
中国电机学术会议论文

CHINA SYMPOSIUM ON ELECTRIC MACHINES



上海电机工程学会

SHANGHAI SOCIETY OF ELECTRICAL ENGINEERING

1983·12



《电机学术论文集》

顾 问：中国电机工程学会理事长 毛鹤年

《电机学术论文集》编委会：

主 任：胡汝鼎

编辑委员：殷元章、王雪渔、朱春甲、寒 松、

樊 虎、施凉奎、孙永林、王浚民、

沈衍民、章毓范、彭友元

前 言

十月神州，桂子飘香，普天同庆，喜气洋洋。我们编辑了《电机学术论文集》，作为电机界献给祖国的礼物，以此庆贺建国三十五周年纪念和中国电机工程学会成立五十周年纪念。

近几年来，电机界春意盎然，学术之花盛开。受上级学会的委托，上海电机工程学会会同上海电器科学研究所，曾先后召开二次中小型电机学术报告讨论会。每次会议都是“群贤毕至、老少咸集”，切磋交流，取长补短，为电机行业的技术发展提供了宝贵的经验，积累了重要的资料。《电机学术论文集》，就是在中国电机工程学会毛鹤年理事长的关怀之下，由上海电机工程学会组成的编委会，从第二次中小型电机学术报告讨论会的150余篇论文中，精选了十几篇学术价值和实用价值均较高的论文编辑而成，它集近年来电机研究的最新成果，是我国电机行业重要的科技文献。论文集附有英文提要，便于国际交流。

由于微电子技术突飞猛进，电子计算机在电机行业的应用与日俱增，因此有关电机理论研究和探讨不断深入，也成了我国电机专业研究生攻读的主要课题。这次编辑的《电机学术论文集》，大部分是高等院校师生近几年在国内、外从事电机理论研究的成果。论文集所选文章，务求有新意，给人以启迪。但是读这类论文，不能“既动复止，初念不及”，而应“自昧而明，群疑尽除”，仔细品味，定有裨益。

以往交流的电机学术论文，不少在《中小型电机》等专业中级杂志上有所介绍，但常有曲高和寡之感。这次专门编辑电机学术论文集，尚属尝试，如有不妥之处，欢迎批评指正！

在本论文集的编辑出版过程中，承蒙上海市电机技术研究所和论文作者所在单位的大力支持，谨致谢意！

《电机学术论文集》编辑委员会主任 胡汝鼎

一九八四年九月

A Word to our Readers

We take great pleasure to present on this memorable occasion of the celebration the 50th anniversary of the founding of the China Society of Electrical Engineering, this volume of selected works chosen from the papers presented at the national symposium on electric motors sponsored by the Shanghai Society of Electrical Engineering held in scenic Hongchow November 1983. The symposium was attended by scientists, engineers and professors from all over the country, and the papers presented represented a cross section of the state of the art in electric motor design, manufacture, research and testing. As compared to the last symposium held in Wushi in 1979, there is a notable advance in the application of modern theories in the analysis of motor performance, and the widespread use of computers as a valuable aid in motor design and research. Our limited space only allow us to present a few selected papers, although a much greater number of papers would be valuable reference material for those who are interested in this field of work. We, on behalf of the Shanghai Society of Electrical Engineering, would like to express our appreciation for all those that have supported this symposium, and it is our hope similar opportunities will be available in the future, so that we can once more exchange information and experience to the advancement of electrical engineering.

J. T. Hu
president, Shanghai Society
of Electrical Engineering

G. Y. Wang
Secretary

目 录

1. 滑差电动机的数学模型及稳态特性……………空军工程学院 李彪 (1)
2. 带阻尼绕组整数槽凸极同步发电机空载时的齿谐波电势
……………浙江大学 王毓东、李兴根 (12)
3. 恒定磁场和低频电磁场问题的边界元法……………华中工学院 邵可然、周克定 (23)
4. 牛顿迭代法在电磁场计算中的应用……………浙江大学 林友仰 (30)
5. 用“对称轴线法”实现任意极对数比的单绕组变极……………华中工学院 许实章 (42)
6. 同步发电机复合变流器相复励可控励磁系统原理和最优参数选择
……………福州大学 郑德腾、林光坚、曹金安 (49)
7. 自激同步感应发电机研究及试验分析……………太原工学院 牛维扬 (57)
8. 无刷发电机和电压调节器系统的数学模型……………江西第二电机厂 潘瑞征 (66)
9. 交交型自控同步电机的特性分析……………南京航空学院 胡育文 严仰光 (78)
10. MOD—0 100千瓦风力发电机与电网并联稳定性的数字模拟和微处理机在
系统中的应用……………南京航空学院 庄心复 (87)
11. 直流无整流子电机数学模型的一般形式及其低速运行问题的研究
……………浙江大学 陈道深 (95)
12. 主磁场饱和对电压源逆变器——感应电动机传动系统稳定性的影响
……………浙江大学 贺益康 (104)
13. 关于永磁磁路动态工作点的确定……………哈尔滨工业大学 王宗培 (113)
14. 电容调速单相电动机低速起动问题……………浙江大学 陈永校 夏振萍 (123)
15. 不对称三绕组单相电机的原理和应用
……………浙江省机械科学研究所 董录凤 陈兰芳 (130)
16. 应用方程式变换分析同步电机的电抗……………太原工学院 顾新园 (136)
17. 同步发电机带桥式整流负载工作时的数学模型——步进 α — β 座标系统的应用
……………南京航空学院 蒋忠玮 (145)
18. 异步电机重投入电源的过渡过程及抑制重合闸冲击电流的方法
……………清华大学电机工程系 高景德 张麟征 黄立培 (154)

滑 差 电 动 机 的 数 学 模 型 及 稳 态 特 性

The Mathematical Models and Steady-state Characteristics for Electromagnetic Couplings

空军工程学院 李 彪

Li Biao

(The Air Force College of Engineering)

提 要

本文用电机的矩阵分析的方法,建立了滑差电动机的数学模型,导出了滑差电动机的传递函数及稳态转矩公式,确定了滑差电动机的激磁电流、参数与转矩间的关系及稳态特性。所得结果,适用于各种型式的滑差电动机。

Abstract

This paper has established the mathematical models for electromagnetic couplings on the basis of the matrix analysis of electrical machines, derived the transfer functions and the steady-state torque formulae for the couplings, and determined the relation between the exciting current, the parameters and the torque of the couplings, and the steady-state characteristics of the couplings as well.

The results obtained are available for different types of electromagnetic couplings.

一、概 述

滑差电动机广泛用于船舶、纺织、造纸等大功率调速系统中，作为原动机与被拖动的机械之间的变速装置，又称为电磁滑差离合器、涡流离合器等，以与一般的机械离合器或电磁离合器等相区别。

在航空恒速恒频交流电源系统的，滑差电动机用来把发动机输出轴的变化了的转速，变为发电机轴的恒定的转速。由于机械恒速传动装置结构复杂，加工困难、成本高，可靠性与可维护性指标低，而滑差电动机结构简单、可靠，因而，用滑差电动机来做成的电磁恒速传动装置，具有很大的吸引力，特别对于功率不很大的交流电源系统来说，就更为合适。

由于滑差电动机结构上的特殊性：①其激磁是直流激磁；②磁极（内转子）是凸极（凸极式、齿极式、爪极式）的；③电枢（外转子）是短路转子（迭片铁心绕线式或鼠笼式、整块铁心空心杯式或空心杯加笼条式），因而，它既与普通的交流激磁、均匀气隙的异步电动机不同，又与普通的交流及直流激磁的凸极同步电动机不同，使滑差电动机中的电压、电流、转矩、参数之间的关系，既不同于普通的异步电动机，又不同于普通的同步电动机。分析滑差电动机中的电磁关系，是重要而困难的问题。

本文根据电机的矩阵分析[1]，建立了滑差电动机的数学模型、导出了滑差电动机的传递函数，确定了滑差电动机的稳态转矩与激磁电流及电机参数之间的关系。所得的结果，适用于各种结构型式的滑差电动机，只需考虑不同型式的滑差电动机相应的参数即可。

二、滑差电动机的动态方程式

为分析方便，设滑差电动机的原理结构图为图1所示。图中1为外转子（短路转子），2为内转子（凸极、直流激磁）。设外转子被原动机带动沿反时针方向转动，其转速为 n_1 。当内转子有激磁电流时，所产生的磁通在外转子中产生电势、电流，外转子的电流与电机中的磁通相互作用的结果，产生的电磁转矩使内转子亦沿反时针方向转动，其转速为 n_2 。

显然，内转子的转速 n_2 永远小于原动机的转速 n_1 ，即：

$$n_1 > n_2$$

外转子与内转子的转速差为：

$$n = n_1 - n_2$$

其方向为反时针。

在恒速恒频发电系统中，原动机的转速 n_1 是变化的，而要求：

$$n_2 = n_0 = \text{const}$$

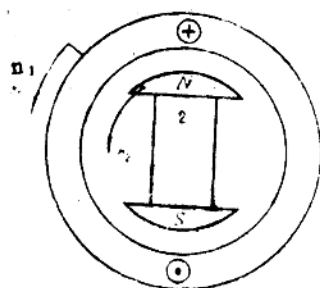


图1 滑差电动机的原理结构图

为方便计, 将转差率 s 定义为:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_0} 100\% \quad (1)$$

n_0 所对应的空间电角速应为 $\dot{\theta}_0$, 时间角频率为 ω_0 ; n 所对应的空间电角速度为 $\dot{\theta}_r$ 。

$$\dot{\theta}_0 = \omega_0 \quad (2)$$

得

$$\dot{\theta}_r = s \omega_0 \quad (3)$$

将实际的外转子绕组折合成等效的、对称的两相 (α 相及 β 相) 绕组后, 图1所示的理想电机, 可以等效于图2所示的理想电机。

1. 滑差电动机的瞬变阻抗矩阵

将图2所示的等效的滑差电动机的两相绕组, 转换至静止的 d 、 q 轴系, 得滑差电动机的瞬变阻抗矩阵为:

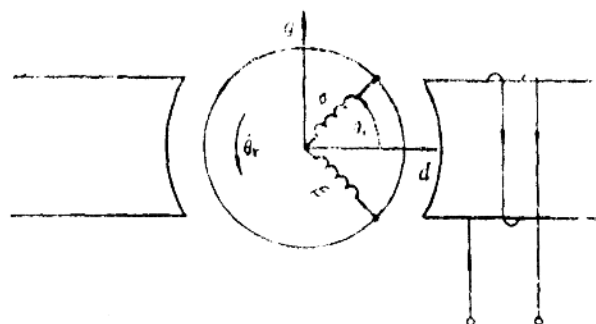


图2 等效的滑差电动机的原理结构图

$$Z' = \begin{bmatrix} R_a + L_a p & L_a \dot{\theta}_r & L_{Fd} p \\ -L_a \dot{\theta}_r & R_a + L_a p & -L_{Fd} \dot{\theta}_r \\ L_{Fd} p & 0 & R_F + L_F p \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, R_a 为等效的电枢电路的电阻; L_a 、 L_q 分别为等效的纵轴及横轴电枢电路的自感; L_{Fd} 为激磁电路与等效的纵轴电枢电路间的互感; R_F 及 L_F 为激磁电路的等效电阻及自感。

2. 动态电路方程式

由滑差电动机的瞬变阻抗矩阵, 得滑差电动机的动态电路方程式为:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + L_a p & L_a \dot{\theta}_r & L_{Fd} p \\ -L_a \dot{\theta}_r & R_a + L_a p & -L_{Fd} \dot{\theta}_r \\ L_{Fd} p & 0 & R_F + L_F p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^d \\ i^q \\ i^F \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 v_d 、 v_q 、 i^d 、 i^q 分别为 d 轴及 q 轴的电枢绕组的电压和电流， v_F 、 i^F 分别为励磁绕组的电压和电流。

因滑差电动机的电枢绕组是短路的，故 $v_d = v_q = 0$ ，动态电路方程式变为：

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + L_d p & L_q \dot{\theta}_r & L_{Fd} p \\ -L_d \dot{\theta}_r & R_a + L_d p & -L_{Fd} \dot{\theta}_r \\ L_{Fd} p & 0 & R_F + L_F p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^d \\ i^q \\ i^F \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. 动态转矩平衡方程式

用矩阵表示时，电机的电磁转矩 M 为：

$$M = i_i G i$$

式中

$$G = \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 \\ -L_d & 0 & -L_{Fd} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad i = \begin{bmatrix} i^d \\ i^q \\ i^F \end{bmatrix} \quad (7)$$

而 i_i 为 i 的转置。因而，滑差电动机的电磁转矩为：

$$M = -[(L_d - L_q)i^d i^q + L_{Fd} i^q i^F] \quad (8)$$

动态转矩平衡方程式为：

$$T = -M + F \dot{\theta}_r + J_s \ddot{\theta}_r \quad (9)$$

式中， T 为负载阻转矩， F 为阻尼系数， J 为转动惯量。按照惯例，取电磁转矩的方向与负载阻转矩方向相同。

4. 滑差电动机的动态方程式

将滑差电动机的动态电路方程式写成：

$$\begin{aligned} V &= Ri + L p i + G \dot{\theta}_r i \\ &= Ri + L p i + G i \dot{\theta}_r \end{aligned} \quad (10)$$

式中电压矩阵 V 、电感矩阵 L 电阻矩阵 R 分别为

$$V = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_F \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} L_d & 0 & L_{Fd} \\ 0 & L_q & 0 \\ L_{Fd} & 0 & L_F \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_F \end{bmatrix}$$

动态转矩平衡方程式写成：

$$T = -i_i G i + (F + J p) \dot{\theta}_r \quad (11)$$

由 (10) 及 (11) 得滑差电动机的动态方程式为：

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_F \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & L_{Fs} p & L_q i^q \\ 0 & R_s + L_s p & 0 & -L_q i^d - L_{Fs} i^F \\ L_{Fs} p & 0 & R_F + L_F p & 0 \\ -L_q i^q & -L_q i^d & L_{Fs} i^q & F + J p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^d \\ i^q \\ i^F \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \quad (12)$$

滑差电动机的动态方程式，是分析滑差电动机及其机电系统的动态特性的基础，也是分析滑差电动机稳态特性的基础。

三、滑差电动机的传递函数

在分析滑差电动机及其调速系统受到小扰动时的动态性能时，首先遇到的基本问题之一，是导出滑差电动机的传递函数。

在文献[3]、[4]、[5]中给出的滑差电动机的传递函数，没有包含滑差电动机的全部参数，不便于分析滑差电动机的参数对滑差电动机及其调速系统的动态性能的影响。

下面导出包含全部参数的滑差电动机的传递函数。

1. 小值振荡方程式

根据(10)、(11)式，

$$\left. \begin{aligned} V &= Ri + Lp i + G \dot{\theta}_r i \\ T &= F \dot{\theta}_r + Jp \dot{\theta}_r - i_i G i \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

当滑差电动机在某一平衡状态时，如受到小值的电压扰动 ΔV 或负载转矩扰动 ΔT ，则滑差电动机的电流 i 及相对旋转角速度 $\dot{\theta}_r = s\omega_0$ 相应地变化 Δi 及 $\Delta \dot{\theta}_r$ 。略去二价无穷小量，得滑差电动机的小振荡方程式为

$$\begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + Lp + G\dot{\theta}_r & G i \\ -i_i(G + G_i) & F + Jp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i \\ \Delta \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中

$$\Delta V = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta V_F \end{bmatrix}, \quad \Delta i = \begin{bmatrix} \Delta i^d \\ \Delta i^q \\ \Delta i^F \end{bmatrix}$$

故小振荡方程式为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta V_F \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + L_d p & L_q \dot{\theta}_r & L_{Fd} p & K_1 \\ -L_d \dot{\theta}_r & R_a + L_d p & -L_{Fd} \dot{\theta}_r & K_2 \\ L_{Fd} p & 0 & R_F + L_F p & 0 \\ K_3 & K_4 & K_5 & F + J p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i^d \\ \Delta i^q \\ \Delta i^F \\ \Delta \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= L_q I^q \\ K_2 &= -(L_d I^d + L_{Fd} I^F) \\ K_3 &= (L_d - L_q) I^q \\ K_4 &= [(L_d - L_q) I^d + L_{Fd} I^F] \\ K_5 &= L_{Fd} I^q \\ I^d &= -\frac{I^F s L_{Fd}}{R_a^2 + s^2 L_d L_q} \cdot s L_q \\ I^q &= \frac{I^F s L_{Fd}}{R_a^2 - s^2 L_d L_q} \cdot R_a \\ I^F &= -\frac{V_F}{R_F} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

决定了没有激磁扰动 ΔV_F 或负载转矩扰动 ΔT 时任意转差率 s 的平衡状态。

当不计外加摩擦力矩时，阻尼系数 F 决定于机械特性 $M = f(s)$ 的平衡点处的斜率，即

$F = \frac{dM}{ds}$ 。由于滑差电动机的机械特性 $M = f(s)$ （见图5）是非线性的，机械特性的斜

率随转差率 s （以及激磁电流 I^F 的大小，即磁路饱和程度）的变化而变化。对于给定的激磁电流及转差率 s ，在机械特性上有一个平衡点。在平衡点附近一个足够小的邻域内，可以认为机械特性是线性的，在这个邻域内的机械特性的斜率，近似等于平衡点处的斜率。

2. 滑差电动机的传递函数

(1) 滑差电动机的框图

根据滑差电动机的小振荡方程式（15），得滑差电动机的框图如图3所示。

由滑差电动机的框图，可以清楚地看出滑差电动机中的各个电磁量，是如何相互联系、相互影响的。

请注意：图3中的 s 是拉氏变换算子，而不是转差率 s 。为避免混淆，本节中当 s 代表转差率时，将在 s 前冠以“转差率”字样，以资区别。

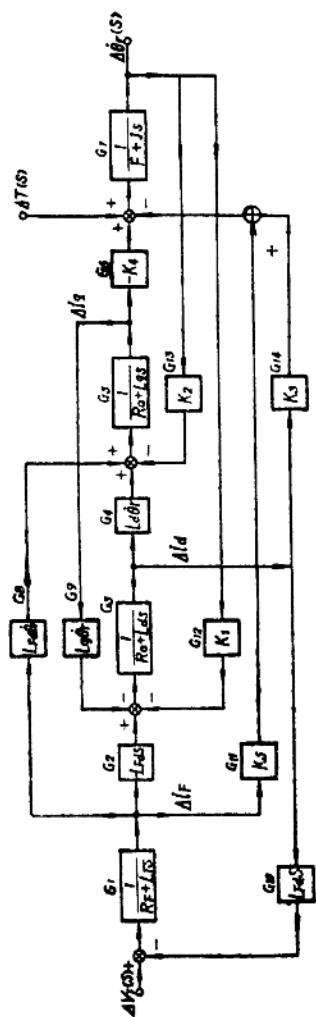


图 3 滑差电动机框图

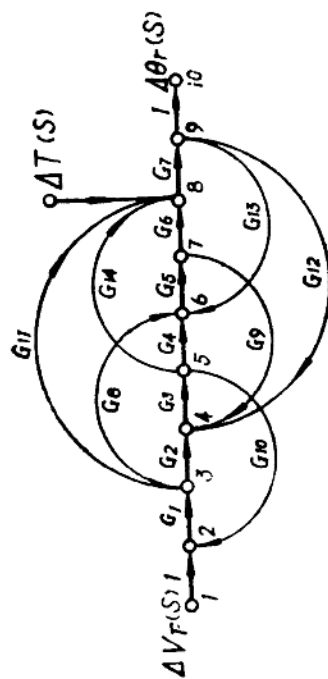


图 4 滑差电动机图的信号流图

(2) 滑差电动机的信号流程图

图3的框图, 甚难用一般的方法简化, 不便于用它求出滑差电动机的传递函数。如作出与框图相应的信号流程图, 便无须对框图进行简化, 而直接利用梅逊增益公式, 求出滑差电动机的传递函数。根据图3所得的信号流程图如图4所示。

(3) 滑差电动机的传递函数

1) 激磁扰动时的传递函数

令 $\Delta T(s) = 0$, $\Delta V_F(s)$ 与 $\Delta \dot{\theta}_r(s)$ 之间的传递函数为:

$$G_{01}(s) = \frac{\Delta \dot{\theta}_r(s)}{\Delta V_F(s)} = \frac{B_1(s)}{A_1(s)} = \frac{1}{\Delta_0} \sum p_k \Delta_k \quad (17)$$

按照梅逊增益公式, 经一系列运算后得

$$\begin{aligned} A_1(s) = & (L_F L_d - L_{F_d}^2) L_q J s^4 + [R_A (L_d + L_q) L_F J \\ & + L_d L_q (R_F J + F L_F) - L_{F_d}^2 (R_A J + F L_q)] s^3 \\ & + [R_A (L_d + L_q) (R_F J + F L_q) + L_d L_q R_F F + R_A^2 L_F J \\ & - K_2 K_4 L_F L_d - K_1 K_3 L_F L_q - L_{F_d}^2 R_A F + L_F L_d L_q \dot{\theta}_r^2 J \\ & + K_1 K_3 L_{F_d} L_q - L_{F_d} L_q \dot{\theta}_r J + K_2 K_4 L_{F_d}^2] s^2 \\ & + [R_A^2 (R_F J + F L_F) + R_A R_F (L_d + L_q) F \\ & - K_2 K_4 (R_F L_d + R_A L_F) - K_1 K_3 (R_F L_q + R_A L_F) \\ & + L_d L_q (R_F J + F L_F) + K_1 K_3 L_{F_d} R_A - K_1 K_4 L_d L_F \dot{\theta}_r \\ & + K_2 K_3 L_q L_F \dot{\theta}_r - L_{F_d} L_q \dot{\theta}_r^2 F + K_1 K_4 L_{F_d}^2 \dot{\theta}_r \\ & - K_2 K_3 L_{F_d} L_q \dot{\theta}_r] s + [R_A^2 R_F F - K_2 K_4 R_A R_F - K_1 K_3 R_A R_F \\ & + L_d L_q R_F \dot{\theta}_r F - K_1 K_4 L_d R_F \dot{\theta}_r - K_2 K_3 L_q R_F \dot{\theta}_r] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} B_1(s) = & (K_3 L_{F_d} L_q - K_5 L_d L_q) s^2 + [K_3 L_{F_d} R_A - K_5 R_A (L_d + L_q)] s \\ & + (K_3 L_{F_d} L_q \dot{\theta}_r^2 - K_5 L_d L_q \dot{\theta}_r^2 - K_4 L_{F_d} R_A \dot{\theta}_r - K_5 R_A^2) \end{aligned} \quad (19)$$

2) 转矩扰动时的传递函数

令 $\Delta V_F(s) = 0$, $\Delta T(s)$ 与 $\Delta \dot{\theta}_r(s)$ 之间的传递函数为

$$G_{02}(s) = \frac{\Delta \dot{\theta}_r(s)}{\Delta T(s)} = \frac{1}{\Delta} \sum p_k \Delta p_k = \frac{B_2(s)}{A_2(s)} \quad (20)$$

其中

$$\begin{aligned}
 B_2(s) = & L_d L_q L_F J s^4 + [R_a(L_d + L_q) J L_F + L_d L_q (J R_F + F L_F) - L_{Fd}^2 J L_F] s^3 \\
 & + [R_a^2 J L_F + R_a (J R_F + F L_F) (L_d + L_q) + F R_F L_d L_q + L_d L_q \dot{\theta}_r^2 J L_F \\
 & - L_{Fd}^2 (J R_a + F L_q) - L_{Fd}^2 L_q \dot{\theta}_r^2 J] s^2 + [R_a^3 (J R_F + F L_F) \\
 & + R_a R_F (L_d + L_q) J + L_d L_q \dot{\theta}_r^2 (F L_F + J R_F) - L_{Fd}^2 F R_a - L_{Fd}^2 L_q \dot{\theta}_r^2 F] s \\
 & + R_a^2 F R_F + L_d L_q \dot{\theta}_r^2 F R_F
 \end{aligned} \quad (21)$$

而

$$A_2(s) = A_1(s) \quad (22)$$

四、滑差电动机的稳态特性

1. 滑差电动机的稳态转矩公式

在方程式(6)中, 令 $p = 0$, $i^d = I^d$, $i^q = I^q$, $i^F = I^F$, $\dot{\theta}_r = s\omega_0$, 解得

$$\left. \begin{aligned} I^d &= -\frac{I^F s X_{Fd}}{R_a^2 + s^2 X_q X_d} \cdot s X_a \\ I^q &= \frac{I^F s X_{Fd}}{R_a^2 + s^2 X_q X_d} \cdot R_a \\ I^F &= -\frac{V_F}{R_F} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

代入式(8)得稳态电磁转矩为:

$$M = \frac{1}{\omega_0} [I^d I^q (X_d - X_q) + I^F I^q X_{Fd}]$$

将 I^d 、 I^q 的值代入, 把 I^F 写成 I_F , 得:

$$M = -\frac{1}{\omega_0} \frac{I_F^2 X_{Fd}^2 s R_a}{R_a^2 + s^2 X_q X_d} \left[1 - \frac{s^2 X_q (X_d - X_q)}{R_a^2 + s^2 X_q X_d} \right] \quad (24)$$

将此式化为更方便的形式,

$$M = -\frac{1}{\omega_0} I_F^2 X_{Fd}^2 \frac{\frac{R_a}{s}}{\left(\frac{R_a}{s}\right)^2 + X_q X_d} \left[1 - \frac{X_q (X_d - X_q)}{\left(\frac{R_a}{s}\right)^2 + X_q X_d} \right] \quad (25)$$

这样，我们便得到了滑差电动机的转矩与激磁电流 I_F 、转差率 s 及电机各参数之间的定量关系。

公式前面的负号表明，滑差电动机外转子上作用着的电磁转矩的方向为顺时针方向，即与外转子的转向相反，对外转子起制动作用。作用在内转子上的电磁转矩与作用在外转子上的电磁转矩大小相等，方向相反，即沿反时针方向，电磁转矩使内转子沿外转子转动的方向旋转。

2. 滑差电动机的机械特性 $M = f(s)$

由滑差电动机的电磁转矩公式 (25) 可以看出，滑差电动机的机械特性 $M = f(s)$ 与异步电动机的机械特性非常相似，这是预料之中的。但滑差电动机的结构与普通异步电动机的结构不同，其转矩公式及机械特性也必然不同。

根据滑差电动机的稳态转矩公式，已知电机的参数时，即可作出滑差电动机的 $M = f(s)$ 曲线。 $M = f(s)$ 曲线的形状，取决于电机的参数。电机的结构型式及运行状态不同，电机的参数也不同，得到不同的 $M = f(s)$ 曲线。例如，其余参数为常数，转子电阻不同时的机械特性如图 5 所示；全部参数为常数，激磁电流不同时的机械特性如图 6 所示。

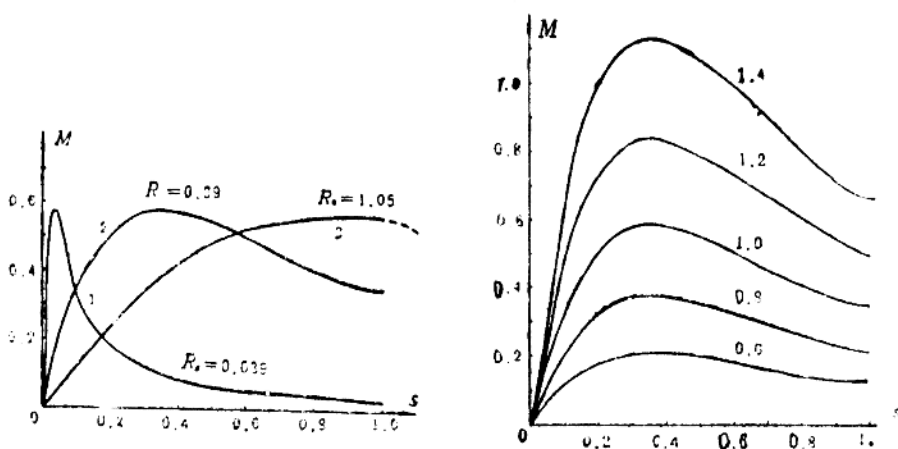


图5 转子电阻不同时，滑差电动机的机械特性 图6 $R_a = 0.39$ ，激磁电流不同时的机械特性

五、 结论

1. 以上分析表明：滑差电动机是同步电动机及异步电动机的有机结合。它的特性既不同于普通同步电动机，又不同于普通异步电动机。它既可以看成是运行于不同的同步转速的同步电动机，又可以看成是具有不均匀气隙的异步电动机。

2. 以上所得的滑差电动机的数学模型，不仅适用于通常的凸极转子的滑差电动机，而且适用于任何型式的滑差电动机，因而具有普遍意义。不同结构型式的滑差电动机，具有不同的但是相应的参数值。

3. 以上所得的结论, 虽然是从参数为恒定的滑差电动机导出的, 但并不失其普遍性。当考虑电流的趋肤效应时, 例如, 对于空心外转子的滑差电动机, 其参数是转差率的复杂函数, 但对于一定的转差率 s , 其参数值是确定的。这时, 对于每一个转差率 s , 应以相应的参数值代入数学模型中。

主要参考文献

- [1] N.N.Hancock, Matrix Analysis of Electrical Machinery, 1974.
- [2] Von J. Stiglitz, Erlangen, Die Schlupfkupplungsanlage. Schiff und Hafen. Heft 11/1967. 19. Jahrgang.
- [3] E.J.Davies, Transient performance of eddy-current coupling, Proc, IEE, Vol.122, No.10, 1975.
- [4] 河野 哲雄 宫野 利雄:
 涡流离合电动机的速度控制及应用, 电气计算, Vol.41, No.13,
- [5] 松本圭二: 新型调速电动机的控制装置, 三菱电机技报, Vol.52, No.3, 1978.

带阻尼绕组整数槽凸极同步发电 机空载时的齿谐波电势

Analysis of No-load Tooth Harmonic E. M. F. of Integral-slot Salient-pole syn- chronous Generators with Damper Windings

浙江大学 王毓东 李兴根

Zhejiang University wang Yudong, Li Shinggen

提 要

齿谐波电势有两类，第一类是由于定子开槽引起附加气隙磁场而产生，第二类是由于阻尼绕组高频感应电流的磁势引起另一附加气隙磁场而产生。在本文中我们对第二类齿谐波电势作了详细讨论，并导出一系列可供计算的公式。为了证实所提出算法的正确性，采用了一台160千瓦电机作为算例，所得结果与实验值符合良好。

Abstract

There are two kinds of tooth harmonic e.m.f. The first is produced by the auxiliary airgap field owing to the slotted stator surface. The second is produced by another auxiliary airgap field caused by the m.m.f. which is created by the high-frequency induced damper winding currents.

In this paper we had a thorough discussion on the second kind tooth harmonic e.m.f. and derived out a series of formulae available for calculation. For identifying the correctness of the proposed method, a 160 kw generator has been taken for example of calculation and the results was well coincided with the experimental data.