

EMTDC 异步电动机模型及起动过程仿真

高爱云, 蔡泽祥

(华南理工大学电力学院电力工程系, 广东 广州 510640)

摘要: 详细介绍了 EMTDC 中三相异步电动机模型, 尤其是机械部分模型, 给出了机械部分与电气部分的接口以及暂态求解过程。基于 EMTDC 对正常情况、定子匝间短路及转子断条故障时的起动转速—转矩关系进行了仿真研究, 得出了仿真曲线, 分析结果证明利用 EMTDC 可为内部故障诊断提供一个仿真环境。

关键词: EMTDC; 异步电机机械部分模型; 转速—转矩关系; 内部故障诊断

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)01-0080-04

1 引言

电动机转速—转矩关系是电动机机械特性的主要表现, 这个特性对分析电动机与被拖动负载配合能否稳定运行等问题有极其重要的意义^[1]。曲线的形状及曲线中的起动转矩、最小转矩、最大转矩是衡量电动机能否顺利起动和稳定运行的重要指标^[2]。电机发生内部故障后, 转速—转矩曲线不同于正常情况, 电动机起动转矩暂态过程受故障情况影响^[3], 其中含有丰富的故障特征, 利用这些故障特征就可以判断出电机是否发生了故障。有两种研究途径可以得到电动机的转速—转矩关系: 一种是通过实验方法, 但投资大且对设备损害较大; 二是仿真方法, 简单方便、直观而又能说明问题, 尤其适用于研究参数变化对问题的影响。而仿真方法的难点在于模型的建立, 这也是决定仿真正确与否的关键所在。本文详细介绍了 EMTDC 中三相异步电机模型, 重点在于机械部分模型, 并给出了机械部分与电气部分的接口以及暂态求解过程。接着运用 EMTDC 对 Y90S—4 型电动机正常情况、匝间短路及转子断条故障后起动转速—转矩关系进行了仿真计算, 仿真结果的正确性证明 EMTDC 为内部故障诊断提供了一个仿真环境。

2 EMTDC 中异步电动机模型^[4]

EMTDC 中的三相异步电动机模型首先将转子侧转换成绕组系数、每相串联匝数均与定子侧相同的三相绕组, 然后经派克变换转换到 dq0 轴, 最后化简为阻抗和电流源并联的支路与外部电路联立求解而建立起来的。

2.1 电气部分模型

选取 q 轴落后 d 轴 90°, 对电动机定转子电气方程派克变换, 结果如下, 式中下标 a、d、q 表示定子侧变量, r、D、Q 表示转子侧变量, 其他符号从惯例^[2]。

定子侧电压方程为

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_{0a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{0a} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_{0a} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} + & & \\ & - & \\ & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_{0a} \end{bmatrix} \quad (1)$$

转子侧电压方程为

$$\begin{bmatrix} v_D \\ v_Q \\ v_{0r} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \\ i_{0r} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_D \\ \psi_Q \\ \psi_{0r} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, 派克变换矩阵为

$$[P] = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos & \cos(-120^\circ) & \cos(+120^\circ) \\ \sin & \sin(-120^\circ) & \sin(+120^\circ) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

它可以重新写成两个矩阵的乘积, 即

$$[P] = [A][B] = \begin{bmatrix} \cos & -\sin & 0 \\ \sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{2}/\sqrt{3} & -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{6} \\ 0 & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: θ 为转子位置角。

第一个转换矩阵 [B] 是将三相绕组用 d、q、0 取代, 第二个转换矩阵 [A] 使得 d、q 轴与转子以相同的速度旋转。对三相绕线转子的三相异步电机, 定子和转子都用 [B] 变换, 以得到 d、q 轴等值绕组, 而仅对定子侧进行 [A] 变换。

d、q 两个轴上的磁链—电流关系式表达了定子

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (990579)

侧和转子侧之间的耦合关系,即

$$\begin{bmatrix} d \\ D \\ q \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & M_{d,D} & 0 & 0 \\ M_{d,D} & L_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_q & M_{q,Q} \\ 0 & 0 & M_{q,Q} & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (5)$$

而零序磁链在电枢和转子间是无耦合的,即

$$\phi_{0a} = L_{0a} i_{0a}, \quad \phi_{0r} = L_{0r} i_{0r} \quad (6)$$

式(5)中为常规的异步电动机,转子只有一个鼠笼(或一组三相绕组),对于双鼠笼转子,相应地在转子侧变为2对绕组,即 D_1, Q_1, D_2, Q_2 ,依此类推。

2.2 机械部分模型

在许多暂态研究中,电动机速度变化非常小,机械部分可忽略不计,而研究起动特性时必须考虑转速变化。EMTDC中三相异步电动机模型中没有内在的机械部分模型,而是将机械部分转换成具有集中参数的R-L-C等值电气网络,然后将它们作为整个电气网络的一部分来求解,电动机的电磁转矩则作为电流源注入到电气网络。对于电动机轴等值网络增加一个节点,其对地电容对应于其转动惯量 J ;如果阻尼正比于电动机轴的转速,用电导为 D 的电阻与其电容并联;如果一机械负载作用在电动机轴上,就用一负向电流源接到该节点。电气量与机械量之间的等值关系如表1所示。机械量和电气量通过电磁转矩联系起来。根据式(9)将电磁转矩从电气侧折算到机械侧,然后将 $T_{mech}(t)$ 作为模拟机械系统的戴维南等值电路的电流源,求解后得到转速(等值电压)。机械部分与电气部分接口如图1所示。

电动机机械方程为:

$$J \left[\frac{dw}{dt} \right] + Dw = T_{net} = [T_{in} - T_{out}]$$

或者用电气量表示为

$$C \frac{dv}{dt} + \frac{1}{R} v = i_{net} = i_{in} - i_{out} \quad (7)$$

$$T_{in} = (V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c) / \quad (8)$$

$$T_{mech} = \frac{p}{2} T_{el} \quad (9)$$

其中: J 为转动惯量; D 为阻尼系数; w 为转子角速度; T_{in} 为机械负载; T_{out} 为输出的电磁转矩。 T_{el} 为电气侧的电磁转矩; T_{mech} 为折算到机械侧的电磁转矩; p 为电机极对数。

表1 机械量与电气量间的等值关系

Tab.1 The equivalence of the mechanical variables to electrical variables

机械量	电气量
T (作用在质量块上的转矩) [N·m]	i (注入节点的电流) [A]
(角速度) [rad/s]	v (节点电压) [V]
(转子角) [rad]	q (电容上电荷) [C]
J (转动惯量) [kg·m ²]	C (对地电容) [F]
D (阻尼系数) [N·ms/rad]	$1/R$ (电导) [S]

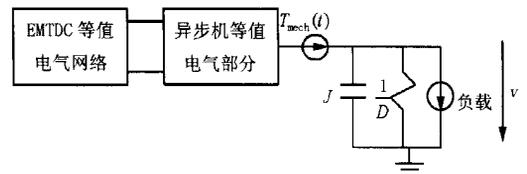


图1 异步电机机械部分与电气部分接口

Fig.1 The interface of the mechanical part and the electrical part of the asynchronous motor

2.3 暂态过程求解

EMTDC中采用补偿法求取暂态解。为使用补偿法求取暂态解,首先使用梯形积分将式(1)、(2)的电机微分方程和式(7)的电机机械方程转换成差分方程。定子侧方程为:

$$\begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_q(t) \\ v_{0a}(t) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_{0a}(t) \end{bmatrix} - \frac{2}{t} \cdot \begin{bmatrix} d(t) \\ q(t) \\ \phi_{0a}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -w(t) & q(t) \\ w(t) & d(t) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} hist_d \\ hist_q \\ hist_{0a} \end{bmatrix} \quad (10)$$

从前一时步得到的历史项为:

$$\begin{bmatrix} hist_d \\ hist_q \\ hist_{0a} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} v_d(t-t) \\ v_q(t-t) \\ v_{0a}(t-t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d(t-t) \\ i_q(t-t) \\ i_{0a}(t-t) \end{bmatrix} + \frac{2}{t} \begin{bmatrix} d(t-t) \\ q(t-t) \\ \phi_{0a}(t-t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -w(t-t) & q(t-t) \\ w(t-t) & d(t-t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

转子侧方程与此类似,不再列出。

机械方程的差分形式为

$$\left(\frac{2C}{t} + \frac{1}{R} \right) v(t) = i_{net}(t) + hist(t-t) \quad (12)$$

从前一时步得到的历史项为

$$\text{hist}(t-t) = i_{\text{net}}(t-t) + \left(\frac{2C}{t} - \frac{1}{R} \right) v(t-t) \quad (13)$$

同时,连接到电机定子侧的网络可由暂态戴维南等值电路公式模拟,即

$$\begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{a,0} \\ v_{b,0} \\ v_{c,0} \end{bmatrix} + [R_{\text{equiv}}] \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

定子在三相坐标空间的电压、电流相量,可通过派克变换转换为 dq0 空间相量。

同样,如果转子侧接有外回路,它们也可以用戴维南等值电路模拟,其方程的形式为

$$\begin{bmatrix} v_D(t) \\ v_Q(t) \\ v_{0f}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{D,0} \\ v_{Q,0} \\ v_{0f,0} \end{bmatrix} + [R_{f,\text{equiv}}] \begin{bmatrix} i_D(t) \\ i_Q(t) \\ i_{0f}(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中下标“0”表示无外接回路时的解。

求解时首先解不包括异步电机的整个网络,得出戴维南等值开路电压以及模拟机械系统的网络开路电压,用线性外推法预报转子速度 $w(t)$,即 $w(t) = 2w(t-t) - w(t-2t)$;接着将网络从相空间转换到 dq0 空间,计算电气侧电磁转矩,并转到机械侧作为模拟机械系统的戴维南等值电路的电流源,求解得转速(等值电压)。如果所得速度与预报速度相差太大,则重新计算,否则更新 dq 轴历史项;然后将定子电流从 dq 量转换到相量,并计入定子电流、转子电流(如果它们与外界电路相连)和机械系统等值网络中模拟电磁转矩的电流的作用,求解整个网络的最后解;最后再进行下一时步的计算。

3 仿真算例

3.1 仿真条件

本文使用的电动机型号为 Y90S-4,主要参数为:额定电压 380 V,额定功率 1.1 kW,额定电流 2.7 A,额定转差 6.7%,效率 78%,功率因数 0.78,起动电流倍数 6.5,起动转矩倍数 2.2,最大转矩倍数 2.2。电动机满载运行,文章对正常情况、24.5% 匝间短路及两根导条断裂后的转矩—转速关系进行了仿真,证明利用 EMDC 可以对计及转速变化的有关机械问题进行仿真研究。

3.2 仿真结果

图 2 为正常情况下的转速—转矩关系曲线,图 3 为 1 s 时发生 24.5% 匝间短路后的转速—转矩关系曲线,图 4 为两根导条断裂后的转速—转矩关系

曲线。电动机均满载运行。

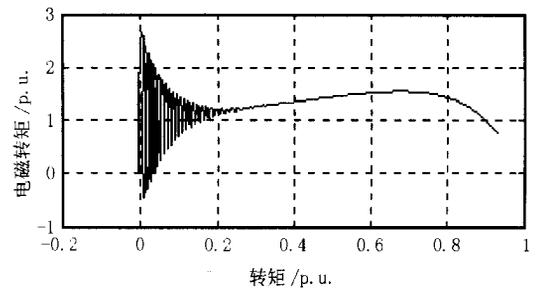


图 2 正常情况下转速—转矩曲线

Fig. 2 The speed-torque curve under normal state

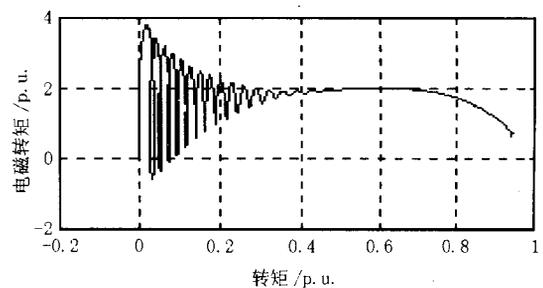


图 3 24.5% 匝间短路后转速—转矩曲线

Fig. 3 The speed-torque curve with 24.5% turns shorted

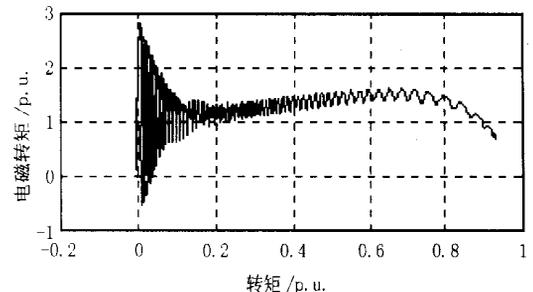


图 4 两根导条断裂后转速—转矩曲线

Fig. 4 The speed-torque curve with two broken bars

3.3 仿真结果分析

图 2 所得到的正常情况下转速—转矩仿真曲线形状与理论基本相符;匝间短路后,从图 3 可以看出转速与转矩均下降,未出现明显的振荡;而转子断条后,从图 4 看出转速与转矩均出现明显的振荡。这是因为转子断条后气隙磁动势中出现比电源电流角频率低 $2s^{-1}$ 的分量,这个分量将使异步电机定子绕组中出现一个比电源电流角频率低 $2s^{-1}$ 的三相电流分量,由于它的调制作用,定子电流将出现节拍性变化,也使电动机的转矩随之而脉动,从而使异步电机转速也将按 2 倍滑差频率而波动^[5]。图 2、图 3 说明 EMDC 中的异步电动机模型考虑了故障时电机转速的变化,使得结果更接近于实际,其转速变化

的求解过程即是根据文章开始所描述的模型及算法进行的。由仿真曲线来看,其模型和算法均具有一定的精确度。实际上,正是因为 EMTDC 异步电机模型考虑了转速的变化,所以能够用来仿真电机的起动过程。同时,电机内部故障时起动过程中包含了丰富的故障特征,通过这些故障特征即可判断出电机是否发生了故障。

6 结论

通过对 EMTDC 仿真软件中三相异步电动机模型,尤其是机械部分模型以及算法的介绍说明该仿真软件可以用来仿真计及电机转速变化的暂态过程,然后对异步电动机正常情况、匝间短路及断条故障下的起动转速-转矩关系进行了仿真计算并给出了仿真曲线,分析表明 EMTDC 的异步电机模型及算法在处理考虑转速变化问题时均具有一定的精确度。同时,电机内部故障时,起动转速-转矩曲线中包含了丰富的故障特征,根据这些故障特征即可做出电机是否发生故障的判断。因此,EMTDC 为内部故障诊断提供了一个仿真环境。

参考文献:

- [1] 宋萍,张小兵.三相异步电动机机械特性的直观表达式[J].淮南矿业学院学报,1998,18(2):58~60.
- [2] 吴凯,等.小型异步电动机转矩转速曲线自动测试系统[J].微电机,1997,30(2):38~42.
- [3] Penman J,Stavrou A. The effects of broken rotor bars on the transient run up of induction machines [A]. Electrical Machines and Drives[C]. 1995,Seventh International Conference on, 1995:47~51.
- [4] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M].北京:水利电力出版社,1991.
- [5] 岳国良,等.异步电机鼠笼转子断条的频谱分析及诊断[J].河北电力技术,1999,18(5):19~22.

收稿日期:2002-06-25;

修回日期:2002-07-24

作者简介:

高爱云(1977-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护;

蔡泽祥(1960-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护,电力系统稳定分析与控制。

The mechanical model and its simulation of the induction motors in EMTDC

GAO Ai-yun, CAI Ze-xiang

(Electrical Engineering Department of South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper introduces the three-phase induction motor model of EMTDC in details, especially the mechanical model. It provides the interface between the mechanical part and the electrical part and the transient resolution process. Based on EMTDC it simulates the start up speed-torque relations of healthy motor and motors with stator turn-to-turn shorts and broken bars, as a result, it produces the simulation curves. The analysis proves that EMTDC can provide a simulation environment for internal faults diagnosis.

Key words: EMTDC; mechanical model of the induction motors; speed-torque relation; internal faults diagnosis

(上接第 79 页)

Summary on the methods of power system transient stability analysis based on the synchronously sampled data of PMU

FU Qiang, WANG Shao-rong, CHENG Shi-jie

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The phasor measurement units based on the precise clock of GPS can measure the parameters of the power system synchronously. The conventional methods of transient system analysis are always based on the asynchronous measured data. The synchronously sampled data provided by PMU exploit a new research area of the system transient stability analysis and control. This paper introduces the activity of PMU application, and then summing up the new approaches and progress in power system transient stability analysis with PMU.

Key words: phasor measurement unit; transient stability analysis; GPS