

起动变阻器和调速变阻器的 应用与计算

蔣 貽 慶 編 著



科学技術出版社

起动变阻器和调速变阻器的 应用与计算

蔣 貽 農 編 著

科学技術出版社

內 容 提 要

本書介紹起動變阻器和調速變阻器的應用與計算。內容除對基本理論和一些計算公式作了簡單的說明外，實例較多，尤其對計算方法敘述較為詳盡。可供一般中級技術幹部和中等技術學校學生自修和參考之用。

起動變阻器和調速變阻器的 應用與計算

編 著 者 蔣 貽 慶

*

科學技術出版社出版

(上海建國西路 336 弄 1 號)

上海市書刊出版業營業許可証出○七九號

上海陸記印刷所印刷 新華書店上海發行所總經售

*

統一書號：15119·285

開本 787×1092 耗 1/32·印張 15/16·字數 15,600

一九五六年八月第一版

一九五六年八月第一次印刷·印數 1—6000

定價：(10) 一角六分

序 言

起動變阻器和調速變阻器的應用是電力驅動在實踐中最基本的問題之一。解放前，國內出版的書籍和英美一般的著作對這一方面的敘述都較少；尤其涉及實用方面的更加缺乏。

解放以來，由於蘇聯無私的援助，國內對這一門技術的研究和出版都有了很大的進展。作者在從事這方面工作中，曾經參考了蘇聯專家關於電力驅動方面一些有名的著作，獲得不少幫助。但原書包括的內容較多，有些理論也較深，一般中級技術幹部，由於時間的限制閱讀可能有些困難。因而，不揣愚陋，根據個人在工作和學習中的一些體會和經驗，寫成這一本小冊子，希望通過它和大家共同研究，提高這方面的業務水平。

本書內容除對基本理論作一些簡單的介紹外，對舉例和計算方法敘述比較詳盡。例題全部是作者工作中碰到的實例。所用公式除一般散見於普通電工學和電機學外，並加以扼要的說明，可以減少閱讀中找尋參考資料的困難，不致有深澀之感。

作者學識經驗都很淺陋，錯誤及遺漏之處，必然很多，敬請讀者和先進加以批評指正。

1956年5月

目 錄

I. 起動變阻器	1
I—1. 計算實例	5
I—2. 三相電阻不平衡的截出法	11
I—3. 使用起動變阻器時必須注意的事項	15
II. 調速變阻器	15
II—1. 計算實例	18
II—2. 使用調速變阻器時必須注意的事項	22
III. 常用的金屬電阻材料	24

起動變阻器和調速變阻器的 應用與計算

繞線轉子式感應電動機雖然在製造費用上和使用維護上都沒有鼠籠式感應電動機來得經濟合算，但它的起動特性和調節特性較好，所以在起動轉矩要求較高而起動電流受到限制的情況下，以及需要調速的大容量的電動機中，它仍然占着重要的地位。但繞線轉子式感應電動機這兩種特性却全有賴于轉子電路中的外接變阻器達成的，因此變阻器的配合是否適當，對於電動機的起動和調節有着決定性的作用。現在將這兩種用途的變阻器分述如下：

I. 起動變阻器

在轉子電路中接入電阻的目的是為了減小起動電流，並增加起動轉矩。當轉子中沒有接入外加電阻的時候，轉子的起動電流很大；但由於起動時功率因數很低，所以電流的有功部分很小，因而起動轉矩很小。在接入外加電阻以後，總電流值減小了，但有功電流成份卻因功率因數的增加而增大，所以起動電流雖小，而起動轉矩則較大。因此，如果在轉子電路中接入適當的電阻，則可在起動時得到所需的轉矩。從理論上，這一轉矩可達電動機的最大轉矩值，但實際

应用上,一般大都不超过最大轉矩值的百分之七十。这一轉矩及其对应的电阻值,可从电动机的自然特性曲綫上用圖解法求得,但圖解法在点繪时必須先算出足够的点数,很为費事。另外也有一种近似的画法,只須在自然特性上采取兩点即可作出近似的曲綫;但作圖本身所引起的較大誤差仍然無法避免。更麻煩的是:在繪制过程中,常会遇到不可避
免的返工。因此在实用上一般以解析法來得簡便適當。

起動變阻器除了降低起動電流增加起動轉矩这一作用外,并要使起動電流和起動轉矩在兩個比較平穩的限值中變動,也就是要求在起動过程中沒有跳越的巔值產生,因此轉子電路中各級總電阻必須按照等比級數來變化。如圖1所示,令 R_1, R_2, \dots, R_{n+1} 分別表示當變阻器手柄在第一、第二……第 $n+1$ 各級時轉子電路中每相的總電阻(包括電動機轉子本身的電阻在內); S_1, S_2, \dots, S_{n+1} 為其对应的各級轉差率。

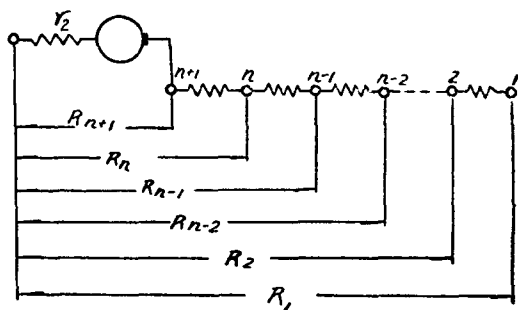


圖 1

如果要求的起動轉矩為 M_1 ，與其對應的轉子電流為 I_1 ，轉差率為 S_1 ；當電動機開始起動（加速）後， S_1 降為 S_2 ， I_1 也降為 I_2 ，這時對應的換接轉矩為 M_2 ；如將電阻截出一檔後， I_2 將升為 I_1 ， M_2 增為 M_1 。在整個起動（加速）過程中，起動電流和起動轉矩將分別在 I_1 、 I_2 和 M_1 、 M_2 這兩對限值之間變化。這裡的 M_2 必須大於傳動機械所需要的轉矩。根據上述要求，則有

$$I_1 = \frac{E_r}{\sqrt{\left(\frac{R_1}{S_1}\right)^2 + X_r^2}} = \frac{E_r}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S_2}\right)^2 + X_r^2}} = \dots$$

$$= \frac{E_r}{\sqrt{\left(\frac{R_{n+1}}{S_{n+1}}\right)^2 + X_r^2}} \dots \text{(i)}$$

$$I_2 = \frac{E_r}{\sqrt{\left(\frac{R_1}{S_2}\right)^2 + X_r^2}} = \frac{E_r}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S_3}\right)^2 + X_r^2}} = \dots$$

$$= \frac{E_r}{\sqrt{\left(\frac{R_n}{S_{n+1}}\right)^2 + X_r^2}} \dots \text{(ii)}$$

要滿足上面這個等式，必須

$$\frac{R_1}{S_1} = \frac{R_2}{S_2} = \dots = \frac{R_n}{S_n} = \frac{R_{n+1}}{S_{n+1}} \dots \text{(iii)}$$

$$\frac{R_1}{S_2} = \frac{R_2}{S_3} = \dots = \frac{R_n}{S_{n+1}} \dots \text{(iv)}$$

$$\frac{\text{(iv)}}{\text{(iii)}} \quad \frac{S_1}{S_2} = \frac{S_2}{S_3} = \dots = \frac{S_n}{S_{n+1}} = \frac{R_1}{R_2} = \dots$$

$$\frac{R_2}{R_3} = \dots = \frac{R_n}{R_{n+1}} = k \dots \dots \dots (V)$$

即轉子电路中各級总电阻为一等比級数,公比为 k 。

从(V)式 $R_n = k R_{n+1}$

$$R_{n-1} = k R_n = k^2 R_{n+1}$$

$$R_2 = k R_3 = k^{n-1} R_{n+1}$$

$$R_1 = k R_2 = k^n R_{n+1}$$

即 $k = \sqrt[n]{\frac{R_1}{R_{n+1}}} = \sqrt[n]{\frac{S_1}{S_{n+1}}} \dots \dots \dots (1)$

上式对电动机从靜止起動或从某一轉速开始加速时均可適用。在計算起動电阻时还可簡化一下:

式中

S_{n+1} —— 在自然特性曲綫上对应于起動(或加速)轉矩 M_1 的轉差率。如 $M_1 = M_K$ (最大轉矩), 則 $S_{n+1} = S_K$; 如 $M_1 = M_H$ (額定轉矩), 則 $S_{n+1} = S_H$ (以下用 S 來代表);

S_1 —— 起動(或加速开始)时的轉差率(以下將專指起動时的轉差率即 $S_1 = 1$);

R_{n+1} —— 轉子每相的内电阻(以下用 r_2 來代表);

R_1 —— 起動(或从轉差率 S_1 开始加速)时產生起動(或加速)轉矩所需的每相总电阻(以下用 R_T 來代表);

n —— 变阻器中电阻的級数,变阻器的触头則

为 $n+1$ 。

如此(1)式,可改寫为

$$k = \sqrt[n]{\frac{R_T}{r_2}} = \sqrt[n]{\frac{1}{S}} \dots\dots\dots(1a)$$

同时
$$\frac{R_T}{r_2} = \frac{1}{S} \dots\dots\dots(2)$$

I—1. 計算实例

根据已有数据和要求,起动的計算可以分为下述三种不同的情况来处理:

一、第一种情况 当起动的轉矩 M_1 和換接轉矩 M_2 均为指定值,而电动机的最大轉矩比值 λ (以額定轉矩 M_H 的百分率表示)为已知时,

如令 E_2 ——轉子开路时的端电压;

I_2 ——轉子每相电流;

r_2 ——轉子每相电阻;

S_H ——电动机的額定轉差率;

S_K ——自然特性曲綫上產生最大轉矩时的轉差率。

从公式

$$S_K = S_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \dots\dots\dots(3)$$

及

$$\frac{M}{M_H} = \frac{2\lambda}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S}} \dots\dots\dots(4)$$

可以求出在產生轉矩 M_1 和 M_2 時對應的轉差率 S_1 和 S_2 。當 I_2 不變，轉差率和轉子電路中的電阻成正比，所以

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{R_1}{R_2} = k$$

從式(1a)
$$k = \sqrt{\frac{n}{S_1}} = \sqrt{\frac{n}{S_2}}$$

所以
$$\sqrt{\frac{n}{S_1}} = \frac{S_1}{S_2}$$

$$\frac{1}{S_1} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^n \dots\dots\dots (5)$$

如用對數計算，(5)式可寫成

$$n = \frac{1g \frac{1}{S_1}}{1g \frac{S_1}{S_2}} \dots\dots\dots (5a)$$

〔例一〕 已知一台 125 馬力 8 極的電動機， $E_2 = 320$ 伏， $I_2 = 178$ 安， $r_2 = 0.018$ 歐（在 75°C ）， $s_H = 2.2\%$ ， $\lambda = 260\%$ ，試為它設計一具起動變阻器，要求起動轉矩 $M_1 = 200\%$ ，換接轉矩 $M_2 = 140\%$ 。

計算：

(1) $S_K = 0.022 (2.6 + \sqrt{2.6^2 - 1}) = 0.11$

(2) 從公式(4)

$$S_1 = 0.0515; \quad S_2 = 0.0325$$

（此處 S_1, S_2 均取二次方程式的較小的根，另一根為對應於曲線上不穩定部分的轉差值）。

$$(3) \quad k = \frac{0.0515}{0.0325} = 1.585$$

$$(4) \quad R_T = \frac{0.018}{0.0515} = 0.349 \text{ 欧}(75^\circ\text{C})$$

$$(5) \quad (1.585)^n = \frac{1}{0.0515} = 19.4$$

$$n = 6.44$$

但 n 必須为整数, 如取 $n = 7$, 則所求变阻器为 7 級, 其每相外接总电阻为 $0.349 - 0.018 = 0.331$ 欧 (75°C), 其各級电阻可以求得如下:

$$\text{当 } n = 7 \text{ 时} \quad k = \sqrt[7]{\frac{1}{0.0515}} = 1.528$$

$$r_2 = 0.018$$

$$\tilde{k} r_2 = 0.0275 \quad \tilde{k} r_2 - r_2 = 0.0095 \text{ (第七級电阻)}$$

$$\tilde{k}^2 r_2 = 0.0420 \quad \tilde{k}^2 r_2 - \tilde{k} r_2 = 0.0145 \text{ (第六級电阻)}$$

$$\tilde{k}^3 r_2 = 0.0641 \quad \dots\dots\dots = 0.0221 \dots\dots\dots$$

$$\tilde{k}^4 r_2 = 0.0980 \quad \dots\dots\dots = 0.0339 \dots\dots\dots$$

$$\tilde{k}^5 r_2 = 0.1498 \quad \dots\dots\dots = 0.0518 \dots\dots\dots$$

$$\tilde{k}^6 r_2 = 0.2285 \quad \dots\dots\dots = 0.0787 \dots\dots\dots$$

$$\tilde{k}^7 r_2 = 0.3490 \quad \frac{\tilde{k}^7 r_2 - \tilde{k}^6 r_2}{\text{外接总电阻}} = \frac{0.1205}{0.331} \text{ (第一級电阻)}$$

$$\text{从 } k = 1.528, \text{ 可以算出 } S_2 = \frac{S_1}{K} = \frac{0.0515}{1.528} = 0.0337,$$

并可从(4)式算出其对应的 $M_2 = 145\%$ 。这里 M_2 較原来选

擇的 M_2 略大, 所以當 M_1 為已定時, 級數愈多, 則 M_2 愈接近於 M_1 , 也就是起動愈加平穩。所以在選擇 n 的時候, 為了簡化品種起見, 可以結合製造單位的原有規格來決定, 但一般以偏高一些為妥。如本例假設製造廠的原有規格為 6 級和 7 級兩種, 則寧可用 7 級而不用 6 級。當然還要同時考慮到電流容量的配合是否經濟適當。由此可見, 當 M_1 和 M_2 為定值時, n 不一定恰巧為整數。在圖解法中碰到這種情況, 就必須另行選擇 M_2 , 把作法重復一次, 沒有解析法來得簡捷。

二、第二種情況 即 M_1 和 M_2 均為指定值, 而電動機的最大轉矩比值 λ 為未知時。因為一般製造廠並不將最大轉矩值載列在電動機的銘牌上, 因此就無法從公式(3)、(4)求得 s_1 和 s_2 。這時我們可以按下面的假定得到一個近似的解法。從自然特性曲線可以看出: 當轉矩不超過 70% 最大轉矩值時, 特性曲線近於成一直線(圖2)。從(4)式中如

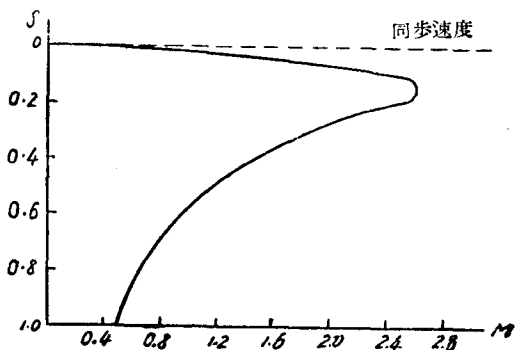


圖 2

果略去 $\frac{S}{S_K}$ 一項, 可得

$$M = -\frac{2\lambda M_H}{S_K} \cdot S = C \cdot S (C \text{ 为常数})$$

即轉矩和轉差率成正比。因此我們假定在自然特性的这一段中轉矩和轉差率近于成正比, 即

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{M_1}{M_2} = k \dots\dots\dots(6)$$

$$S_1 = M_1 S_H \dots\dots\dots(7)$$

近似的圖解法也是根据这一假定而來的, 在近似圖解法中, 自然特性曲綫僅須借 $S = 0$ 、 $M = 0$ 和 $S = S_H$ 、 $M = M_H$ 兩点即可作出。

〔例二〕 仍用前面的例題來作計算(假定 λ 为未知值) 計算:

从公式(6) $k = \frac{M_1}{M_2} = \frac{2.0}{1.4} = 1.43$

从公式(7) $S_1 = 2 \times 0.022 = 0.044$

从公式(5) $\frac{1}{0.044} = (1.43)^n$

所以 $n = 8.75$

由此可見, 用近似法求出的結果, S_1 比較小。其对应的 M_1 約为 180%, 而 n 則較前为大。因此可以推得 M_2 必大于 140%。这一結果在实际应用上已經足夠准确。根据作者計算經驗, 用近似法求出的 S_1 一般較公式(4) 算出的結果大

約小10~20%。如果上述結果乘以1.15的校正系数，則

$$S_1 = 1.15 \times 0.044 = 0.0506$$

$$n = 8.35$$

取 n 等于9，則

$$k = \sqrt{\frac{1}{0.0506}} = 1.393$$

$$S_2 = \frac{S_1}{k} = \frac{0.0506}{1.393} = 0.0363$$

当 $S_1 = 0.0506$ 时，从公式(4)可求得 $M_1 = 198\%$ ； $S_2 = 0.0363$ 时， $M_2 = 155\%$ ，基本上符合預定的要求。而

$$R_T = \frac{0.018}{0.0506} = 0.355 \text{ 欧 } (75^\circ\text{C})$$

每相外接总电阻为 $0.355 - 0.018 = 0.337$ 欧

所得結果与例一頗为接近。

三、第三种情况 起动电流和起动轉矩均要求为額定值。在这情况下：

$$S = S_H$$

$$M_1 = M_H$$

所以
$$k = \sqrt{\frac{n}{S_H}}$$

普通在电动机容量不超过20仟瓦， S_H 的值約为 0.04~0.08。如用 $n = 6$ 級，則 k 值約为 1.71~1.52；較大容量的电动机， S_H 約为 0.01~0.035。如用 $n = 9$ 級，則 k 值約为 1.67~1.45。起动变阻器普通用的級数約在5~9級的范围中。所以

k 值一般在 1.4~1.8 之間。當 $M_1 = M_H$ 時， $M_2 \left(= \frac{M_1}{k} \right)$ 約為 0.715~0.555 M_H 之間，也即 M_2 可以不低於二分之一額定轉矩值。

〔例三〕 如仍用前面的例子作計算，取 $n = 9$ ，則

$$k = \sqrt[n]{\frac{1}{S_H}} = \sqrt[9]{\frac{1}{0.022}} = 1.528$$

$$R_T = \frac{0.018}{0.022} = 0.818 \text{ 歐 (75°C)}$$

每相外接總電阻為 $0.818 - 0.018 = 0.800$ 歐

M_2 約為 0.655 M_H 。

各級電阻的算法同前。

在公式(2)中，轉子每相電阻 r_2 一項，往往易於忽略，可按下列式求得。

$$r_2 = \frac{1,000 P_H S_H}{m_2 I_2^2 (1 - S_H)} \dots\dots\dots (8)$$

或
$$r_2 = \frac{E_2 S_H}{\sqrt{3} I_2} \dots\dots\dots (8a)$$

式中 P_H 為額定功率(仟瓦)， m_2 為轉子相數， S_H 可按銘牌轉速求得。

I-2. 三相電阻不平衡的截出法

根據前面討論的結果，起動電阻的級數愈多，起動愈加平穩；但電阻級數過多，變阻器的觸頭勢必加多，製造就比

較複雜，而成本也必增加。因此在實用上多採取所謂“三相不平衡的截出法”。電阻不是每次從三相中同時截出，而是每次輪流從一相中截出一段電阻，直至全部電阻截出為止。這樣使變阻器的觸頭大為減少，製造簡化，成本降低。在實用中，不平衡截出法雖然使轉子電流有一些不平衡，但不平衡的程度並不大，而且是在三相中輪換進行的，同時時間也很短，對電動機本身和供電線路的影响都不大。在不平衡截出法當中，三相電阻的分布仍應保持等比的关系。在一相內截出一段電阻後，余留在該相中的電阻和其他兩相中的電阻，也應保持等比关系。這樣轉子中每相的等效電阻將等於等比級數的中項，並且按着等比关系逐級變化。

圖3中如令各相總電阻為 R_A , R_B 和 R_C ，並假定

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{R_B}{R_C} = k$$

從等效電阻的求法則有

$$\begin{aligned} R_E &= \frac{R_A R_B + R_B R_C + R_C R_A}{R_A + R_B + R_C} \\ &= (k R_B^2 + R_B^2 / k + R_B^2) / (k R_B + R_B + R_B / k) \\ &= R_B^2 (k + 1/k + 1) / R_B (k + 1/k + 1) \\ &= R_B \end{aligned}$$

如令 R_1, R_2, \dots, R_6 為當手柄在不同位置時轉子各相的總電阻； $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_6$ 為對應的每段電阻，則當起動時各相的電阻為

$$R_A = R_1 = k^6 r_2$$