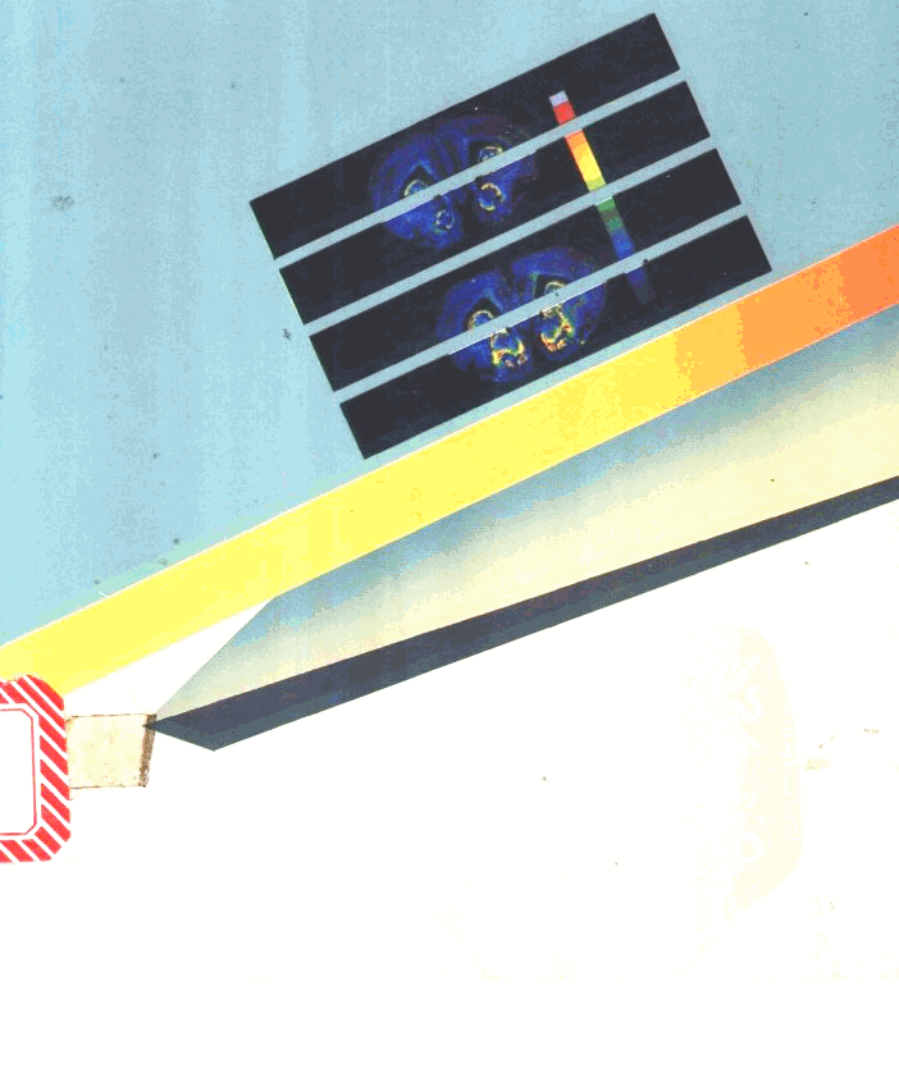


工程科技叢書

電動機控制工程

白玉良編譯 劉群章校訂



工程科技叢書

電動機控制工程

白玉良編譯・劉羣章校訂

工程科技叢書編審委員會

主任委員：虞兆中

編審委員：

于惠中	王瑞材	李家同	呂維明
林世昌	孟繼洛	施振纓	夏鑄九
郭德盛	陳義男	陳興時	黃正義
黃丕陵	黃秉鈞	葉超雄	鄧啓福
劉清田	羅文偉		

中華民國七十二年八月初版
保有版權・翻印必究

定價：新臺幣二五〇元

編譯者 白 玉 良
校訂者 劉 羣 章
發行人 王 必 成

出版者 聯經出版事業公司
臺北市忠孝東路四段 557 號
電話：7074151・3940137 郵
政劃撥帳戶第 100559 號

行政院新聞局出版事業登記證局版臺業字第 0130 號

• 44006-4 •

序 言

隨着工業技術的現代化，工廠設備的自動化、合理化以及省能源化已成為工業技術革新的主流。近數年來，因為閏流體應用技術的突飛猛進，在電力轉換技術領域裏產生所謂的「電力電子技術」(power electronics technology)及「能源電子技術」(energy electronics technology)的新觀念。這一種技術對於現代工業控制技術分野，確有其不可磨滅的絕對貢獻。然而，對於一個「驅動源」而言，電動機的利用，不但仍然維持其本來的鞏固基礎，其運用範圍且在日益擴大。所以要計畫一個工廠之新設、擴充、或更新時，控制工程師仍應優先考慮電動機的利用問題。

反觀電動機本身的變遷歷史，其本身的基本控制理論，並沒有太多的變化，而所有變化，却都發生在其控制裝置上面。現代工業的控制系統，除了原來的「序控」(sequence control)以外，「自動控制」(automatic control)，「程序控制」(process control)，「電子計算機控制」(electronic computer control)等，都已到了極度技術化的境地。所以做為現代控制技術工程師，應對這些控制技術隨時吸取新的技術，以便在實際應用時，期能得心應手外，對於普遍被用為驅動源的電動機本身的特性及其基本控制理論，應先有充分的了解，始能適當選用電動機及合理有效的控制設備，以配合整個工廠機構在基本運轉上的需求。

電動機控制工程範圍相當廣泛且複雜。本書不準備網羅一切而徒增讀者之困惑。所以僅包括一些電動機控制上之基本理論及常用之控制電路，以期讀者於讀完本書後，能對電動機控制工程有一概括的了解。本書各章尚附以習題，使讀者能利用做習題而進一步了解各種控制電路的真諦。如果讀者欲在電動機控制技術上，能有更進一步的了解，除續讀各種控制技術書籍外，筆者要特別推薦常讀「IEEE TRANSACTION ON INDUSTRY APPLICATIONS」的各期論文。

本書一共分為：

第一章：電動機控制系統概要；

第二章：電力變換控制系統；

第三章：電動機的起動、停止控制；

第四章：電動機速度，反轉，及制動控制；

第五章：單相電動機的速度，反轉及制動控制；

第六章：靜態控制，及

第七章：自動反饋控制系統；

等七章，內容力求深入簡出，避免引入複雜難解的數式。所以不但合於教學之用，亦可供自修之參考。

筆者從事配電工作及執教多年，深知電動機控制技術在現代工業界的重要性，故乃着手收集各種工廠設計時所必備的電動機控制技術資料，予以重編整理後寫成本書。如果本書能夠提供同好一些參考，則筆者當深感榮幸。

白玉良識

民國71年10月

目 錄

第一章 電動機控制系統概要

1-1 電動機控制系統的選擇.....	1
1-2 電動機種類及其特性.....	3
1-3 電動機控制電路圖號.....	50
1-4 習題.....	60

第二章 電力變換控制系統

2-1 旋轉換流機.....	63
2-2 靜態電磁換流器.....	67
2-3 電子管換流器.....	72
2-4 半導體整流器.....	73
2-5 習題.....	96

第三章 電動機的起動、停止控制

3-1 概要.....	97
3-2 直流機及交流機的手起動.....	99

3-3	習題(1).....	116
3-4	直流機自動起動.....	117
3-5	習題(2).....	128
3-6	交流機自動起動.....	131
3-7	習題(3).....	161

第四章 電動機速度反轉及制動控制

4-1	概要.....	165
4-2	直流機的手動，或自動控制.....	166
4-3	習題(1).....	199
4-4	交流多相機的手動或自動控制.....	201
4-5	多相交流機不同運轉實務控制.....	226
4-6	習題(2).....	235

第五章 單相電動機的速度、反轉及制動控制

5-1	單相機的反轉.....	239
5-2	單相機的速度控制.....	240
5-3	可飽和電抗器及磁性放大器控制.....	244
5-4	單相機電子控制.....	247
5-5	單相機控轉制動.....	252
5-6	單相機動力制動.....	252
5-7	交流串激及通用機的開流體速度控制.....	256
5-8	習題.....	265

第六章 靜態控制

6-1	概論	267
6-2	邏輯和功用	267
6-3	邏輯積功用	269
6-4	邏輯否定功用	271
6-5	記憶邏輯	272
6-6	延時功用	274
6-7	「反或」及「反及」功用	274
6-8	邏輯代數及基本邏輯	276
6-9	電驛邏輯與靜態邏輯變換	279
6-10	靜態邏輯系統附件	283
6-11	靜態邏輯控制系統	294
6-12	靜態邏輯系統設計	300
6-13	習題	305

第七章 自動反饋控制系統

7-1	概論	307
7-2	通用伺服機構	308
7-3	伺服機構元件	311
7-4	伺服機構的準確性	313
7-5	伺服機構的不穩定性	315
7-6	阻尼伺服機構	316
7-7	阻尼方式	319
7-8	轉換器	323
7-9	調變器	325
7-10	調變器放大器	326
7-11	直流放大器	328
7-12	自動程序控制實例	329

7-13 轉移函數.....	330
7-14 以開路轉換函數來預測閉路穩定性.....	334
7-15 串接補償.....	337
7-16 增益因數補償.....	354
7-17 反饋補償.....	358
7-18 習題.....	361
習題解答.....	367

第一章

電動機控制系統概要

§1.1 電動機控制系統的選擇

電動機控制系統的選擇，須先具備電動機及控制器方面的基本知識，並了解電源、電動機及控制器間的密切關係，始能設計合理有效的控制系統，因此欲計畫設計一套良好電動機控制系統時，需先檢討各項計有：

- (1)電動機特性。
- (2)負荷特性。
- (3)電源特性。
- (4)操作要求。及
- (5)經濟性。

其中(1)(2)二項間尤其是有密切的關係。究竟由負荷特性來選用電動機抑或使負荷特性來配合電動機特性，則屬於個案研究問題，必需充分考慮其經濟性後始做決定。一般原則，則以負荷特性來選用適當電動機為主。選用電動機時，需先確知負荷對於起動停止、旋轉方向、運轉狀況、速度控制及安全事項等要求後始能做適當的選擇。例如加速減速時間短，且頻度高的電動機熱容量， GD^2 等則成為選擇時的問題點。

對於第(3)項，如果電源容量不充裕時，一般說來較難獲得理

想的控制方式。例如某鼠籠形感應電動機雖然可以符合其負荷特性的要求，但有可能因電源不充裕而被迫改採繞線形感應電動機或極數變換形感應電動機。又如煉鋼廠的鐵塊壓延機，因急促的負荷驟變而可能導致電壓閃爍問題。所以從控制的觀點而言，可以採用靜態電源，然而改善閃爍問題却不得不採用備有飛輪的 *M-G* 機組。有時為了改善工廠的功率因素，還要考慮採用高價的同步電動機。又採用靜態電源時，還要考慮其所產生的高次諧波問題。

第(5)項的經濟性，則為任何工程計畫都應加考慮的問題，單以高超技術為目標，採用高級的控制裝置則屬毫無意義。尤其太高級的裝置往往過於複雜，所需備品也多，反而降低其可靠性。

因為電能的被廣泛利用，電動機已被普遍使用於現代工商業場所，使電能變換為有用的機械能，以帶動機器及控制各種生產作業。這些經由齒輪、皮帶、滑輪或直接連接於電動機的機器或其他機械設備，就是所謂的電動機負荷。在許多場合裏，這一種負荷需以各種不同轉向及不同速度轉動，以符合某種預定的操作程序（如大廈裏的電梯等）。成羣的電動機，則需要在彼此間具備一種更複雜的動作程度（如化工廠及煉鋼廠裏的電動機運轉屬之）。

供應電動機的電能則依負荷特性要求，使用一種叫做控制器（controller）的設備來做成程序並控制任何時刻負荷所要求的轉矩、速度及轉向等。控制器通常分為手動及自動二種。動作程序及控制順序完全由操作的人控制者稱之為手動控制器（manual controller）。反之，則稱為自動控制器（automatic controller）。其自動化的程度則取決於程序上的需要或所控制負荷特性上的需要。如屬簡單的控制，則一種簡單的電動機起動器（motor starter），則已足夠派上用場。如果需要更複雜的控制程序或控制方法，則需採用複雜的控制器。如所控制的負荷或程序不

受外在因素的影響，或所控制負荷不要太精密的控制，則可使用一種叫做開路系統 (open loop system) 的控制系統。如洗衣機，以預定的控制順序完成控制的方式者屬之。反之如需更精密的過程控制或負荷轉矩及速度控制，則應使用一種更複雜的閉路控制 (closed loop system)。一般所謂的反饋控制系統 (feedback control system) 屬之。

因為控制系統通常包括保護設備，以便由保護設備來驗知故障，並指使控制系統來停止電動機運轉，同時打開電路，所以學習控制系統時，不得不提及電動機保護設備及其與控制系統的連帶關係。

§1.2 電動機種類及其特性

如前所述，欲對電動機做合理而有效之控制，需先充分了解電動機特性。本節將對各種電動機的特性中特別與控制有關部分做一簡單扼要的介紹，以便進一步學習電動機控制有關事項。

1.2.1 電動機種類

電動機依電源別可分為：

- (a) 直流電動機。
- (b) 交流電動機。
 - (1) 單相交流電動機。
 - (2) 三相交流電動機。

又依動作原理可分為：

- (a) 直流電動機。
- (b) 感應電動機。
- (c) 同步電動機，及
- (d) 交流整流電動機，

等多種。

1.2.2 電動機原理

設：

B ：磁通密度(wb/m^2)

i ：電流(A)

l ：導體長度(m)

則電動機所產生之旋轉力

$$F = Bil(N) \quad (1-1)$$

所使用之磁場有由直流激磁線圈所產生的「固定磁場」，單相交流所產生的「交變磁場」及三相交流所產生的「旋轉磁場」等三種。電動機的固定部分，稱為「定部」(stator)，旋轉部分則稱為「轉部」(rotor)。定部及轉部則由構成磁束通路的鐵心及產生磁束或感應電壓電流的繞組所構成。其中僅用以產生磁束而不感應電壓者稱為「磁場繞組」(field winding)；而用以感應電壓者稱為「電樞繞組」(armature winding)。

電動機的轉矩與磁束電流的關係如下：

$$T \propto \phi I \quad (1-2)$$

又電動機輸出 P 與轉速 N 及轉矩 T 間有如下的關係：

$$P \propto NT \propto N\phi I \quad (1-3)$$

所以在一定輸出的情況下，轉速與轉矩成反比。一般地，磁束 ϕ 決定鐵心的量，電流 I 決定銅線的量。所以電動機的大小取決於轉矩而非輸出，在一定輸出的情況下，低速機的外形通常大於高速機。

1.2.3 電動機轉矩特性與安定性

圖1-1 示各種電動機的典型轉矩特性。曲線II及III示轉矩對速度變化的「分激特性」，曲線V則示轉矩隨着轉速做大幅度

變化的「串激特性」。曲線VI則示介於上二者中間的「複激特性」，這一種特性又稱為「高轉差率特性」。

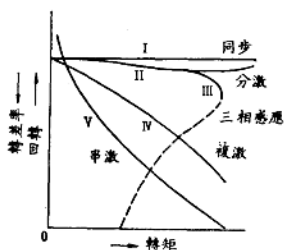


圖1-1 電動機轉矩特性

因為負荷變化而產生之速度變化，通常以「速度變動率」(speed regulation) 來表示。設 N_0 代表無載時轉速， N 代表額定負載時轉速，則

$$\text{速度變動率} = \frac{N_0 - N}{N} \times 100\% \quad (2-4)$$

電動機的轉矩特性需與負荷特性有適當的配合，否則無法獲得安定的運轉。

圖1-2 示電動機轉矩特性與負荷特性應如何獲得適當的配合。

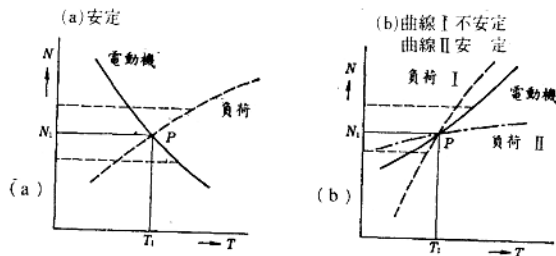


圖1-2 電動機運轉的安定性

圖1-2(b) 示一種「右上」的轉矩特性，則轉速愈高，轉矩愈大。此時，如負荷特性如該圖曲線 I 所示則在 P 點以上時，速度愈大，電動機轉矩愈大於負荷轉矩，所以電動機將一直加速，直到機件損壞，或保護設備開始動作而停止電動機為止。相反地在 P 點以下時，轉速愈低，則電動機轉矩愈小於負荷轉矩，所以會一直減速到電動機停止，或保護設備開始動作。所以這一種轉矩特性的配合，將無法獲得安定的運轉。

圖1-2(a) 所示的右下特性及圖1-2(b)的右上特性與曲線 I 的配合都屬於安定的適當配合。感應電動機在最大轉矩以上範圍運轉時，直流差動複激電動機，及直流分激電動機在大電流區域運轉時，都將呈右上特性。

1.2.4 電動機的一般特性

(a)輸入電力

直流電動機：

$$P_1 = VI(W) \quad (1-5)$$

單相交流電動機：

$$P_1 = V_1 \cos \phi (W) \quad (1-6)$$

三相交流電動機：

$$P_1 = \sqrt{3} V I \cos \phi (W) \quad (1-7)$$

(b)電動機轉出功率

$$P_s = \frac{2\pi N}{60} T = \frac{NT_s}{0.974} (W) \quad (1-8)$$

但：

N ：轉速(rpm)

T ：轉矩(N-m)

T_s ：轉矩(kg-m)

(c)電動機效率

$$\mu = \frac{P_m}{P_i} \quad (1-9)$$

但:

μ : 效率

P_m : 電動機輸出電力(W)

P_i : 電動機輸入電力(W)

1.2.5 直流電動機

(a) 直流電動機 主磁極在定部, 電樞繞組則置於轉部的槽中, 並經由整流子引接到外部電源。其轉矩則由外部直流電源所供應的電流與主磁極磁場間的作用所產生。直流電動機可分類如下:

(1) 以主磁極繞組的分類方法:

分激電動機: 如圖1-3(a)所示, 係將磁場繞組與電樞繞組接成並聯者。

串激電動機: 如圖1-3(b)所示, 係將磁場繞組與電樞繞組接成串聯者。

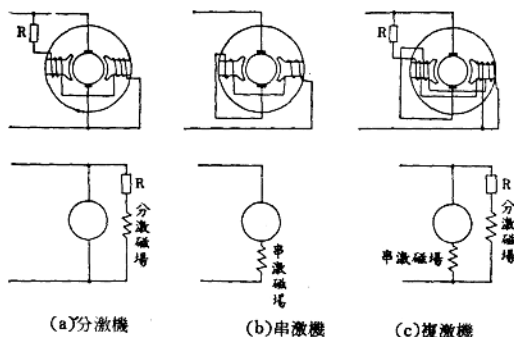


圖1-3 直流電動機的繞線圖

複激電動機: 如圖1-3(c)所示, 同時具有並聯磁場及串聯磁場者。

在分激電動機，有時另加一些串聯的磁場繞組，而這一種繞組稱之為「安定繞組」，其接線看起來很像複激電動機而事實上卻具有分激電動機的特性。

(2)以構造等的分類方式：

單電樞、雙重電樞、彙接電樞，及雙電動機驅動等；圖1-4示直流電動機各種不同的電樞構造方式。一般的電樞，多採用單電樞的構造。但有時為求控制上的快速反應，而須降低電動機的 GD^2 時，需將電樞分割成二個，其分割方式則如圖1-4所示各種。有時容量較大時，受限於電壓電流的條件，或以整個機械設備的經濟性或彈性的需要，亦有採用分割電樞方式者。

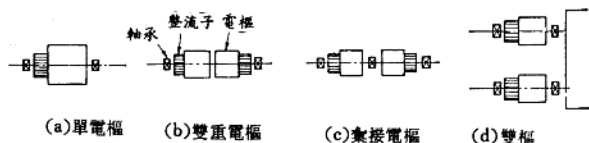


圖1-4 直流電動機各種電樞構造

旋轉方向、可逆、非可逆等：旋轉方向有單方向及雙方向者，又分為電氣方式及機械方式等二種，欲改變旋轉方向，可以改接電樞電流或磁場方向即可。

過載容量：電動機為了應付其本身的過載，或急促的加減速所引起的過載，需具備適當的過載容量。通常有：150% 15秒，150% 1分，175% 1分，200% 1分，及225% 1分等各種。

(b)直流電動機的基本特性：

(1)電壓平衡式：

$$V_a = E + I_a R_a (V) \quad (1-10)$$

$$E = K\phi N (V) \quad (1-11)$$

其中 V_a ：端子電壓(V)

E ：反電動勢(V)