

清華大學交流講義

電器專門課程

(非自動控制電器)

蘇聯專家 奧梅里謙柯 編著

電器教研組 譯校

— 僅供內部參考 —

— 1955年 4月 —

序 言

電器專門課程第二部份非自動控制電器是蘇聯專家奧梅里謙柯為我校電器教研組教師及研究生講授。所包括的主要內容為電機的啓動和調節電阻的計算，各種變阻器控制器的構造，計算、選擇方法及線路圖等。奧梅里謙柯專家在講授這一部分材料時特別介紹了蘇聯著名的電器工廠——哈爾科夫電器工廠所应用的各種數據。這對於幫助我們掌握設計及計算非自動控制電器有很大好處。

必須指出目前我國電器製造工業中非自動控制電器的生產還是比較薄弱的一環，已經生產的數量不多品種也不全。過去這部份的理論和計算在我國也或多或少地受到忽視。無疑地專家講義將給我國電器製造工作者有極大的幫助。

這份材料的主要參考書為Бунфаков控制電器

值得再強調的是專家在講授這門課時是考慮到聽眾的已有水平（他們已學過電器普通課程，理論知識比較掌握，而實際知識很差等）因而實質上專家所講授的是非自動控制電器的線路主要問題，這些問題或者是進行設計所必須，或者是電器教師所應當掌握的。因此這份講義不能當作教本末對大學生講授。各學校要引用這份講義時應當根據教學大綱或講課計劃所規定的內容將材料再加補充，整理和系統化。

講義名稱雖是專門課程，但有一部份材料（例如一部份啓動電阻及調節電阻的計算）應列入電器普通課程內講授。

譯稿雖一再校訂但仍不免有錯誤和遺漏之外。如有錯誤則應由翻譯和總編的同志負責。希望讀者們發現錯誤或遺漏時通知我們。以便再版時修正。

有關電器及高壓電器部份將在1956年2月另成一集出版。

清華大學電器教研組

1955年4月

目 录

序 言	頁 数
一、 概 述	1
二、 电动机的平滑启动电阻计算	7
三、 串激直流电动机逐级启动电阻计算	14
四、 串激直流电动机逐级启动电阻计算	30
五、 异步电动机的逐级启动电阻计算	45
六、 液体变阻器	71
液体变阻器	84
七、 电压调压器计算	88
蓄电池充电电动机激磁变阻器计算	97
八、 控制电器构造及接线图	
电阻元件	102
变阻器	112
九、 控制器	
手用控制器	119
鼓形控制器及其计算	124
凸轮控制器及其计算	141
十、 电器计算问题的补充问题	146
十一、 特殊变阻器	151
照明调压器	
弧光灯调压器	
滑线变阻器	
十二、 附录	
各种电阻元件允许通过的电流与 $\eta\beta\%$ 的曲线	

電器及電器專門課程

第二部份

III. 手控電器 (非自动控制電器)

概述:

控制電器的主要作用如下 (可以完成一種或幾種作用)

- 1) 啟動電動機
- 2) 調節電動機轉速
- 3) 電動機的電制動
- 4) 使電動機反轉
- 5) 使電動機通電和斷電
- 6) 調節發電機的電壓
- 7) 調節發電機負載

從上述控制電器的用途可以知道這種電器常用在電動機的過渡工作例中，與電動機工作的動力學不可分。因此應先研究決定電動機動力學的主要關係

電動機動力學的意義

電力拖動用以使工作機實現工藝過程，這些工藝過程可以在電動機工作的穩定和不穩定情況下進行，電動機的動力學可看做是工作機，電動機及控制電器在各種組一情況下的過渡過程，為了可以正確地選擇控制電器就必須知道電動機動力學的主要問題

過渡過程可以用電力拖動的負載圖來表示其特徵，這些負載圖是 $M, P, n = f(t)$ 的函數關係，分析相應的過程便可以去正確地選擇控制電器。

力矩方程式

電力拖動的狀況決定於電動機力矩 M_{gB} 與轉力矩 M_c 的作用，這兩力矩中每一個都可以是運動力矩和制動力矩。

- 例如:
1. 酸風機的旋轉; M_{gB} 是運動力矩, M_c 是制動力矩。
 2. 吊車釋放重擔; M_c 是運動力矩, M_{gB} 是制動力矩。
 3. 電梯研重物下降; M_{gB} 是運動力矩, M_c

電力拖動的動力學決定於總力矩的作用，總力矩稱為動力力矩 M_g

$$M_g = M_{gb} + M_c$$

今後所認定沿旋轉方向的力矩為正，反旋轉方向者為負，圖 1 表示正及負的靜力矩的例子。



圖 1

電動機力矩可以由下式決定：

$$M_{gb} = \frac{P}{\omega} \frac{75}{736} = 0.975 \frac{P}{n} \quad P - \text{瓦}, n - \frac{\text{轉}}{\text{分}}$$

在不穩定情況下動力力矩和慣性力矩間的聯系由達拉姆貝爾方程式決定：

$$M_g = J \frac{d\omega}{dt}$$

M_g — 動力力矩 公斤—米

J — 拖動的慣性力矩 公斤米²。

ω — 角速度 秒⁻¹

隨動力力矩符號的不同，電力拖動可以在不同情況下工作，

例如：

$$M_g = 0 \text{ — 恆速}, \quad M_g > 0 \text{ — 加速}, \quad M_g < 0 \text{ — 制動}$$

應當記住，這時動力力矩為電動機力矩及靜力矩之和，而慣性矩可認為是一常數即 $J = \text{常數}$

有時在實際計算中常用飛輪力矩代替慣性力矩，即如果

$$J = mR^2 \quad m - \text{質量} \quad R - \text{慣性半徑}$$

$$J = \frac{GR^2}{g} = \frac{GD^2}{4g} \quad GD^2 \text{——飛輪力矩}$$

則達拉姆貝爾方程式可寫成 $Mg = \frac{GD^2}{4g}$

必須指出，所有上列公式中動力力矩可看作是歸化到電動機軸上的力矩。將力矩歸化到電動機軸上可如下進行：

如果工作機軸上靜力矩為 M_{c1} ，角速度為 ω_1 ，電動機角速度為 ω_2 ，又如果傳送效率為 η_p ，則當從電動機傳送能量給工作機時可寫成 $M_{c1}\omega_1 = M'_{c1}\omega_2\eta_p$

M'_{c1} —— 歸化到電動機軸上的工作機力矩。

上一方程式是考慮兩軸上的功率平衡，包括傳送環節的損失

在內，令 $K = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ 則 $M'_{c1} = M_{c1} \frac{1}{K} \frac{1}{\eta_p}$

當電動機和工作機械間有好幾級傳送，傳送數比為 K, K_2, K_3 及效率為 $\eta_{p1}, \eta_{p2}, \eta_{p3}$ 則歸化到軸上的靜力矩可決定如下：

$$M'_{c1} = M_{c1} \frac{1}{K_1 K_2 K_3} \frac{1}{\eta_{p1} \eta_{p2} \eta_{p3}}$$

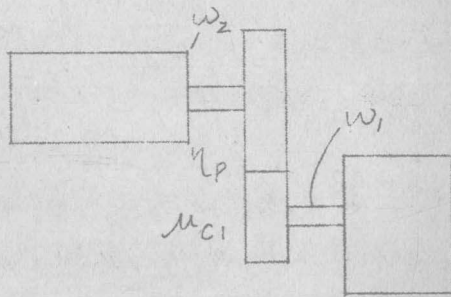


圖 2

歸化慣性矩由動態平衡條件決定：

$$J \frac{\omega_2^2}{2} = J_g \frac{\omega_2^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_3 \frac{\omega_3^2}{2} + \dots$$

J ——歸化到電動機軸上的慣性矩

J_g ——電動機的慣性矩

J_1, J_3 ——中間環節的慣性矩

換算到電動機軸的全系統慣性力矩為：

$$J = J_g + J_1 \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} + J_3 \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + \dots$$

因為 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ，故角速度的比可用轉數比來代替即

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{K_1} \quad \frac{\omega_3}{\omega_2} = \frac{n_3}{n_2} = \frac{1}{K_3} \quad \text{等}$$

$$\text{於是 } J = J_g + J_1 \frac{1}{K_1^2} + J_3 \frac{1}{K_3^2} + \dots$$

用飛輪力矩代替慣性力矩時歸化後的飛輪力矩為：

$$GD^2 = (GD^2)_g + (GD^2)_1 \frac{1}{K_1^2} + (GD^2)_3 \frac{1}{K_3^2} + \dots$$

電動機啟動時間

從達拉姆貝爾方程式可寫成：

$$Mg = J \frac{d\omega}{dt} \quad \text{因為 } J = \frac{GD^2}{4g} \quad \text{而 } \omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$\text{故 } dt = \frac{GD^2 2\pi n}{4g \cdot 60 \cdot Mg} \quad dt = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{Mg}$$

從這一方程式可見速度從 n_1 變到 n_2 所需時間為

$$t = \int_{n_1}^{n_2} \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{Mg}$$

如果可以假設在這速度變化範圍內動力矩保持常數則時間為

$$t_{12} = \frac{GD^2(n_2 - n_1)}{375 M_g}$$

如果可假設動力矩平均值為常數而且等於 $M_{gcp} = \alpha M_H - M_c$

M_H —— 力矩額定值, 則 $t_{12} = \frac{GD^2(n_2 - n_1)}{375(\alpha M_H - M_c)}$,

$M_c = 0$ 時 $t_{12} = \frac{GD^2(n_2 - n_1)}{375 \alpha M_H}$

如果应当決定到轉速 $n_2 = n_H$ 的電動機啟動時間, 則在這些條件下:

$$t_H = \frac{GD^2 n_2}{375 \alpha M_H} \quad \text{因為 } n_1 = 0,$$

t_H —— 額定啟動時間

關於非自动控制電器變阻器的概念

普通類型的金屬變阻器由下列主要部份組成:

- 1) 電阻元件
- 2) 內部聯線
- 3) 逐級轉換開關
- 4) 聯結外線用的端鈕
- 5) 自動防止過載的設備
- 6) 外殼及管架

啟動變阻器的聯結圖

電動機的啟動是指電動機由不動的狀態到達額定轉速的過程, 同時這一操作過程不應對電動機, 電器及電源有危害, 根據電動機種類及尺寸的不同, 有不同的方法啟動

小電動機啟動時可以直接接到額定電壓的電源, 這些電動機

的容量不超过1倍，並且电动机迴路中的熔断器可选择為額定电流的三倍以下。為啟動3倍以下的电动机有時在電控迴路中經常接一电阻，它吸收加到电动机电压的15%，~~其目的在於保護电动机~~这种方法是不合理的。因此，~~应采用~~应采用可变啟動电阻——啟動變阻器。

利用啟動變阻器，可以限制最初啟動時的啟動电流，隨着速度增加電樞反電動勢也增加，電樞迴路的电流就減少，於是就可以逐級除去變阻器的各段，當速度接近額定值時，變阻器就短接，电动机直接接在電源上工作，變阻器可以用金屬电阻也可用液體电阻。

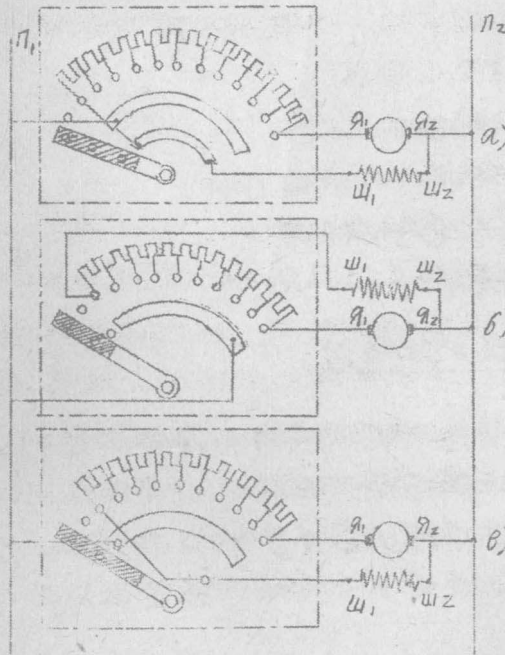
上面所說的直流电动机的變阻器也可用於异步电动机，這時轉子就相當於電樞。

變阻器最简单的线路圖

在研究並激或複激电动机時应当滿足兩條件：

- 1) 全部啟動過程中电动机應有全部激磁。
- 2) 电动机斷電時應將激磁迴路短路。

下圖表示變阻器供并自逐級轉換開關聯絡的原理圖



這些圖中電動機並聯線圈的聯結方法不同。

圖a的激磁線圈在全部啟動過程中加上電源的全部電壓，在變阻器工作時該電壓一直加在线圈上：

圖c中只有當電動機啟動時在變阻器的第一個位置才加上全部電壓，從電樞電路引出的電阻接入激磁回路，在電動機正常工作位置，電阻完全接入激磁回路，於是磁通減弱。

圖b與圖c的區別在於：電動機工作時激磁線圈上加全部電壓。

為了啟動時能滿足激磁回路中全部磁通為常數的條件，圖a中必須附加一逐級轉換開關的觸點及刷手，這自然使變阻器構造稍貴，並使線路複雜，也常使變阻器尺寸增大，這是按圖a選擇變阻器時的主要缺點。

最後兩圖中啟動過程中的激磁減弱，當按圖c接線的電動機工作時磁通稍減，但實踐證明這減弱幾乎不影響電動機工作時的旋轉力矩及轉數。

(二) 電動機的平滑啟動：

啟動過程

啟動變阻器的主要任務是在啟動電動機時限制電流，或是使啟動電流按一定規律變化，必須限制啟動電流的理由如下：

- a) 減少電網的電流衝量。
- b) 減少電動機繞組的電動力
- b) 得到較好的整流

平滑啟動時，電流均勻地改變，而不超過一定極限值，這種啟動可利用水變阻器或滑動變阻器如果啟動時利用逐級粗調變阻器，則這時啟動電流在轉換到另一級的時候跳躍地變化，而這時電流達到其極限值，異步電動機其激或串激直流電動機的平滑啟動沒有什麼區別，因此可以只計稱並激電動機，

電動機的轉矩可簡成

$$M_{gb} = K\phi\gamma.$$

電動機的電動勢也可寫成 $E = K\omega\phi$

由這兩個式子可得 $E\gamma = M_{gf}\omega$

即由電樞所產生的電磁功率等於機械功率

並激電動機中當電流及磁通為常數時，電樞電動勢與電動機轉數成正比，串激電動機中當電樞電流為常數時也一樣，而三相異步電動機的公式如下：

$$M_{gf} = 3K\gamma\phi \quad 3E\gamma = M_{gf}\omega$$

計核時必須利用的第三個基本方程式為：

$$U = E + R_a\gamma \quad \text{或} \quad u = E + \gamma Z_a$$

曲線 $\omega = f(\gamma)$ 稱為電動機的速度特性，當電壓為常數時這些特性為圖3所示。

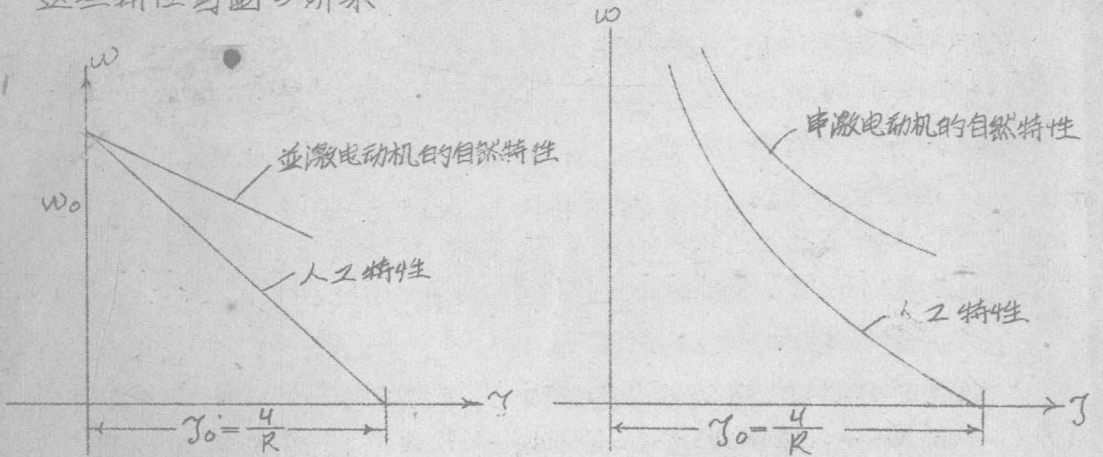
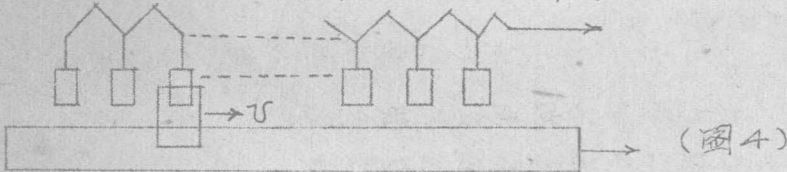


圖3

為得到理想的平滑啟動必須在電動機電路中接入水變阻器，改變水位就改變電樞電流，但是在分析平滑啟動時，更方便的是設想在電樞電路中接入一級數很多的金屬變阻器，圖4。

金屬變阻器之滑動桿運動速度用 V 表示



(圖4)

若決定平穩啟動時電動機的啟動時間可如下進行：

$$\text{因為 } J \frac{d\omega}{M_{gb}} = M_{gb} - M_c$$

$$\text{令 } T_s = \frac{J\omega_H}{M_{gb}} \quad \frac{M_c}{M_{gb}} = \beta$$

$$\text{則 } \frac{T_s}{\omega_H} \frac{d\omega}{dt} = 1 - \beta \quad (A)$$

計稱啟動變阻器時 T_s 的數值起很大作用，它的量綱與時間相同，因此稱為啟動時間常數，係數 β 一般與速度 ω 有關，實際中常會碰到下列情況：

1. 啟動的電機及電器要求在工作時力矩為一常數，

屬於這一類的有升降機，軋鋼機，牽引電動機等，對這些機器，利用下式可認為已足夠準備。

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 \frac{\omega}{\omega_H}$$

即 β 幾乎為一直線

2. 如果電動機所帶動的機器本身又帶動風或液體例如鼓風機，泵，推進器等，這時靜力矩可認為與角速度平方成正比，即

$$\beta = \beta_0 + \beta_2 \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2$$

3. 若拖动機器所必需的功率為一常數，例如鑄床。

$$\text{則係數 } \beta \text{ 可，寫成 } \beta = \beta_0 + \frac{\beta_3}{a + \omega}$$

公式中 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 及 a 均為與阻力矩有關的常數。

現在引去一些式子以決定電動機啟動時間。

1. 額定工作條件下電動機電樞的啟率。

$$\eta = \frac{E}{E + \gamma R_g} = \frac{E}{U} = \frac{\omega_H}{\omega_s}$$

2. 啟動電流與額定電流之比, $K = \frac{\gamma_n}{\gamma_H}$

通常在啟動電動機時, 當斷開變阻器的所有各級電阻以後, 電動機的轉數還沒有到達額定值, 因此實際上只計標去掉, 各段電阻所需的時間因此

$$E + \gamma_H R_g = U \quad \text{啟動的穩定情況}$$

$$E' + \gamma_n R_g = U \quad \text{當所有電阻均打開, 而電動機的轉速尚未到額定}$$

從以上所引的兩公式可寫成:

$$K = \frac{U - E'}{U - E} = \frac{\omega_s - \omega_H'}{\omega_s - \omega_H}$$

轉換後

$$\frac{\omega_H'}{\omega_H} = \frac{1}{\gamma} [1 - K(1 - \eta)]$$

啟動時間為

$$t_s = T_s \frac{1 - K(1 - \eta)}{\eta(1 - \beta)}$$

可以得到 t_s 方程式的另一形式。

$$t_s = T_s \frac{1 - \frac{R_g}{R}}{\eta(1 - \beta)}$$

理想情況下

$$R_g = 0, \quad \eta = 1$$

$$\therefore t_s = \frac{T_s}{1 - \beta}$$

平滑啟動電阻的計祿

總電阻可由右式求得： $u = E + R\gamma$.

但是電動機不動時 $E = 0$ ，因此 $u = R_1\gamma$

$$\text{或 } R_1 = \frac{u}{\gamma} \quad R_1 \text{ 為啟動電阻.}$$

但按這一公式計祿電阻還不能決定電阻的選擇，因為還必須知道電阻的極限溫升，此極限溫昇是計祿電阻時的第二個條件，設計變阻器時應使其每一瓦熱不超過規定的極限溫度，

設變阻器為短時工作，於是在一並溫度下啟動時功率與連續工作時的等值功率之比可用過載係數 β 來表示。

$$\beta = \frac{P}{P_0}, \quad P = \gamma^2 R \text{ 短時啟動的發熱功率}$$

P_0 連續工作時同一極限溫度下的等值功率

從牛頓方程式可得 $P_0 = M s_0 = \frac{P}{\beta}$ 。於是決定冷卻表面，以及電阻本身的尺寸。

電阻元件中單位時間內產生的熱量可用 $\gamma^2 dR$ 來表示。

$$\text{於是 } dP_0 = \frac{\gamma^2 dR}{\beta} \quad \text{因為 } \beta = \frac{1}{1 - e^{-t/\tau}}$$

$$\therefore dP_0 = (1 - e^{-t/\tau}) \gamma^2 dR$$

$$\text{或 } P_0 = \int_{R_M}^{R_1} (1 - e^{-t/\tau}) \gamma^2 dR$$

當 β 為常數時啟動變阻器的電阻可表示如下：

$$\text{從方程式 } u = E + R\gamma, \quad E = 0, \omega = 0 \text{ 時 } M = R_1\gamma$$

此外理想情況下 $R_g = 0$ ， $\therefore M = K\omega_s\phi$ ， ω_s 為空載理想速度。

$$\frac{u}{u} = \frac{E + R\gamma}{R_1\gamma} = \frac{R}{R_1} + \frac{E}{u}$$

$$\frac{R}{R_1} = 1 - \frac{E}{U} \quad \text{或} \quad \frac{R}{R_1} = 1 - \frac{W}{W_s}$$

$$\therefore \frac{R}{R_1} = 1 - \frac{W}{W_s} \frac{W_H}{W_H} = 1 - \eta \left(\frac{W}{W_H} \right) = 1 - \eta (1 - \beta) \frac{t}{T_s} \quad T_s = J \frac{W_H}{M_{\beta P}}$$

解方程式 A. 可得 $\frac{W}{W_H} = (1 - \beta) \frac{t}{T_s}$

將上式對時間微分可得 $dR = -R_1 \eta \frac{1 - \beta}{T_s} dt$

最後一式可用來求 P_0

$$P_0 = \int^2 R_1 \eta \left(\frac{1 - \beta}{T_s} \right) \int_0^{t_s} (1 - e^{-t/T}) dt \quad \text{解出後即得}$$

$$P_0 = \frac{J^2 R_1}{T_s} \eta (1 - \beta) [t_s - T(1 - e^{-t_s/T})]$$

上式還可稍加改變：因為 $T_s = J \frac{W_H}{M_{\beta P}} = \frac{W_H^2}{M_{\beta P} W_H} = 2 \frac{A_H}{P_a}$

A_H — 額定速度時的運動部份的動能。

P_a — 最大啟動功率

因為 $J^2 R_1 \eta = J^2 R_1 \left(\frac{E}{U} \right) = E J = P_a$

$$\therefore P_0 = P_a (1 - \beta) \frac{T}{T_s} \left[\frac{t_s}{T} - 1 + e^{-t_s/T} \right]$$

$$P_0 = P_a (1 - \beta) \frac{T}{T_s} \frac{1}{2} \left(\frac{t_s}{T} \right)^2$$

知道 P_0 以後便可求電阻器散熱面積，於是從 R_1 及 R_0 兩個數值便可選擇變阻器。

現在舉一具體例子以說明平滑啟動電動機的啟動電阻的計綫，設已給定下列數值：

1. 並激電動機容量 16.5 瓩。
2. 電樞額定電流 80 安
3. 電源電壓 220 伏
4. 電樞繞組電阻 0.175 歐
5. 負載係數 $\beta = 0.6$

$$\text{效率 } \eta = \frac{U - I_H R_a}{U} = \frac{220 - 80 \times 0.175}{220} = 0.936$$

$$\text{啟動電流與額定電流之比 } K = \frac{I_n}{I_H} = \frac{M_{BP}}{M_C} = \frac{1}{0.6} = 1.66$$

設電樞及其之相聯的物件的動能為 90 仟焦。

$$\text{啟動時間常數為 } T_s = \frac{2A}{P_a} = \frac{2 \times 90}{1.66 \times 16.5} = 6.6 \text{ 秒}$$

由以前所列的一個公式可決定啟動時間 $t_s \approx 17$ 秒

如果取變阻器時間常數為 122 秒，則將它代入公式以求 P_0 。

$$P_0 = P_a (1 - \beta) \frac{T}{T_s} \frac{1}{2} \left(\frac{t_s}{T_s} \right)^2 \approx 2 \text{ 瓩}$$

電阻值的決定如下：

$$R_1 = \frac{U}{I_n} = \frac{U}{I_H K} = \frac{220}{80 \times 1.66} = 1.74 \text{ 歐}$$

知道了 R_1 及 P_0 後，可選擇適合變阻器的容積，如果變阻器選作金屬的則必須再計綫級數，並檢查每一級電阻的發熱。

至於級數計綫在以後計綫逐級啟動變阻器時再講，現在舉一例說明如何檢查發熱。

設級數取為 10，每級電阻等於 1.75 歐，一定時間內每級電阻

通过电流，因而产生一定热量， $I_n^2 Y_{CT} t_c$ ， t_c 为电阻级通电流时间。

该热量可看作是由等值电流 I_0 所产生的

$$\therefore p I_0^2 Y_{CT} t_c = I_n^2 Y_{CT} t_c$$

p 为过载系数 $p = T/t_c$

$$\text{於是 } I_n^2 Y_{CT} t_c = I_0^2 p T \quad I_0 = I_n \sqrt{\frac{t_c}{T}}$$

知道每级电阻通电流的时间及每级电流以後便可检查每级电阻的发热情况。

本例中级数为10，每级通电流时间为1.7秒。

$$\text{第一级电流 } I_{01} = I_H K \sqrt{\frac{1.7}{120}} = 80 \times 1.66 \sqrt{\frac{1.7}{120}} = 16 \text{ 安}$$

同样方法可求出第二级电流，但通电流时间等于 $1.7 \times 2 = 3.4$ 秒，依此类推。

(三) 直流电动机的逐级启动

主要定义及原则

利用有级电阻的变阻器来启动电动机时，动触头从一个位置到另一个位置将相应的电阻级短路，於是使电流瞬时升高，图5表示电动机启动线路图及电流随启动时间而变化的曲线。

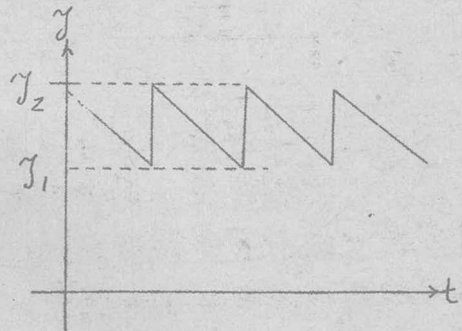
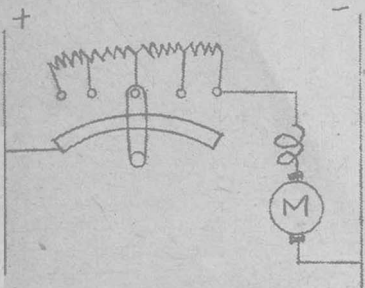


图5