

自动化丛书

电机放大机

〔苏联〕B. И. 拉金著 黄立鋤 徐 权译

上海科学技术出版社

电机放大机

〔苏联〕B. H. 拉金 著

黄立鈞 徐叔译 樊虎校

2/6529/27

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书是“自动化丛书”之一。丛书内容包括自动学及远动学的理论,自动装置、元件和仪器的结构及应用等。丛书选题主要取自苏联及其他国家的有关资料,也包括国内编写的专题论著。本丛书由“自动化丛书编辑委员会”主编。

本书阐述国外各种型式电机放大机的结构、工作原理及理论基础。着重介绍交轴磁场电机放大机的调整与试验方法,同时还列述电机放大机在自动电力拖动系统中应用的一些较简单的原理图。

本书供自动电力拖动的工程技术人员及大专学生作参考。

ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

В. И. Радин

Госэнергоиздат • 1962

自动化丛书(31)

电 机 放 大 机

黄立鈞 徐 叔 译 樊 虎 校

自动化丛书编辑委员会主编

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可証出093号

上海市印刷三厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印张 3 6/32 排版字数 67,000

1964年1月第1版 1964年1月第1次印刷 印数 1—8,000

统一书号 15119·1773 定价(十二) 0.38 元

目 录

緒 論	1
第 1 章 直軸磁場电机放大机	4
1. 他激电机放大机	4
2. 自激电机放大机	7
3. 双机放大机	11
4. 双换向器放大机	14
5. 兩級和三級直軸磁場电机放大机	16
第 2 章 交軸磁場电机放大机	20
6. 工作原理和結構	20
7. 靜态特性和放大系数	28
8. 快速动作和过渡过程	38
9. 半节距电樞繞組的电机放大机	43
第 3 章 电机放大机的应用	51
10. 电机放大机作为自动調节系統中的元件	51
11. 发电机电压的自动調节	57
12. 电动机轉速的調节	63
13. 随动拖动装置中的电机放大机	67
第 4 章 电机放大机的調整及試驗	71
14. 电刷接触	71
15. 补偿的調整	73
16. 工厂試驗	76
17. 特殊試驗	83
附 录	86
参考文献	94
补充参考文献	95

緒 論

放大裝置是自動調節系統中的重要元件。凡是能夠利用較小功率來控制較大功率的裝置，一般就叫做放大裝置。

電子管放大器、電機放大機、磁放大器和半導體放大器都廣泛地在自動電力拖动系統中應用。電子管放大器、磁放大器及半導體放大器是靜止的放大裝置；而電機放大機則是旋轉的放大裝置。

電機放大機在 1937 年即在自動調節系統中應用，從那時開始，就廣泛地在自動電力拖动中應用。

電機放大機(ЭМЯ)通常是一種換向器直流電機。由於激磁系統的不同，電機放大機一般分為直軸磁場電機放大機和交軸磁場電機放大機。第一種電機放大機的主工作磁通沿電機的直軸方向(順磁極方向)作用，第二種電機放大機中則沿交軸方向作用。

在自動調節系統中，電機放大機的輸入端(控制繞組)輸入一個訊號，在放大機中放大，這和拖动電動機軸上送給放大機的機械能量消耗有關，而電機放大機的輸出端則聯接到驅動執行機械的電動機上或較大功率電機的激磁繞組上。

當然，電機放大機的放大倍數愈大，則愈能在電機放大機的控制回路中應用輕便和功率較小的電器。因此，對電機放大機的第一個基本要求，就是要保證放大機有較大的放大系數。電機放大機的放大系數就是電機放大機輸出功率與輸入功率之比，即

$$k_y = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \quad (1)$$

有时还把放大系数按电流与电压来区分,即

$$k_{yi} = \frac{I_{\text{БЛХ}}}{I_{\text{БХ}}} \quad (2)$$

$$k_{yu} = \frac{U_{\text{БЛХ}}}{U_{\text{БХ}}} \quad (3)$$

由此可知

$$k_y = k_{yi} k_{yu} \quad (4)$$

为了增加电机放大机的放大系数,往往采用两级或三级放大。因此,电机放大机根据放大级数可分为一级、二级和三级的。如果 k_{y1} 、 k_{y2} 、 k_{y3} 是每级的放大系数,则这个放大机的总放大系数为

$$k_y = k_{y1} k_{y2} k_{y3} \quad (5)$$

现代电机放大机的放大系数一般由 1000 到 100,000。

对电机放大机的第二个基本要求是快速动作。电机放大机对输入信号变化的反应愈迅速,则自动调节系统的工作便愈精确愈好。

电机放大机的快速动作主要决定于电机放大机输出级激励磁场的电磁惯性,因为这一级容量最大,需要消耗的电磁能也最大。

回路的时间常数为

$$T = \frac{L}{R} \quad (6)$$

式中 L ——电感;

R ——回路的有效电阻。

电机放大机输出级的时间常数约为 0.02~0.2 秒^①。

为了评定各种不同的电机放大机,因此在比较时,通常引

① 原文未注明时间常数单位。——校注

入品质因数的概念。品质因数就是放大系数与时间常数之比,即

$$k_{\pi} = \frac{k_y}{T'} \quad (7)$$

运行可靠性和特性稳定,也是对电机放大机提出的最重要的要求。由于电机放大机在自动电力拖动中应用很广,所以,主要机构的正常运行,经常与电机放大机的运行可靠性有关。如果电机放大机有不正常的运行现象,就可能造成很大的经济损失。近来在自动调节系统中,电机放大机已开始被静止的放大装置(磁放大器)所代替,主要原因就是后者在运行中的可靠性较好。因此设计与制造电机放大机的最重要任务,也就是保证它们的运行可靠性。

一般电机和电器都要求最轻的重量和最小的尺寸,这对电机放大机来说是特别重要,因为它们用在航空、船舶以及其他移动式自动调节系统中已广泛地应用。

在随动系统中,电机放大机的主要运行特性是过渡过程,在这个过程中,可能有较大的由电流与电压所形成的短时过载。因此电机放大机还必须保证有较大的过载能力。

第 1 章

直軸磁場电机放大机

1. 他激电机放大机

普通的他激直流发电机是最简单的电机放大机(图1)。

这种发电机的放大系数为

$$k_y = \frac{U_R I_R}{I_E^2 R_B} \quad (8)$$

式(8)中的放大系数可以变换成由电机的有关参数来表示。为此,引入下列系数:

$k_E = \frac{E}{U_R}$ ——发电机电枢电动势 E 与端电压 U_R 之比; k_{Σ} ——磁路饱和系数, 以及 σ_B ——磁极的漏磁系数^①, 并且用电机的电磁参数来

表示电动势 E , 用磁势和磁导来表示激磁磁通。

经过简单的变换后, 得

$$k_y = \frac{k}{k_E k_{\Sigma} \sigma_B} n \frac{A}{B_{\delta}} \cdot \frac{D_R}{\delta k_{\delta}} T_n \quad (9)$$

式中 k ——常数;

n ——电枢的转速;

^① 原文为激磁绕组漏磁。——校注

A ——电樞的綫負載；

B_δ ——气隙中的磁感应；

D_a ——电樞直徑；

k_δ ——考虑到电樞和定子齿形尺寸結構的气隙系数。

从式(9)可知，放大系数与時間常数 T_B 成正比，因此，电机放大机的快速动作随着放大系数的增加而变劣。

品质因数

$$k_A = \frac{k_y}{T_B} = \frac{k}{k_E k_{\Sigma} \sigma} n \frac{A}{B_\delta} \cdot \frac{D_a}{\delta k_\delta} \quad (10)$$

从式(10)可知，电机放大机的品质因数随着轉速、綫負載、电樞直徑的增加而增高，同时随着气隙长度、气隙中的磁感应和磁路饱和程度的增加而降低。

因此，为了使电机放大机具有良好的品质因数，就必须制成高轉速、不饱和、磁通密度較小、尺寸較大的电机。

一般系列的他激直流发电机并不具备上述性能，因此用作放大机的指标很低。此外，直流电机的定子軛部通常采用整块鉄心制成，在过渡过程中，定子軛部将感应产生渦流，而渦流将破坏电机的快速动作。又如剩磁电压較大，同样也对自动調节系統的工作产生不良的影响。

因此，把他激发电机作为放大机时，結構上应作如下的考虑：采用迭片式定子軛鉄，最小的气隙长度，較高的轉速和不饱和的磁路。

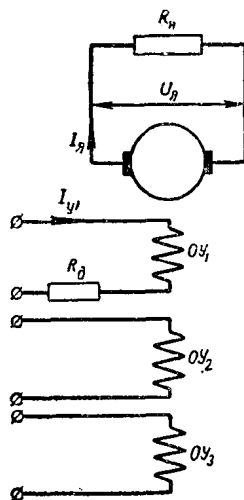


图2 有三个控制繞組的他激电机放大机的原理图

这种他激发电机通常称为“他激电机放大机”。

对自动调节系统来说，还要求电机放大机具有几个激磁绕组，通常这些绕组称为控制绕组（图2）。为了减小控制回路的时间常数，通常在控制绕组中接入有效电阻 R_A ，

$$T'_y = \frac{L_y}{R_y + R_A} = \frac{L_y}{R_y k_R} = \frac{T_y}{k_R} \quad (11)$$

式中 $k_R = \frac{R_y + R_A}{R_y}$;

L_y ——控制绕组电感；

R_y ——控制绕组有效电阻；

R_A ——附加电阻。

电机放大机中所有的控制绕组通常配置在同一个定子槽内，正如实验研究所表明的那样，在绕组之间实际上几乎存在着完全的磁链。因此，当存在几个具有闭合回路的控制绕组时，任何一个控制回路的时间常数为所有绕组的时间常数之和。在图2所示的电机放大机中

$$T_1 = T_{y1} + T_{y2} + T_{y3} \quad (12)$$

当在控制绕组中施加脉冲电压时，不饱和他激电机放大机的空载电压增加，它的过渡过程可用下式表示为

$$U_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (13)$$

$$E_2 = k_u U_1 \quad (14)$$

式中 U_1 ——加在控制回路上的电压；

i_1 ——控制回路的电流；

R_1 ②——有效电阻；

① 原文为 $U_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt}$ 。——校注

② 原文为 r_1 。——校注

L_1 ——控制回路的电感；

E_2 ——电机放大机输出端上的电动势；

k_u ——电压放大系数。

用运算子形式可表示为

$$U_1 = i_1 R_1 (1 + p T_1) \quad (15)$$

或者由式(14)得

$$E_2 = \frac{k_u U_1}{1 + p T_1} \quad (16)$$

式中, $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$ ① 为控制回路的时间常数。

式(16)的解具有下列形式

$$E_2 = U_1 k_u (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) \quad (17)$$

这样,从式(17)可知,电机放大机输出端电压是随着时间常数 T_1 ,按指数关系而增加的(图3)。

因为这一类电机放大机的磁路不饱和,便可在调节系统中采用强行激磁,这样,电机放大机可有较大的电压过载能力,从而使自动调节系统的快速动作得到显著的改善。

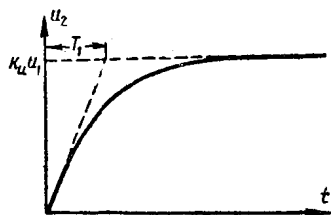


图3 他激电机放大机空载电压增长曲线

由于他激电机放大机不能得到较大的放大系数,所以在调节系统中很少应用。

2. 自激电机放大机

为了增大他激电机放大机的放大系数,可以增加一个自

① 原文为 $\frac{L_1}{r_1}$ 。——校注

激繞組。这种自激电机放大机在国外称为“轉控机”(Rototrol)。在結構上和他激电机放大机完全相同。

自激繞組可与电机的电樞繞組并联(图 4 a) 或串联(图 4 б) 连接。

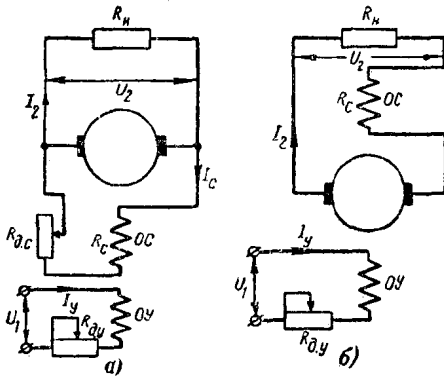


图 4 自激电机放大机的原理图

a—并联自激电机放大器; б—串联自激电机放大器

激磁繞組的这种連接方法广泛地在直流电机中应用, 如并联連接应用于并激电机, 串联連接应用于串激电机。但是, 在这些电机中必須調整激磁繞組, 以使剩磁电压保証供給电机所需的自激。

不同的是, 电机放大器自激繞組則被調整成当他激控制繞組(图 5) 上沒有訊号时, 电机不自激, 但却接近于临界自激。

图 5 为电机放大机的空載特性曲綫, 而直綫 1 是当他激控制回路电流 $I_y = 0$ 时, 在自激回路上的电压降 $I_c R_c$ (R_c ——自激回路电阻, I_c ——这回路的电流)。如果这条直綫不与空載特性曲綫相交, 則电机放大器就不自激。当电流通过他

激控制繞組时,在电机放大机电刷上出現电压 e_1 , 自激回路中有电流流过,而电机放大机被激磁到图5中空載特性曲綫与直綫 I' 的交点所示的电压,直綫 I' 系代表当他激控制回路电流为 I'_y 时,在換算自激回路中的电压降 $I_c R'_c$, 其中 $R'_c = R_c \frac{w_y}{w_c}$ 为換算到控制繞組側的自激回路电阻。在图5中,这一交点用 a 表示。

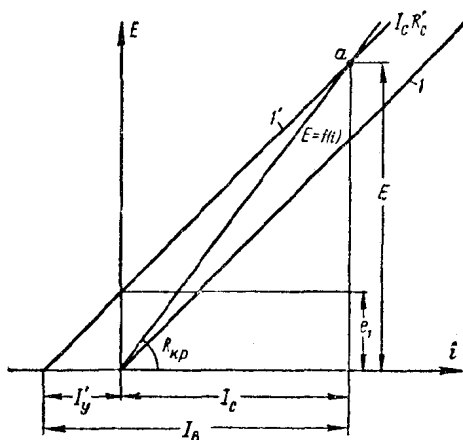


图5 自激电机放大机空載特性曲綫

电机放大机的合成激磁电流为

$$I_B = I'_y + I_c \quad (18)$$

式中 $I'_y = \frac{w_y}{w_c} I_y$ I_y ——換算到自激繞組側的控制电流;

w_y ——控制繞組匝数;

w_c ——自激繞組匝数。

为了提高品质因数,自激电机放大机通常是不飽和的。

分析图5, 可从简单的几何关系得到下列自激电机放大

机的空载电动势值

$$E = k_1 \frac{R_c}{R_c - k_1} i_y \quad (19)$$

式中, $k_1 = \frac{E}{i_n}$ 为电动势与激磁电流的比例系数, 它同样也代表由空载特性曲线直线部分斜率所决定的电机放大机极限电阻(临界激磁) ($k_1 = R_{kp}$)。

当自激回路电阻等于 R_{kp} ($R_c = R_{kp}$) 时, 电动势趋向于无限大。

串联自激电机放大机也能得到类似关系。

比较他激电机放大机与自激电机放大机的放大系数, 并略去电枢电压降, 可得

$$k_{ye} \approx m k_y \quad (20)$$

式中

$$m = \frac{R_c}{R_y - k_1} \quad (21)$$

系数 m 也就是总激磁磁势与控制绕组磁势之比。

这样, 自激电机放大机的放大系数能比他激电机放大机大得多。

现在来研究并联自激电机放大机(参阅图 4 a) 当控制绕组上输入信号时, 空载电压增长的过渡过程。

设控制及自激绕组上流过电流 $i_B = i_y + i_c$, 则当这些绕组之间没有漏磁时, 可以写出运算符形式的方程式

$$U_1 = R_y i_y + L_y p i_B \quad (22)$$

$$E = k_u U_1 = R_c i_c + L_c p i_B \quad (23)$$

同时解这些方程式, 得

① 原文为 $U_1 = r_y i_y + L_y p i_B$ 。——校注

② 原文为 $E = k_u U_1 = r_c i_c + L_c p i_B$ 。——校注

$$E = U_1 k_u (1 - e^{-\frac{t}{T_0}}) \quad (24)$$

式中

$$T_0 = m(T_y + T_c) \quad (25)$$

式中, $T_y = \frac{L_y}{R_y}$ ①; $T_c = \frac{L_c}{R_c}$ ② 为控制及自激回路的时间常数。

当分析串联自激电机放大机(参阅图 46)时,也能得到与此相仿的关系。

比较自激电机放大机与他激电机放大机时很容易看出,自激电机放大机的快速动作要比他激电机放大机差得多。因此,自激电机放大机适用于对快速动作要求不高的自动调节系统中。

3. 双机放大机

为了增加放大效应,将两台他激电机放大机串接起来,使其中的一台成为另一台的激磁机(图 6),于是放大系数为

$$k_y = k_{y1} k_{y2} \quad (26)$$

式中 k_{y1} ——第一台他激电机放大机的放大系数;

k_{y2} ——第二台他激电机放大机的放大系数。

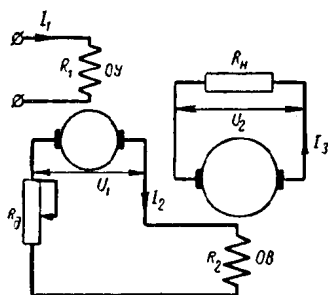


图 6 双机电机放大机原理图

① 原文为 $T_y = \frac{L_y}{r_y}$ 。——校注

② 原文为 $T_c = \frac{L_c}{r_c}$ 。——校注

当第一台他激电机放大机的激磁绕组上施加讯号并为不饱和时, 第二台他激电机放大机输出端的空载电压增长过渡过程可写成

$$U_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (27)$$

$$E_2 = k_1 \dot{i}_1 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (28)$$

$$E_3 = k_2 \dot{i}_2 = k_u U_1 \quad (29)$$

式中, k_1 、 k_2 为决定电机参数的系数 (第一及第二台电机空载特性曲线直线部分的斜率), 或者用运算子形式

$$U_1 = i_1 (R_1 + L_1 p) \quad (30)$$

$$E_2 = k_1 \dot{i}_1 = i_2 (R_2 + L_2 p) \quad (31)$$

$$\text{式} \quad E_3 = \frac{k_u U_1}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)} \quad (32)$$

的解为

$$E_3 = k_u U_1 \left[1 + \frac{1}{T_2 - T_1} (T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 e^{-\frac{t}{T_2}}) \right] \quad (33)$$

式中, $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$ 、 $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$ 为第一及第二台电机激磁回路的时间常数。

按双指数曲线关系变化, 电压增长过程是非周期性的 (图 7)。

为了简化计算, 通常用时间常数 $T_1 + T_2$ 的指数曲线 (图 7 中用虚线表示的曲线) 来代替双指数曲线。

双机放大机的快速动作主要决定于连接有功率最大的输出级激磁绕组回路的时间常数, 因为它具有最大的电感。实际上, 电机的主磁通正好与此绕组形成磁链。

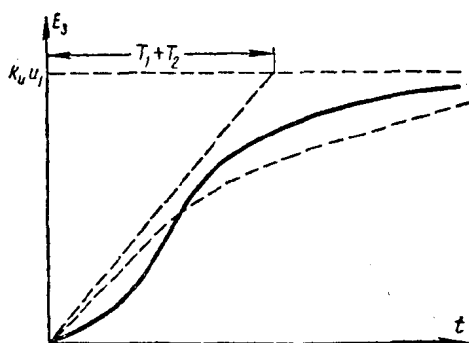


图7 双机电机放大机空载电压增长曲线

由于每一级放大机都是独立的电机，所以每台发电机可以选择对自身最合理的参数。

两台发电机可以合装在一个机壳内。这种单机座双机机组的外形尺寸将决定于输出级发电机，后者的功率要比第一级发电机大得多。

输出级发电机可以按有效材料的最高利用效率来设计，这时，发电机的外形尺寸较小，但作为放大机的性能则并不好。

第一级发电机可以设计成与第二级发电机有相同的直径。这时，第一级发电机的有效材料利用效率很低，结果如前所述，它作为放大机将具有较高的指标。这种双机放大机的总放大系数可以达到相当大(1000~10,000)。这类电机放大机亦称“快速机”(Rapidyn)。

为了消除涡流的有害影响和减少磁极与定子轭铁的磁滞，在快速机中，磁极与定子轭铁是用电工钢片迭装而成的。第二级发电机装有补偿绕组，用以改善第二级放大性能和取得所要求的外特性斜率。为了改善换向条件，在输出级发电