

高等学校交流讲义

# 电力拖动自动控制

下 册

南京工学院工业企业电气化自动化教研组 合编  
华中工学院工业企业电气化自动化教研室

只限学校内部使用



中国工业出版社

本書內容包括控制电器的基本理論和性能，繼电器、接触器、电机放大机、磁放大器及电子离子器械的基本作用原理及其在电力拖动自动控制中的应用。

本書由于取材較广，不但可做为高等学校工业企业电气化自动化专业的教科書，亦可供高等学校动力类其他专业以及有关工程技术人员参考。

## 电力拖动自动控制

下 册

南京工学院工业企业电气化自动化教研组 合編  
华中工学院工业企业电气化自动化教研室

\*

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业許可証出字第110号）

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店經售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$  · 印张  $17 \frac{1}{4}$  · 字数 411,000

1961年10月北京第一版·1961年10月北京第一次印刷

印数 0,001—4,337 · 定价（10—6）2.05 元

統一書号：15165·891《\*电-127》

# 下 册 目 录

## 第三篇 电机放大机及其电力拖动 自动控制

|             |                                                                           |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>第十一章</b> | 交磁电机放大机的工作原理<br>和工作特性 .....                                               | 197 |
| §11—1       | 电机放大机的工作原理和工作特<br>点 .....                                                 | 197 |
| §11—2       | 交磁电机放大机的理想空载特性 .....                                                      | 200 |
| §11—3       | 换向电流及转子中的铁损（交轴<br>磁通在电枢中引起的涡流和转子<br>齿尖中的磁滞）的去磁作用对交<br>磁电机放大机空载特性的影响 ..... | 201 |
| §11—4       | 交磁电机放大机的负载特性（外<br>特性） .....                                               | 203 |
| <b>第十二章</b> | 带电机放大机自动控制系统<br>的静态特性 .....                                               | 204 |
| §12—1       | 概述 .....                                                                  | 204 |
| §12—2       | 带电压、电流反馈系统的工作原<br>理和静态特性 .....                                            | 206 |
| §12—3       | 由电机放大机组成的低电阻电桥<br>自动调速系统的工作原理和静态<br>特性的分析计算 .....                         | 219 |
| §12—4       | 带速度负反馈自动调速系统的工<br>作原理和静态特性的分析计算 .....                                     | 226 |
| §12—5       | 由电压、电流反馈组成的相互截<br>止自动控制系统的工作原理和静<br>态特性的分析计算 .....                        | 228 |
| <b>第十三章</b> | 带电机放大机自动控制系统<br>中的过渡过程 .....                                              | 234 |
| §13—1       | 最佳过渡过程概念 .....                                                            | 234 |
| §13—2       | 电机放大机控制系统过渡过程近<br>似算法 .....                                               | 240 |
| §13—3       | 保证过渡过程接近最佳过渡过程<br>的一些原则 .....                                             | 247 |
| §13—4       | 用运算微积分法求解电机放大机控                                                           |     |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 制系统的过渡过程 .....         | 248 |
| §13—5 电机放大机的传递函数 ..... | 262 |

## 第四篇 磁放大器及其电力拖动自 动控制

|             |                                        |     |
|-------------|----------------------------------------|-----|
| <b>第十四章</b> | 磁放大器 .....                             | 273 |
| §14—1       | 磁放大器交直流同时磁化的现象 .....                   | 273 |
| §14—2       | 单拍不带反馈理想磁放大器的工<br>作原理和基本性能 .....       | 277 |
| §14—3       | 磁放大器的过渡过程 .....                        | 286 |
| §14—4       | 线性磁放大器的基本性能 .....                      | 291 |
| §14—5       | 带电流正反馈的磁放大器 .....                      | 294 |
| §14—6       | 磁放大器设计 .....                           | 300 |
| <b>第十五章</b> | 磁放大器在直流电力拖动系<br>统中的应用 .....            | 312 |
| §15—1       | 单拍磁放大器在直流电力拖动系<br>统中的应用 .....          | 313 |
| §15—2       | 双拍磁放大器 .....                           | 319 |
| <b>第十六章</b> | 饱和电抗器控制异步电动机<br>的交流电力拖动系统 .....        | 325 |
| §16—1       | 饱和电抗器控制异步电动机电力<br>拖动系统的工作原理和特性分析 ..... | 325 |
| §16—2       | 饱和电抗器和异步电动机计算 .....                    | 333 |
| §16—3       | 饱和电抗器控制异步电动机可反<br>向电力拖动系统 .....        | 336 |
| §16—4       | 饱和电抗器控制异步电动机电力<br>拖动系统的能量指标和应用 .....   | 340 |
| <b>第十七章</b> | 快速磁放大器 .....                           | 343 |
| §17—1       | 快速磁放大器的基本概念 .....                      | 343 |
| §17—2       | 快速磁放大器的工作原理和特性 .....                   | 344 |
| §17—3       | 非矩形磁滞回线铁芯材料的快速<br>磁放大器 .....           | 351 |
| §17—4       | 快速磁放大器的线路 .....                        | 353 |
| §17—5       | 快速磁放大器用作磁性无触点通<br>断元件 .....            | 355 |

## 第五篇 电子-离子电力拖动自动控制

|             |                       |     |
|-------------|-----------------------|-----|
| <b>第十八章</b> | 水银整流器的基本概念 .....      | 361 |
| §18-1       | 水银整流器的作用原理及物理特性 ..... | 361 |
| §18-2       | 水银整流器的种类、构造和型号 .....  | 365 |
| <b>第十九章</b> | 不可逆离子电力拖动 .....       | 370 |
| §19-1       | 可控水银整流器的外特性 .....     | 370 |
| §19-2       | 主变压器 .....            | 379 |
| §19-3       | 阴极电抗器 .....           | 392 |
| §19-4       | 功率因数和效率 .....         | 395 |
| <b>第二十章</b> | 可逆离子电力拖动 .....        | 397 |
| §20-1       | 逆流器的输入特性 .....        | 397 |
| §20-2       | 可逆离子拖动的种类及其工作原理 ..... | 402 |

|              |                          |     |
|--------------|--------------------------|-----|
| <b>第二十一章</b> | 栅控系统 .....               | 407 |
| §21-1        | 概述 .....                 | 407 |
| §21-2        | 栅控系统的供电 .....            | 408 |
| §21-3        | 移相器 .....                | 422 |
| §21-4        | 综合放大 .....               | 438 |
| §21-5        | 半波磁放大器栅控 .....           | 435 |
| <b>第二十二章</b> | 离子拖动系统的应用线路及静态特性计算 ..... | 443 |
| §22-1        | 小功率的离子拖动线路 .....         | 443 |
| §22-2        | 中大功率的离子拖动系统举例 .....      | 445 |
| §22-3        | 静态速度特性计算 .....           | 456 |
| <b>第二十三章</b> | 整流器串级系统和离子变频器 .....      | 461 |
| §23-1        | 整流器串级系统 .....            | 461 |
| §23-2        | 离子变频装置 .....             | 462 |

## 第三篇 电机放大机及其电力拖动自动控制

放大器是自动控制系统中主要的调节和控制元件，在电力拖动自动控制系统中常用的放大器有：电机放大器、磁放大器、电子-离子及半导体放大器等。就电力拖动系统对放大器的几个主要要求：放大系数、时间常数、输出功率、工作可靠性和控制的灵活性等看来，电机放大机一般都是能够满足的，因而在各种电力拖动装置中，它得到了广泛的应用。

实际上采用的电机放大机有交磁的和自激的两种，后一种电机放大机的性能较差（放大系数小，时间常数大），目前已很少采用。在本篇中只分析交磁电机放大机以及由它组成的几种典型的自动控制系统。

本篇共分三章，第十一章中有关电机放大机的工作原理和工作特性等内容，有些在电机学中讲授过，可以根据具体情况予以删减。但电机放大机中各种内反馈形成的原因及其对电机放大机工作特性的影响等有关内容，在处理带电机放大机控制系统的静态和动态特性的计算时都很重要，因此对这些内容仍应着重讲述。

第十二章中阐述几种常用反馈的作用和几种常见的带电机放大机控制系统的工作原理及其静特性的计算方法等问题。它们是学习本课程以后各篇及有关后续课程时所必须具备的基础知识，因而应着重讲解。

第十三章中关于用运算微积分求解带电机放大机控制系统过渡过程及电机放大机传递函数两方面内容，是处理带电机放大机控制系统所应具备的基本知识，建议着重讲解，在时间许可及其他课程未曾提及的情况下，可以讲述有关最佳过渡过程的概念以及由此得出的组成控制系统的一般原则。

### 第十一章 交磁电机放大机的工作 原理和工作特性

#### §11-1 电机放大机的工作原理和工作特点

电机放大机是一种特殊结构的直流发电机，交磁电机放大机的结构和工作原理基本上都与两极他激直流发电机是相同的，因而在说明交磁电机放大机的工作原理和工作特点之前，要简单的说明一下两极他激直流发电机的工作情况。

图 11-1 为一两极直流他激发电机的工作原理图。当激磁绕组中流过电流  $i_m$  时，在电枢存在的空间便产生磁通  $\phi_m$ ，电枢以一定的速度（旋转方向如图示）转动时，各电枢导体便和这个磁通相切割，结果其中就要产生感应电势，各导体中的感应电势的方向如图中的点叉表示的那样，在 AB 两电刷间测得的电压为一电枢路径中各导体的感应电势之和。当把这两个电刷经负载  $R_H$  接通时，各电枢导体中就要流过电流  $I_a$ ，于是在电枢存在的空间就又产生一个方向不变大小与  $I_a$  成比例的磁通  $\phi_a$ ，它的方向象图中箭头指示的那样，这也就是通常所指的电枢反应磁通，电机学中曾经说明它恶化了直流发电机的工作情况，

但由于它的方向在空间保持不变，这就有使直流发电机进行第二次激励的可能。交磁电机放大机就是在这个基础上建立起来的。

由于磁通 $\phi_f$ 的方向不变，在电枢转动的过程中各电枢导体亦同样要和它相切割，因而其中又要产生一个与 $\phi_f$ 有关的电势，这个电势的方向，如图11-2中圆圈里层的点叉表示的那样。

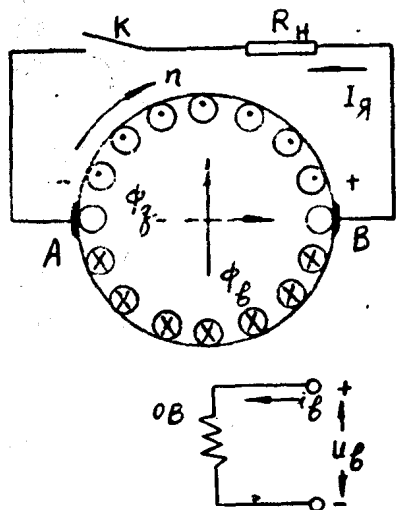


图 11-1 两极直流他激发电机的工作原理图

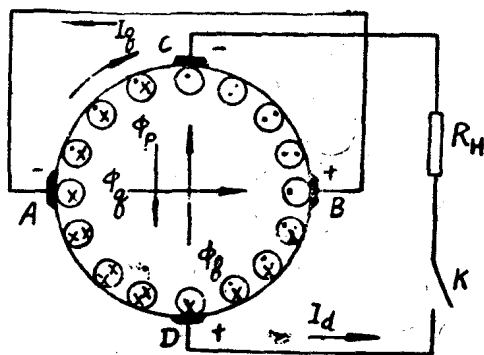


图 11-2 由 $\phi_f$ 产生的电势方向

在主磁极的轴线上再装一对电刷 $CD$ ，由这两个电刷上测得的电压即是磁通 $\phi_f$ 在电枢回路各导体中感应电势之和，这个电压就是交磁放大机的电枢电压。

由于电枢导体同时和 $\phi_B$ ，及 $\phi_f$ 两个磁通切割，因而在大部分电枢导体都产生有两个感应电势，这两种电势的极性在一些导体中是相同的，在另一些导体中则相反（参看图11-2）。虽然在大部分导体中同时存在有两个感应电势，但是在 $AB$ 两电刷间测得的电压则大小仅决定于磁通 $\phi_B$ ，而与磁通 $\phi_f$ 无关，因为各电枢导体中由 $\phi_f$ 引起的感应电势在这两个电刷间互相抵消了，同样在 $CD$ 两电刷间测得的电压则是仅决定于 $\phi_f$ ，而与 $\phi_B$ 无关。

由以上的分析看出，在电机放大机以恒速旋转的情况下，它的电枢电压 $u_d$ 与 $\phi_f$ 成比例， $\phi_f$ 与 $I_f$ 成比例。在交磁放大机中 $AB$ 两电刷是被短接的，因此可以认为这个回路中的电阻是恒定不变的（实际上电刷的接触电阻是在一定范围变动的）。这样 $I_f$ 就与 $E_f$ 成比例，而 $E_f$ 又与 $\phi_B$ 及 $i_B$ 成比例。因而改变 $i_B$ 的大小就能控制电枢电压 $u_d$ 的高低。

由以上的分析看出，就工作情况看来，交磁电机放大机相当于两个串联工作的他激直流发电机，激磁绕组和电刷 $AB$ 间的电枢回路为第一级发电机，这一级发电机是在短路状态下工作，它只要产生一个较小的电势，就能产生一个较大的电流，同时由于主磁路中的磁阻小（气隙小，磁性材料好）。因而第一级需要的激磁安匝是很小的。这是交磁放大机的放大作用（输出量与输入量之比）大的原因之一。第一级发电机的电枢回路也就是第二级发电机的激磁回路。第二级发电机是由这个激磁回路与 $CD$ 两电刷间的电枢回路组成的。这一级发电机的激磁回路和电枢回路间不仅有磁的联系，而且有电的联系。这种关系说明，在电枢导体中同时要流过两种电流。由于各电枢导体中两种感应电势的极性不完全

相同，它们的电流密度也是不一样的。电枢在旋转的过程中各电枢导体的位置相互交替，因而在整个工作期间所有电枢导体的发热情况基本上还是一样的。

交磁电机放大机的工作情况可用图 11-3 中的等值线路来说明，交磁电机放大机既是两级串联工作的，那么它的放大系数（功率的和电压的）应是两级合成的，虽然由于两级间存在有负反馈作用，使得总的放大系数不是等于两级放大系数的乘积，但总比一级的大得多，这是交磁放大机放大作用大的又一个原因。由于上面两种原因的存在，就使交磁放大机的放大作用比普通直流发电机大得多了。例如，直流发电机的功率放大系数（输出功率与激磁功率之比）在 20 到 100 之间，交磁放大机的功率放大系数在 10,000 左右，个别情况下可达 100,000。

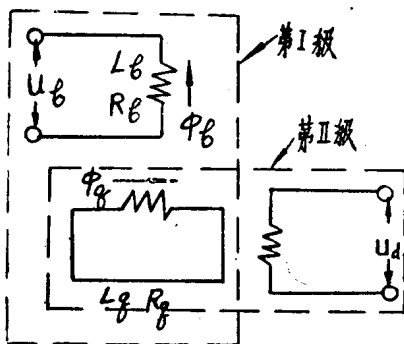


图 11-3 交磁电机放大机的等值线路图

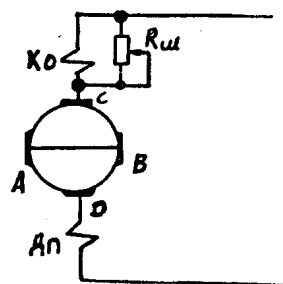


图 11-4 交磁放大机的接线原理图

电枢电流  $I_a$  流过电枢绕组时又产生一个磁通  $\phi_P$ ，它的大小与电流  $I_a$  成比例，它的方向恰和基本磁通  $\phi_b$  相反，因而  $\phi_P$  是起去磁作用，它就是交磁放大机中的电枢反应磁通，由于基本磁通  $\phi_b$  很小，一般  $\phi_P$  比  $\phi_b$  要大得多（例如  $Z_{KK}-50$  型放大机的额定激磁安匝  $A\omega_b=50$  安匝，电枢反应安匝  $A\omega_P=1950$  安匝，后者比前者几乎大四十倍之多）。这样电枢反应对放大机工作的影响就显得特别严重。在没有消除或减少这种影响的情况下，放大机就不能带负载工作。因而在交磁放大机中都装有补偿绕组  $K_o$ ，这个绕组是串联在电枢回路中（图 11-4）。在这个绕组两端还并联了一个可变电阻（ $R_m$ ），用以按照不同工作情况的要求改变放大机的补偿程度。

另外在直轴方向还装有一对整流极  $\Pi\Pi$  来改善  $CD$  电刷下面的整流情况，它的绕组也是串联在电枢回路中（图 11-4）。

交轴回路中的电流比直轴（电枢）回路中的小 [通常  $I_{qH} = (\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}) I_{dH}$ ]， $AB$  电刷下面的整流情况不像  $CD$  电刷下面那样严重，因而我国生产的放大机中在交轴方向都未装整流极。一般是采用移动电刷的方法，来改善电刷（ $AB$ ）下面的整流情况。

由于放大机激磁功率小，因而在主磁极上就有比较富裕的空间，使可能多绕几个激磁绕组（一般为两个到四个）。各激磁绕组的额定输入功率是一样的，而额定输入电压和电流则往往不相同，这样就可以适应各种工作情况对不同放大系数的要求。另外激磁绕组的最大允许电流通常比其额定输入电流要大五倍到八倍之多，这样当放大机在自动控制系统中工作时就有可能实现各种反馈和强行励磁的作用。

## §11-2 交磁电机放大机的理想空载特性

在略去交轴电刷整流电流的去磁作用和交轴磁通在电枢中引起的铁损的去磁作用的情况下, 根据电机学中求得的磁势和磁通以及磁通和电势之间的关系, 可以推导出电机放大机的理想空载特性的表达式, 即电枢电势与输入的激磁安匝之间的关系式:

$$E_q = \frac{N}{60} \Pi \Phi_0 10^{-8} = \frac{0.4\pi}{60} G_d N \Pi 10^{-8}; \quad \omega_y = C_q i_b \omega_y. \quad (11-1)$$

· 又知  $I_q = E_q / R_q = \frac{C_q}{R_q} i_b \omega_y. \quad (11-2)$

式中  $C_q = \frac{0.4\pi}{60} N \Pi G_d 10^{-8}$ ;  $E_q = f(i_b \omega_y)$  特性曲线的斜率;

$R_q$ ——交轴回路中的总电阻 (包括电枢绕组的电阻, 短接线的电阻和电刷的接触电阻)。

根据上面的关系可写出:

$$E_{d0} = C_1 \Pi^2 i_b \omega_y. \quad (11-3)$$

式中  $C_1 = \frac{0.1\pi k 10^{-16}}{60} \frac{1}{R_q} N^3 G_d G_q$ , 在磁路不饱和的情况下  $G_d$  和  $G_q$  都是常数, 因而系数  $C_1$  也是一个常数。

$k$ ——绕组系数。

(11-3) 式为电机放大机的理想空载特性的表达式, 按照这个式子可以看出下面几个关系:

1. 在磁路未饱和的情况下 ( $C_1 = \text{常数}$ ), 空载电势的大小与激磁磁势 ( $i_b \omega_y$ ) 成正比, 它的极性随着  $i_b$  流过激磁绕组的方向的变化而改变。
2. 在激磁电流 ( $i_b$ ) 的方向不变的情况下空载电势的极性与电枢的旋转方向无关, 因为电势 ( $E_d$ ) 和转速的平方 ( $\Pi^2$ ) 成比例。

在工作过程中可以认为转速  $n$  是固定不变的, 因而可令  $C_y = C_1 n^2 = \text{常数}$ , 这样就可以把 (11-3) 式改写为:

$$E_{d0} = C_y i_b \omega_y. \quad (11-4)$$

式中  $C_y = \frac{0.1\pi k 10^{-16}}{60^2} \frac{N^3}{R_q} G_d G_q n^2$ ——电机放大机的安匝放大系数。

安匝放大系数是表明放大机工作性能的主要指标之一, 由上式看出它与下列因素有关:

1)  $C_y$  和  $G_d$  及  $G_q$  成正比, 为了加大放大系数  $C_y$  电机放大机中的磁导就作得比普通直流发电机中的大一些, 因而电机放大机在结构上就与普通直流发电机有下面几点区别:

i) 电机放大机的磁路用较好的磁性材料制作或是用普通磁性材料制作, 而加大磁路的截面积。这样电机放大机的重量要比同容量的直流发电机大 25~30%;

ii) 电机放大机的转子和定子间的空气隙比普通直流发电机的小, 与感应电动机的气隙

差不多。另外为加大交轴方向的磁导主磁极的极弧作得比直流发电机的宽，一般在 $150^\circ$ 左右，直流发电机的在 $90^\circ \sim 100^\circ$ 之间。这样对电机放大机的制造精度，装配质量以及运行条件都要求得比直流发电机严格一些。这也是电机放大机成本比直流发电机大的原因。

2)  $C_y$  与  $N^3$  成正比，但在电机尺寸不变的情况下  $R_g$  又与  $N^2$  成正比，实际上  $C_y$  与  $N$  之间只是保持一个一次方的关系。要是增多  $N$  来提高放大系数  $C_y$  的话，那末电枢绕组的电阻和电流密度也都随着增大。因而实际上就不用这种方法提高放大系数，所以放大机的电枢和两极直流发电机的电枢基本上是相同的。

3)  $C_y$  与  $n^2$  成正比，提高  $n$  时可使  $C_y$  成倍的增加，所以放大机的转速一般都比较高（ $1500 \sim 3000$  转/分）。如转速太高机械强度就得相应的加大。另外整流要更为困难。整流电流和铁损的去磁作用也随之增大，结果使  $C_y$  不能随着  $n^2$  成倍的增大，由下一节的分析可以看出实际上  $C_y$  与转速  $n$  之间并不是一个平方关系，而且当转速  $n$  超过某一数值后， $C_y$  基本上是不变的。

(11-2)和(11-3)式所指示的关系绘在图(11-5)中。应当指出，即使是  $G_d$  和  $G_g$  均为常数，在运行过程中  $C_y$  也要随着交轴回路中的电阻（特别是接触电阻）及补偿程度的变化而改变，例如在工作温度变化的范围内， $C_y$  的数值就能变化  $25 \sim 30\%$  之多。在处理实际问题时，这些因素的影响是应当考虑的。

### §11-3 换向电流及转子中的铁损（交轴磁通在电枢中引起的涡流和转子齿尖中的磁滞）的去磁作用对交磁电机放大机空载特性的影响

由于交轴方向没装正流极，交轴电刷的正流是属于滞后性质的。如同在普通直流发电机中那样，滞后的正流电流要产生一个和基本磁势相反的去磁安匝。另外电枢在旋转过程中它的铁芯要和交轴磁通相切割和被交轴磁势反复的磁化，铁心和交轴磁通相切割而引起的涡流及转子齿尖被交轴磁势反复磁化时出现的磁滞现象都将产生一种与基本磁势相反的去磁安匝。考虑到这些去磁作用，放大机的实际空载特性就与理想的大不相同。在这种情况下在直轴方向就有三个磁势（参看图 11-6），总的合成磁势如下：

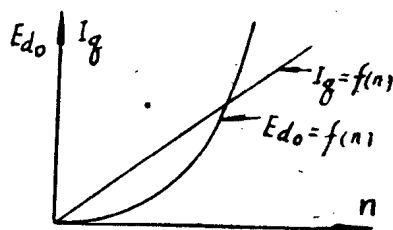


图 11-5 交磁电机放大器的理想空载特性曲线

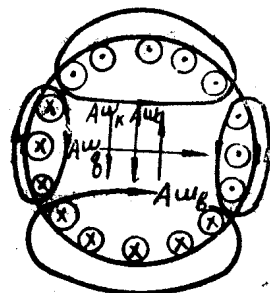


图 11-6 交磁放大机产生的磁势

$$A\omega_d = A\omega_B - A\omega_g - A\omega_a \quad (11-5)$$

式中  $A\omega_B$ ——基本激磁安匝；  
 $A\omega_g$ ——交轴换向电流的去磁安匝；

$A\omega$ ——轉子中鉄錐的等值去磁安匝。

由电机放大机的設計資料查得:

$$A\omega \equiv nI_q \text{ 或 } A\omega_k = k_1 nI_q. \quad (11-6)$$

$$\therefore A\omega_k \equiv (e_a + e_s).$$

$$e_a \equiv nI_q; e_s \equiv nI_q.$$

式中  $e_a$ ——換向元件中的旋轉電勢;

$e_s$ ——換向元件中的自感電勢。

$$\text{又} \quad A\omega \equiv n^{0.3} \frac{I_q}{\delta} \text{ 或 } A\omega_s = k_2 n^{0.3} \frac{I_q}{\delta}. \quad (11-7)$$

式中  $\delta$ ——轉子與定子間的气隙長度。

$$I_q \equiv E_q \equiv \frac{A\omega_d}{\delta} n.$$

$$\text{則} \quad A\omega_d \equiv I_q \frac{\delta}{n} \text{ 或 } A\omega_d = k_3 \frac{\delta}{n} I_q. \quad (11-8)$$

將 (11-6), (11-7) 和 (11-8) 代入 (11-5) 式得:

$$A\omega_B - k_1 nI_q - k_2 n^{0.3} \frac{I_q}{\delta} = k_3 \frac{\delta}{n} I_q.$$

將上式整理求得交軸電流的表达式:

$$I_q = \frac{A\omega_B}{k_1 n + k_2 n^{0.3} \frac{1}{\delta} + k_3 \frac{\delta}{n}} = \frac{A\omega_B n}{k_1 n^2 + k_2 \frac{1}{\delta} n^{1.3} + k_3 \delta} \quad (11-9)$$

上式表明,  $I_q$  和  $n$  之間已經不是一次方的關係了, 當  $n=0$  時,  $I_q=0$ ; 當  $n=\infty$  時,  $I_q=0$ . 這就是說在  $n$  由  $0 \rightarrow \infty$  的增長過程中  $I_q$  先是隨着增加, 到某一最大值后就逐漸減小一直到零。這也說明當轉速超過某一數值後放大系數就不會增加了。

$$\text{又知,} \quad E_d \equiv A\omega_d n = k_4 I_q n. \quad (11-10)$$

把 (11-9) 的關係代入 (11-10) 式得:

$$E_d = k_4 \frac{A\omega_B n^2}{k_1 n^2 + k_2 \frac{1}{\delta} n^{1.3} + k_3 \delta}. \quad (11-11)$$

由上式得實際的安匝放大系數

$$C'_y = k_4 \frac{n^2}{k_1 n^2 + k_2 \frac{1}{\delta} n^{1.3} + k_3 \delta}.$$

這也說明放大系數和轉速間也不再是個平方關係了, 當  $n=0$  時,  $E_d=0$ ;  $n=\infty$  時  $E_d=k_4 A\omega_B/k_1$ , 即當轉速達到某一值後  $E_d$  就不再隨轉速的升高而增加了。

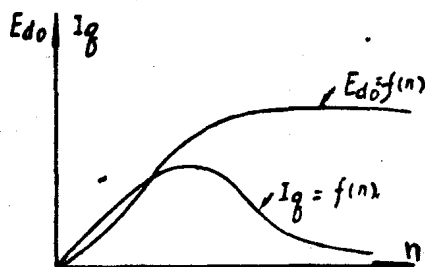


圖 11-7 交磁放大機的实际空載特性

(11—10) 和 (11—11) 表示的关系繪在图 (11—7) 中, 由图中的曲綫看出, 这种去磁作用对放大机的放大系数的影响是很大的, 因而在处理实际问题时必须考虑。

在实际工作中, 放大机的轉速是要发生一定变化的 (一般为 10~15%); 这个变化的百分值虽不大, 但如放大系数和轉速是平方关系的话, 那末这样的轉速变化值对放大系数的影响将是很大的。由上述可知, 去磁作用減小了放大系数和轉速間的比例系数。这样轉速变化对放大系数的影响也相应的減小了, 結果使放大系数在工作过程中更为稳定, 因此从这一方面看, 去磁作用的影响是有利的。

#### §11-4 交磁电机放大机的負載特性 (外特性)

交磁电机放大机的負載特性, 即在外加激磁安匝和轉速保持不变的情况下, 电樞端电压  $u_d$  和电樞电流  $I_d$  之間的关系。这是放大机的重要特性之一。由于直軸电樞反应的去磁作用很大, 因而补偿程度对放大机外特性的影响就很严重。本节分析的目的, 在于确定外特性与补偿程度間的具体关系以及如何根据实际需要确定必要的补偿程度。

由上节的分析知道: 在空載情况下, 直軸方向的合成安匝为  $A\omega_d$ 。有負載时, 除去这个安匝外, 还有一个电樞反应的去磁安匝 ( $I_d\omega_a - I_a\omega_k$ )。这时总的合成安匝为:

$$A\omega_{\Sigma} = A\omega_d - I_a\omega_a + I_a\omega_k. \quad (11-12)$$

式中  $\omega_a = \frac{N}{4}$  ——电樞繞組的等值匝数;

$\omega_k$  ——补偿繞組的等值匝数。

放大机有負載时的电势为:

$$E_{d0} = C_y A\omega_{\Sigma} = C_y A\omega_d - C_y I_a(\omega_a - \omega_k) = E_{d0} - I_a C_y(\omega_a - \omega_k). \quad (11-13)$$

端电压为电势和电樞压降之差, 即

$$u_d = E_d - I_a R_d. \quad (11-14)$$

式中  $R_d$  ——直軸回路中的总电阻 (包括电樞繞組, 补偿繞組, 附加极繞組和电刷接触电阻)。

把 (11-13) 代入 (11-14) 得:

$$u_d = E_{d0} - I_a [C_y(\omega_a - \omega_k) + R_{\Sigma}]$$

令  $\xi = C_y(\omega_a - \omega_k)$

$$u_d = E_{d0} - I_a (R_{\Sigma} + \xi). \quad (11-15)$$

式中  $\xi$  ——补偿系数, 它的符号的正負表示补偿程度的性质 (过补偿和欠补偿), 它的数值表示补偿程度的大小。

由 (11-15) 式看出, 补偿程度对端电压的影响相应于改变电樞回路中的电阻, 因此补偿系数就起着等效电阻的作用。这个电阻的数值和符号都是随着  $\omega_a$  和  $\omega_k$  間的相对关系而变化的。 $\omega_a$  固定不变,  $\omega_k$  是随着并联电阻的变化而改变, 因而改变与补偿繞組相并联的电阻的数值, 就可以改变外特性曲綫的形状, 下面分析外特性曲綫的形状随补偿系数  $\xi$  的变化关系。

1)  $\xi > 0$ , 即  $\omega_a > \omega_k$  电枢反应磁势大于补偿绕组的磁势, 此为欠补偿情况,  $\xi$  为正值, 其作用相当于把电枢内电阻加大, 使端电压随着电枢电流的增加更快的下降, 外特性曲线向下倾斜得更厉害。

2)  $\xi = 0$ , 即  $\omega_a = \omega_k$  电枢反应磁势和补偿绕组的磁势相等, 此为叠补偿情况, 电枢反应对外特性没有影响, 此时外特性曲线下降的倾斜度比第一种情况小。

3)  $\xi < 0$ , 即  $\omega_a < \omega_k$  补偿绕组磁势大于电枢反应磁势, 此为过补偿情况, 此时外特性曲线具有三种形状:

i)  $|\xi| < R_{ar}$ , 即  $(R_{ar} + \varphi) > 0$ , 外特性曲线仍然下降但比第 2) 种情况的硬;

ii)  $|\xi| = R_{ar}$ , 即  $(R_{ar} + \varphi) = 0$  外特性为一水平直线。端电压  $u_d$  永远等于电动势  $E_d$ ;

iii)  $|\xi| > R_{ar}$ , 即  $(R_{ar} + \varphi) < 0$ , 外特性曲线向上倾斜, 端电压随电枢电流的增加而上升。这时放大机的工作情况与串联自激发电机相同。如电枢回路的电阻小于临界电阻时, 放大机就要发生自激现象。以致失去应有的可控性能, 在调整放大机时一定要避免这种现象的产生。产生自激现象的补偿系数称为临界补偿系数用  $\xi_{kp}$  表示。和上面几种补偿情况相应的外特性曲线绘在图 11-8 中。

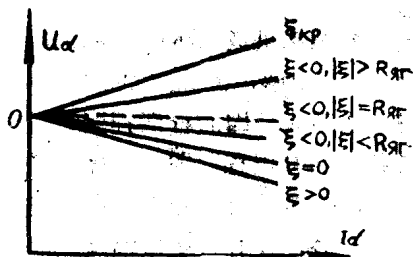


图 11-8 交磁放大机过补偿时的外特性曲线

下面分析一下临界补偿系数与电枢电阻及负载电阻的关系:

用  $I_a = \frac{u_d}{R_H}$  代入(11-15)式得:

$$u_d = \frac{E_{d0} R_H}{R_H + R_{ar} + \xi} \quad (11-16)$$

式中  $R_H$ ——负载电阻。

由(11-16)式的关系看出, 当  $R_H + R_{ar} + \xi = 0$  时  $u_d \rightarrow \infty$  这相应于放大机在自激的状态下工作, 根据这个关系求出的补偿系数即是临界补偿系数  $\xi_{kp}$ :

$$\xi_{kp} = -(R_H + R_{ar}) \quad (11-17)$$

当负载知道后, 极限补偿系数  $\xi_{kp}$  也就确定了。调整放大机的补偿程度时绝不能使补偿系数大于这个值, 为了在工作情况变动及参数变化的情况下都不致使放大机发生自激, 实际所要求的补偿系数要比这个值小很多, 一般都是按照第 2) 种情况确定放大机的补偿程度。

## 第十二章 带电机放大机自动控制系统的静态特性

### §12-1 概 述

电机放大机的应用范围非常广泛, 但应用得最多的是直流的拖动控制系统, 因而本章只分析几种常见的带放大机的直流拖动控制系统。通过对这些系统的分析来说明组成电机

放大机控制系统的一般原则和系统参数的计算选择方法。

在由发电机—电动机組組成的直流拖动系統中，改变发电机激磁电流的大小和方向，就可以控制电动机轉速的高低和旋轉方向。在这种系統中电动机轉速的調节和轉向的改变比較容易实现，因而它已被广泛的应用到各工业部門中的生产机械上。但是当負載增加时，电动机的轉速将随着发电机和电动机電樞压降的增大成比例的下降，所以这种系統的机械特性的硬度，比由恒压的直流电网供电的他激电动机的还小。另外，过渡过程中的冲击电流大，平均轉矩小，致使过渡过程进行得不够迅速和平稳。

为了使生产机械的生产率和加工质量以及万用性不断的提高，它們就要求拖动控制系统有更好的静态特性和动态特性，即更硬的机械特性和更好的电流变化图形（过渡过程中），这样也就在简单发电机—电动机組的基础上产生了由电机放大机組成的带反饋的各种自动控制系统。

## §12-2 带电压、电流反饋系統的工作原理和静态特性

### （一）工作原理

图 12-1 为带电压負反饋的自动調速系統，这个系統中的控制回路由調速器的电阻  $R_1$ ，反饋电位計  $R_2$  和放大机的控制繞組  $w_y$  組成，加在这个回路中的电压有取自調速器的給定电压  $u'_0$  和取自电位計  $R_2$  的与放大机端电压成比例的电压  $u'_d$ 。綫路的联接应保証使这两个电压的极性相反，这样控制电流  $i_y$  就决定于电压  $u'_0$  和  $u'_d$  之差，即

$$i_y = \frac{u'_0 - u'_d}{R_y} \quad (12-1)$$

式中  $R_y$ ——控制回路中的总电阻。

通常都把这种由輸出量 ( $u_d$ ) 反过来影响輸入量 ( $i_y$ )、其结果是阻止輸出量自身变化的作用称为負反饋作用。这里的反饋信号是由端电压組成的，故称为电压負反饋。有了电压負反饋，端电压的变化就受到了限制。例如当負載增大使端电压下降时，反饋电压  $u'_d$  也随着减小，而給定电压  $u'_0$  是恒定不变的。这样加在控制繞組上的电压就增大，使放大机电势升高，阻止端电压的下降。反之，当端电压受到某种因素的影响升高时，反饋电压增大使控制电流减小，放大机电势降低，阻止端电压的升高。结果在一定的准确度内把端电压保持給定的水平上。控制回路中的电压放大系数愈大端电压在遭受干扰时产生的偏差就愈小。电动机的机械特性硬度也提高得愈多。在控制回路中的电压放大系数等于无限大的情况下，端电压将不随負載的变动而变化，这样就完全消除了发电机电樞压降对电动机轉速的影响。但在这种极端情况下，电动机的机械特性也只能提高到与由电压恒定的直流电网供电的他激电动机的那样硬。在一般生产机械允許的滑差 ( $\delta < 20\%$ ) 范围内这种系統的調速范围将小于 1:8，許多生产机械（如重型机床的主拖动和进給拖动）要求的調速范围都大于 1:8。为进一步扩大調速范围就在这个系統的基础上

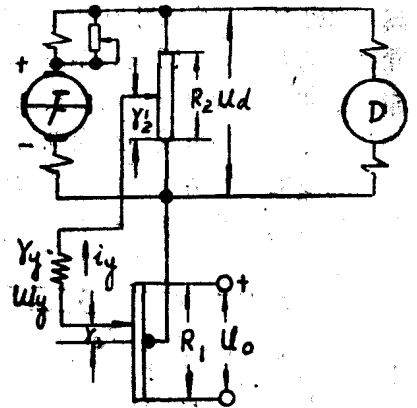


图 12-1 带电压負反饋的放大机自动調速系統

上, 形成了带电压负反馈和电流正反馈的自动调速系统(图 12—2), 这个系统中的控制回路由调速器电阻  $R_1$ , 反馈电位计  $R_2$ , 电动机附加极绕组和放大机的控制绕组  $w_y$  所组成。在空载情况下, 加在这个回路的电压与前一个系统中的相同, 在有负载的情况下, 除去给定电压  $u'_0$ , 电压反馈电压  $u'_d$  外, 还有一个取自电动机附加极绕组电阻上的电压降  $I_a R_a$ 。电压  $I_a R_a$  的大小是与电枢电流  $I_a$  成正比, 联接线路时应使它的极性和给定电压  $u'_0$  相同, 故把这个电压的作用称为电流正反馈, 在有负载, 即电流正反馈起作用的情况下, 控制电流  $i_y$  由下式决定:

$$i_y = \frac{u'_0 - u'_d + I_a R_a}{R_y} \quad (12-2)$$

当电枢电流  $I_a$  随负载增大时, 压降  $I_a R_a$  增加, 放大机控制电流  $i_y$  增大, 电势升高, 结果不仅可使端电压保持不变, 消除发电机电枢压降对转速的影响, 而且可使发电机端电压超过空载电压和使电动机的反电动势保持不变, 完全消除电枢压降对转速的影响。从而得到一条水平的机械特性。理论上讲可得到无限大的调速范围。事实上线路各参数间不能维持一种线性关系, 这种理想情况是不能实现的。不过这个系统的机械特性要比前一个系统的硬得多了, 因而这个系统的应用范围是比较广泛的。当电流正反馈使发电机端电压升高到超过空载电势以补偿电动机的电枢压降时, 电压负反馈也增大。结果是阻止端电压的升高, 削弱电流正反馈的作用。这样看来电压负反馈不但无益, 反而有害。在有电流正反馈的系统中之所以还用电压负反馈, 是由于另外一些重要的原因。

1) 电压负反馈减小放大机的磁滞回线提高电动机转速的稳定性。

和发电机的情况一样, 放大机的空载特性  $E_d = f(i_y)$  是由上升分支和下降分支组成的一个闭合回线(图 12—3)。

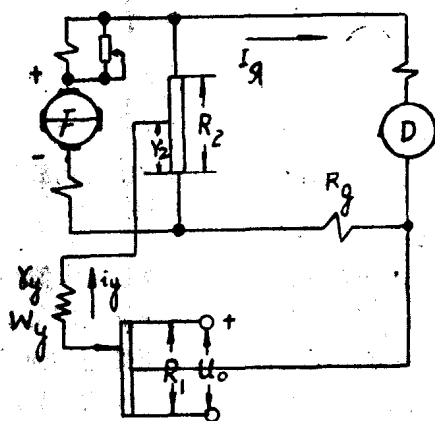


图 12—2 带电压负反馈和电流正反馈的放大机自动调速系统

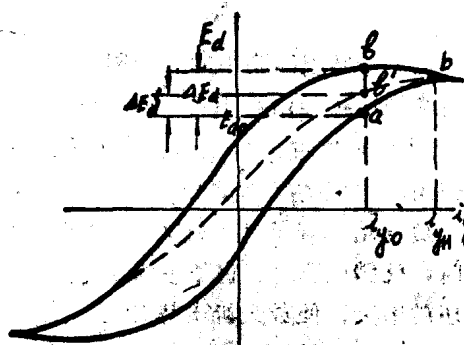


图 12—3 放大机的  $E_d = f(i_y)$  特性曲线

假如空载时放大机工作在特性曲线上的  $a$  点, 当电流正反馈随着负载增大时, 放大机的电势则沿特性曲线的上升分支升高, 例如在额定负载下升至特性曲线上的  $b$  点, 负载从额定值减少至零时, 放大机的电势不是回到原来出发的  $a$  点, 而是沿下降分支减小到  $b'$  点, 这样电势就产生了一个增量  $\Delta E_d$ 。在负载增加和减小的变化过程中机械特性上也形成

了一个相应的速度回环(图12—4)结果是使电动机的转速随着负载的变化发生波动。只有电压负反馈才能减少这种影响,因为当放大机的电势在磁滞影响下升高时,电压负反馈的作用加强。使总的输入磁势减小,它的电势便不沿原来的分支,而是沿虚线表示的路径下降,最后的工作点则由 $b$ 点降至 $b'$ 点。机械特性曲线上的速度回环也相应的减小到虚线表示的那样,结果使电动机转速由放大机磁滞引起的变化量减小,稳定性提高。

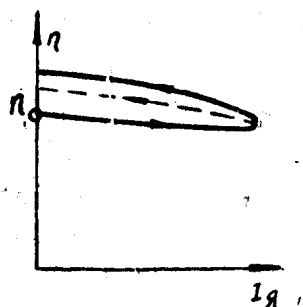


图12—4 放大机机械特性曲线

2) 电压负反馈减少发电机的剩磁电势, 扩大系统的调速范围和提高系统的工作可靠性。

在用改变发电机电势调节电动机转速的情况下, 系统所能达到的最低速度和调速范围, 是与发电机剩磁电势有关的。发电机剩磁愈大, 系统所能达到的调速范围也就愈小, 同时在这种系统中通常都是用去掉外加激磁电压(给定电压)的方法使电动机停车, 如发电机剩磁电势太大, 电动机可能停不下来, 被拖动的生产机械就要产生“爬行”, 这样就降低了它的工作可靠性。

电机放大机的剩磁电势较大, (一般为额定电压的15~20% ( $E_{ocm} = 15 \sim 20\% U_H$ )) 它对扩大系统调速范围和提高系统工作可靠性的影响就特别严重, 因而减少放大机的剩磁电势, 在实际上有很大意义。

电压负反馈之所以能减少剩磁电势可以看作是它使磁滞回环减小的结果, 另外也可按下面的情况说明这个问题。

当去掉外加激磁电压(给定电压)时, 发电势的剩磁电势通过电压负反馈的作用, 使放大机控制绕组中流过一个反向的去磁电流, 结果使剩磁磁势减少, 剩磁电势本身降低。

3) 电压负反馈加快了系统的过渡过程。

由(12—1)式看出, 有电压负反馈时为获得一定的输出, 外加激磁电压(给定电压)就得加大, 在稳定工作情况下给定电压与反馈电压之差等于放大机所要求的输入电压。在过渡过程中反馈电压总是迫使放大机的激磁电流更快的变化, 这样就加快了系统的过渡过程。例如在电动机的升速起动过程中反馈电压总是小于它的稳定值, 加在放大机控制绕组上的激磁电压就大于稳定工作状态下应有的输入电压。这个加大的激磁电压使放大机控制绕组中的激磁电流, 发电机的电势和电动机的转速的增长速度增大, 起动过程就加速的进行。

在减速制动过程中, 反馈电压总是大于它的稳定值。结果使放大机控制绕组中的电流, 发电机的电势, 电动机的转速急剧下降, 制动过程加速的进行。

由于电压负反馈在上述几个方面能改善系统的工作特性, 所以在有电流正反馈的系统中电压负反馈仍然是不可少的。

本节开始时曾经说明, 有电压负反馈时为获得一定的输出, 加在放大机控制回路中的激磁电压(给定电压)就得升高, 这样是一方面加快了系统的过渡过程, 另一方面则使系统的放大系数减小, 因而设计这种系统时, 决不能无限制的加大电压负反馈的作用。

为使系统可靠的工作, 在所有情况下都不应使电枢电流超过电机允许的最大值, 为此在这个系统中除去用电压负反馈和电流正反馈外, 还要加一个带截止装置的电流负反馈回

路(图12—5), 来限制电枢电流的最大值, 这个回路是由电动机和放大机的附加极绕组, 放大机控制绕组  $OY-II$ , 比较电压  $u_{CP}$  及截止整流器组成的, 加电流负反馈的目的既然在限制电枢电流的最大值, 因而当电枢电流在允许值以内变化时是不需要它起作用的。否则放大机的电势将随负载的增加而降低, 结果使系统在工作范围内的机械特性变得更软了。为了消除电流负反馈对系统工作特性的影响, 在它的回路中加入了由比较电压  $u_{CP}$  和整流器  $B$  组成的截止装置, 比较电压 ( $u_{CP}$ ) 的极性永远与降压  $I_a \Sigma R_a$  相反, 并使它等于  $K I_{aB} \Sigma R_a$  的数值 ( $K$  为大于1的系数, 具体大小的决定看下文)。这样在电枢电流小于允许值的范围内, 绕组  $OY-II$  中不会流过电流, 电流负反馈就不起作用。当电枢电流大于允许值 ( $K I_{aB}$ ) 时,  $I_a \Sigma R_a > u_{CP}$  控制绕组  $OY-II$  中将流过电流, 电流负反馈便起作用。在这种情况下放大机的电势将随负载的增加而下降。结果就能把电枢电流限制在允许的范围以内, 在过渡过程中带截止装置的电流负反馈同样也能限制电枢回路中的冲击电流, 使它的变化平稳从而改善系统的动态性能。在有些系统中电流正反馈, 电压负反馈和电流负反馈共用一个控制绕组(参看图12—13 重型镗床主拖动系统)。这样能简化系统结构, 实际上究竟把控制绕组共用或是分开使用, 应按照系统参数配合情况来决定。

有时为防止发电机的电压过高造成事故(如电压负反馈回路折断等)或改善系统的动态性能, 在这样的系统中有时还加带截止装置的电压负反馈回路(参看图12—13 重型镗床主拖动系统)这个回路的工作情况将在下文分析镗床主拖动系统时加以说明。

## (二) 带电压负反馈的自动调速系统静特性的分析计算

以下的分析计算按图12—1中的关系进行。

$$\text{已知} \quad i_y = \frac{u_{O'} - u_d'}{R_y} = \frac{\alpha u_O - \beta u_d}{R_y}$$

$$\text{式中} \quad \alpha = \frac{r_1}{R_1};$$

$$\beta = \frac{r_2}{R_2} \text{——反饋系数。}$$

等值电阻  $R_y$  按图12—3中的等值线路计算:

$$\begin{aligned} R_y &= r_y + \frac{r_2(R_2 - r_2)}{R_2} + \frac{r_1(R_1 - r_1)}{R_1} \\ &= r_y + \alpha R_1(1 - \alpha) + \beta R_2(1 - \beta). \end{aligned} \quad (12-3)$$

按(12—1)式的关系写出有电压负反馈和考虑剩磁电势时空载电势的表达式

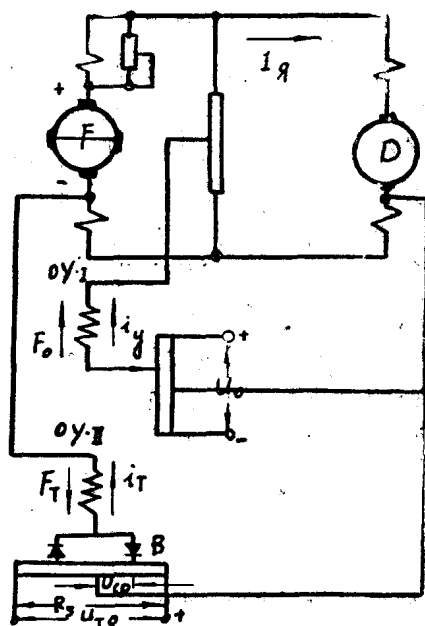


图 12—5 带截止装置的电流负反馈回路

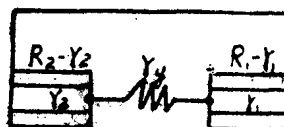


图 12—6 计算用的等值线路

$$\begin{aligned}
 E'_{d0} &= k_y i_y \pm E_{ocm} = k_y \frac{\alpha u_0 - \beta u_d}{R_y} \pm E_{ocm} \\
 &= K_y (\alpha u_0 - \beta u_d) \pm E_{ocm}.
 \end{aligned}
 \quad (12-4)$$

式中  $K_y = \frac{k_y}{R_y}$  ——控制回路的电压放大系数。

按 (11-15) 式的关系写出放大机端电压的表达式

$$u_d = E'_{d0} - I_a(R_{\Sigma} + \xi). \quad (12-5)$$

将 (12-4) 代入 (12-5) 得:

$$u_d = K_y (\alpha u_0 - \beta u_d) - I_a(R_{\Sigma} + \xi) \pm E_{ocm}.$$

整理上式得:

$$u_d = \frac{K_y}{1 + \beta K_y} \alpha u_0 - \frac{I_a(R_{\Sigma} + \xi)}{1 + \beta K_y} \pm \frac{E_{ocm}}{1 + \beta K_y}. \quad (12-6)$$

上式表明, 电压负反馈减小放大机的电枢压降, 使端电压稳定, 当控制回路的放大系数  $K_y$  达到无限大时, 电枢压降等于零, 端电压则保持不变。另外电压负反馈也使剩磁电势按同样的倍数减少。由数学式子表明的这些关系与前一节中分析的结果是符合的。

由主回路中的电压平衡关系写出:

$$n = \frac{u_d - I_a R_{sD}}{C_e}. \quad (12-7)$$

把 (12-6) 代入 (12-7) 的系统的机械特性方程式:

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{1}{C_e} \left\{ \frac{K_y}{1 + \beta K_y} \alpha u_0 - \frac{I_a(R_{\Sigma} + \xi)}{1 + \beta K_y} \pm \frac{E_{ocm}}{1 + \beta K_y} - I_a R_{sD} \right\} \\
 &= \frac{1}{C_e} \left\{ \frac{K_y}{1 + \beta K_y} \alpha u_0 - I_a \left[ \frac{(R_{\Sigma} + \xi)}{1 + \beta K_y} + R_{sD} \right] \pm \frac{E_{ocm}}{1 + \beta K_y} \right\} \\
 &= n_0 - \Delta n' \pm \Delta n''.
 \end{aligned}
 \quad (12-8)$$

式中  $\Delta n' = \frac{1}{C_e} I_a \left[ \frac{(R_{\Sigma} + \xi)}{1 + \beta K_y} + R_{sD} \right]$  ——由电枢压降引起的转速增量;

$\Delta n'' = \frac{1}{C_e} \frac{E_{ocm}}{1 + \beta K_y}$  ——由剩磁电势引起的转速增量, 它的符号由剩磁电势的极性决定。

在电压负反馈的作用足够大和适当提高补偿程度的情况下可以令

$$\frac{(R_{\Sigma} + \xi)}{1 + \beta K_y} = 0. \quad (12-9)$$

这样机械特性方程式变为: