

感应电机定子绕组故障仿真模型研究

蒋建东¹, 魏臻珠¹, 冯 涛²

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州, 450001; 2. 商丘供电公司, 河南 商丘, 476000)

摘 要: 把感应电机定子侧绕组的每一个并联分支看成是一个支路, 转子侧等效为 d 轴和 q 轴两个相互垂直的绕组, 建立了基于绕组并联支路的感应电机磁链方程和电压方程. 根据故障后支路的电压方程和磁链方程得出了各种绕组短路故障的等效模拟电路; 对于绕组断线故障, 可令该绕组的阻抗为一个相当大的数来模拟, 最后用一个 45 kW 的电机参数进行仿真.

关键词: 感应电机; 定子绕组故障; 建模

中图分类号: TM 341 **文献标识码:** A

0 引言

通过感应电机定子绕组故障的仿真分析, 探讨感应电机定子绕组故障后电动机内各个特征量的变化规律, 为感应电机定子绕组故障的信号检测和保护方法研究提供科学依据, 是减少或避免感应电机烧损和经济损失的有效途径. 目前对感应电机仿真的模型有 EMTDC 中的电动机模型^[1,2]和基于 Matlab 工具箱的模型^[3]等. 对感应电机定子绕组故障的模拟, 文献[1]根据定子阻抗参数与定子绕组匝数之间的关系, 通过在 EMTDC 中的感应电机模型定子侧接入适当的阻抗对匝间短路进行了仿真, 这种方法简单实用, 但仅能对匝间短路故障进行模拟. 文献[4]根据“双向旋转电磁场”的概念, 把每一个线圈中电流产生的脉振磁势分解为两个相反方向旋转的磁势, 然后根据内部故障后绕组的连接情况对分解后的磁势进行合成, 进而建立了匝间短路故障的数学模型, 显然这种方法求解起来十分繁琐. 作者建立了基于绕组并联支路的感应电机磁链方程和电压方程, 并根据电路基本原理给出了各种定子绕组故障的模拟方法, 最后用一个 45 kW 的电机参数进行了仿真.

1 基于绕组并联支路的感应电机磁链方程和电压方程

设感应电机定子绕组并联支路数为 k , 把定

子侧每个并联支路看作一个支路, 转子侧等效为 d 轴和 q 轴两个相互垂直的绕组, 如图 1 所示. 根据交流电机绕组构成方法及其电势分布理论, 由图 1 所示的电流正方向, 并规定定子侧和转子侧的正电流产生正磁链, 感应电机的磁链方程和电压方程分别为

$$\begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \vdots \\ \Psi_i \\ \vdots \\ \Psi_n \\ \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & \cdots & M_{1i} & \cdots & M_{1n} & M_{1d} & M_{1q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{i1} & \cdots & L_{ii} & \cdots & M_{in} & M_{id} & M_{iq} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{n1} & \cdots & M_{ni} & \cdots & L_{nn} & M_{nd} & M_{nq} \\ M_{d1} & \cdots & M_{di} & \cdots & M_{dn} & L_d & 0 \\ M_{q1} & \cdots & M_{qi} & \cdots & M_{qn} & 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_i \\ \vdots \\ i_n \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_n \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \vdots \\ \Psi_i \\ \vdots \\ \Psi_n \\ \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & r_s & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & r_r & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & r_d & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & r_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_i \\ \vdots \\ i_n \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: n 为定子并联分支总数, $i, j = 1, 2, \dots, n$ 分别对应于 $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, \dots, a_k, b_k, c_k$; 其它参数的表示方法从惯例, 其中电感参数的计算参见文献[5].

收稿日期: 2006-07-26; 修订日期: 2006-09-28

作者简介: 蒋建东(1975-), 男, 河南南阳人, 郑州大学讲师, 博士, 硕士生导师. 主要从事电力系统分析与控制方面的教学与研究.

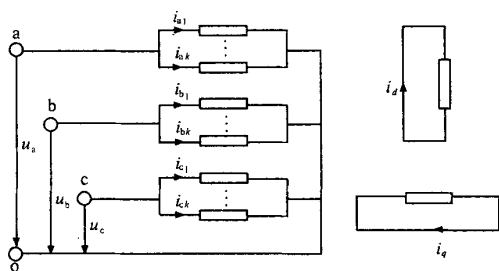


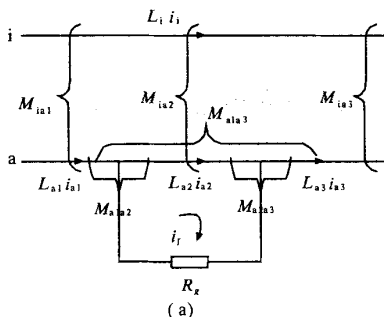
图1 感应电机定子绕组和转子等效绕组

Fig.1 The induction motor stator parallel branch circuits and rotor equivalent circuits

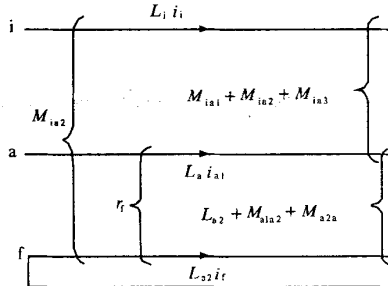
2 故障模拟方法

感应电机绕组故障,有以下几种类型:①匝间短路;②同相不同分支之间短路;③相间短路;④接地短路;⑤断线.对于断线故障,可令电压方程(2)系数阵中相应的电阻元素为一个相当大的数来模拟.对于其它4种类型的故障,由下面的分析可知,可用一条支路来统一进行模拟.

2.1 匝间短路



(a)



(b)

图2 匝间短路示意图及其等效电路

Fig.2 Turn to turn short within a coil and its equivalent circuit

2.2 同相不同分支之间短路

设某一相的两个并联分支 a 和 b 发生了短路故障,过渡电阻为 R_g ,支路 a 和 b 的短路点到其首端(电源侧)的电阻分别为 r_{fa} 和 r_{fb} ,故障前支路 a 和 b 的电阻分别为 r_a 和 r_b ,自感系数分别为 L_a 和 L_b .其它参数标于图 3(a)中.其等效电路如图 3(b)所示.

2.3 相间短路

设支路 a 和支路 b 发生了相间短路故障,过渡电阻为 R_g ,支路 a 和 b 的短路点到其首端(电源侧)的电阻分别为 r_{fa} 和 r_{fb} ,故障前支路 a 和 b 的电阻分别为 r_a 和 r_b ,自感系数分别为 L_a 和 L_b ,

设支路 a 发生了匝间短路故障,过渡电阻为 R_g ,短路部分线圈的电阻为 r_f ,故障前支路 a 的电阻为 r ,自感系数为 L_a ,其它参数标于图 2(a)中.为简明起见,图中没有标出各线圈的电阻(以下各图同,不再说明).

由图 2(a),支路 i 与 a 之间的互感磁链:

$$\Psi_{ia} = (M_{ia1} + M_{ia2} + M_{ia3})i_{a1} + M_{ia2}i_f \quad (3a)$$

支路 a 的磁链和电压方程分别为

$$\Psi_a = L_a i_{a1} + (L_{a2} + M_{a1a2} + M_{a2a3})i_f + (M_{ia1} + M_{ia2} + M_{ia3})i_i \quad (3b)$$

$$\Psi_a + r_f i_f + r_{i1} = u_a \quad (3c)$$

短路回路 f 的磁链和电压方程分别为

$$\Psi_f = L_{a2}i_f + (L_{a2} + M_{a1a2} + M_{a2a3})i_{a1} + M_{ia2}i_i \quad (3d)$$

$$\Psi_f + R_g i_f + r_f i_f + r_{i1} = 0 \quad (3e)$$

根据公式(3a)~(3e),我们可以得到匝间短路故障时的等效电路,如图 2(b)所示.

用同样的方法可以得到同相不同分支之间短路、相间短路、接地短路的等效电路.

其它参数标于图 4(a)中,其等效电路如图 4(b)所示.

2.4 接地短路

设支路 a 发生了接地短路故障,过渡电阻为 R_g ,短路部分线圈的电阻为 r_f ,故障前支路 a 的电阻为 r ,自感系数为 L_a ,其它参数标于图 5(a)中,其等效电路如图 5(b)所示.

由前面的分析可以看出,对匝间短路、同相不同分支之间短路、相间短路和接地短路故障,我们可以用一条支路来进行统一模拟.对于复杂故障的模拟,只需将前面介绍的方法进行适当的组合即可.

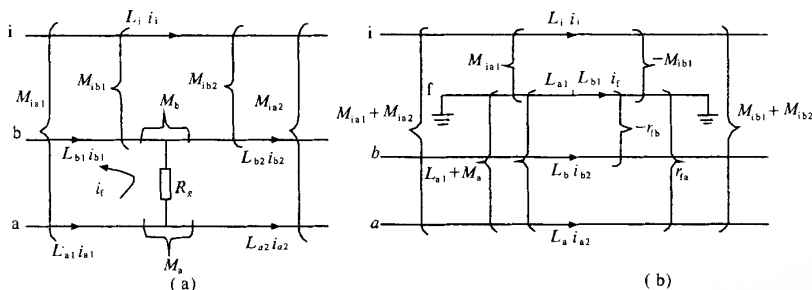


图 3 同相不同分支之间短路示意图及其等效电路

Fig. 3 Short between coils of the same phase and its equivalent circuit

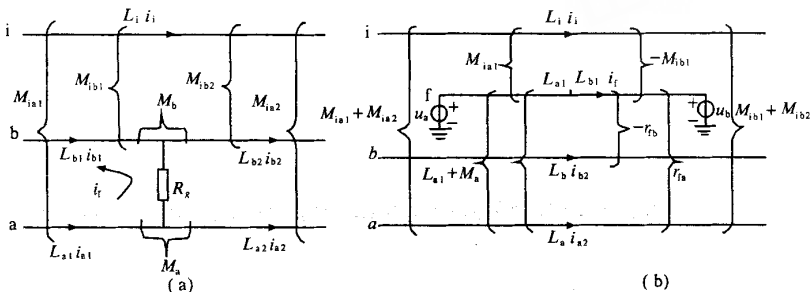


图 4 相间短路示意图及其等效电路

Fig. 4 Phase to phase short and its equivalent circuit

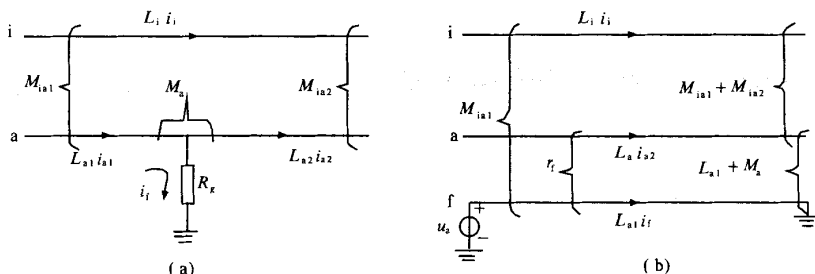


图 5 接地短路示意图及其等效电路

Fig. 5 Phase to earth short and its equivalent circuit

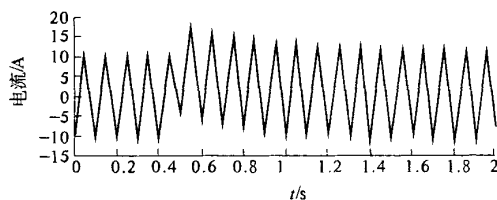
3 故障后感应电机磁链方程和电压方程的修改

由上面的分析,对于各种绕组短路故障,可以用一条支路等效模拟,对感应电机磁链和电压方程的修改相当于增加一个支路方程,并相应地按照以上等效图对电阻矩阵和电感矩阵进行修正.对于多重故障,按照同样的方法进行多重修正即可.然后求解修正后的感应电机磁链和电压方程即可完成感应电机定子绕组故障的模拟仿真.

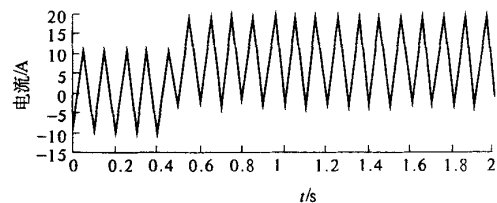
4 仿真结果

作者用一个 45 kW 的电机参数进行了仿真.图 6 给出了 B 相绕组接地短路的仿真结果,故障

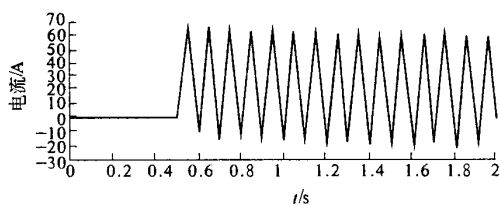
发生时间是 0.5 s,过渡电阻为 100 Ω .



(a) 非故障分支电流(B相)



(b) 故障分支电流(B相)



(c) 短路回路电流

图 6 B 相绕组接地短路时定子
绕组电流变化情况

Fig. 6 Representation of stator currents
when phase B to earth short

5 结论

作者基于定子侧绕组并联分支建立了感应电机的磁链方程和电压方程,给出了各种定子绕组故障的等效模拟方法,最后用一个 45 kW 的电机参数进行了仿真。本文方法对绕组故障的模拟方

法物理概念清晰、实用性强,易于在计算机上实现。

参考文献:

- [1] 魏臻珠,蒋建东,蔡泽祥. 基于等效电路参数的异步电动机内部故障仿真[J]. 电力自动化设备,2005,9(25):50-53.
- [2] 高爱云,蔡泽祥. EMTDC 异步电动机模型及起动过程仿真[J]. 继电器,2003,1(31):80-83.
- [3] 赵亮,辛小南,杨育霞. 异步电动机 S 函数仿真模型研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2004,25(4):102-105.
- [4] ZHANG L Z, CHEANG T S. A new approach to analysis of inter-turns faults of three-phase induction motors[C]. Proceedings of APSCOM, 1997(2):723-728.
- [5] 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.

Study on the Induction Motor's Stator Winding Fault Simulation Model

JIANG Jian-dong¹, WEI Zhen-zhu¹, FENG Tao²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Shangqiu Power Supply Company, Shangqiu 476000, China)

Abstract: In this paper, by treating the stator side as every parallel stator branch circuits and disposing the rotor side as d and q windings equivalently, the induction motor model based on each parallel stator branch circuit is built. According to the basic electric circuit theory, the simulation method of various winding fault is deduced. This method has the advantages of strong generality and conceptual clearness, which may be used as a powerful tool to analyze the effect of stator winding faults to large induction motor performances for the investigation of new diagnostic and protective method. Finally, the numerical simulation is conducted and the results of the phase to earth short are given.

Key words: induction motor; stator winding fault; modeling