

閘流體控制直流電動機 的運轉與維護

上山直彥 編著
許 溢 适 譯

51
51

大學圖書出版社印行

閘流體控制直流電動機 的運轉與維護

上山直彥 編著
許 溢 适 譯

大學圖書出版社印行

版權所有 * 翻印必究

中華民國七十二年七月 日出版

**閘流體控制直流電動機
的運轉與維護**

基本定價：五元 角正

原著者：	上	山	直	彥
編譯者：	許	溢		适
發行人：	華	毛	幼	琪
發行者：	大	學	圖	書
			出	版
			社	

地址：台北市羅斯福路四段12巷5-1號

（台灣大學對面）

電話：3215535• 3413374• 3211208

郵撥：13668號大學圖書公司

印刷者：永美美術印刷製版有限公司

登記證：局版台業字第一〇二一號

序

最近半導體應用的發展非常顯著，電動力應用的方面也不例外，
閘流體、電晶體、IC 以及 LSI 等使用很多。其中利用閘流體驅動直
流電動機的閘流體柳納德裝置，有優秀的控制性能，閘流體開發的幾
十年，幾乎獨佔柳納德控制。

此與傳統的華德黎翁方式（MG），或水銀整流器的靜止柳納德
比較，就經濟性，維護性，控制性，裝置的容易性，可靠性，效率，
騒音等格外優秀的關係。又隨最近產業界技術的長足進步，隨產業機
械的自動化，省力化的前進，可變速驅動電動機以及自動控制的必要
性徐徐增高，利用範圍也達非常多方面。

在這裡可變速支柱的閘流體直流機之控制，根據基礎與控制理論
，就閘流體控制裝置採用時的心理準備，問題點應用與實際，工廠運
轉時的具體上維護，點檢，淺易來解析，特別從事電氣設備運轉技術
人員的諸位，使能有效活用，重點置於實務的方面，相信他書的類例
很少，為本書的特點。

本書相信尚有不少不妥之處，希望電機界先輩賜予指正。

著者

譯者序

近年科技的進步非常驚人，工程人員所負的責任也愈來愈重大，譯者曾在三菱電機，三菱重工研究實習一段時間，覺得日本的讀書風氣很盛，研究精神值得國人效法，平實閱讀一些有關日文的科技書籍，選擇一些較好者試譯成中文，供我國工業界及學生參考閱讀，如能對國家社會有一點貢獻就達到譯者的願望。

閘流體控制DC電動機的運轉與維護書籍，市面上尚無看到，本書可視為前譯「閘流體電動機」的第二冊，不久將再出版「閘流體AC電動機」可視為第三冊，一套共三冊，這些書的出版相信對國內工程界有相當參考的價值。

譯者所用名詞皆為工程界常用之名詞，或教育部公佈之標準電機工程名詞，有些為譯者試譯。

譯者所知有限，大胆試譯疏誤之處在所難免，尚祈學者先進賜予指正。

許滄适 謹識於台北

目 錄

第一章 直流機控制的基礎	1
1-1 直流電動機轉矩發生的原理	1
1-2 直流機的基本特性	2
1-3 直流電動機的特性	3
1-3-1 直流電動機的基本式	3
1-3-2 利用激磁的控制	4
1-3-3 利用端電壓的控制	4
1-4 開流體控制的基本動作	4
1-5 漣波對直流電動機的影響	6
1-5-1 整流的惡化	6
1-5-2 漣波容許值	7
1-5-3 電抗器的決定	7
1-5-4 開流體對直流機的影響	10
1-6 開流體控制裝置的構成與電路	15
1-6-1 有關開流體的電路構成	15
1-6-2 有關控制系統的構成	15
1-7 設保持電路的反饋特性	19
第二章 開流體變換裝置的構成與動作	25
2-1 主電路構成	25
2-1-1 直流截波器	25
2-1-2 一方向結線	27
2-1-3 十字結線	29

2 目 錄

2-1-4 逆並聯結線	31
2-1-5 單基切換方式	34
2-1-6 激磁切換方式	35
2-2 自動控制電路	36
2-2-1 利用直流截波器的速度控制	36
2-2-2 附電流限制電路速度控制	38
2-2-3 附電流小控制速度控制	39
2-2-4 自動激磁減弱控制	41
2-3 保護電路	42
2-3-1 閘流體變換器的保護	42
2-3-2 電動機的保護	50
2-4 順序電路	51
2-4-1 運轉順序	51
2-4-2 停止順序	52

第三章 自動控制理論

3-1 控制理論的基礎	55
-------------------	----

3-1 控制理論的基礎	55
3-1-1 反饋控制系統	55
3-1-2 轉移函數與波德線圖	56
3-1-3 運算放大器的轉移函數	61
3-1-4 直流電動機的轉移函數	61
3-2 速度控制	65
3-2-1 電流控制系統的轉移函數求法	65
3-2-2 電流控制系統的波德線圖畫法與電路常數的求法	70
3-2-3 速度控制系統的轉移函數求法	73
3-2-4 速度控制系統的波德線圖	75
3-3 環控制	77
3-4 張力控制	80

第四章 直流機的應用	85
4-1 製鐵工業的應用	85
4-1-1 熱軋連續壓延機	87
4-1-2 分塊及厚板壓延機	90
4-1-3 型鋼壓延機	92
4-1-4 鋼管壓延機	93
4-1-5 線材及棒網壓延機	93
4-1-6 冷軋壓延機	94
4-1-7 連續冷軋壓延機	95
4-1-8 連續帶鋼處理設備	96
4-2 非鐵工業的應用	98
4-3 製紙工業的應用	98
4-3-1 抄紙工程	98
4-3-2 加工工程	101
4-4 化學、纖維工業的應用	103
4-4-1 輪胎線機	103
4-4-2 塑膠壓延機線	104
4-4-3 織布加工線	106
4-5 載重、搬運機械的應用	106
4-5-1 起重機	107
4-5-2 索 道	108
4-6 礦山的應用	108
4-7 交通機械的應用	109
4-7-1 電車的特性	110
4-7-2 交流電車	112
4-7-3 直流電車	115

第五章 點檢、維護與試驗	121
5-1 直流機的試驗	121
5-1-1 概 說	121
5-1-2 試驗項目	121
5-1-3 線圈及繞線的電阻測定	122
5-1-4 線圈的極性調查	123
5-1-5 空隙的測定	123
5-1-6 電刷壓力的測定	123
5-1-7 整流子的振動測定	124
5-1-8 各部分連結的點檢	124
5-1-9 電刷跨距的點檢	124
5-1-10 握刷器與整流子面的間隙點檢	125
5-1-11 振動調整	125
5-1-12 電刷位置的決定	125
5-1-13 整流調整	127
5-1-14 無負載特性試驗	130
5-1-15 負載特性試驗	130
5-1-16 溫度試驗	133
5-1-17 損失測定	133
5-1-18 過速度試驗	134
5-1-19 飛輪效應 (GD^2) 的測定	134
5-1-20 絕緣電阻測定	135
5-1-21 耐電壓試驗	137
5-2 直流機的維護與點檢	137
5-2-1 一般的注意事項	137
5-2-2 日常點檢	137
5-2-3 週期，月間點檢	139

5-2-4 定期點檢	140
5-3 直流機的重要維護點檢項目	142
5-3-1 整流子，電刷周圍的維護點檢	142
5-3-2 軸承的維護點檢	158
5-4 閘流體變換裝置的試驗	165
5-4-1 一般性試驗	165
5-4-2 通電準備	166
5-4-3 特性試驗及各部份的設定調整	168
5-4-4 閘流體控制試驗	175
5-4-5 模擬試驗	184
5-4-6 其他的試驗	186
5-4-7 其他的電路方式	187
5-4-8 異常現象	195
5-4-9 其他的一般性注意項目	198
5-5 控制裝置的維護與點檢	200
5-5-1 一般性注意事項	200
5-5-2 日常點檢	201
5-5-3 定期點檢	202
5-5-4 閘流體故障發現法	206
5-5-5 閘流體元件的交換	208
5-5-6 故障儘快修理	208
5-5-7 故障檢修	210

第一章 直流機控制的基礎

1-1 直流電動機轉矩發生的原理

首先討論直流電動機為何轉動的基本問題。圖 1-1 所示為最簡單型之 2 極 3 整流片的直流機構成圖。實際的直流機，具有相當多的整流片數，在這裡為容易理解起見如圖所示考慮 3 線圈的直流機。如用模型圖如圖 1-2 所示。今圖 1-1 的直流機依所加電壓，考慮如何承受轉矩，以何方向轉動。此時的條件假定如下：

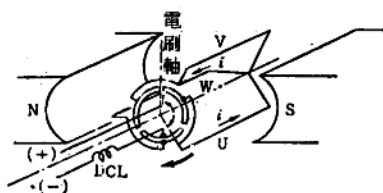


圖 1-1 直流機構成圖

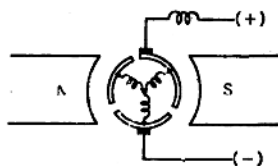


圖 1-2 直流機模型圖

- (1) 因磁場強度假定磁通分佈一樣。
- (2) 直流電流利用電抗器假定完全平滑化者。
- (3) 不考慮電樞反應的影響。

圖 1-1 的直流機動作如下。首先圖 1-1 的轉子位置，電樞線圈所流的電流 i 為， $(+) \rightarrow U$ 線圈 $\rightarrow W$ 線圈 $\rightarrow (-)$ 的方向。此時 U 線圈的承受轉矩，如圖 1-1 箭頭的方向為正確，如式 1-1 所示。

$$T_v = r i B l \sin \theta \quad (1-1)$$

假定， r ：線圈的半徑〔m〕

i ：直流電流〔A〕

2 開流體控制DC電動機的運轉與維護

B : 激磁的磁通密度 [wb/m²]

ℓ : 線圈長度 [m]

θ : U 線圈與直軸 (圖 1-1 的電刷軸) 的角度。

又根據同樣的考慮法, W 線圈作用的轉矩 T_w 可用下式表示。

$$T_w = r(-i)Bl \sin(\theta + 120^\circ) \quad (1-2)$$

由此種結果, 轉子向右側轉動, 總轉矩 T 如下式所示。

$$T = T_U + T_w = T_P \sin(\theta - 30^\circ) \quad (1-3)$$

假定, $T_P = \sqrt{3} r i B l$

如以上所述承受轉矩, 圖 1-1 的直流機電樞向右方向轉動, 今達 (+)→ V 線圈→ W 線圈→(-) 的模式。如此對 θ 的變化, 變化電流的通電模式, 經常發生同一方向的轉矩作用, 為直流機整流子的作用。

1-2 直流機的基本特性

其次考慮直流電動機的基本特性, 求電樞的感應電動勢與電樞電流的關係。在這裡,

e : 感應電動勢 [V]

i : 電樞電流 [A]

e_1 : 電樞線圈的平均電動勢 [V]

ϕ : 總磁通

d : 電刷間串聯連結的線圈數

Z : 電樞導體數

$2a$: 並聯電路數

$2p$: 極數

n : 轉數 [rps]

$$\text{得, } d = \left(\frac{Z}{2} \right) / 2a \quad (1-4)$$

$$e = d e_1 = \frac{pZ}{a} \cdot \phi \cdot n = K_1 \phi n \text{ [v]} \quad (1-5)$$

假定 $K_1 = pZ/a$ 由機械決定的常數。

$$\text{故得 } ei = \left(\frac{pZ}{a} \phi n \right) \left(\frac{2\pi a}{pZ} \cdot \frac{T}{\phi} \right) 2\pi n T \quad (1-6)$$

但 T 如前述的發生轉矩。此式 1-6，電樞電流 i 與感應電動勢 e 的方向相反，依 ei [W] 的變換電力，得 $2\pi n T$ [W] 的動力，同時如負載轉矩一定，依 e 的變化，其意義為轉數 n 能自由控制。另一方面根據式 1-5，因 $e = K_1 \phi n$ 的關係，變化激磁電流而變化 ϕ ，雖相同的電樞電壓，轉數 n 與 ϕ 成反比例變化，依激磁電流，還是表示 n 能自由控制。前者的電樞電壓控制方式，稱為電樞電壓控制方式，一般適合轉矩一定特性的負載，後者的變化激磁電流方式，稱為激磁控制方式，大都用於輸出一定特性的負載。

1-3 直流電動機的特性

1-3-1 直流電動機的基本式

直流電動機所加電壓與電路的電壓降以及電流的關係，可用下式表示。

$$E = E_R + E_M = R_a I_a + k_n n \phi \quad (1-7)$$

上式， E ：加於電樞電路的電壓 [V]

I_a ：電樞電流 [A] 阻 [A]

R_a ：電樞電路的總電阻 [Ω]

ϕ ：電動機激磁磁通 [Wb]

k_n ：電動機的比例常數

n ：電動機轉數 [rpm]

圖 1-3 表示直流電動機的電氣等效電路，此圖為電樞電路的總電阻聚合在一地方作為 R_a 。加於電樞電路的電壓 E ，等於電樞電路的電壓降 E_R 與 n 速度橫切磁通 ϕ

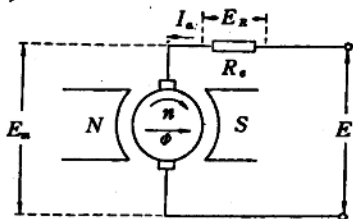


圖 1-3 直流電動機等效電路

4 閘流體控制DC電動機的運轉與維護

所生電動機電樞的反電動勢 E_m 之和。

由式 1-7，得有關電動機速度 n 如下式所示。

$$n = \frac{E - R_a I_a}{k_E \phi} \quad (1-8)$$

如看式 1-8，在 E ， R_a ， ϕ 中變化任何，可知能控制直流電動機轉速 n 。

1-3-2 利用激磁的控制

式 1-8 的基本式，變化磁通 ϕ 的控制方式。

式 1-8 如其他的項一定得，

$$n = \frac{E - R_a I_a}{k_E \phi} = \frac{A}{\phi} \quad (1-9)$$

$$A = \frac{E - R_a I_a}{k_E} \quad (1-10)$$

可知轉數與磁通成反比例。故如減少激磁電流，轉數上升，強化激磁轉數下降，能作速度的控制。但此種控制方式，也有電動機本身的性能問題，一般限於 4 : 1 程度的控制範圍。

1-3-3 利用端電壓的控制

式 1-8 的基本式變化電樞端電壓時，可知能控制轉數。今為容易理解起見，激磁的磁通 ϕ 一定，如不計負載電流引起內部的電壓降，端電壓與轉數有比例關係。如前所述，電動機的輸出轉矩與電樞電流 I_a 成比例，負載與速度無關如要求一定的轉矩，電樞電流與電動機的速度無關變一定。一般的產業機械大部份約一定的轉矩特性，此種控制方式在非常廣的應用範圍實用化。如電樞電流一定，輸出與速度變成比例增大。

1-4 閘流體控制的基本動作

利用閘流體控制直流電動機的電樞，所謂柳納德控制時的特性，與MG機組得普通的直流電源控制有不同的靜特性。

此起因於電流為脈流，直流電動機如圖 1-4 所示的等效電路替換時，可知下面的方程式成立。

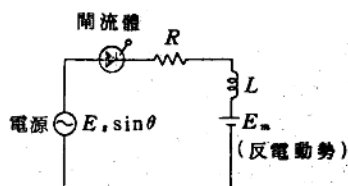


圖 1-4 開流體控制的等效電路

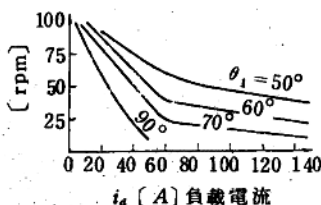


圖 1-5 開流體控制的速度變動率

$$E_s \sin \theta - (E_m + E_t) = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a \quad (1-11)$$

E_t 為開流體的內部電壓降， $\theta = \theta_t$ 時，就 $i_a = 0$ 的初期條件，解式 1-11 得，

$$i_a = \frac{E_s}{R} \left[\{ \cos \varphi \sin (\theta - \varphi) + a \} - \{ \cos \varphi \sin (\theta_t - \varphi) - a \} e^{-(\theta - \theta_t) / \tan \varphi} \right] \quad (1-12)$$

上式， θ_t ：點弧角， $\cos \varphi$ ：電樞電路的功因 ($\varphi = \tan^{-1} \omega L / R$)， $E_m / E_s = a$ 。另一方面消弧角 θ_c ，使用 $i_a = 0$ 的條件，不計電源的阻抗與 E_t 求 θ_t 與 θ_c 的關係，無轉流用整流器時，求得，

$$\{ a - \cos \varphi \sin (\theta_t - \varphi) \} e^{\theta_c / \tan \varphi} \quad (1-13)$$

其次有轉流用整流器時，

$$\theta_c = \pi + \tan \varphi \log \frac{1}{a} \left[\cos \varphi \sin \varphi + \{ a - \cos \varphi \sin (\theta_t - \varphi) \} e^{(\theta_t - \pi) / \tan \varphi} \right] \quad (1-14)$$

如 $\theta_c > \pi$ 時， $\theta_c = \pi$ 時變式 1-13。故如解式 1-13 與式 1-4，對各不同之 a 值的連續電流與不連續電流的範圍，能以 $\cos \varphi$ 為變數來表示。結果直流電流 i_a 解前列之式，能用 $\theta_t, \theta_c, a, E_s$ 的函數表示

6 開流體控制DC電動機的運轉與維護

參考上主電路構成就單相全波整流電路的情形，圖 1-5 表示負載電流與速度的關係，由此圖能理解，輕載時速度的變動率變非常大，如負載增加，在其地方急激速度變動率減少。其次式 1-13 及式 1-14 所求點弧角與消弧角的關係為一例，圖 1-6 與 1-7 表示其特性，依主電路的構成，可知電流連續域不大相同。但連續電流時，

$$\theta_c = \frac{2\pi}{n} + \theta_i \quad (n: \text{相數}) \quad (1-15)$$

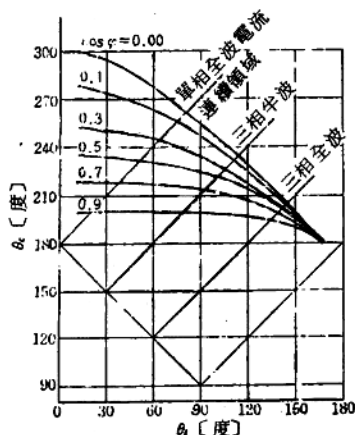


圖 1-6 θ_i 與 θ_c 的關係 ($\alpha = 0.10$
無轉流整流器的情形)

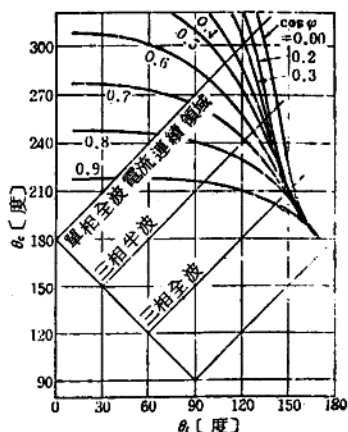


圖 1-7 θ_i 與 θ_c 的關係 ($\alpha = 0.10$
有轉流整流器的情形)

1-5 連波對直流電動機的影響

開流體裝置的電源含有漣波可由前項理解，電壓與電流的漣波引起種種的問題。

1-5-1 整流的惡化

開流體控制時，漣波的影響比平滑的直流電源運轉時，整流會惡化。電樞電流如為脈流，中間極的磁路部分產生渦流，變中間極的磁通變化緩慢。因此電樞電流與中間極磁通之間產生相位差，不會滿足

無火花條件，整流惡化。一般電樞電路裝入串聯電抗器，漣波電流抑制在容許值以下，中間極磁路的積層。採用磁通落後小的對策。又中間極磁路的積層，一般大型機有效，100 kW以下的小型機不太會有效果。其次按漣波電流分，相當電樞線圈的阻抗壓降的電壓，出現於正負電刷間。此稱為阻抗電壓，因漣波分產生的分壓阻抗電壓，出現於各整流子片間的關係，電刷入口側變短路，此種電壓如超過火花發生電壓值，發生火花。更開流體柳納德，大都採用利用開流體的激磁方式，此時主激磁電流當然含漣波，主磁通也脈動。整流中的電樞線圈為要與主磁通交鏈，因變壓器的作用感應電壓更使整流惡化。

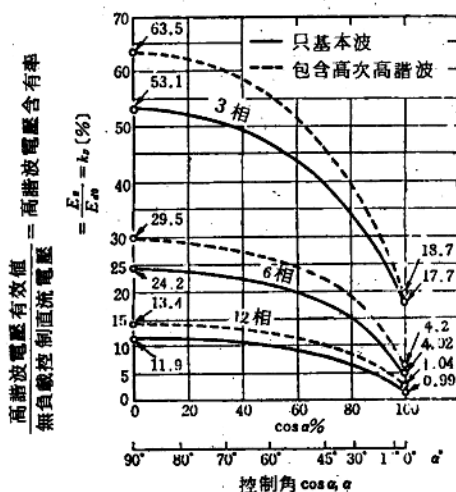


圖 1-8 控制角 α 與包含直流電壓之高諧波分的關係 (不計重疊角)

1-5-2 漣波容許值

直流電動機的漣波容許值依本身整流的難易來決定，一般整流的難易在無火花整流帶評價。

圖 1-10 表示漣波與此無火花整流帶寬度關係之一例。

決定漣波容許值，非求決定與平滑直流運轉時能保持同一的無火