

泵站同步电动机电容补偿起动过程的仿真分析*

史旺旺 杨鹏 吴桂峰

(扬州大学工学院电气工程系)

摘要 该文建立了同步电动机在端部并联电容起动的混合数学模型,利用此模型对泵站同步电动机电容补偿起动过程的电流、端电压、转速、转矩、励磁电流等进行了仿真,并与无电容补偿的起动过程等进行比较。仿真的结果表明,选择合适的电容对改善电压质量、加速起动速度是有帮助的。文章提出的混合数学模型,在电机端部网络变化时,不必改变电机的状态方程。

关键词 同步电动机 电容 起动 数字仿真

1 引言

同步电动机在大容量场合(如大型泵站中)应用很广泛,但同步电动机不能自起动,通常采用异步起动方式,异步起动的主要缺点是起动电流大、起动功率因素低。文献[1]对考虑线路阻抗的同步电动机的异步起动的起动参数进行了仿真,表明起动过程引起电机端电压的严重下降,对起动十分不利。文献[2]对异步电机的起动提出采用电容补偿,并取得了很好的补偿效果。

为补偿端电压的下降,本文提出在同步电机起动过程中也采用电容补偿,并建立了同步电机在端部并联电容的起动混合坐标系数学模型。利用此模型对泵站同步电机电容补偿起动过程的电流、端电压、功率、励磁电流等进行了仿真,并与无电容补偿的起动过程进行比较。仿真结果表明,电容补偿了电源电压,减少了起动时间,但选择合适的电容很重要,电容过大的过补偿会产生过电压。

2 仿真模型的建立

考虑线路阻抗和并联电容同步电动机的主接线图见图1。

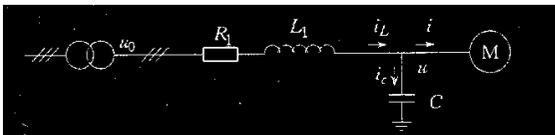


图1 同步电动机的接线图

当考虑电容并联后,求解起动过程应将定子

端状态方程和电机状态方程联立求解。同步电动机在转子速坐标 $d-q$ 系统中的电压方程的表观值形式为^[1]:

$$\begin{bmatrix} u_{qs} \\ u_{ds} \\ 0 \\ 0 \\ u_{fr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{qr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{dr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{fr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega_r X_{ds} & 0 & \omega_r X_{md} & \omega_r X_{md} \\ -\omega_r X_{qs} & 0 & -\omega_r X_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{fr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{qs} & 0 & X_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & X_{ds} & 0 & X_{md} & X_{md} \\ X_{mq} & 0 & X_{qr} & 0 & 0 \\ 0 & X_{md} & 0 & X_{dr} & X_{md} \\ 0 & X_{md} & 0 & X_{md} & X_{fr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p i_{qs} \\ p i_{ds} \\ p i_{qr} \\ p i_{dr} \\ p i_{fr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 i_{qs} 、 i_{ds} 为 $d-q$ 系统中定子电流, i_{qr} 、 i_{dr} 、 i_{fr} 为 $d-q$ 系统中转子 q 轴电流、 d 电流和励磁绕组电流, X_{qs} 、 X_{ds} 为 q 、 d 轴定子自感阻抗, X_{qr} 、 X_{dr} 为 q 、 d 轴转子自感阻抗, X_{mq} 、 X_{md} 为 q 、 d 轴激磁阻抗, r_s 为定子电阻, r_{qr} 、 r_{dr} 、 r_{fr} 分别为转子 q 轴、 d 轴及励磁绕组电阻折算值, ω_r 为转子角速度, $p = \frac{d}{dt}$

定子磁链方程为

$$\Psi_{qs} = L_{qs} i_{qs} + L_{mq} i_{qr} \quad (2)$$

$$\Psi_{ds} = L_{ds} i_{ds} + L_{md} (i_{dr} + i_{fr}) \quad (3)$$

* 本论文得到扬州大学科研基金的资助。

转矩

$$T_e = \Psi_{ds}i_{qs} - \Psi_{qs}i_{ds} \tag{4}$$

转子运动方程式

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_l \tag{5}$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \tag{6}$$

其中, T_l 为负载转矩。

由于定子端状态方程和电机状态方程分别为静止 abc 坐标系统和转子 dq 坐标系统, 必须转换成相同的坐标系统, 解决办法或者是定子端状态方程转换为 dq 坐标系统, 或者是将电机状态方程转换为 abc 坐标系统。本文采用后者。主要原因是定子端的拓扑结构经常改变, 而电机的状态方程是不变的。如果将电机方程转换为 abc 坐标系统, 当定子端结构发生变化时, 只需在定子端直接求状态方程, 而不必每次进行 abc 坐标系统到 dq 坐标系统的转换。为减少 dq 至 abc 系统的工作量, 本文提出采用所谓混合坐标系统, 即与定子端接口的状态变量采用 abc 坐标系统 (abc 相电压和电流采用 abc 坐标系统, 而其余仍为 dq 坐标系统), 因此, 电机的状态变量为 [$i_a, i_b, i_c, i_{qr}, i_{dr}, i_{fr}, \omega_r, \theta_r$] 输入电压为 $u_a, u_b, u_c, u_{qs}, u_{ds}$ 与 u_a, u_b, u_c 之间的关系为:

$$u_{qs} = \frac{2}{3} \left[u_a \cos\theta_r + u_b \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + u_c \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \tag{7}$$

$$u_{ds} = \frac{2}{3} \left[u_a \sin\theta_r + u_b \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + u_c \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \tag{8}$$

i_a, i_b, i_c 与 i_{qs}, i_{ds} 之间的关系为:

$$i_{qs} = \frac{2}{3} \left[i_a \cos\theta_r + i_b \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \tag{9}$$

$$i_{ds} = \frac{2}{3} \left[i_a \sin\theta_r + i_b \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \tag{10}$$

$$i_a = i_{qs} \cos\theta_r + i_{ds} \sin\theta_r \tag{11}$$

$$i_b = i_{qs} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{ds} \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{12}$$

$$i_c = i_{qs} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{ds} \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \tag{13}$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{di_{qs}}{dt} \cos\theta_r + \frac{di_{ds}}{dt} \sin\theta_r - \omega_r i_{qs} \sin\theta_r + \omega_r i_{ds} \cos\theta_r \tag{14}$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{di_{qs}}{dt} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{di_{ds}}{dt} \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) - \omega_r i_{qs} \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + \omega_r i_{ds} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{15}$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{di_{qs}}{dt} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{di_{ds}}{dt} \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) - \omega_r i_{qs} \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \omega_r i_{ds} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \tag{16}$$

对式(1)变换可得如下形式的状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{p}i_{qs} \\ \dot{p}i_{ds} \\ \dot{p}i_{qr} \\ \dot{p}i_{dr} \\ \dot{p}i_{fr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{1qs}(i_{qs}, i_{qs}, \dot{i}_{qr}, \dot{i}_{dr}, \dot{i}_{fr}, \omega_r, \theta_r, u_{qs}, u_{qr}) \\ f_{1ds}(i_{qs}, i_{qs}, \dot{i}_{qr}, \dot{i}_{dr}, \dot{i}_{fr}, \omega_r, \theta_r, u_{qs}, u_{qr}) \\ f_{1qr}(i_{qs}, i_{qs}, \dot{i}_{qr}, \dot{i}_{dr}, \dot{i}_{fr}, \omega_r, \theta_r, u_{qs}, u_{qr}) \\ f_{1dr}(i_{qs}, i_{qs}, \dot{i}_{qr}, \dot{i}_{dr}, \dot{i}_{fr}, \omega_r, \theta_r, u_{qs}, u_{qr}) \\ f_{1fr}(i_{qs}, i_{qs}, \dot{i}_{qr}, \dot{i}_{dr}, \dot{i}_{fr}, \omega_r, \theta_r, u_{qs}, u_{qr}) \end{bmatrix} \tag{17}$$

将式(7)(8)(9)(10)代入式(17), 可得如下形式的状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{p}i_{qs} \\ \dot{p}i_{ds} \\ \dot{p}i_{qr} \\ \dot{p}i_{dr} \\ \dot{p}i_{fr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{2qs}(i_a, i_b, i_c, \dot{i}_{qr}, \dot{i}_{dr}, \dot{i}_{fr}, \omega_r, \theta_r, u_a, u_b, u_c) \\ f_{2ds}(i_a, i_b, i_c, \dot{i}_{qr}, \dot{i}_{dr}, \dot{i}_{fr}, \omega_r, \theta_r, u_a, u_b, u_c) \\ f_{2qr}(i_a, i_b, i_c, \dot{i}_{qr}, \dot{i}_{dr}, \dot{i}_{fr}, \omega_r, \theta_r, u_a, u_b, u_c) \\ f_{2dr}(i_a, i_b, i_c, \dot{i}_{qr}, \dot{i}_{dr}, \dot{i}_{fr}, \omega_r, \theta_r, u_a, u_b, u_c) \\ f_{2fr}(i_a, i_b, i_c, \dot{i}_{qr}, \dot{i}_{dr}, \dot{i}_{fr}, \omega_r, \theta_r, u_a, u_b, u_c) \end{bmatrix} \tag{18}$$

将式(18)中的 $\frac{di_{qs}}{dt}, \frac{di_{ds}}{dt}$ 代入式(14)(15)(16), 则式(18)变为状态变量为 [$i_a, i_b, i_c, i_{qr}, i_{dr}, i_{fr}$] 混合状态方程。

为保持定子端的方程和电机方程的联结, 定子端的方程的状态变量应包含定子端电压。因此选定定子端电压和线路电流为状态变量, 以 A 相为例, 状态方程为:

$$L_1 \frac{di_{LA}}{dt} + R_1 i_{LA} + u_A = u_{0A} \tag{19}$$

$$i_{LA} = i_A + i_{CA} \tag{20}$$

整理得

$$\frac{di_{LA}}{dt} = (u_{0A} - u_A - R_1 i_A) / L_1 \tag{21}$$

$$\frac{du_A}{dt} = (i_{LA} - L_{CA}) / C \tag{22}$$

3 仿真实例

利用上述电机的数学模型, 对一台同步电动机的起动过程作了仿真, 电机的标么值参数为: r_s

$$= 0.078 \quad x_{ds} = 0.9141 \quad x_{qs} = 0.5594 \quad x_{md} = 0.8521 \quad x_{mq} = 0.4974 \quad x_{dr} = 0.9458 \quad x_{qr} = 0.6237 \quad r_{dr} = 0.2229 \quad r_{qr} = 0.1336 \quad u_{fr} = 0.0194 \quad x_{fr} = 0.9745 \quad r_{fr} = 0.01577$$

线路阻抗为 $0.03 + j0.065$,

由于水泵为风机型负载, 设

$$T_1 = 0.1 + 0.1\omega_r + 0.1\omega^2 r + 0.4\omega^3 r。$$

求解电机状态方程采用经典四阶龙格-库塔法。

图2为变压器输出额定电压有效值为1.0时直接起动时电机的端电压波形图, 图3为直接起动的转速曲线。由图3知, 起动时间约为3s。图4为 $x_c = 0.6$ 时起动时电机的端电压波形图, 图5为 $x_c = 0.6$ 时起动的转速曲线。起动时间约为

2.5s, 与直接起动相比, 定子端电压得到10%~20%的补偿, 同时起动时间也相应减小。图6为 $x_c = 0.2$ 时起动时电机的端电压波形图, 图7为 $x_c = 0.2$ 时起动的转速曲线。起动时间约为1.5s。由上述仿真结果可以看到, 定子端并联电容的确可以起到补偿端电压的效果, 但起动初期和起动后期的补偿效果不一样, 由于起动初期功率因数低, 补偿幅度小, 而在起动后期, 功率因数高, 可能会出现过补偿。电容选择过大, 虽能减小起动时间, 但会出现很高电压, 甚至出现振荡(图6和图7)。因此并联电容应以允许出现的最大电压来选择。

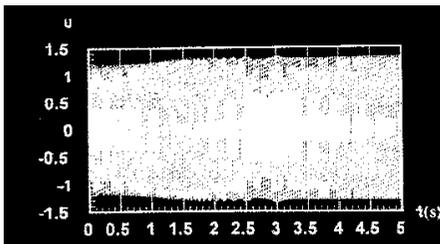


图2 直接起动电压波形

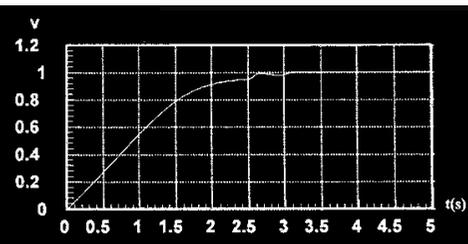


图3 直接起动转速波形

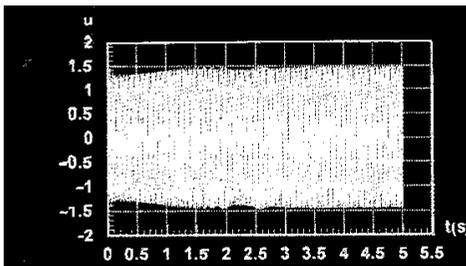


图4 $x_c = 0.6$ 时起动电压波形

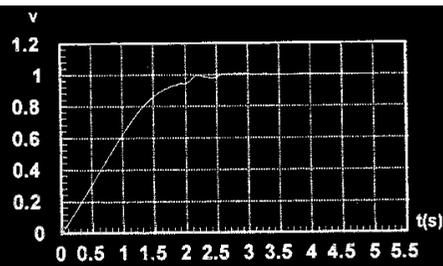


图5 $x_c = 0.6$ 时起动转速波形

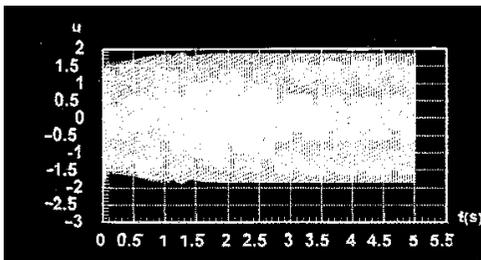


图6 $x_c = 0.2$ 时起动电压波形

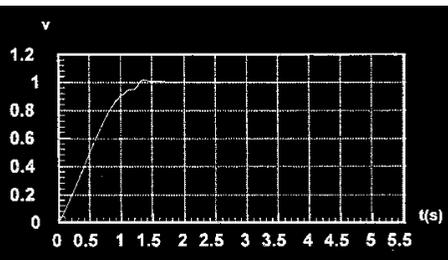


图7 $x_c = 0.2$ 时起动转速波形

4 结论

本文提出采用混合坐标系建立了定子端并联电容的起动过程的数学模型, 对定子端的拓扑结构变化时, 不必修改同步电动机方程, 而只改变定子端方程即可。并对泵站同步电机的起动过程作了仿真。仿真结果表明选择合适得电容能够补偿定子端电压。该仿真方法和程序对于泵站电机

起动方式的选择、电容的选择、稳定性研究均有实际意义。

参考文献

- 1 史旺旺等. 泵站同步电动机起动过程计算机仿真. 排灌机械, 1998, 16(1): 25~27
- 2 胡虔生等. 三相笼型异步电动机电容起动的数字仿真. 电工技术学报, 1997(1): 19~23

ANALYSIS FOR THE STARING PROCEDURE OF SYNCHRONOUS MOTOR WITH PARALLELED CAPACITOR

Shi Wangwang , Yang Peng , Wu Guifeng(Page of original article 5 - 7)

(Polytechnic Institute of Yangzhou University)

Abstract : It presents the hybrid starting model of synchronous motor with paralleled capacitor and simulating results including stator current , stator voltage , speed , torque , field current. The simulating results comparing with direct starting show its efficiency in compensating voltage , reducing starting time. It is not necessary to change the state equation when network is changed in stator.

Key words : Synchronous motor , Capacitor , Starting , Computer simulation