

文章编号:1000-582X(2006)08-0053-04

基于时域的汽轮发电机暂态仿真*

蒙泽森,何祖威,杨晨

(重庆大学 动力工程学院,重庆 400030)

摘要:结合大型火电厂实时仿真机对汽轮发电机高逼真度仿真的要求,通过 Park 方程建立能精确描述其暂态过程的状态方程,并对时变的系统矩阵 A 和控制矩阵 B 进行改进处理,结合四阶 Runge - Kutta 法得到更省计算量的数值解法.最后编写相应的仿真程序,对某 360 MW 汽轮发电机进行突加负载仿真试验,仿真结果显示文中提出的方法适合实时仿真机的发电机模型.

关键词:Park 方程;暂态过程;状态方程;四阶 Runge - Kutta 法;突加负载

中图分类号:TK26

文献标识码:A

汽轮发电机在经历诸如突然加减负载、内部短路故障、异常运行时,处于暂态过程,发电机内的电压、电流、磁链、电磁转矩、转速等物理量将随时间变化;而且,电磁转矩是电流的非线性函数,磁不对称性和磁饱和的影响也使得电压方程具有时变和非线性的特点,因此,对于一般的暂态过程,整个控制方程(即电压和转矩方程)是一组时变系数的非线性微分方程组^[1].在某些定性研究或精度要求不高的定量分析中,可以通过合理假设以及坐标变换使整个运动方程变为常系数线性微分方程组,从而可通过 Laplace 变换在频域上用等效电路、框图、传递函数、频率特性等方法求得解析解^[1-2].但是,为了更深入地研究发电机暂态过程,人们寻求用数值法来直接对更精确描述其暂态过程的时变系数非线性微分方程组进行求解^[1-3],而高速和大内存计算机的迅速发展以及数值算法的相应发展,使得数值解比上述假化后的解析解更精确,也很省时.暂态过程的数值解实质是直接时域上选择合适的状态变量,将整个控制方程转化为状态方程形式,再对其离散化以便用差分法求解.

针对目前电机分析中常用的频域法难以应用到全范围高逼真度培训仿真机的发电机组模型的情况,先导出适用于实时仿真机的改进的状态方程,再采用四阶 Runge - Kutta 法编写其仿真程序,最后对某 360 MW 汽轮发电机突加负载的暂态过程进行仿真,以验证其正确性.

1 数学模型

由于凸极同步发电机更具有普遍的意义,隐极同步发电机可看作其特例,因此先建立凸极同步发电机机电运动的数学模型.

经过 Park 变换可将发电机 A、B、C 定子绕组看成在 dqo 坐标下的 d 轴、 q 轴等效绕组以及零序系统绕组,其中 d 轴与转子直轴重合, q 轴与转子交轴重合.为了在 Park 变换后使定、转子绕组间的互感变为可逆,需引入 X_{ad} 基准的标么制^[1]来表示其运动方程,即基值励磁电流产生的定子互感磁链 $M_{af}i_b$ 等于定子基值电流产生的直轴电枢反应磁链 $L_{ad}i_b$.在 X_{ad} 基准的标么制下(标么值用上标*来表示),有 $X_{af}^* = X_{ad}^* = X_{af}^*$, $X_{aq}^* = X_{aq}^*$,这里 X_{ad}^* 为直轴电枢反应电抗, X_{aq}^* 为交轴电枢反应电抗,那么按照发电机惯例,磁链方程^[1]为:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d^* \\ \Psi_q^* \\ \Psi_d^* \\ \Psi_f^* \\ \Psi_D^* \\ \Psi_Q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_d^* & 0 & 0 & X_{af}^* & X_{ad}^* & 0 \\ 0 & X_q^* & 0 & 0 & 0 & X_{aq}^* \\ 0 & X_q^* & 0 & 0 & X_0^* & 0 \\ X_{af}^* & 0 & 0 & X_f^* & X_{fd}^* & 0 \\ X_{ad}^* & 0 & 0 & X_{fd}^* & X_D^* & 0 \\ 0 & X_{aq}^* & 0 & 0 & 0 & X_Q^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d^* \\ -i_q^* \\ -i_0^* \\ i_f^* \\ i_D^* \\ i_Q^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

将时间也用标么值表示,即 $t^* = t/t_b = \omega_b t$,时间的基值 t_b 等于电转速 ω_b 基值的倒数,则在 dqo 坐标系统下电压方程^[1]表示为:

* 收稿日期:2006-03-22

作者简介:蒙泽森(1980-),广西灵山县人,重庆大学硕士研究生,主要研究方向为发电厂电气系统数学建模与仿真,以及热力系统的计算机仿真与控制.

$$\begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \\ u_0^* \\ u_f^* \\ u_D^* \\ 0 \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \Psi_d^* \\ \Psi_q^* \\ \Psi_0^* \\ \Psi_f^* \\ \Psi_D^* \\ \Psi_Q^* \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} -i_d^* \\ -i_q^* \\ -i_0^* \\ -i_f^* \\ -i_D^* \\ -i_Q^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\Psi_d^* \omega_r^* \\ \Psi_q^* \omega_r^* \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, p 为时间用标么值表示的微分算子, 即 $p = d/dt^*$; R 为电阻对角矩阵, 其对角元素依次为 $r_a, r_a, r_a, r_f, r_D, r_Q$.

对于转矩方程, 在上述标么制下为:

$$T_m^* = T_e^* + D_\Omega^* \omega_r^* + J^* \frac{d\omega_r^*}{dt^*}, \quad (3)$$

式中, p_0 为发电机磁极对数; D_Ω^* 为旋转阻力系数的标么值, $D_\Omega^* = \frac{D_\Omega \omega_b}{p_0 T_b}$; J^* 为转动惯量标么值, $J^* = \frac{J \omega_b^3}{p_0^2 S_b}$; T_m^* 为原动机的输入转矩标么值; T_e^* 为电磁转矩的标么值,

$$T_e^* = \frac{T_e}{T_b} = \frac{3}{2} p_0 (\Psi_d^* i_q^* - \Psi_q^* i_d^*) = \Psi_d^* i_q^* - \Psi_q^* i_d^*, \quad (4)$$

值得指出的是, 功率基值 $S_b = 3U_N I_N = 3 \frac{u_b i_b}{\sqrt{2}\sqrt{2}} = \frac{3}{2} u_b i_b$;

$$\text{转矩基值 } T_b = \frac{p_0 S_b}{\omega_b} = \frac{3}{2} p_0 \Psi_b i_b.$$

采用发电机惯例, 功角 δ 以从机端电压相量到空载电势相量为正, 则其与绝对角度 θ 的关系为 $\delta = \theta - \omega_b t$, 则 $\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - \omega_b = \omega_r - \omega_b$, 在式子两边同时除以 ω_b , 注意到 $t^* = \omega_b t$, 得: $\frac{d\delta}{dt^*} = \omega_r^* - 1$,

$$\text{注意, 这里的功角仍是采用实际值.} \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} -y_d r_a & -y_{af} r_f & -y_{ad} r_D & y_d X_q \omega_r & y_d X_{aq} \omega_r & 0 & 0 \\ -y_{af} r_a & -y_f r_f & -y_{fd} R r_D & y_{af} X_q \omega_r & y_{af} X_{aq} \omega_r & 0 & 0 \\ -y_{ad} r_a & -y_{fd} r_f & -y_D r_D & y_{ad} X_q \omega_r & y_{ad} X_{aq} \omega_r & 0 & 0 \\ -y_{aq} X_d \omega_r & -y_{aq} X_{af} \omega_r & -y_{aq} X_{ad} \omega_r & -y_{aq} r_a & -y_Q r_Q & 0 & 0 \\ \frac{X_d}{J} (-i_q) & X_{af} (-i_q) & \frac{X_{ad}}{J} (-i_q) & -\frac{X_q}{J} (-i_d) & -\frac{X_{aq}}{J} (-i_d) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中各个 y 开头的变量是由电抗矩阵求逆得到的, 即:

$$\begin{bmatrix} y_d & y_{af} & y_{ad} \\ y_{af} & y_f & y_{fd} \\ y_{ad} & y_{fd} & y_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & X_{af} & X_{ad} \\ X_{af} & X_f & X_{fd} \\ X_{ad} & X_{fd} & X_D \end{bmatrix}^{-1} \quad \text{和}$$

$$\begin{bmatrix} y_q & y_{aq} \\ y_{aq} & y_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_q & X_{aq} \\ X_{aq} & X_Q \end{bmatrix}^{-1} \quad (10)$$

控制矩阵 B 为:

2 汽轮发电机的状态方程

求解时变的和非线性的运动方程, 必须在时域上进行数值求解, 为此需将其转化为状态方程形式. 隐极的汽轮发电机可看作凸极同步发电机的特例, 可由上述数学模型建立其状态方程. 这里设定子为星形联结、无中线, 此时零序电流为 0, 零序的各个量不用计算, 使得微分方程组少了 1 维; 汽轮发电机不装设阻尼绕组, 但暂态运行时转子铁芯的涡流效应可认为是 d 轴、 q 轴上各一个等效绕组 D 、 Q 的作用; 这里均采用 X_{ad} 基准的标么值, 并在不造成混淆下省去上标 *, 以 $-i_d, i_f, i_D, -i_q, i_Q$ 和 ω_b, δ 为状态变量, 值得指出的是功角 δ 不是标么值而是实际值. 电网电压的幅值 U_m 、功角 δ 与 d 轴电压 u_d 、交轴电压 u_q 关系为:

$$u_d = U_m \sin \delta, \quad u_q = U_m \cos \delta \quad (6)$$

方程(3)中的阻尼项 $D_\Omega \omega_r$ 可近似认为与发电机空载转矩 T_0 相等, 因此再联合方程(1)、(2)、(3)、(5), 可得汽轮发电机机电运动的状态方程为:

$$px = Ax + Bv, \quad (7)$$

其中, x 为状态向量, v 为控制向量:

$$x = [-i_d \ i_f \ i_D \ -i_q \ i_Q \ \omega_r \ \delta]^T \quad \text{和} \\ v = [U_m \ u_f \ U_m \ \frac{T_m - T_0}{J} - 1]^T \quad (8)$$

系统矩阵 A 为:

$$B = \begin{bmatrix} y_d \sin \delta & y_{af} & 0 \\ y_{af} \sin \delta & y_f & 0 \\ y_{ad} \sin \delta & y_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_Q \cos \delta \\ 0 & 0 & y_{aq} \cos \delta \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 暂态过程的数值解法

由式(9)和(11)可看出,矩阵 A 、 B 含有状态变量,使得状态方程具有非线性性质,必须用数值法来求解,文中采用电机工程上常用的四阶 Runge-Kutta 法^[4]求解. 四阶 Runge-Kutta 法的算法为:时间步长若为 h ,第 i 步状态变量 x_i 已知,则第 $i+1$ 步的状态变量 x_{i+1} 应为:

$$x_{i+1} = x_i + \frac{1}{6}(dx_1 + 2dx_2 + 2dx_3 + dx_4) \quad (12)$$

其中 dx_1 、 dx_2 、 dx_3 、 dx_4 分别为 t_i 、 $t_i + 0.5h$ 、 $t_i + 0.5h$ 、 $t_i + h$ 时刻的状态向量的增量. 由于在每一个计算时刻矩阵 A 、 B 都需要根据该时刻状态向量来计算,为了减少计算量,笔者作了一个改进,即去除时变矩阵 A 中的状态变量 ω_r 、 $-i_d$ 、 $-i_q$ 得到一个常值矩阵 A_1 ,控制矩阵 B 也作类似的处理,得到常值矩阵 B_1 ,然后在每次计算时刻,只需用相应的状态变量乘以 A_1 、 B_1 中部分的元素得到临时的矩阵 A_2 、 B_2 ,用 A_2 、 B_2 代替 A 、 B . 作这样处理后,在式(12)中,有:

$$\begin{aligned} dx_1 &= h \cdot (A_2 x_i + B_2 v) \\ dx_2 &= h \cdot [A_2(x_i + 0.5dx_1) + B_2 v] \\ dx_3 &= h \cdot [A_2(x_i + 0.5dx_2) + B_2 v] \\ dx_4 &= h \cdot [A_2(x_i + dx_3) + B_2 v] \end{aligned} \quad (13)$$

值得指出的是,式(13)中的 4 个 A_2 和 4 个 B_2 是变化的,每一次计算时刻都要重新计算一次 A_2 、 B_2 . 这样,一旦状态向量的初值给定,以此为起点一步一步向前计算即得整个暂态过程的状态向量,从而过程任意时刻的各物理量可根据该时刻的状态向量来计算.

4 仿真试验

根据上述数值算法,用 Fortran 编程语言编写仿真程序,并对某 360MW 汽轮发电机准同期并列这样的突加负载暂态过程进行仿真试验. 根据电机参数的定义^[5],由该发电机参数手册,可得所需的参数(标么值): $X_d = 1.8464$, $X_q = 1.5105$, $X_f = 1.9847$, $X_d' = 1.9996$, $X_q' = 1.5568$, $X_{af} = 1.7434$, $X_{ad} = 1.7434$, $X_{qd} = 1.7434$, $X_{aq} = 1.4075$, $r_a = 0.0026$, $r_f = 0.0014$, $r_d = 0.0373$, $r_q = 0.0619$, $J = 1570.811$;在准同期并列时,控制变量为: $U_m = 1.0$, $u_f = 0.0017$, $T_m = 0.875$, $T_0 = 0.020$;状态变量初值为: $-i_d = 0$, $i_f = 1.251$, $i_D = 0$, $i_q = 0$, $i_Q = 0$, $\omega_r = 1.0$, $\delta = 0$;时间步长取 0.0003 s,即 $h = 0.0003 \cdot \omega_b = 0.09425$,仿真时间为 10 s,即 $ti > 10 \cdot \omega_b = 3141.52654$ 时仿真结束. 仿真结果如表 1 和图 1、图 2、图 3、图 4、图 5 所示. 表 1 给出了仿真数据的前 3 步和后 3 步数据,图 1 - 图 5 是根据仿真数据绘出的主要物理量暂态特性图.

表 1 前 3 步和后 3 步仿真数据(注:时间为实值)

$t(s)$	i_d	i_f	i_q	ω_r	δ	i_A	T_e
0	0	1.251	0	1	0	0	0
0.0003	0.02388	1.262491	0.46215	1.00002	1.5E-06	-0.0197	1.008171
0.0006	0.09515	1.296899	0.91058	0.99998	2.1E-06	-0.0772	1.987985
0.0009	0.2129	1.35392	1.34152	0.99989	-4E-06	-0.1698	2.933118
...
9.9996	0.75708	1.218256	0.45731	1.00000	0.75972	0.83326	0.855013
9.9999	0.75708	1.218255	0.45731	1.00000	0.75972	0.85747	0.855013
10.0002	0.75708	1.218255	0.45731	1.00000	0.75972	0.87408	0.855013

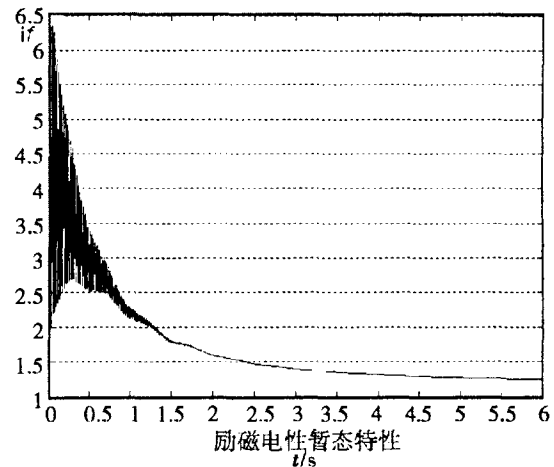


图 1 励磁电流暂态特性

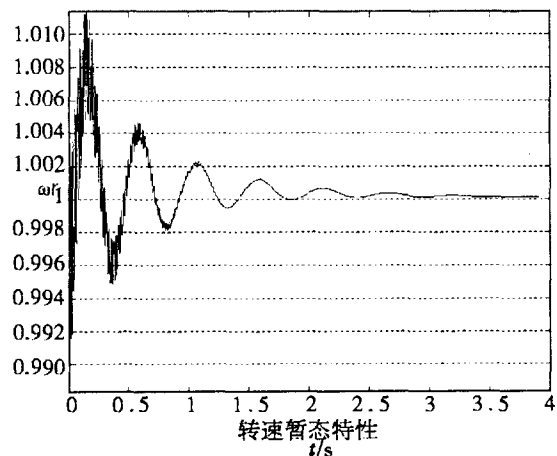


图 2 转速暂态特性

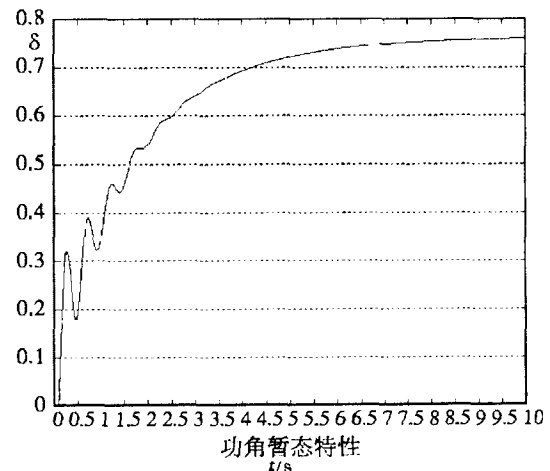


图 3 功角暂态特性

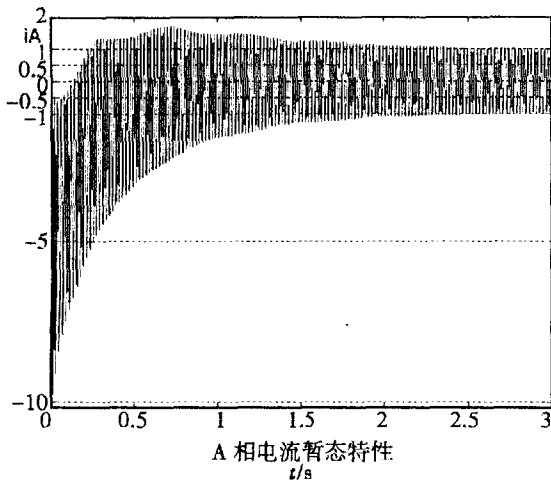


图4 定子电流暂态特性

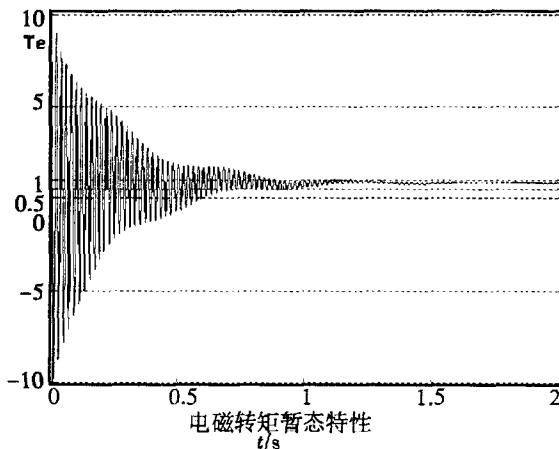


图5 电磁转矩暂态特性

5 结论

由仿真结果可以看出,在暂态的最初时段(约1 s

内),各个物理量发生较大变动,特别是电磁转矩和定子电流,说明开始时段定子有非常大的冲击电流;此后逐渐趋于稳定,其中电磁转矩和定子电流最容易达到稳定(2 s左右),而功角的暂态过程最长(8 s左右),仿真结果表明其与实际情况非常接近。

与文献[3-4]介绍的频域方法相比,本方法是基于时域的,可直接得出数值解法的差分形式,适合于发电机的计算机仿真;与五阶、三阶、二阶等实用模型^[6-7]相比,文中的状态方程直接根据 Park 方程得出,全部考虑了发电机定子绕组和转子绕组的暂态过程,其仿真结果更精确,但该方法不像实用模型那样能直接采用电机参数,需要转换。综上所述,文中的方法可应用于高精度要求的火电厂实时培训仿真机的发电机组建模和仿真上。

参考文献:

- [1] 汤蕴缪,张奕黄,范瑜. 交流电机动态分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [2] MOHAMED L A. Modeling of Synchronous Machines for System Studies[M]. Ottawa: National Library of Canada,2000.
- [3] 黄家裕. 电力系统动态分析中派克方程基本形式的应用[J]. 上海交通大学学报,1993,27(2):1-7.
- [4] 王能超. 数值分析简明教程[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2003.
- [5] 陈亚民. 同步发电机电磁参数转换[J]. 电力系统及其自动化学报,1999,11(3):86-90.
- [6] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [7] 陈亚民. 同步发电机电磁暂态过程的实用方程[J]. 电力系统及其自动化学报,1995,7(3):18-25.

Transient Simulation of Steam-turbine Generator Based on Time-domain

MENG Ze-sen, HE Zu-wei, YANG Chen

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: For achieving the high-fidelity simulation of steam-turbine generator on the real-time simulator of coal fired plant, the paper establishes a group of state equations based on Park's equation, which can accurately describe its transient process. Then a kind of time-saved numerical solution in terms of four-order Runge-Kutta method is proposed through the modified processing to the time-dependent system matrix A and control matrix B. Finally a program is coded to simulate the emergency load process of one 360MW steam-turbine generator, the result indicates that the method of this paper can exactly apply on the generator model of real-time simulator.

Key words: park's equation; transient process; state equation; four-order runge-kutta method; emergency load

(编辑 陈移峰)