抽水蓄能电动发电机启动过程数字仿真

田立军　陆于平　陈　珩
（东南大学电气工程系　210096　南京）

摘　要　针对静止变频器启动的抽水蓄能电动发电机，用数值方法对其启动过程进行了数字仿真，获得了启动过程主要物理量的变化规律，特别是电流、电压波形及频率变化曲线，并对电流、电压波形进行了频谱分析。为进一步开发、研究抽水蓄能机组微机保护算法提供了依据。

关键词　抽水蓄能机组　静止变频器　数字仿真　微机保护

0　引言

抽水蓄能电站对电网的调峰填谷作用和由此产生的巨大社会经济效益，已被越来越多的国家所重视。在我国潘家口水电站（3×90 MW）、广州抽水蓄能电站（4×200 MW）、十三陵水电站（4×200 MW）、天荒坪水电站（6×300 MW）已先后建成或正在建设抽水蓄能机组，越来越多的抽水蓄能电站正在设计和筹建[1]。

抽水蓄能机组电气运行的主要特点是启停频繁，工况转换迅速；除了发电工况外，还有电动机运行工况。继电保护的配置除了考虑发电电动工况的保护外，还要对启动、停机过程进行保护。由于微机保护的高性能和高精度，使得抽水蓄能机组已在电力系统中获得了广泛的应用，但对抽水蓄能机组用数字化方式处理机组从水泵启动到水轮机甩负荷这一大范围频率变化区内的交流输入量，却是新的研究课题。

目前新建的大型机组以采用静止变频器启动为主，背靠背启动方式为备用。本文着眼于抽水蓄能机组微机保护的开发研究，对广泛采用的变频器启动过程进行了数字仿真，获得了启动过程电动发电机各主要物理量的变化规律，其中特别是非正弦电流、电压波形及频率变化的曲线将为进一步研究保护算法提供依据。

1　静止变频器启动原理

变频器启动接线如图 1 所示[2]，机组启动过程大致如下：被启动机组加上空载额定电压的励磁，经开关 CB2 与变频器连接，然后投入变频器电源侧开关 CB1，变频器向定子绕组输入频率逐渐上升的三相交流电，定子三相电流所产生的旋转磁场与已励磁的转子相互作用产生加速力矩，使机组逐渐升速，待升速至额定值且满足同期条件时，经 CB3 将机组并网，同时切除变频器。

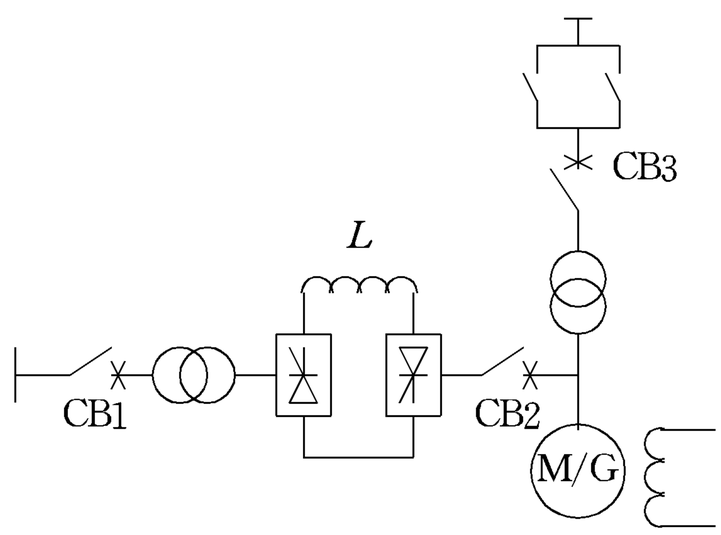

图1　主电路图
Fig. 1　Main circuit diagram

在转速从零到 10％额定转速阶段，机端电压太低，不足以使逆变器换流，此时逆变器通过其控制回路工作在强迫换流状态，整流器输出间隙脉冲电流。当转速升至 10％额定转速时，定子绕组感应电势足以供给逆变器实现负载换流，此阶段为自然换流阶段，整流器输出电流经平波电抗器的作用，可看作恒定直流（I_d）。

2　变频启动过程的数学模型

为方便计算，由逆变器供电的同步电动机数学模型可直接采用 a,b,c 坐标系统[3]，也可采用 $d,q,0$ 坐标系统。带阻尼绕组的可逆式电动发电机在电动机工况运行时，按电动机惯例，其 $d,q,0$ 坐标系统电压方程式为：

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d & 0 & x_{ad} & x_{ad} & 0 \\ 0 & x_q & 0 & 0 & x_{aq} \\ x_{ad} & 0 & x_f & x_{ad} & 0 \\ x_{ad} & 0 & x_{ad} & x_D & 0 \\ 0 & x_{aq} & 0 & 0 & x_Q \end{bmatrix} \mathrm{p} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} +$$

1996－07－19 收稿，1996－09－26 改回。

$$\begin{bmatrix} r & -\omega x_q & 0 & 0 & -\omega x_{aq} \\ \omega x_d & r & \omega x_{ad} & \omega x_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & i_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中 r 为定子绕组电阻；x_d，x_q 为直轴、交轴同步电抗；r_f，r_D，r_Q，x_f，x_D，x_Q 分别为励磁绕组、直轴和交轴阻尼绕组的电阻和电抗；x_{ad}，x_{aq} 分别为直轴和交轴电枢反应电抗。

转子运动方程：

$$2H\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = T_\mathrm{e} - T_\mathrm{L} \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \omega \qquad \theta = \omega t + \theta_0 \tag{3}$$

式中 H 为机组惯性时间常数；θ_0 为转子初始角。

电磁转矩：

$$T_\mathrm{e} = i_q \Psi_d - i_d \Psi_q = (x_d - x_q) i_d i_q + x_{ad}(i_f + i_D) i_q - x_{aq} i_d i_Q \tag{4}$$

阻力矩：

$$T_\mathrm{L} = k\omega^2 \tag{5}$$

忽略摩擦力矩，T_L 可视为与转速的平方成正比。由于水泵工况启动一般为脱水启动，即为减少启动阻力矩，向转轮室压入压缩空气，使转轮脱离水面，从而使机组在额定转速时的阻力从机组额定转矩的30%左右降到1%～5%。

图1中的逆变器实际是一电流型逆变器。在启动过程中定子绕组电流和转子电压是已知量，未知量则是转子电流、定子端电压和转速 ω。定子端电压可由转子电流、转速 ω 直接求得。故式(1)、式(2)可化为如下状态方程形式：

$$\dot{\boldsymbol{I}} = -\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{R}\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_s + \boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{U}_r \tag{6}$$

其中

$$\boldsymbol{I} = [i_f,\ i_D,\ i_Q,\ \omega]^\mathrm{T}$$

$$\boldsymbol{I}_s = [\mathrm{p}i_d,\ \mathrm{p}i_q,\ 0,\ 0]^\mathrm{T}$$

$$\boldsymbol{U}_r = [U_f,\ 0,\ 0,\ T_\mathrm{L}']^\mathrm{T}$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} x_f & x_{ad} & 0 & 0 \\ x_{ad} & x_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_Q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_Q & 0 \\ \dfrac{x_{ad} i_q}{2H} & \dfrac{x_{ad} i_q}{2H} & -\dfrac{x_{aq} i_d}{2H} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} x_{ad} & 0 & 0 & 0 \\ x_{ad} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_{aq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中 $T_\mathrm{L}' = \dfrac{T_\mathrm{L} - (x_d - x_q) i_d i_q}{2H}$

定子端电压：

$$u_\mathrm{A} = u_d \cos\theta - u_q \sin\theta$$

$$u_\mathrm{B} = u_d \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) - u_q \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) \tag{7}$$

$$u_\mathrm{C} = u_d \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) - u_q \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi)$$

其中

$$\begin{aligned} u_d &= x_d \mathrm{p}i_d + x_{ad}\mathrm{p}i_f + x_{ad}\mathrm{p}i_D + r i_d - \omega x_q i_q - \omega x_{aq} i_Q \\ u_q &= x_q \mathrm{p}i_q + x_{aq}\mathrm{p}i_Q + \omega x_d i_d + r i_q + \omega x_{ad} i_f + \omega x_{ad} i_D \\ \theta &= \omega t + \theta_0 \end{aligned} \tag{8}$$

3 变频启动过程仿真计算

3.1 已知量及初始值计算

假设换流超前角为 γ，则换流重叠角[4]：

$$\mu = \gamma - \arccos\left(\cos\gamma + \frac{2\omega L_c I_d}{\sqrt{6}U}\right) \tag{9}$$

式中 I_d 为整流器输出直流电流；U 为相电压有效值；换相电感 L_c 近似取电机的负序电感，即：

$$L_c = \frac{1}{2}(L_d'' + L_q'')$$

设

$$I_K = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{\sqrt{2}U}{\omega L_c}$$

在自然换流阶段，电机定子绕组三相电流如图2所示；换流段如图2 0～μ 段所示；三相电流为：

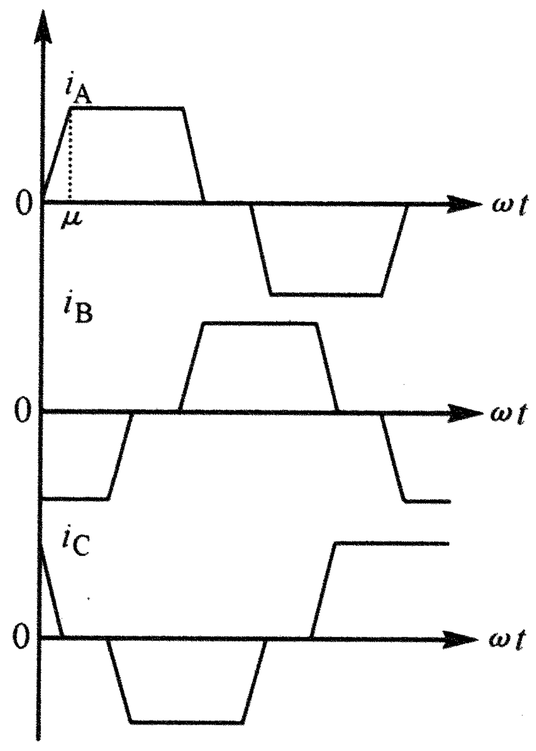

图2 定子三相电流

Fig. 2 Three-phase stator current

$$
\begin{aligned}
i_{\mathrm{A}} &= I_K(\cos\ \omega t - \cos\ \gamma)\\
i_{\mathrm{B}} &= -\ I_d\\
i_{\mathrm{C}} &= I_d - I_K(\cos\ \omega t - \cos\ \gamma)
\end{aligned}
\tag{10}
$$

其它时刻电流可类似求得。

于是在整个启动过程中：

$$
\begin{aligned}
i_d &= \frac{2}{3}\left[i_{\mathrm{A}}\cos\theta + i_{\mathrm{B}}\cos\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right) + i_{\mathrm{C}}\cos\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right)\right]\\
i_q &= -\frac{2}{3}\left[i_{\mathrm{A}}\sin\theta + i_{\mathrm{B}}\sin\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right) + i_{\mathrm{C}}\sin\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right)\right]
\end{aligned}
\tag{11}
$$

$$
\begin{aligned}
\mathrm{p}i_d &= -\frac{2}{3}\omega\left[i_{\mathrm{A}}\sin\theta + \sin\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right) + i_{\mathrm{C}}\sin\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right)\right] +\\
&\quad \frac{2}{3}\left[\mathrm{p}i_{\mathrm{A}}\cos\theta + \mathrm{p}i_{\mathrm{B}}\cos\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right) + \mathrm{p}i_{\mathrm{C}}\cos\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right)\right]\\
\mathrm{p}i_q &= -\frac{2}{3}\omega\left[i_{\mathrm{A}}\cos\theta + i_{\mathrm{B}}\cos\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right) + i_{\mathrm{C}}\cos\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right)\right] -\\
&\quad \frac{2}{3}\left[\mathrm{p}i_{\mathrm{A}}\sin\theta + \mathrm{p}i_{\mathrm{B}}\sin\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right) + \mathrm{p}i_{\mathrm{C}}\sin\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right)\right]
\end{aligned}
\tag{12}
$$

设计算初始时刻电流波形如图 2 所示。初始值（标幺值）$i_D = i_Q = 0; i_f = 1.0; u_f = r_f i_f; \omega = 0.2$，即转速为 20% 额定转速（$f = 10$ Hz）；$\gamma = \pi/3$；μ 保持不变，即 I_K 保持不变。

因为逆变桥上每个晶闸管导通时间为 $2\pi/3$ 电角度，每隔 $\pi/3$ 电角度换相一次，$\omega t = \mu$ 时，A，B 相开始导通，当超前角 $\gamma = \pi/3$ 时，C 相绕组感应电动势为正最大值，转子位置如图 3 所示。

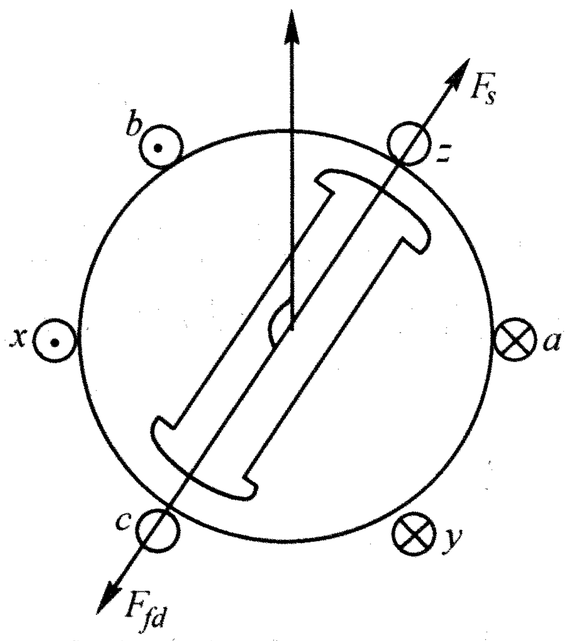

图 3　转子初始位置

Fig. 3　Initial placement of rotor

这时，励磁基波磁通势 F_{fd} 位于 $5\pi/6$ 空间电角度处，与步进式移动的电枢基波磁通势 F_s（$F_s = F_{\mathrm{A}} + F_{\mathrm{B}}$，即 A，B 相电流产生的基波磁通势的合成）相差 π 电角度。$\omega t = 0$ 时，转子位置初始角 $\theta_0 = 5\pi/6 - \mu$。

3.2　抽水蓄能电动发电机主要参数

电抗（标幺值）：

$x_d = 1.001$；$x_q = 0.772\ 9$；$x_\sigma = 0.183$；

$x_d' = 0.315$；$x_q'' = 0.266$；$x_d'' = 0.233$。

时间常数：

$T_d' = 1.51$ s；$T_{d0}'' = 0.059$ s；

$T_Q = 0.199$ s；$T_a = 0.121$ s；$H = 3$ s。

其中 $T_{d0}'' = \dfrac{x_D - \dfrac{x_{ad}^2}{x_f}}{r_D}$ 是定子开路时的直轴次暂态时间常数；$T_Q = \dfrac{x_Q}{r_Q}$ 是定子开路时的交轴阻尼绕组时间常数。

3.3　仿真计算步骤

式(6)状态方程的求解采用四阶龙格-库塔法。频率较大时宜取较小步长，否则换流过程电流波形无法准确表示。仿真计算时，由于起始频率为 10 Hz，取步长 0.05 ms。图 4 给出了仿真计算流程图。

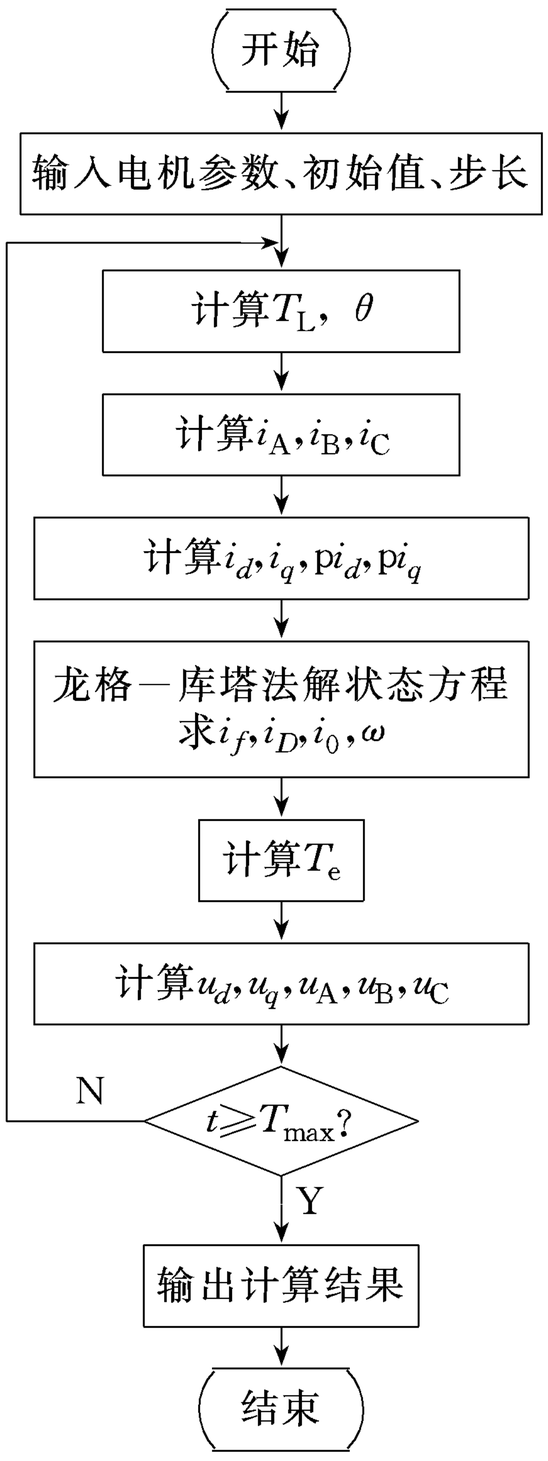

图4　数字仿真流程图

Fig. 4　Flowchart of digital simulation

3.4　仿真计算结果

仿真计算结果如图 5 所示。图 5(a)为 A 相电流波形；图 5(b)，(c)为 A 相电压波形；图 5(d)为励磁电流波形；图 5(e)，(f)为电磁转矩曲线；图 5(g)，(h)为转速(频率)上升曲线。其中图 5(c)，(f)，(h)为不计阻尼绕组作用时的仿真计算结果。阻尼绕组在电机正常运行时，能够提高暂态稳定性，抑制负荷突变引起的转子振荡。在变频启动过程中，通过仿真计算，可见阻尼绕组能削弱电压波形中的高次谐波，使电磁转矩变化平稳，转速稳定上升，改善电机的启动性能。

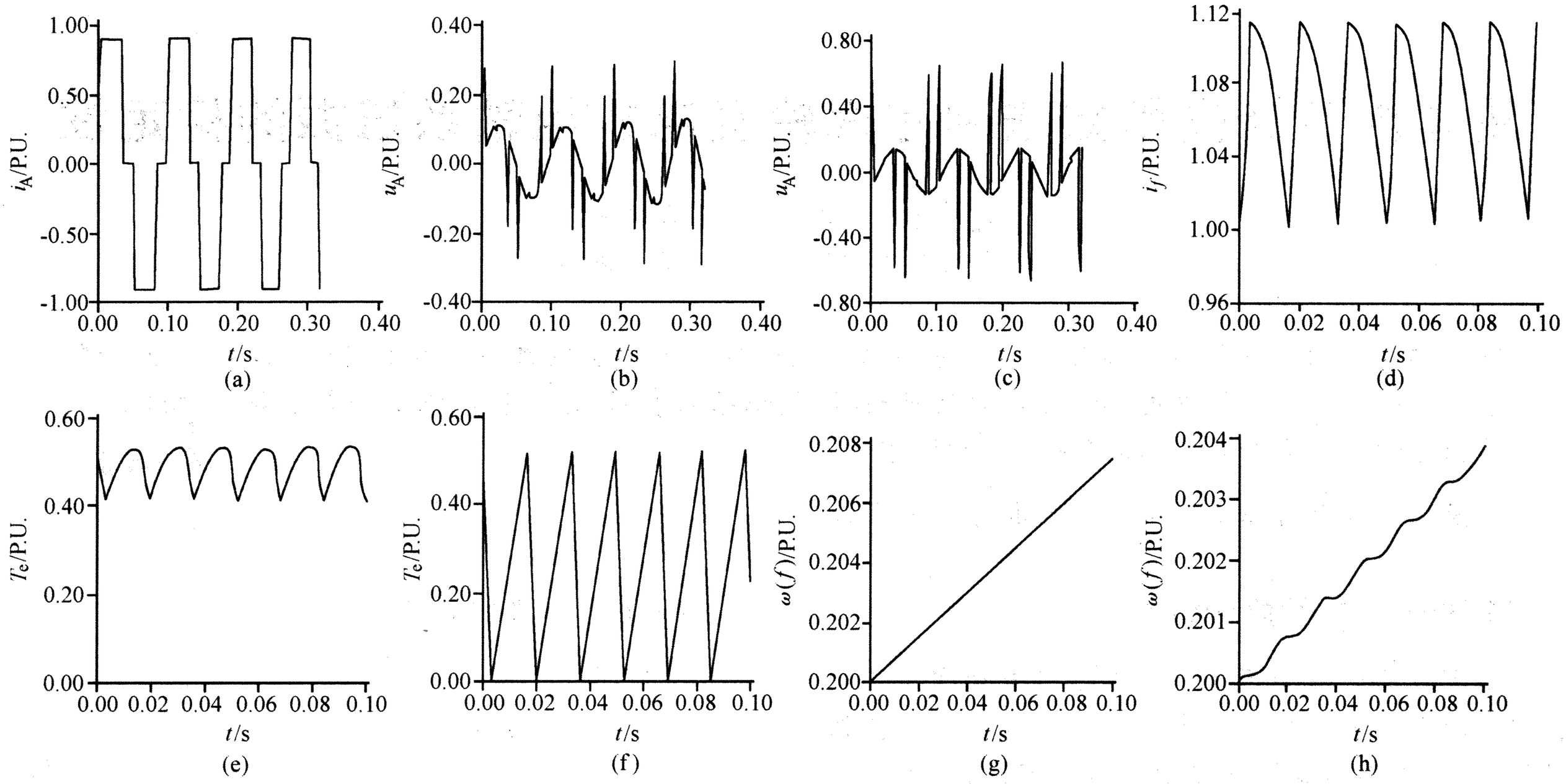

图 5 启动过程仿真结果

Fig. 5 Simulation results of the starting process

对仿真所得电流、电压波形进行频谱分析，结果如图 6 所示。其中，图 6(a)给出了相电流幅频特性曲线；图 6(b)给出了相电压幅频特性曲线。从图中可见，启动过程中电流、电压除 10 Hz 基波外，还含有大量 5，7，11，13…次谐波，即 $6k \pm 1$ 次谐波。如忽略换流重叠角，电流波形为纯矩形波；再将时间坐标原点取为如图 7 所示，则可求得相电流的傅氏级数解析表达式为：

$$i_A(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\sin \omega_1 t - \frac{1}{5}\sin 5\omega_1 t - \frac{1}{7}\sin 7\omega_1 t + \frac{1}{11}\sin 11\omega_1 t + \frac{1}{13}\sin 13\omega_1 t + \cdots\right) \tag{13}$$

4 结论

(1) 抽水蓄能电动发电机水泵工况启动过程数字仿真研究表明，启动过程中电流、电压不再是纯正弦波，而是含有大量谐波成分，谐波主要是 $6k \pm 1$ 次谐波。

(2) 阻尼绕组的存在削弱了启动过程中叠加在正弦电压波形上的脉冲峰值，即高次谐波分量。

(3) 电磁转矩呈脉动规律变化，但由于阻尼绕组的作用，启动过程中转速(频率)基本上可认为是稳定上升。

(4) 抽水蓄能机组微机保护必须考虑启动过程的电流、电压波形中高次谐波分量对保护算法、频率跟踪算法产生的不利影响。本文的研究结果可直接用来对抽水蓄能机组微机保护算法进行仿真研究。

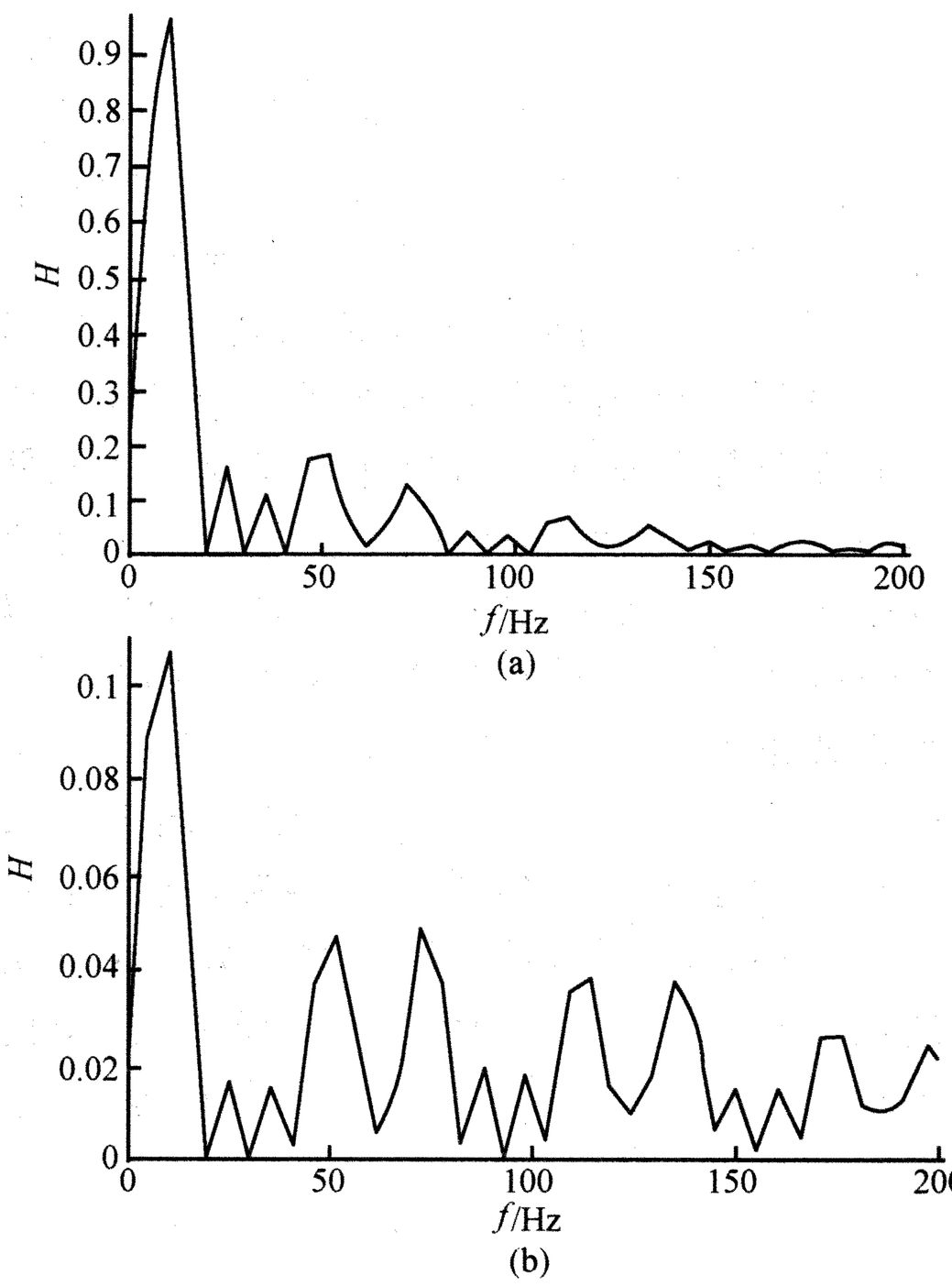

图 6 电流、电压频谱图

Fig. 6 Current and voltage spectrogram

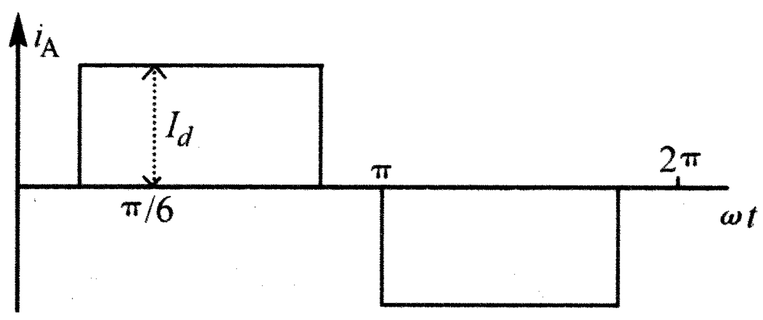

图 7 电流波形($\mu=0$)

Fig. 7 Current waveform($\mu=0$)

(上接第 41 页)

5 参考文献

1 陆佑楣,潘家铮,主编. 抽水蓄能电站. 水电出版社,1992

2 Peterson T, Frank K. Starting of Synchronous Motor Using Static Frequency Converter. IEEE Trans on PAS, 1972, 91(1): 172～179

3 Namuduri C, Sen P C. Digital Simulation of an Inverter-Fed Self-Controlled Synchronous Motor. IEEE Trans on IE, 1987, 34(2): 205～215

4 陈 坚. 交流电机数学模型及调速系统. 国防工业出版社,1989

田立军,男,1964 年生,博士研究生,讲师。

陆于平,男,1962 年生,副教授,主要从事微机继电保护、控制方面的研究。

陈 珩,男,1928 年生,教授,博士生导师,主要从事电力系统分析、电压稳定、仿真等方面的研究。

DIGITAL SIMULATION FOR STARTING PROCESS OF A PUMPED-STORAGE GENERATOR/MOTOR

Tian Lijun, Lu Yuping, Chen Heng (Southeast University, 210096, Nanjing, China)

Abstract In this paper, the starting process of a pumped-storage generator/motor which is started by a static frequency converter system is simulated. The main physical quantities during starting, especially the current and voltage waveforms and frequency curve are obtained. The frequency spectra of current and voltage waveforms are also studied. All these results provide the basis for studying and developing digital protection algorithm of pumped-storage units.

Keywords pumped-storage units static frequency converter digital simulation digital protection