得原问题的解。

SQP 算法求解非线性约束优化问题的一般数学模型为^[14]:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } h_i(\mathbf{x}) = 0 \quad i \in E = \{1, 2, \dots, l\} \\ g_i(\mathbf{x}) \geq 0 \quad i \in I = \{1, 2, \dots, m\} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 为决策变量, n 决策变量个数; $f(\mathbf{x})$ 为目标函数; $h_i(\mathbf{x})$ 和 $g_i(\mathbf{x})$ 分别为等式和不等式约束函数; l 和 m 分别为等式和不等式约束个数。

构造拉格朗日函数:

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}) = f(\mathbf{x}) - \sum_{i \in E} \mu_i h_i(\mathbf{x}) - \sum_{i \in I} \lambda_i g_i(\mathbf{x}) \quad (17)$$

其中, $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\lambda}$ 分别为等式和不等式约束的拉格朗日乘子向量。在给定点 $(\mathbf{x}_k, \boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\lambda}_k)$ 后,将约束函数线性化,并对拉格朗日函数进行二次多项式近似,得到下列形式的二次规划子问题^[14]:

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{W}_k \mathbf{d} + \nabla f^T(\mathbf{x}_k) \mathbf{d} \\ \text{s.t. } h_i(\mathbf{x}_k) + \nabla h_i^T(\mathbf{x}_k) \mathbf{d} = 0 \quad i \in E \\ g_i(\mathbf{x}_k) + \nabla g_i^T(\mathbf{x}_k) \mathbf{d} \geq 0 \quad i \in I \end{cases} \quad (18)$$

其中, $\mathbf{W}_k = \mathbf{W}(\mathbf{x}_k, \boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\lambda}_k) = \nabla_{xx}^2 L(\mathbf{x}_k, \boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\lambda}_k)$; $\nabla f(\mathbf{x}_k)$ 为 $f(\mathbf{x}_k)$ 在 $\mathbf{x}_k$ 处的梯度; $\nabla h_i(\mathbf{x}_k)$ 和 $\nabla g_i(\mathbf{x}_k)$ 分别为 $h_i(\mathbf{x}_k)$ 和 $g_i(\mathbf{x}_k)$ 在 $\mathbf{x}_k$ 处的梯度。式(18)的最优解 $\mathbf{d}^*$ 可作为原问题的变量 $\mathbf{x}$ 在第 k 次迭代过程中的搜索方向。

拉格朗日函数二阶导数的真实 Hessian 阵 $\mathbf{W}_k$ 为:

$$\mathbf{W}_k = \nabla^2 f(\mathbf{x}_k) - \sum_{i=1}^l \mu_i \nabla^2 h_i(\mathbf{x}_k) - \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla^2 g_i(\mathbf{x}_k) \quad (19)$$

由于 $\mathbf{W}_k$ 的计算十分繁琐,数学家提出了利用对称正定矩阵 $\mathbf{B}_k$ 替代 $\mathbf{W}_k$ 的 SQP 法, $\mathbf{B}_k$ 的选取方法可参考文献[14]。

为保证求解结果的全局收敛性, SQP 算法还借助某价值函数来确定沿着搜索方向 $\mathbf{d}_k$ 进行搜索的步长 α_k ^[14]。得到搜索步长后, SQP 算法通过式(20)得到下一个迭代点 $\mathbf{x}_{k+1}$ 。

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{d}_k^* \quad (20)$$

拉格朗日乘子更新如式(21)所示, SQP 算法求解约束优化问题的流程如图 2 所示。

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{k+1} = \begin{bmatrix} \nabla h^T(\mathbf{x}_{k+1}) \\ \nabla g^T(\mathbf{x}_{k+1}) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_{k+1} \\ \boldsymbol{\lambda}_{k+1} \end{bmatrix} = (\mathbf{A}_{k+1} \mathbf{A}_{k+1}^T)^{-1} \mathbf{A}_{k+1} \nabla f_{k+1} \end{cases} \quad (21)$$

辨识电动机单笼模型参数 $\mathbf{X}=[X_s, X_m, R_r, X_r]$ 时, 变量 $\mathbf{X}$ 初始值如式(22)所示^[10]。

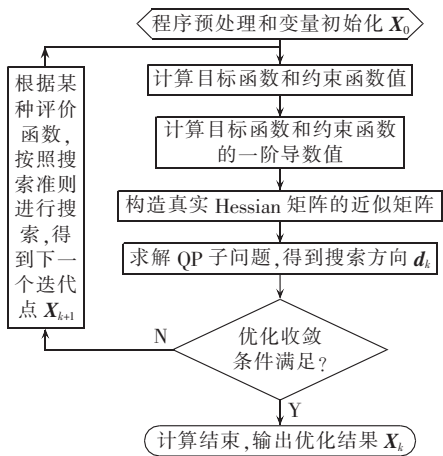


图 2 SQP 算法流程图

Fig.2 Flowchart of SQP algorithm

$$\left\{\begin{aligned} R_r &= \frac{3U_s^2}{P_n} s_n \\ X_m &= \frac{3U_s^2}{Q_1} \\ X_s &= 0.05 X_m \\ X_r &= X_s \end{aligned}\right. \quad (22)$$

辨识电动机双笼模型参数 $\mathbf{X} = [X_s, X_m, R_{r1}, X_{r1}, R_{r2}, X_{r2}]$ 时, R_{r1}, X_m, X_s, X_r 的初值同单笼模型的 R_r, X_m, X_s, X_r ; R_{r2}, X_{r1}, X_{r2} 的初始值如式 (23) 所示^[10]。

$$\left\{\begin{aligned} R_{r2} &= 2R_{r1} \\ X_{r1} &= 2X_s \\ X_{r2} &= X_s \end{aligned}\right. \quad (23)$$

辨识得到电动机模型参数后, 以额定电压 U_n 和额定机械功率 P_n 为基准值, 将参数有名值归算为标么值。根据式 (24) 计算电动机惯性时间常数 T_j ^[12]。

$$T_j = J\Omega_s^2 / P_n \quad (24)$$

其中, J 为电动机的转动惯量。

5 算例

表 1 给出了 6 台感应电动机的铭牌数据, 表中, Ω_n, p 分别为电动机的额定机械转速与极对数。采用提出的辨识模型和算法, 计算得到各电动机单笼和

双笼模型参数见表 2 和表 3, 表中电阻、电抗均为标么值, 后同。

表 1 感应电动机出厂铭牌数据
Table 1 Nameplate data of induction motor

P_n/kW	U_n/kV	I_n/A	$\frac{\Omega_n}{(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})}$	$\eta/\%$	$\cos\theta_n$	K_m	K_{st}	K_{ls}	$J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	p
1400	10	95.0	1492	95.9	0.89	2.38	0.85	6.43	510	2
1250	10	85.0	1492	95.9	0.89	2.29	0.86	6.04	455.5	2
850	6	96.8	1488	95.2	0.894	2.47	1.49	6.00	214	2
680	6	78.0	1488	94.7	0.89	2.40	1.3	5.68	173	2
200	0.38	346	2975	94.8	0.925	2.50	2.2	7.20	8	1
110	0.38	191	2977	95.8	0.9	3.10	2.4	8.30	3.19	1

表 2 计算得到的感应电动机单笼模型参数
Table 2 Calculated parameters of single-cage induction motor model

P_n/kW	R_s	X_s	R_r	X_r	X_m	T_j/s
1400	0.0294	0.1411	0.0043	0.0253	2.6353	8.89
1250	0.0309	0.1315	0.0043	0.0413	2.6992	8.88
850	0.0357	0.1180	0.0065	0.0340	2.5420	6.11
680	0.0372	0.1222	0.0064	0.0332	2.4716	6.17
200	0.0346	0.0755	0.0071	0.0792	3.6072	3.88
110	0.0159	0.0659	0.0069	0.0721	2.7431	2.82

表 3 计算得到的感应电动机双笼模型参数
Table 3 Calculated parameters of double-cage induction motor model

P_n/kW	R_s	X_s	R_{r1}	X_{r1}	R_{r2}	X_{r2}	X_m
1400	0.0763	0.0403	0.0046	0.0638	0.2833	0.0574	2.9589
1250	0.0271	0.1122	0.0052	0.0926	0.0278	0.0216	2.7980
850	0.0305	0.0863	0.0073	0.0870	0.0814	0.0319	2.6725
680	0.0339	0.0875	0.0071	0.0841	0.0997	0.0396	2.5674
200	0.0358	0.0679	0.0081	0.1111	0.0589	0.0239	3.5856
110	0.0272	0.0196	0.0074	0.1206	0.1344	0.1189	2.6061

根据表 2 和表 3 辨识得到的模型参数计算电动机各项性能指标, 计算指标与铭牌指标的比较见表 4 和表 5。可见, 除起动参数外, 单笼模型能准确反映电机的工作特性; 双笼模型各项计算数据均与铭牌数据吻合。

记本文、文献[5]和文献[10]提出的方法分别为法 1、法 2 和法 3, 以 1400 kW 和 1250 kW 电动机为例, 3 种方法计算得到的单笼模型参数比较见表 6,

表 4 感应电动机单笼模型计算数据与铭牌数据的比较

Table 4 Comparison between nameplate data and data calculated by single-cage induction motor model

指标	1400 kW 电动机		1250 kW 电动机		850 kW 电动机		680 kW 电动机		200 kW 电动机		110 kW 电动机	
	铭牌值	计算值	铭牌值	计算值	铭牌值	计算值	铭牌值	计算值	铭牌值	计算值	铭牌值	计算值
P_1/kW	1464.45	1463.55	1310.29	1312.45	899.34	899.47	721.43	724.3	210.65	210.82	113.14	112.99
Q_1/kvar	750.26	749.95	671.285	672.13	450.75	450.77	369.602	370.62	86.53	86.56	54.8	54.75
I_n/A	95.0	94.95	85.0	85.13	96.8	96.81	78.0	78.29	346.0	346.26	191.0	190.76
P_n/kW	1400	1399.30	1250	1252.03	850	850.1	680	682.58	200	200.16	110	109.86
$\cos\theta_n$	0.89	0.89	0.89	0.8901	0.894	0.894	0.89	0.8902	0.925	0.925	0.9	0.8999
$\eta_n/\%$	0.959	0.9561	0.959	0.9540	0.952	0.9451	0.947	0.9424	0.948	0.9494	0.958	0.9723
K_m	2.38	2.3809	2.29	2.2902	2.47	2.4699	2.40	2.3995	2.50	2.5009	3.1	3.1016
K_{st}	0.85	0.15	0.86	0.1344	1.49	0.2538	1.30	0.2386	2.20	0.2683	2.4	0.3413
K_{ls}	6.43	5.02	6.04	4.8318	6.00	5.372	5.68	5.2122	7.20	5.5405	8.3	6.3403

表 5 感应电动机双笼模型计算数据与铭牌数据的比较
Table 5 Comparison between nameplate data and data calculated by double-cage induction motor model

指标	1 400 kW 电动机		1 250 kW 电动机		850 kW 电动机		680 kW 电动机		200 kW 电动机		110 kW 电动机	
	铭牌值	计算值	铭牌值	计算值	铭牌值	计算值	铭牌值	计算值	铭牌值	计算值	铭牌值	计算值
P_1/kW	1 464.45	1 464.19	1 310.29	1 309.64	899.34	897.75	721.438	720.95	210.65	210.62	113.14	113.258
Q_1/kvar	750.26	750.26	671.285	671.27	450.75	450.16	369.60	369.38	86.53	86.525	54.80	54.66
I_n/A	95.00	94.99	85.00	84.97	96.8	96.64	78.00	77.95	346.00	345.95	191.00	191.07
P_n/kW	1 400	1 405.77	1 250	1 255.99	850	854.66	680	682.72	200	199.67	110	108.48
$\cos\theta_n$	0.890	0.890	0.890	0.8899	0.894	0.8939	0.890	0.890	0.925	0.925	0.900	0.9006
$\eta_n/\%$	0.959	0.9601	0.959	0.9590	0.952	0.9520	0.947	0.9470	0.948	0.9480	0.958	0.9578
K_m	2.38	2.3799	2.29	2.2889	2.47	2.4693	2.40	2.4000	2.50	2.4992	3.10	3.1001
K_{st}	0.85	0.8484	0.86	0.8619	1.49	1.4903	1.30	1.3009	2.20	2.1998	2.40	2.4024
K_{lt}	6.43	6.4299	6.04	6.0408	6.00	5.9993	5.68	5.6801	7.20	7.1994	8.30	8.3024

性能指标比较见表 7。法 1 和法 3 计算得到的电动机双笼模型参数比较见表 8,性能指标比较见表 9。

表 6 电动机单笼模型参数比较
Table 6 Comparison of model parameters for single-cage induction motor

电动机容量/kW	计算方法	R_s	X_s	R_r	X_r	X_m
1 400	法 1	0.0294	0.141 1	0.0043	0.025 3	2.635 3
	法 2	0.0294	0.0844	0.0045	0.0844	2.692 0
	法 3	0.0069	0.1273	0.0046	0.063 6	2.961 0
1 250	法 1	0.0309	0.1315	0.0043	0.0413	2.699 2
	法 2	0.0309	0.0874	0.0045	0.0874	2.743 2
	法 3	0.0069	0.1324	0.0046	0.066 2	3.041 9

表 7 电动机单笼模型计算指标与铭牌值的比较
Table 7 Comparison between nameplate data and data calculated by single-cage induction motor models

电动机容量/kW	指标	铭牌值	计算值		
			法 1	法 2	法 3
1 400	P_1/kW	1 464.45	1 463.55	1 459.69	1 410.85
	Q_1/kvar	750.26	749.95	748.66	746.15
	I_n/A	95.0	94.95	94.71	92.15
	P_n/kW	1 400	1 399.3	1 395.74	1 390.88
	$\cos\theta_n$	0.89	0.89	0.8898	0.884
	$\eta_n/\%$	0.959	0.956 1	0.956 2	0.985 8
	K_m	2.38	2.3809	2.3799	2.379 7
	K_{lt}	6.43	6.4299	6.4201	6.420 1
1 250	P_1/kW	1 310.29	1 312.45	1 297.26	1 253.97
	Q_1/kvar	671.285	672.13	666.15	664.84
	I_n/A	85.0	85.13	84.19	81.99
	P_n/kW	1 250	1 252.03	1 238.09	1 236.26
	$\cos\theta_n$	0.89	0.890 1	0.889 6	0.883 5
	$\eta_n/\%$	0.959	0.954 0	0.954 4	0.985 9
	K_m	2.29	2.290 2	2.291 1	2.289
	K_{lt}	6.04	6.0408	5.9993	5.999 3

表 8 电动机双笼模型参数比较
Table 8 Comparison of model parameters for double-cage induction motor

参数	1 400 kW 电动机		1 250 kW 电动机	
	法 1	法 3	法 1	法 3
R_s	0.0763	0.0079	0.0271	0.0076
X_s	0.0403	0.091 1	0.1122	0.0970
R_{r1}	0.0046	0.0053	0.0052	0.005 1
X_{r1}	0.0638	0.1543	0.0926	0.1528
R_{r2}	0.2833	0.0365	0.0278	0.0439
X_{r2}	0.0574	0.0456	0.0216	0.0485
X_m	2.9589	2.7383	2.7980	2.8201

表 9 电动机双笼模型计算指标与铭牌值的比较
Table 9 Comparison between nameplate data and data calculated by double-cage induction motor models

电动机容量/kW	指标	铭牌值	计算值	
			法 1	法 3
1 400	P_1/kW	1 464.45	1 464.19	1 411.63
	Q_1/kvar	750.26	750.27	816.45
	I_n/A	95.0	94.99	94.15
	P_n/kW	1 400	1 405.27	1 389.22
	$\cos\theta_n$	0.89	0.89	0.865 6
	$\eta_n/\%$	0.959	0.960 1	0.984 5
	K_m	2.38	2.3799	2.183 4
	K_{st}	0.85	0.8484	1.172 6
1 250	K_{lt}	6.43	6.4299	6.420 1
	P_1/kW	1 310.29	1 309.64	1 265.55
	Q_1/kvar	671.285	671.27	736.394 8
	I_n/A	85.0	84.97	84.535 9
	P_n/kW	1 250	1 255.99	1 245.88
	$\cos\theta_n$	0.89	0.8899	0.864 3
	$\eta_n/\%$	0.959	0.9590	0.984 5
	K_m	2.29	2.2889	2.078 2
	K_{st}	0.86	0.861 9	1.172 6
	K_{lt}	6.04	6.0408	5.990 1

可见,本文得到的性能指标更接近铭牌数据。

6 结论

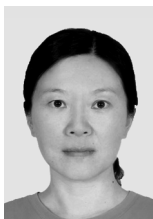
- a. 感应电动机模型参数辨识中,常近似认为定子参数与转子参数成比例,这一做法会造成一定的误差。
- b. 本文提出基于铭牌数据辨识电动机模型参数的优化模型,模型以计算效率偏差最小为目标,以电动机定子电流、输入无功、最大电磁转矩和起动参数等于铭牌值为约束条件,采用 SQP 算法进行求解。所求得的电动机参数能够很好地反映电动机的各项性能指标。
- c. 与其他方法的对比研究表明,本文方法得到的电动机模型参数能更准确地反映感应电动机的工作特性。

参考文献:

[1] 赵晋泉,居俐洁,罗卫华,等. 计及分区动态无功储备的无功电压

- 控制模型与方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 100-105.
- ZHAO Jinqun, JU Lijie, LUO Weihua, et al. Reactive voltage control model and method considering partitioned dynamic reactive power reserve[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 100-105.
- [2] 李妮, 李兴源, 冯明, 等. 改善多馈入直流系统电压无功特性的直流控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 25-30.
- LI Ni, LI Xingyuan, FENG Ming, et al. DC control for improving voltage and reactive power characteristics of multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 25-30.
- [3] 汤涌, 张红斌, 侯俊贤, 等. 负荷建模的基本原则和方法[J]. 电网技术, 2007, 31(4): 1-5.
- TANG Yong, ZHANG Hongbin, HOU Junxian, et al. Study on essential principle and methods for load modeling[J]. Power System Technology, 2007, 31(4): 1-5.
- [4] 李鹏, 余贻鑫, 贾宏杰. 关于更精确的电压稳定极限描述中所需模型与方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 21-26.
- LI Peng, YU Yixin, JIA Hongjie. A study on models and methods for identifying of voltage stability limit more precisely[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 21-26.
- [5] 赵兵, 汤涌, 张文朝, 等. 基于出厂数据的电动机仿真模型参数计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 52-58.
- ZHAO Bing, TANG Yong, ZHANG Wenchao, et al. Determination of induction motor simulation model parameters based on the motor manufacturer data[J]. Power System Technology, 2010, 30(1): 52-58.
- [6] ROGERS G J, SHIRMOHAMMADI D. Induction machine modeling for electromagnetic transient program[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1987, 2(4): 622-628.
- [7] ABDELAZIZ M M A, EL-SAADANY E F. Estimation of induction motor single-cage model parameters from manufacturer data[C]// Proceedings of the 2013 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Vancouver, Canada: IEEE, 2013: 1-5.
- [8] SAKTHIVEL V P, BHUVANESWARI R, SUBRAMANIAN S. Multi-objective parameter estimation of induction motor using particle swarm optimization[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2010, 23: 302-312.
- [9] ABRO A G, MOHAMAD-SALEH J. Multiple-global-best guided artificial bee colony algorithm for induction motor parameter estimation[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2014, 22(3): 620-636.
- [10] PEDRA J, CORCOLES F. Estimation of induction motor double-cage model parameters from manufacturer data[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 310-316.
- [11] PEDRA J, CORCOLES F. On the determination of induction motor parameters from manufacturer data for electromagnetic transient programs[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(4): 1709-1718.
- [12] 胡度生, 胡敏强. 电机学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 132-184.
- [13] 江爱朋. 大规模简约空间 SQP 算法及其在过程系统优化中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- JIANG Aipeng. Large scale reduced space SQP algorithm and its application in process system optimization[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [14] 马昌凤. 最优化方法及其 MATLAB 程序设计[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 211-251.

作者简介:



毛晓明

毛晓明(1971—), 女, 湖北武汉人, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制(E-mail: mxmsunny@163.com);

廖卫平(1990—), 男, 湖南邵阳人, 硕士, 研究方向为电力系统电压稳定(E-mail: 1071672259@qq.com)。

Induction motor model parameter identification based on motor nameplate data and sequential quadratic programming

MAO Xiaoming, LIAO Weiping

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Since the model parameter identification based on the nameplate data of induction motor needs the manually-added approximate constraints, an optimal mathematical model is proposed to identify the model parameters of single-cage and double-cage induction motors, which takes the minimum efficiency deviation as its objective and applies the nameplate values of important performance indexes as its constraints, such as stator current, input reactive power, maximum electromagnetic torque, startup parameters, etc. The sequential quadratic programming algorithm is proposed to solve the model. Case study verifies the scientificity of the proposed model and algorithm. Compared with other methods shows that, the model parameters identified by the proposed model algorithm can better reflect the operating performances of induction motor.

Key words: induction motors; nameplate data; parameter identification; sequential quadratic programming