

感应电机转子断条根数影响分析

马宏忠¹ 胡虔生² 黄允凯² 王惠庆¹

(1. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098 ; 2. 东南大学电气工程系, 江苏 南京 210096)

摘要 : 首先介绍感应电机转子绕组故障分析方法 , 然后详细讨论转子断条故障后转子各导条和每一段端环中电流的分布及变化情况 , 定子电流中转子绕组故障特征量的变化情况 , 最后总结出特征量的变化规律 : 连续断条根数增加 , 故障特征量增加 , 但当连续断条数超过电机每极的导条数时 , 断条数继续增加 , 故障特征量反而减小 .

关键词 : 感应电机 ; 多回路 ; 断条 ; 转子电流 ; 故障特征量

中图分类号 : TM307 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2003)05-0573-04

转子绕组故障是笼形异步电机最常见的故障之一 . 虽然人们对其已进行了近 20 年的研究^[1~3] , 但至今这一故障的诊断仍显得十分困难 . 众所周知 , 转子绕组故障在定子电流中产生频率为 $(1-2s)f_1$ 的故障特征量 . 公开报道的文献对这一分量的定性研究较多 , 定量研究较少 . 文献 [2, 3] 给出了这种反映转子绕组故障特征电流大小的经验公式 , 不但彼此相差甚远 , 而且与实测数据相比 , 也有较大差距 .

为此 , 本文采用基于多回路的分析方法 , 对感应电机转子绕组故障与电机定子电流的关系 , 断条根数对电机定子电流、转子电流、转子绕组故障特征量等的影响 , 进行了详细分析 .

1 感应电机转子绕组故障稳态分析方法

1.1 基于多回路法的三相感应电机基本方程

为便于分析 , 在不影响机电关系的前提下作如下假定^[4] : (a) 忽略铁心的涡流、磁滞和非线性 , 将铁心磁阻归算到气隙中 ; (b) 电机气隙均匀 , 不考虑气隙磁导的齿谐波 , 故障前电机在电或磁的方面均匀对称 ; (c) 三相电机定子绕组对称 ; (d) 三相电源对称 .

笼形转子可采用多回路形式来表示 , 任意两相邻导条与连接这两导条的端环构成一个回路 . 设转子有 n 个槽 , 转子各回路电流分别为 $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n, i_e$. 其中 i_e 为端环回路电流 . 因为假定定子三相绕组对称 , 没有故障 , 所以定子回路电流可设为 i_a, i_b, i_c . 这样就构成了基于多回路混合型的三相感应电机转子绕组故障分析的数学模型 . 根据上述假定 , 列出故障前电机电压方程和磁链方程为

$$U = D\psi + RI \tag{1}$$

$$\psi = LI \tag{2}$$

式中 : U, I, ψ —— $(n+4) \times 1$ 的列矩阵 ; R, L —— $(n+4) \times (n+4)$ 的方阵 ; D —— 微分算子 .

$$U = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \\ i_e \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r & -r_b & \dots & -r_b & r_e \\ 0 & 0 & 0 & -r_b & r_r & \dots & 0 & r_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -r_b & 0 & \dots & r_r & r_e \\ 0 & 0 & 0 & r_e & r_e & \dots & r_e & nr_e \end{bmatrix}$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \\ \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \vdots \\ \Psi_n \\ \Psi_e \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} & M_{a1} & M_{a2} & \cdots & M_{an} & M_{ae} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} & M_{b1} & M_{b2} & \cdots & M_{bn} & M_{be} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} & M_{c1} & M_{c2} & \cdots & M_{cn} & M_{ce} \\ M_{1a} & M_{1b} & M_{1c} & L_{11} & L_{12} & \cdots & M_{1n} & M_{1e} \\ L_{2a} & M_{2b} & M_{2c} & M_{21} & L_{22} & \cdots & M_{2n} & M_{2e} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ M_{na} & M_{nb} & M_{nc} & M_{n1} & M_{n2} & \cdots & L_{nn} & M_{ne} \\ M_{ea} & M_{eb} & M_{ec} & M_{e1} & M_{e2} & \cdots & M_{en} & L_{ee} \end{bmatrix}$$

式中: r_b, r_e ——转子导条电阻、转子端环电阻; r_r ——转子回路电阻, $r_r = 2(r_b + r_e)$; r_s ——定子绕组相电阻; Ψ_i, L_{ii}, M_{ij} ($i = a, b, c, 1, 2, \dots, n, e; j = a, b, c, 1, 2, \dots, n, e; i \neq j$)——磁链、自感、互感。下标 a, b, c 表示定子三相绕组; $1, 2, 3, \dots, n$ 表示转子导条回路序号; e 表示转子端环回路。

1.2 转子故障后的电路方程

电机转子绕组故障主要有 2 种: 导条断裂故障和端环开裂故障。对式 (1) (2) 作适当处理, 则可解得故障后电机的定、转子电流。

1.2.1 转子断条后的电路方程

导条断裂以后(设转子第 j 根导条断裂), 断条两侧的转子导条电流回路构成一个大的回路, 并且回路电流相等。这时只要把方程 (1) (2) 中矩阵 R 和 L 的第 $j+4$ 行元素加到第 $j+3$ 行对应元素上, 列向量 U 的第 $j+4$ 行元素加到第 $j+3$ 行元素上, 令 $j+4$ 行中 $j+3$ 列元素为 1, $j+4$ 列元素为 -1, 其余元素为 0, 即可得到相应的转子故障后的电路方程。这样处理后, 回路电流 $i_j = i_{j+1}$ 。若断条数大于 1, 可作类似处理。

应当指出, 这种处理方式与文献 [4] 不同, 解得的电流个数未减少, 所求得的转子电流序号与没有故障时一致, 便于故障前后各对应回路、导条、端环电流的比较。

1.2.2 转子端环断裂回路方程

当电机转子一端端环(设第 j 根)发生断裂时, 与该端环连接的转子回路电流为零, 这时只要令矩阵 R 和 L 第 $j+3$ 行中 $j+3$ 个元素为 1, 其余元素为 0, 列向量 U 中的第 $j+3$ 行元素为 0 即可。

1.3 稳态电流计算

由上述可知, 故障前后异步电机方程均为一组以回路电流为自变量, 以相关电阻、电感(自感、互感)为系数的变系数微分方程组。稳态时, 可先假定各回路电流表达式, 并将其代入上述微分方程组, 然后按照方程两边同频率量相等的原则把微分方程组化成线性方程组, 最后根据该线性方程组可求得各回路电流的稳态值, 从而可由回路电流求得各导条电流和端环电流^[5]。

2 转子断条故障后电机转子变化情况

2.1 转子断条根数与转子相量的关系

笔者以 Y90S—4 小型四极三相感应电机(其转子槽数为 22)为样机进行了仿真计算及实验测试^[5,6], 仿真和测试结果如图 1 所示。图 1 多边形的“边”(I_{b_j})为转子导条电流相量; “辐条”(I_{e_j})表示端环电流相量。为简化图形, 各电流上的相量符号“ $\cdot$ ”省略(下同)。图中省略了表示电流方向的箭头。

对于完好电机, 当极对数 $p \neq 1$ 时, 同极性不同极面对应位置的导条电流大小相等、方向相同, 所以图 1(a) 两对极下的转子电流重合。当转子断条发生故障后, 转子电流不对称, 不但各导条电流大小会改变, 而且相位也会发生变化, 这时同极性不同极面对应位置导条的电流不再相等。因此, 图 1(b)~(d) 中同极性不同极面对应位置的导条电流相量不再重合。

2.2 转子绕组故障前后转子导条电流

随着连续断条数的增多, 转子各导条电流不对称性明显增加。图 2 表示转子完好电机和断条 1~3 根时的转子导条电流。可以看出, 转子断条后, 与该导条相邻的导条电流明显增加。远离该断条的导条电流变化不大, 且对于连续断条来说, 随着断条数的增加, 与之相邻的导条中的电流也相应增加, 但当连续断条数超过电机每极的导条数时, 断条根数继续增加, 与之相邻的导条中的电流反而减小。

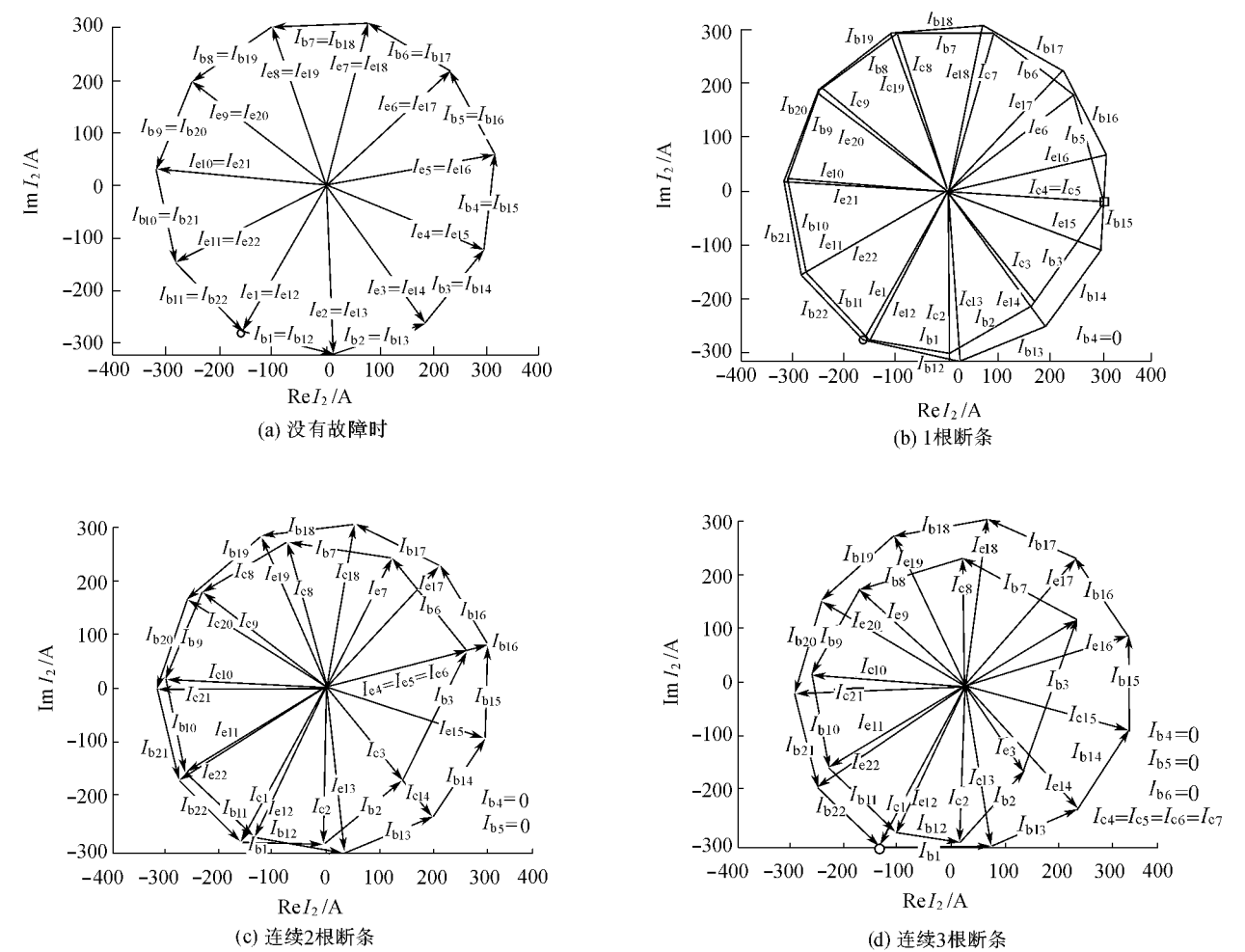


图 1 电机转子断条前后的转子电流相量图

Fig.1 Rotor current phasor before and after breaking of some bars

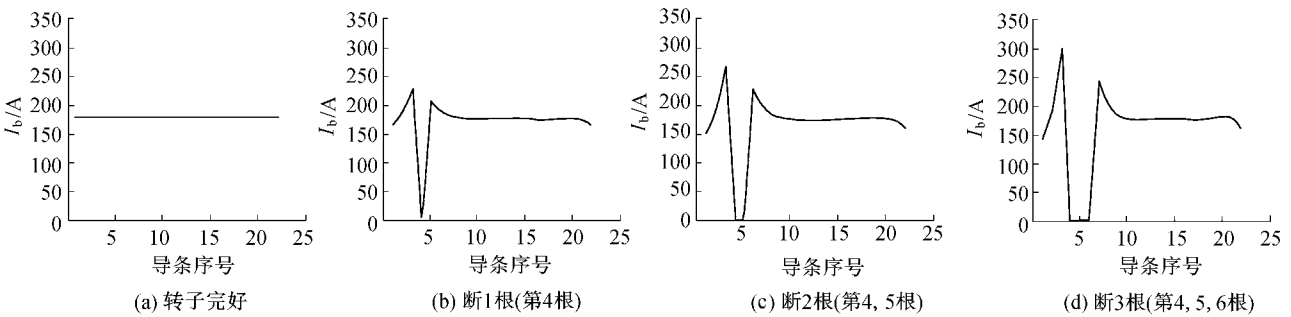


图 2 转子断条后各导条电流变化

Fig.2 Variation of current through each rotor bar after breaking of some bars

3 断条根数与故障特征电流的关系

从前面分析可知,当电机转子断条发生故障后,转子电流不对称,在定子电流中产生频率为 $(1-2s)f_1$ 的额外电流频率成分(I_{2s})。本文用转子故障时的该特征电流分量(I_{2s})与该时刻的定子基频电流(I_1)之比(K_{2s})表示转子绕组故障特征量,简称为故障特征量。其大小与断条根数有关,当连续断条时,断条数增加,故障特征量也增加;但当断条数大于每极导条数时,断条数增加,该故障特征量反而减少。转子连续断条根数与故障特征量的关系如图 3 所示。

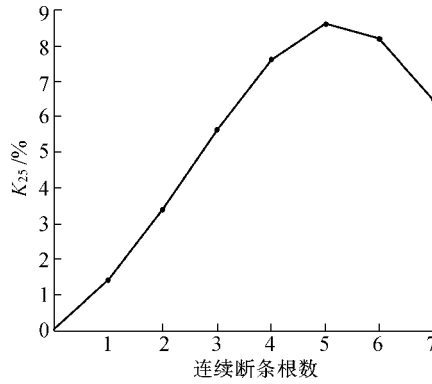


图3 转子连续断条根数与故障特征量的关系

Fig.3 Relationship between fault characteristic value and the number of continuously broken bars

4 小 结

本文根据多回路理论提出的电机转子绕组故障新的处理方法,给电机故障后的处理、比较、作图分析等带来很大方便。通过分析电机断条数量与电机转子电流间的关系,揭示了电机断条后转子电流的变化规律,修正了电机转子绕组故障特征量大小与断条根数成正比的传统观点,指出随着连续断条根数的增加,电机的不对称性和故障特征量也相应增加;当连续断条数超过电机每极导条数时,断条数继续增加,故障特征量反而减小,与之相邻的导条中的电流也相应减小。

参考文献:

- [1] BENBOUZID M E H, NEJJARI H, BEGUENANE R et al. Induction motor asymmetrical faults detection using advanced signal processing techniques[J]. IEEE Trans on EC, 1999, 14(2): 147—152.
- [2] KLIMAN G B. Methods of motor current signature analysis[J]. Electric Machine & Power Systems, 1992, 20(5): 463—474.
- [3] FILIPPETTI F, FRANCESCHINI G, TASSONI C. Neural networks aided on-line diagnostics of induction motor rotor fault[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1995, 31: 892—899.
- [4] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993. 76, 532—540.
- [5] 马宏忠. 大型交流电机故障分析与诊断系统的研究[D]. 南京: 东南大学, 2001.
- [6] 马宏忠, 胡虔生. 非正弦信号测量误差分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(1): 17—20.

Impact of the number of broken rotor bars of induction motors

MA Hong-zhong¹, HU Yu-sheng², HUANG Yun-kai², WANG Hui-qing¹

(1. College of Electrical Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Department of Electrical Engineering, Southeast Univ., Nanjing 210096, China)

Abstract The fault analysis method for rotor windings of induction motors is introduced. Then a discussion is made on the current distribution and its variations in each rotor bar and each section of end rings under different numbers of broken rotor bars, and the variation of fault characteristic value of rotor windings. Finally, some conclusions are drawn: the fault characteristic value increases with the number of continuously broken bars, but, if the number of broken bars exceeds the total number of rotor bars at each pole, the fault characteristic value will decrease with the increase of broken bars.

Key words induction motor; multi-loop; broken bar; rotor current; fault characteristic value