泵站同步电机三相短路仿真计算

张建华，史旺旺，杨 鹏
（扬州大学工学院电气工程系）

摘 要：泵站同步电机突然三相短路传统的分析方法不仅理论复杂，且具有一定的局限性。针对这一特点，在建立同步电机数学模型的基础上，利用叠加原理对同步电机突然三相短路进行仿真计算和分析，并将仿真计算的结果与近似计算公式的计算结果进行比较。结果表明，仿真计算方法具有计算方法简单、计算精度高的特点。

关键词：三相短路，数学模型，仿真
文献标识码：A **文章编号**：1005-6254(2002)-0030-05
TM3

引 言

突然三相短路是对同步电机有严重威胁的过渡过程，分析三相短路不仅可以为同步电机的合理可靠的设计及运行提供依据，而且对与其相联的电器及继电保护设备的选择也有重要意义。但三相短路的物理过程比较复杂，无论是在定子绕组还是在励磁绕组中短路电流都存在直流分量、基波分量、二次谐波分量。三相短路电流的变化规律不仅与同步电机的参数有关，而且还与同步电机的负载、短路时的转子位置角有关。这些将导致其分析过程及结果的复杂性。笔者曾经参加有关的工程项目，发现在许多场合，对三相短路电流往往采用估算的方法。利用计算机对同步电机的三相短路进行仿真计算，不仅计算方法简单，而且计算精度高。

1 交流同步电机的数学模型

利用计算机对同步电机三相短路进行仿真时，必须建立适合于计算机仿真的同步电机的数学模型，即空间状态方程。此外，在分析同步电机突然三相短路时，可以利用叠加原理，即认为不是发生了突然短路，而是在电机的端头上突然加上了与电机突然短路前的端电压大小相等但方向相反的三相电压。这样考虑时，同步电机突然三相短路问题就变成了下述两种工作情况的综合问题了。

（1）与短路前一样的稳定运行状况；

（2）突然在电机端头加上与电机突然短路前的端电压大小相等但方向相反的三相电压。

1.1 运用派克分量表示的磁链方程和电压方程[1]

经过派克变换以后同步电机的磁链方程及电压方程用标幺值表示具有如下的形式：

$$\begin{bmatrix}\psi_d\\ \psi_q\\ \psi_0\\ \psi_f\\ \psi_D\\ \psi_Q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-x_d & 0 & 0 & x_{af} & x_{aD} & 0\\ 0 & -x_q & 0 & 0 & 0 & x_{aQ}\\ 0 & 0 & -x_0 & 0 & 0 & 0\\ -x_{af} & 0 & 0 & x_f & x_{fD} & 0\\ -x_{aD} & 0 & 0 & x_{fD} & x_D & 0\\ 0 & -x_{aQ} & 0 & 0 & 0 & x_Q\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_d\\ i_q\\ i_0\\ i_f\\ i_D\\ i_Q\end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix}u_d\\ u_q\\ u_0\\ u_f\\ 0\\ 0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & -r & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -r & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & r_f & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_d\\ i_q\\ i_0\\ i_f\\ i_D\\ i_Q\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dot{\psi}_d\\ \dot{\psi}_q\\ \dot{\psi}_0\\ \dot{\psi}_f\\ \dot{\psi}_D\\ \dot{\psi}_Q\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-\omega\psi_q\\ \omega\psi_d\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 运用派克分量表示的空间状态方程

由派克分量表示的磁链方程和电压方程消去磁链即可得到用派克分量表示的空间状态方程具有如下的形式：

第一作者简介：张建华（1960 - ），男，扬州大学工学院电气工程系，讲师，江苏省扬州市（邮编：225009）。

万方数据

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_d & 0 & 0 & x_{af} & x_{aD} & 0 \\ 0 & -x_q & 0 & 0 & 0 & x_{aQ} \\ 0 & 0 & -x_0 & 0 & 0 & 0 \\ -x_{af} & 0 & 0 & x_f & x_{fD} & 0 \\ -x_{aD} & 0 & 0 & x_{fD} & x_D & 0 \\ 0 & -x_{aQ} & 0 & 0 & 0 & x_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r & \omega x_q & 0 & 0 & 0 & -\omega x_{aQ} \\ -\omega x_d & -r & 0 & \omega x_{af} & \omega x_{aD} & 0 \\ 0 & 0 & -r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中 x_d、x_q、x_0 分别为同步电机的正、交轴同步电抗和零序电抗。

1.3 电磁转矩方程式[2]

电磁转矩方程式用派克分量表示为

$$T_{dq0} = (x_q i_q) i_d - (x_d i_d) i_q + (x_{af} i_q) i_f + (x_{aD} i_q) i_D - (x_{aQ} i_d) i_Q \tag{4}$$

1.4 同步电机的稳态运行

电机三相空载电势的瞬时值为:

$$e_a = -E_q \sin\theta_r$$

$$e_b = -E_q \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$e_c = -E_q \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right)$$

其中 θ_r 为转子d轴领先于定子坐标系轴线的电角度。

设电机端电压滞后空载电势功率角 δ,定子电流又滞后电压功率因素角 ϕ,则三相端电压和定子电流的瞬时值将分别为:

$$u_a = -u\sin(\theta_r - \delta)$$

$$u_b = -u\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} - \delta\right)$$

$$u_c = -u\sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} - \delta\right)$$

$$i_a = -i\sin(\theta_r - \delta - \varphi)$$

$$i_b = -i\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right)$$

$$i_c = -i\sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} - \varphi\right)$$

对上列三相电势、电压、电流进行派克变换后,得:

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} = E_q \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = u \begin{bmatrix} \sin\delta \\ \cos\delta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = u \begin{bmatrix} \sin(\delta+\varphi) \\ \cos(\delta+\varphi) \\ 0 \end{bmatrix}$$

在这种运行方式下,励磁绕组电流只取决于励磁电压,而励磁电压又为定值,因此励磁绕组电流也为定值直流,即:

$$i_f = u_f / r_f$$

励磁绕组和正、交轴定子绕组电流既都为定值直流电流,它们产生的磁场就都属恒定磁场,与这些绕组相对不动的正、交轴阻尼绕组中也就不会产生感生电流,即这种运行方式下运行方式下有:

$$i_D = 0$$

$$i_Q = 0$$

计及上列情况及同步运行时 $\omega = 1$ 则由方程(3)可列出稳态运行时的空间状态方程为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r & x_q & 0 \\ -x_d & -r & x_{af} \\ 0 & 0 & r_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \end{bmatrix} \tag{5}$$

2 同步电机三相短路仿真计算

2.1 仿真算法的程序实现

利用计算机对同步电机三相短路进行仿真分析时,采用叠加原理。分析有载条件下三相短路前的负载电流,再求出因短路而有的电流变化量,最后将两者叠加,得有载短路全电流。因此,应首先确定短路前电机端电压和定子绕组电流的正、交轴分量。而为此,可先由短路前电机端电压 $u_{[0]}$、定子绕组电流 $i_{[0]}$ 以及短路前的功率因素角 $\varphi_{[0]}$,求得短路前的功率角

$$\delta_0 = \tan^{-1}\frac{u_{[0]}\sin\varphi_{[0]} + x_q i_{[0]}}{u_{[0]}\cos\varphi_{[0]} + r i_{[0]}} - \varphi_{[0]} \tag{6}$$

从而根据同步电机稳态运行时的方程式

万方数据

(5)求得，$u_{[0]}$ 、$i_{[0]}$ 的正、交轴分量

$$\begin{aligned} u_{d[0]} &= u_{[0]}\sin\delta_0 \\ u_{q[0]} &= u_{[0]}\cos\delta_0 \\ i_{d[0]} &= i_{[0]}\sin(\delta_0+\varphi_{[0]}) \\ i_{q[0]} &= i_{[0]}\cos(\delta_0+\varphi_{[0]}) \end{aligned} \tag{7}$$

还应当确定短路前的励磁电流，而为此，可先由已求得的$u_{q[0]}$ 、$i_{d[0]}$、$i_{q[0]}$ ，求得短路前的空载电势：

$$E_{q[0]} = u_{q[0]} + ri_{q[0]} + x_{d[0]} \tag{8}$$

从而励磁电流：

$$i_{f[0]} = E_{q[0]} / x_{af} \tag{9}$$

然后，可进行因突然短路而出现的各绕组电流变化量 Δi_d、Δi_q、Δi_f、Δi_D、Δi_Q 的计算。显然，由方程式(3)可知，这时各变化量之间的关系应满足如下方程式：

$$\begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \\ \Delta u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_d & 0 & x_{af} & x_{aD} & 0 \\ 0 & -x_q & 0 & 0 & x_{aQ} \\ -x_{af} & 0 & x_f & x_{fD} & 0 \\ -x_{aD} & 0 & x_{fD} & x_D & 0 \\ 0 & -x_{aQ} & 0 & 0 & x_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \\ \Delta i_f \\ \Delta i_D \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r & x_q & 0 & 0 & -x_{aQ} \\ -x_d & -r & x_{af} & x_{aD} & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \\ \Delta i_f \\ \Delta i_D \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} \tag{10}$$

建立上式时，设电机保持同步速不变，并删去了计算三相短路时多余的零轴分量之间的关系式。上式可简写为：

$$\Delta u_{dq0} = X^{(3)}_{dq0}\Delta i_{dq0} + Z^{(3)}_{dq0}\Delta i_{dq0}$$

在励磁电压不可调整的前提下，以Δu_{dq0}及短路后最初瞬间的电流变化量Δi_{dq0}代入，就可开始解算。解得各绕组电流变化量为Δi_{dq0}，然后，将其与短路前各绕组电流$i_{dq0[0]}$叠加，就可得短路时各绕组电流全量 i_{dq0} ：

$$\Delta u_{dq0} = \begin{bmatrix} -u_{d[0]} & -u_{q[0]} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\Delta i_{dq0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\Delta i_{dq0} = \begin{bmatrix} \Delta i_d & \Delta i_q & \Delta i_f & \Delta i_D & \Delta i_Q \end{bmatrix}^T$$

$$i_{dq0[0]} = \begin{bmatrix} i_{d[0]} & i_{q[0]} & i_{f[0]} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$i_{dq0} = \begin{bmatrix} i_d & i_q & i_f & i_D & i_Q \end{bmatrix}^T$$

对其中的 i_d、i_q 进行派克逆变换，即可得定子三相绕组电流，以 a 相为例

$$i_a = i_d\cos(t+\theta_0) - i_q\sin(t+\theta_0)$$

由方程式(4)可求得短路时的电磁转矩 T。

同步电机三相短路进行仿真分析，实际上是解一个常微分方程组的初值问题。这类问题的数值计算方法很多，本文采用较精确的方法四价龙格——库塔法。

根据上述原理，可画出同步电机的三相短路仿真程序原理框图如图 1 所示。

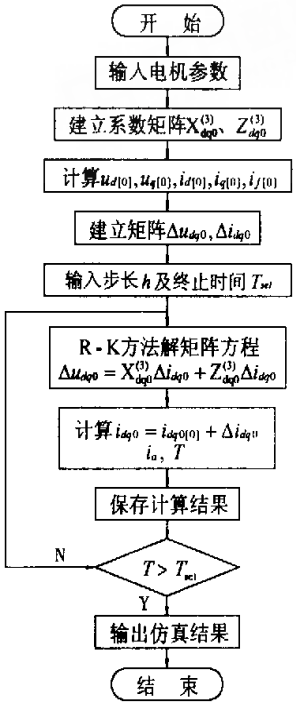


图 1 仿真程序框图

2.2 仿真实例

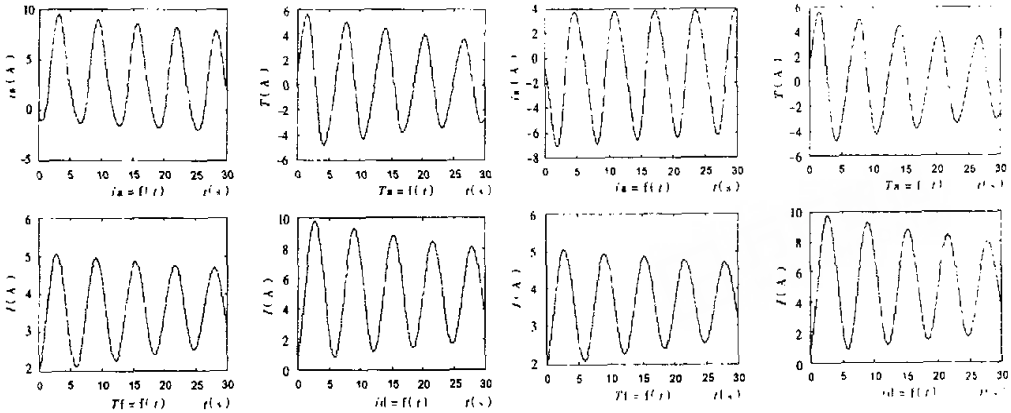
笔者对多台不同容量及参数的同步电机进行仿真计算，其短路电流的变化规律相似。限于篇幅本文仅以一台同步电机为例，对在满载条件下，转子位置角处于不同角度时的三相短路进行仿真。其同步电机的参数(标幺值)如下所示。

r = 0.000656; r_f = 0.00151; r_D = 0.00159; r_Q = 0.00159; x_d =1.0; x_q = 0.60; x_f = 1.03; x_D = 0.95; x_Q = 0. 70; x_{af} = 0.85; x_{aD} = 0.85; x_{fD} = 0.85; x_{aQ} = 0.45

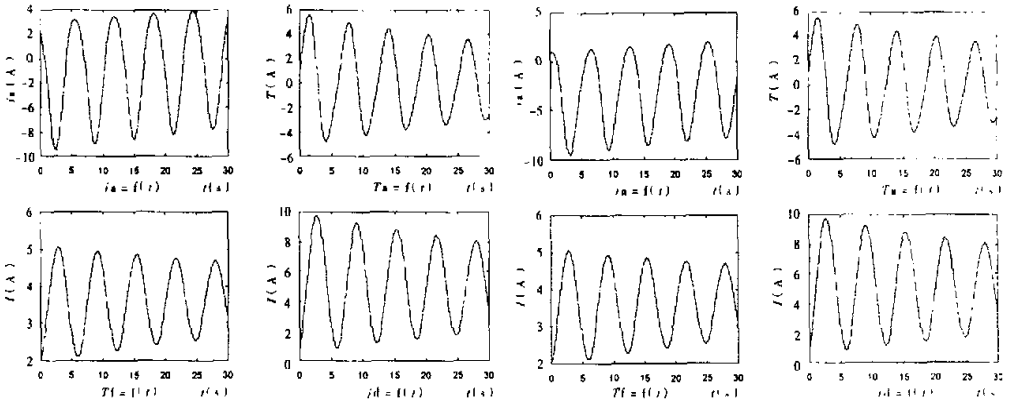
其仿真结果如图 2 。由图 1 可知：短路时定子电流的正轴分量、转子励磁电流及电磁转矩的变化规律与短路时转子位置角无关，而定子电流

万方数据

及定子电流的正轴分量的变化规律与短路时转子位置角有关。当时转子位置角 π 为时短路，差不多经过半个周期的时间后，定子电流达到最大值，其最大值接近十倍的额定电流。



（$u_{[0]}=1$、$\theta_0=\pi$）　　（$u_{[0]}=1$、$\theta_0=\pi/2$）



（$u_{[0]}=1$，$\theta_0=\pi/4$）　　（$u_{[0]}=1$，$\theta_0=0$）

图2 突然三相短路曲线的仿真

2.3 两种计算结果的比较

有关同步电机突然三相短路的理论分析中，求解短路电流的变化规律，不仅要导致复杂的数学结果，而且也不易看出电机各参数的主要影响及其物理本质。此外在采用近似的方法来求解其电流变化的情况。即在忽略定、转子电阻的情况下，首先求出电流的起始值及稳态值，其次，求出所需电流衰减的时间常数，最后，再根据这些结果求出电流随时间而变化的公式。虽然在一般电机参数值的条件下，用这样的近似方法求得的结果，在工程上，是足够准确的。但在电阻较大的情况下，误差较大。为了将两种计算结果进行比较，下面给出电流随时间而变化的近似计算公式[2]。

根据同步电机突然三相短路的电磁理论，可得突然三相短路的电流为：

$$
\begin{aligned}
i_a = {} & u_{q[0]}\left(\frac{1}{x_d'}-\frac{1}{x_d''}\right)e^{-\frac{t}{T_d'}}\cos(t+\theta_0)+\\
& u_{d[0]}\left(\frac{1}{x_q''}-\frac{1}{x_q}\right)e^{-\frac{t}{T_q''}}\sin(t+\theta_0)+\\
& u_{0[0]}\left(\frac{1}{x_d'}-\frac{1}{x_d}\right)e^{-\frac{t}{T_d'}}\cos(t+\theta_0)+\\
& \frac{E_{q[0]}}{x_d}\cos(t+\theta_0)-\\
& \frac{u_{[0]}(x_d''+x_q'')}{2x_d''x_q''}e^{-\frac{t}{T_a}}\cos(\theta_0-\delta_0)+\\
& \frac{u_{[0]}(x_d''-x_q'')}{2x_d''x_q''}e^{-\frac{t}{T_a}}\cos(2t+\theta_0+\delta_0)
\end{aligned}
$$

$$
i_q = -u_{d[0]}\left(\frac{1}{x_q''}-\frac{1}{x_q}\right)e^{-\frac{t}{T_q''}}+\frac{u_{[0]}}{x_q''}e^{-\frac{t}{T_a}}\sin(t+\delta_0)
$$

万方数据

$$i_d = u_{q[0]}\left[\left(\frac{1}{x_d'}-\frac{1}{x_d}\right)e^{-\frac{t}{T_d'}}+\left(\frac{1}{x_d''}-\frac{1}{x_d'}\right)e^{-\frac{t}{T_d''}}\right]$$
$$+\frac{E_{q[0]}}{x_d}-\frac{u_{[0]}}{x_d''}e^{-\frac{t}{T_a}}\cos(t+\delta_0)$$

式中x_d'、x_q'、x_d''、x_q''分别为正、交轴暂态电抗及次暂态电抗。

T_d'、T_q'、T_d''、T_q''分别为正、交轴暂态时间常数及次暂态时间常数。

T_a为定子绕组时间常数。

由电机参数可计算得：$x_d'=0.2985$；$x_q'=0.6$；$x_d''=0.20975$；$x_q''=0.3107$；$T_d'=513.93$；$T_q''=0$；$T_d''=115.65$；$T_q''=227.99$；$T_a=50.09$

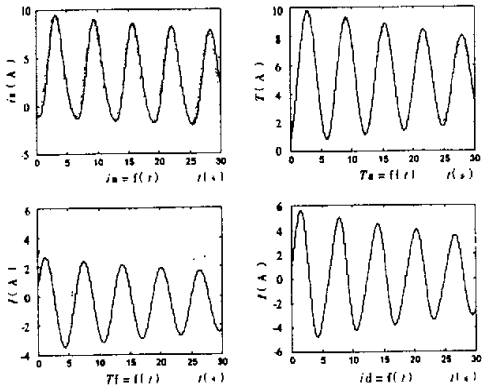


图3 三相短路曲线的比较（$u_{[0]}=1$，$\theta_0=\pi$）

图3为在满载条件下，短路时的转子位置角为π时两种计算方法的计算结果。图中实线为仿真计算的结果，虚线为用上述近似计算公式的计算结果。

由两种计算结果比较可知：定子电阻对定子电流正轴分量的影响不明显；对定子电流交轴分量的影响却很明显，但对定子电流的影响仍不明显。这是因为不十分大的电阻对阻抗的模的影响毕竟不大。但当定子绕组或定子回路电阻较大时，以致必需计及定子电阻对定子电流的影响时，用近似计算公式来计算定子电流，必将产生较大的误差。

3 结 语

本文运用仿真方法对同步电机三相短路进行分析。通过分析比较，说明了利用计算机对同步电机三相短路进行仿真分析，虽有物理概念不够精晰的缺点，却往往有简单、精确、灵活等独特优点。尤其是在只要求获得精确数值计算结果的场合，它的优越性更加明显。

参考文献

1 高景德，王祥珩，李发海. 交流电机及其系统的分析. 北京：清华出版社，1993,93~95

2 贺益康，交流电机的计算机仿真，北京：科学出版社，1990

Simulating Computation of Pumping Station's Synchronous Machines of Three-phase Short-circuit

ZHANG Jian-hua, SHI Wang-wang, YANG Peng

(Dept. of Electrical Engineering, Yangzhou Univ.)

Abstract: Three-phase short-circuit of pumping station of synchronous machines have serious influence toward the machines and electric power systems. In designing of the systems, Protect of short-circuit must according to design of electric current. Analytic means of theory not only complex but also confined. A mathematical model of three phase synchronous machines is developed in this paper. Based on this model, three-phase short-circuit of synchronous machines are emulated and computed .Two kinds of method of calculation are compared. Emulation have characteristic of briefness and higher precision.

Key words: three-phase short-circuit; mathematical model; emulation

万方数据