

①  
97,24(2)  
3-6

研究与设计

# 六相双 Y 同步电机等效电路及其参数的确定

中国科学院等离子体物理研究所(合肥市, 230031) 汤广福 傅 鹏

TM341.06

**摘要** 根据六相双 Y 同步电机的 Park 方程, 通过基值变换, 导出双 Y 同步机的交直轴等效电路; 在对该等效电路模型参数确定中, 借助等效三相同步电机, 给出精确分析计算模型参量的方法。

**关键词** 同步电动机, 模型, 参数, 等效电路, 计算

3-62

## 一、引言

等效电路及其参数计算是同步电机基本理论和运行分析领域的一个重要课题。运用基值变换, 将六相双 Y 同步机的数学模型转变成等效电路这一直观形式也是我们进行双 Y 同步机短路和其它行为分析的重要手段。对等效电路参数的计算, 若按常规方法, 将定子与转子绕组相互间互感系数设为相等的简化假设, 会导致同步电机数学模型参数不精确的结果<sup>[2]</sup>, 而模型参数的精确程度又是对电机进行准确理论分析和仿真分析的前提。本文在对六相双 Y 同步机模型参数的确定过程中, 根据 d 轴绕组间互感系数不同情况, 无需任何简化假设, 仅通过等值三相同步电机等效电路间的等效转换, 就精确地分析和计算出模型的所有参量。

## 二、六相双 Y 同步机的等效电路

将六相双 Y 同步电机 Park 方程<sup>[3]</sup>中 d

$$\begin{bmatrix} \psi_{d1} \\ \psi_{d2} \\ \psi_{fd} \\ \psi_{Dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & X_{dm} & X_{ad} & X_{aKd} \\ X_{dm} & X_d & X_{ad} & X_{aKd} \\ X_{ad} & X_{ad} & X_{fd} & X_{fKd} \\ X_{ad} & X_{ad} & X_{ad} + X_{rc} & X_{ad} + X_{rc} + X_{Dx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{d1} \\ -i_{d2} \\ i_f \\ i_{Dx} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u_{fd} &= P\psi_{fd} + r_{fD}i_f \\ 0 &= P\psi_{Dx} + r_{Dx}i_{Dx} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(3)、(4)即可得六相双 Y 电机直轴等效

轴 4 个磁链方程写成下列矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \psi_{d1} \\ \psi_{d2} \\ \psi_{fd} \\ \psi_{Kd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & X_{dm} & X_{ad} & X_{aKd} \\ X_{dm} & X_d & X_{ad} & X_{aKd} \\ X_{ad} & X_{ad} & X_{fd} & X_{fKd} \\ X_{aKd} & X_{aKd} & X_{fKd} & X_{Kd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{d1} \\ -i_{d2} \\ i_{fd} \\ i_{Kd} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2 个电压方程:

$$\begin{aligned} u_{fd} &= P\psi_{fd} + r_{fd}i_{fd} \\ 0 &= P\psi_{Kd} + r_{Kd}i_{Kd} \end{aligned} \quad (2)$$

对式(1)矩阵方程经矩阵变换, 即改变  $f_d$  绕组的基准值, 转换为  $X_{ad}$  基值系统:

$$aX_{aKd} = X_{ad}$$

式中  $a$ ——基值比例系数

式(2)也作相应的基值变换, 并定义:

励磁与阻尼绕组间漏抗:  $X_{rc} = aX_{fKd} - X_{ad}$

励磁绕组的漏抗:  $X_{rc} = X_{fd} - X_{ad} - X_{rc}$

阻尼绕组的漏抗:  $X_{Dx} = a^2X_{Kd} - X_{ad} - X_{rc}$

$$i_{Dx} = \frac{1}{a}i_{Kd} \quad i_f = i_{fd} \quad \psi_{Dx} = a\psi_{Kd}$$

$$r_{Dx} = a^2r_{Kd} \quad r_{rc} = r_{fd}$$

可得到下列磁链方程电压方程式:

电路, 同理可得交轴等效电路(2 个阻尼回路), 分别如图 1a、1b 所示。

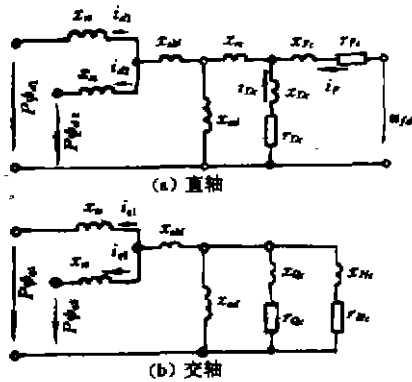


图1 六相双 Y 同步电机等效电路

### 三、等效电路参数的确定

六相电机的基本参数  $X_{d(6)}$ 、 $X_{ad(6)}$ 、 $r$  和  $R_f$ ，试验参数  $X_{d(6)'}$ 、 $X_{d(6)''}$ 、 $X_{q(6)''}$ 、 $T_{d(6)'}$ 、 $T_{d(6)''}$ 、 $T_{q(6)'}$ 、 $T_{q(6)''}$  以及  $X_{SS}$ ，一般由制造厂提供，缺少情况下也可由计算或实验求得<sup>[1]、[4]、[5]</sup>。因此，等效电路中模型参数的确定就是在上述参数已知的情况下求解下列模型参数。

$d$  轴： $X_m$ 、 $X_{Dc}$ 、 $r_{Fc}$ 、 $r_{Dc}$

$q$  轴： $X_{Qc}$ 、 $X_{Hc}$ 、 $r_{Qc}$ 、 $r_{Hc}$

六相双 Y 同步电机的分析与计算可以转换为：对具备电枢反应电抗  $X_{ad}$ 、 $X_{aq}$ （单 Y 电枢反应电抗）和漏抗  $X_{Sm}$ （2 个 Y 间综合互漏抗）的等值三相同步电机通过外接电抗  $X_{SS}/2$  向负载供电运行问题的分析<sup>[5-8]</sup>。根据图 1 等效电路，并考虑双 Y 对称性可知，满足  $d$  轴等效电路必须同时满足下列六相等值运算电抗和传递函数的表达式（所有等值三相同步机参数以下标 (3) 来区分）。

$$X_{ad}(P) = X_{d(3)}(P) + \frac{X_{SS}}{2} \quad (5)$$

式中

$$X_{d(3)}(P) = \frac{(1 + PT_{d(3)'}) (1 + PT_{d(3)''})}{(1 + PT_{d(3)'}) (1 + PT_{d(3)''})} X_{d(3)}$$

等值三相同步机直轴运算电抗

$$G(P) = \frac{1 + PT_{Dc}}{(1 + PT_{Dc}') (1 + PT_{Dc}'')} \quad (6)$$

同理， $q$  轴等效电路必须满足下列函数式：

$$X_{qm}(P) = X_{q(3)}(P) + \frac{X_{SS}}{2} \quad (7)$$

式中  $X_{q(3)}(P)$ ——等值三相同步机交轴运算电抗

$$X_{q(3)}(P) = \frac{(1 + PT_{q(3)'}) (1 + PT_{q(3)''})}{(1 + PT_{q(3)'}) (1 + PT_{q(3)''})} X_{q(3)}$$

按照 IEC 对  $X_s'$ 、 $X_s''$  ( $S$  表示  $d$  或  $q$ ) 的基本定义可得运算电抗  $X_s(P)$  的另一种形式。

$$\frac{1}{X_s(P)} = \frac{1}{X_s} + \left( \frac{1}{X_s'} - \frac{1}{X_s} \right) \frac{PT_s'}{1 + PT_s'} + \left( \frac{1}{X_s''} - \frac{1}{X_s} \right) \frac{PT_s''}{1 + PT_s''} \quad (8)$$

将式 (8) 与式 (5) 或式 (7) 中  $X_{d(3)}(P)$ 、 $X_{q(3)}(P)$  表达式对比，得出以短路时间常数表示开路时间常数表达式。

$$T_{s'} + T_{s''} = \frac{X_s}{X_s'} T_s' + \left( 1 - \frac{X_s}{X_s'} + \frac{X_s}{X_s''} \right) T_s'' \quad (9)$$

$$T_{s'} T_{s''} = T_s' T_s'' \frac{X_s}{X_s''} \quad (10)$$

对一外接电抗为  $X_e$  的三相同步电机，还可以进一步正确地计算出最后的短路时间常数，即有：

$$X_m(P) = X_s(P) + X_e = \frac{(1 + PT_{m}') (1 + PT_{m}'')}{(1 + PT_{m}') (1 + PT_{m}'')}$$

对比上式的分子多项式并结合式 (9)、(10) 得：

$$T_{m'} + T_{m''} = \frac{X_s}{X_m} \left[ \left( 1 + \frac{X_e}{X_s'} \right) T_s' + \left( 1 + \frac{X_e}{X_s} - \frac{X_e}{X_s'} + \frac{X_e}{X_s''} \right) T_s'' \right] \quad (11)$$

$$T_{m'} T_{m''} = T_s' T_s'' \frac{X_s}{X_m} \frac{X_m''}{X_s''} \quad (12)$$

式中  $X_m = X_s + X_e$

$X_m'' = X_s'' + X_e$

由式 (9) 知

$$X_m' = \frac{T_{m'} - T_{m''}}{T_{m'} + T_{m''} - \left( 1 + \frac{X_m}{X_m''} \right) X_m''} X_m \quad (13)$$

根据式 (11)、(12) 并考虑到  $X_{s(6)} =$

$2X_{S(3)} + X_{S5}, X_{S(6)}' = 2X_{S(3)}' + X_{S5}, X_{S(6)}'' = 2X_{S(3)}'' + X_{S5}$ , [6] 可以由六相双 Y 电机短路时间常数  $T_{d(6)}', T_{d(6)}''$  求出等值三相同步机的短路时间常数  $T_{d(3)}', T_{d(3)}''$  (用  $X_{S5}/2$  替代  $X_c$ ), 然后代入式(9)、(10)即可得出等值三相同步机开路时间常数也即六相双 Y 电机的开路时间常数而无须作任何简化的假设。

1.  $X_{dm}(P)$  等效电路参数计算

(1)  $X_{dm}(P)$  等效电路的标准形式

由式(5)、(8)可以作出准确代表运算电抗  $X_{dm}(P)$  的标准等效电路形式如图 2a 所示。现定义一特性阻抗  $X_c$ , 在不改变  $X_{dm}(P)$  的前提下, 对此作适当的变换:

$$X_{dm}(P) = (X_c + \frac{X_{S5}}{2}) + (X_{d(3)}(P) - X_c)$$

并参考式(11)~(13)(等值三相同步机外接电抗  $X_c = -X_c$ ) 等效电路可转变为图 2b 的形式。

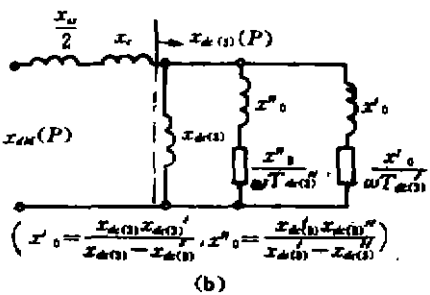
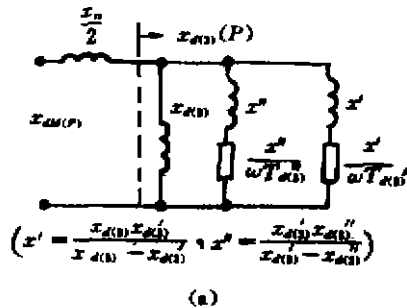


图 2  $X_{dm}(P)$  等效电路标准形式  
(2) 六相电机等效电路  $X_{dm}(P)$  的转换形式

对比图 1a 与图 2b, 为寻求运算电抗的

等效效果, 应消除图 1a 中  $X_n$  这条支路, 现用  $X_c$  取代双 Y 间互漏抗  $X_m$ , 并设下列关系成立。

$$\frac{1}{X_c - X_m} = \frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{rc}} \quad (14)$$

通过简单变换, 并令图 1a 中  $u_f = 0$ , 即得图 3 所示  $X_{dm}(P)$  的转换电路形式 [图中  $K = (X_{d(3)}/X_{ad})^2$ ].

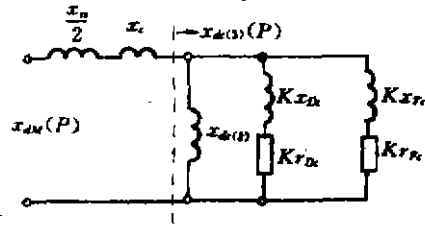


图 3 六相电机等效电路  $X_{dm}(P)$  的转换形式

(3)  $X_{dm}(P)$  等效电路参数计算方法

在  $X_{ad}$  基值系统, 励磁绕组电流与电压基值分别为:

$$I_{fB} = X_{ad} I_{fC}$$

$$u_{fB} = S_n / X_{ad} I_{fC}$$

式中  $S_n$ ——同步机额定容量

$I_{fC}$ ——额定电压下气隙励磁电流

励磁绕组电阻实际值与标么值间关系为:

$$r_f = \frac{S_n}{X_{ad}^2 I_{fC}^2} r_{fC} \quad (15)$$

根据图 2b 与图 3 等效电路的对比, 可得求解等效电路参数系列公式如下:

$$\left. \begin{aligned} X_{rc} &= (X_c - X_m) \frac{X_{ad}}{X_{d(3)}} \\ X_{Dc} &= \frac{X_{d(3)}' X_{d(3)}''}{X_{d(3)}' - X_{d(3)}''} \left( \frac{X_{ad}}{X_{d(3)}} \right)^2 \\ X_{Fc} &= \frac{X_{d(3)} X_{d(3)'}}{X_{d(3)} - X_{d(3)'}} \left( \frac{X_{ad}}{X_{d(3)}} \right)^2 \\ r_{Dc} &= \frac{X_{Dc}}{\omega T_{d(3)}''} \\ r_{Fc} &= \frac{X_{Fc}}{\omega T_{d(3)}'} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

应用式(11)~(16)可得出计算直轴模型参数的程序框图, 如图 4 所示。

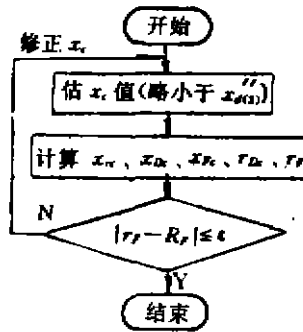


图4 计算直轴模型参数程序流程图

## 2. $X_{qm}(P)$ 等效电路参数的计算

同理,图 1b 中等效电路参数可采用  $d$  轴类同的方法加以确定,此时特性阻抗  $X_C = -X_m$  无须迭代逼近,计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} X_C &= \frac{X_{qm(s)}' X_{qm(s)}''}{X_{qm(s)}' - X_{qm(s)}''} \\ X_{Hc} &= \frac{X_{qm(s)}' X_{qm(s)}''}{X_{qm(s)}' - X_{qm(s)}''} \\ Y_C &= \frac{X_C}{\omega T_{qm(s)}''} \\ r_{Hc} &= \frac{X_{Hc}}{\omega T_{qm(s)}''} \end{aligned} \right\} (17)$$

由式(11)~(15)及式(17),可以精确计算出  $q$  轴开路时间常数及等效电路的模型参数。

## 四、结 论

(1)六相双 Y 同步电机的数学模型同样可以采用等效电路的形式来表示,且相对于

三相同步电机等效电路而言,只是在漏抗处以双 Y 互漏抗和各自净漏抗取代,从而形成两条耦合的支路。

(2)六相双 Y 同步电机的三相等值运算电抗等同于等值三相同步电机运算电抗与单 Y 综合净漏抗一半之和。

(3)六相双 Y 同步机短路常数和开路时间常数可以借助等值三相同步机进行换算。

(4)模型化的六相双 Y 同步电机所需的所有参数是可以精确确定的,而无须作任何简化的假设。

## 参考文献

- 1 Salvatore L, Savino M. Experimental determination of synchronous machine parameters. IEEE Proc. B. Electr. Power Appl., 1981, 128(4): 212~218.
- 2 Canay I. Determination of model parameters of synchronous machines. IEEE Proc. B. Electr. Power Appl., 1983, 130(2): 86~94.
- 3 Harley R. et al, Comparative study of Saturation methods in synchronous machine models. IEEE Proc. 13. Electr. Power Appl., 1980, 127, (1): 1~7.
- 4 Shackshaft G. New approach to the determination of Synchronous-machine parameters from test. ibid., 1974, 121(11): 1385~1393.
- 5 温增银, 胡会敏. 六相双 Y30° 相带绕组同步电机短路的暂态进程. 华中工学院学报, 1974(4).
- 6 汤广福, 许家治等. 一种新型六相双 Y 同步电机数学模型的分析研究. 大电机技术, 1996(3).

收稿日期: 1996-01-30

## 《中小型电机》征订启事

《中小型电机》杂志创刊于 1959 年,是机械工业部部批刊物。《中小型电机》立足电机行业,为我国电机行业的技术发展服务,同时又兼顾与电机相关的其它行业,为相关行业在电机技术等方面提供技术服务和技术信息,是行业内外科研、设计、生产、测试、维修和使用等有关人员不可缺少的技术资料,可供包括大专院校师生在内的有关人员阅读,一般电工爱好者也能从中得到有益的知识。

《中小型电机》杂志主要包括以下内容:电机研究与设计、电机制造工艺、新产品介绍、计算机应用、

测试技术和装备、绝缘技术、电机选用与维护、电机故障分析与检测、电机控制与保护、电机标准、电机质量、国外电机技术、小经验以及行业动态、信息报导等。

《中小型电机》为双月刊,公开发行,逢双月 10 日出版,邮发代号:4-199,1997 年定价不变,邮局从 1997 年 4 月起征订 1997 年下半年订户,截止日期为 5 月底,根据邮局规定,每半年征订一次,请广大读者及时就近向邮局订阅,请勿漏订。