

文章编号 :1007 - 649X(2001)01 - 0086 - 03

交流励磁发电机动态分析模型

王 勇,刘宪林,姜和恭

(郑州工业大学电气信息工程学院,河南 郑州 450002)

摘 要 :根据转子结构对称的交流励磁发电机的基本方程式,结合该类电机励磁系统的特点和异步运行的特征,综合考虑了励磁系统的 3 个调节量:励磁电压的频率、幅值和相角.定义转子磁通(电流)在定子绕组中的感应电势与定子电压的夹角为功角,将转子旋转磁场角频率与同步角频率之差引起的功角分量和转差率作为状态变量,推导了其四阶简化动态分析模型.同时给出了单机无穷大系统中交流励磁发电机的状态方程,为含交流励磁发电机的单机无穷大系统的研究提供了理论基础.

关键词 :交流励磁 ;动态分析模型 ;发电机

中图分类号 :TM 713 文献标识码 :A

0 引言

交流励磁发电机的定子结构与同步发电机完全一样,转子为多相对称绕组,正常运行时,转子施加多相对称的低频励磁电压.

与普通同步发电机相比,交流励磁发电机励磁系统的调节量由一个变为 3 个,即励磁电压的幅值、频率和相位均可调节.因此,调节励磁不仅可以调节发电机的无功功率,而且可以调节发电机的有功功率和转速.采用适当的励磁控制策略,可使电网频率与交流励磁发电机的转速解耦,即系统频率和电机转速成为可控的柔性连接,从而提高了电机的稳定性和电网运行的可靠性.

抽水蓄能电站中若采用交流励磁发电机,可以根据水头的变化,选择最佳的机组运行转速,不仅可以提高机组的效率,而且可改善机组的运行状况^[1].另外,交流励磁发电机在低负荷时可以大量吸收无功功率,为电力系统提供了有力的调压手段,这对大容量、高电压及远距离输电具有重要意义.因此,交流励磁发电机在电力系统中有着广阔的应用前景.

1 交流励磁发电机的动态分析模型

1.1 基本方程式

假定交流励磁发电机的转子结构对称,极对数为 1.定子和转子回路中的电流、磁链和电压的

正方向设定如下:正向定子电流产生负向磁链;正向转子电流产生正向磁链;定子侧电压电流正方向符合发电机惯例;转子侧电压电流正方向符合电动机惯例;转子转速低于同步速时转差率为正.则在 $x-y$ 同步速坐标系下,交流励磁发电机标么值形式的基本方程式如式(1)~(8)所示^[2~4]:

$$\Psi_{xs} = -X_s i_{xs} + X_a i_{xr}; \quad (1)$$

$$\Psi_{ys} = -X_s i_{ys} + X_a i_{yr}; \quad (2)$$

$$\Psi_{xr} = X_r i_{xr} - X_a i_{xs}; \quad (3)$$

$$\Psi_{yr} = X_r i_{yr} - X_a i_{ys}; \quad (4)$$

$$u_{xs} = -r_s i_{xs} - \Psi_{ys} + P \Psi_{xs}; \quad (5)$$

$$u_{ys} = -r_s i_{ys} + \Psi_{xs} + P \Psi_{ys}; \quad (6)$$

$$u_{xr} = r_r i_{xr} - s \Psi_{yr} + P \Psi_{xr}; \quad (7)$$

$$u_{yr} = r_r i_{yr} + s \Psi_{xr} + P \Psi_{yr}; \quad (8)$$

式中: X_a 为电枢反应电抗; r_s 和 r_r 分别为定/转子绕阻的电阻; X_s 和 X_r 分别为定/转子绕阻在定子频率时的全电抗; Ψ_{xs} 和 Ψ_{ys} 分别表示定子绕阻磁链在 x 轴和 y 轴上的投影; Ψ_{xr} 和 Ψ_{yr} 分别表示转子绕阻磁链在 x 轴和 y 轴上的投影;各电压 u 和电流 i 符号的含义类推; $s=1-\omega_r$ 为转差率; P 为微分算子.

1.2 电磁暂态方程

忽略定子电阻,不考虑定子电磁暂态过程,即取 $P \Psi_{xs} = P \Psi_{ys} = 0$.在式(3)和式(4)两侧同乘以 $\frac{X_a}{X_r}$,分别可得式(9)和式(10).

收稿日期 2000-11-06;修订日期 2000-12-27

作者简介:王 勇(1973-),男,山东省潍坊市人,郑州工业大学硕士研究生.

$$E_y = E'_y + (X_s - X'_s)i_{xs}; \quad (9)$$

$$E_x = E'_x - (X_s - X'_s)i_{ys}, \quad (10)$$

式中： $E_y = X_a i_{xr}$ ； $E_x = -X_a i_{yr}$ ； $E'_y = \frac{X_a}{X_r} \Psi_{xr}$ ； E'_x

$$= -\frac{X_a}{X_r} \Psi_{yr}；X'_s = X_s - \frac{X_a^2}{X_r}。$$

如以 x 轴为实轴，则 $E = E_x + jE_y$ 为转子磁通(电流)在定子绕组中的感应电势， $E' = E'_x + jE'_y$ 为暂态电势。在式(7)和式(8)两侧同乘以

$\frac{X_a}{r_r}$ ，分别可得式(11)和式(12)。

$$E_{yr} = E_y + T_r \cdot sE'_x + T_r \cdot pE'_y, \quad (11)$$

$$-E_{xr} = -E_x + T_r \cdot sE'_y - T_r \cdot pE'_x, \quad (12)$$

式中： $E_{xr} = -\frac{X_a}{r_r} u_{yr}$ ； $E_{yr} = \frac{X_a}{r_r} u_{xr}$ ； $T_r = \frac{X_r}{r_r}$ 。

将式(9)式(10)分别代入式(11)式(12)，整理得交流励磁发电机的电磁暂态方程式式(13)式(14)。

$$pE'_y = \frac{1}{T_r} [E_{yr} - E'_y - (X_s - X'_s)i_{xs}] - sE'_x, \quad (13)$$

$$pE'_x = \frac{1}{T_r} [E_{xr} - E'_x + (X_s - X'_s)i_{ys}] + sE'_y. \quad (14)$$

1.3 转子运动方程

$x-y$ 坐标系下的角度关系如图 1 所示。设定子端电压 u_s 与 x 轴同相位，励磁电压角频率为 ω_f ， $x-y$ 坐标系以同步角速度 $\omega = 1$ 逆时针旋转。

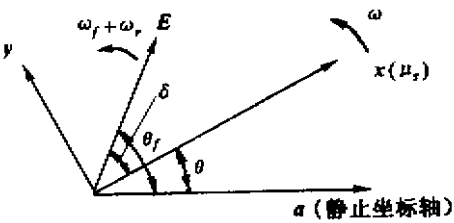


图 1 $x-y$ 坐标系下的角度关系

Fig.1 Angle relationship in $x-y$ axis

经分析，交流励磁发电机的功角由两部分组成，一部分是由转子旋转磁场角频率与同步角频率之差引起的功角分量 θ_k ；另一部分是与励磁电压初相角对应的功角分量 φ ，即

$$\delta = \theta_k + \varphi. \quad (15)$$

另外，由图 1 知

$$\delta = \theta_f - \theta, \quad (16)$$

结合

$$\theta_f = \theta_{f0} + (\omega_f + \omega_r)t + \Delta\varphi; \quad (17)$$

$$\theta = \theta_0 + \omega t = \theta_0 + t; \quad (18)$$

$$\delta_0 = \theta_{f0} - \theta_0 = \theta_{k0} + \varphi_0, \quad (19)$$

可得

$$\delta = \theta_{k0} + (\omega_f + \omega_r - 1)t + \varphi_0 + \Delta\varphi, \quad (20)$$

其中： θ_f 和 θ 分别为 E 和 u_s 与 a 轴的夹角； δ 为 E 与定子电压 u_s 的夹角，定义为功角； φ 为励磁电压初相角对应的功角分量； $\Delta\varphi$ 为 φ 的变化量； θ_k 为转子旋转磁场角频率与同步角频率之差引起的功角分量； θ_{f0} 、 θ_0 、 δ_0 、 φ_0 为各量初始时刻的值。

由于功角 δ 随励磁电压初相角的变化而发生突变，所以取 θ_k 作为状态变量。

显然

$$\frac{d\theta_k}{dt} = \omega_f + \omega_r - 1, \quad (21)$$

即

$$\frac{d\theta_k}{dt} = \omega_f - s. \quad (22)$$

另外易知

$$T_j \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e, \quad (23)$$

即

$$T_j \frac{ds}{dt} = T_e - T_m. \quad (24)$$

式中： T_e 是原动机传递的电磁力矩； T_m 是原动机的机械力矩。

式(22)和式(24)构成了交流励磁发电机的转子运动方程。

2 单机无穷大系统动态模型

如图 2 所示，一台交流励磁发电机经电抗 X_l 接入无穷大系统。将 X_l 作为发电机内电抗来考虑，总电抗 $X = X_l + X_s$ ，总的暂态电抗 $X' = X_l + X'_s$ 。

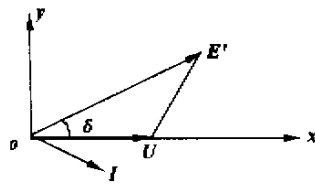


图 2 单机无穷大系统及其矢量图

Fig.2 The single-machine infinite bus system and its vectorgraph

设无穷大母线电压 U 与 x 轴同相位，近似认为 E' 与 U 的夹角等于功角 δ ，由文献[2]可知，定子电功率为

$$P_s = \frac{U \cdot E' \sin\delta}{X'}. \quad (25)$$

由文献 5 可知,交流励磁发电机由于存在滑差功率(转子电功率),原动机传递给定子的电磁功率为

$$P_e = (1 - s)P_s, \quad (26)$$

$$T_e = \frac{(1 - s)P_s}{\omega_r} = \frac{U \cdot E'}{X'} \sin \delta. \quad (27)$$

由文献 6 可知,若忽略原动机、调速系统的动态作用,考虑原动机的暂态频率特性,原动机的输入功率为

$$P_m = C_1 \omega_r - C_2 \omega_r^2, \quad (28)$$

式中: C_1, C_2 为常数.

机械力矩为

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} = C_1 - C_2 \omega_r = C_1 - C_2(1 - s). \quad (29)$$

将式(27)和式(29)代入式(24),整理得

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_j} \left(\frac{U \cdot E'}{X'} \sin \delta - C_1 + C_2 - C_2 s \right). \quad (30)$$

对单机无穷大系统

$$i_{xs} = \frac{E'_y}{X'}, \quad (31)$$

$$i_{ys} = \frac{U - E'_x}{X'}, \quad (32)$$

将式(31)和(32)分别代入式(13)和式(14),并与式(22)和式(30)联立即得单机无穷大系统的动态分析模型,如式(33)~(37)所示.

$$\dot{E}'_y = \frac{1}{T_r} \left(E_{yr} - \frac{X}{X'} E'_y \right) - s E'_x, \quad (33)$$

$$\dot{E}'_x = \frac{1}{T_r} \left(E_{xr} - \frac{X}{X'} E'_x + \frac{X - X'}{X'} U \right) + s E'_y, \quad (34)$$

$$\dot{\theta}_k = \omega_f - s, \quad (35)$$

$$\dot{s} = \frac{1}{T_j} \left(\frac{U \cdot E'}{X'} \sin \delta - C_1 + C_2 - C_2 s \right) \quad (36)$$

$$\delta = \theta_k + \varphi. \quad (37)$$

3 结束语

本文提出的四阶简化动态分析模型充分考虑了交流励磁发电机励磁系统的 3 个可调量,其中 ω_f 反映励磁电压频率, E_{xr}, E_{yr}, φ 反映励磁电压的幅值和初相角.同时还考虑了原动机的暂态频率特性,该特性在交流励磁发电机的稳定运行方面起到了很大作用.采用转差率 s 作为状态变量能够更直观地反映电机的异步特性.另外,由于交流励磁发电机的功角随励磁电压初相位的调节而发生突变,因此采用 θ_k ,而不是功角 δ 作为状态变量.

参考文献:

- [1] GISH W B, SCHURZ J R, MILANO B. An adjustable speed synchronous machine for hydroelectric power applications[J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, 1981, 100(5): 2171 - 2176.
- [2] 夏卡梁. 异步化同步电机[M]. 徐绳均, 韩居华, 张桂娥, 译. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [3] 贺益康. 交流电机的计算机仿真[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [4] 杨顺昌. 异步化汽轮发电机模型. 电工技术学报[J]. 1995, 10(2): 13 - 16.
- [5] 杜秀霞, 倪受元. 抽水蓄能电站变速恒频运行的分析与设计[J]. 电工电能新技术, 1999, 18(3): 13 - 17.
- [6] 颜湘武. 异步化同步发电机运行机理及其励磁控制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1996.

Dynamic Analysis Model of AC - excited Generator

WANG Yong, LIU Xian - lin, LOU He - gong

(College of Electrical & Information Engineering Zhengzhou University of Technology Zhengzhou 450002, China)

Abstract Based on the basic equations of AC - excited Generator (ACEG), a four - step dynamic analysis model is presented, in which three adjustable variables of excitation system (frequency, amplitude and phase angle of magnetizing current) and ACEG's character of asynchronous performance are all considered. And then, a state equation of ACEG in a single - machine infinite bus system is derived, which is necessary for the analysis of single - machine infinite bus system with an ACEG.

Key words AC - excited; dynamic analysis mode; generator