

高等学校教学用书

电 机 学

第四册

Л. М. ПИОТРОВСКИЙ 著
清华大学电力机械教研组译

高等教育出版社

高等學校教學用書



電 機 學

第四冊

И. М. 朴德羅夫斯基著
清華大學電力機械教研組譯

高等教育出版社

本書係根據1949年蘇聯國立動力出版社(Государственное энергетическое издательство)出版的林德羅夫斯基(Л. М. Плотровский)著“電機學”(Электрические машины)譯出的。原書經蘇聯高等教育部審定為動力系及電工系、動力高等學校及電工高等學校用的教科書。

本書綜合地研究電機的各种問題。這些知識是電能和電工高等學校電機製造、發電廠、輸配電及和電機工作有關的其他電工部門各專業組學生所必需的。

本書是專供上述高等學校的學生用的，但對欲繼續在電機領域中深造的現場工程師亦可供參考之用。

參加本書第四冊翻譯和校訂工作的為清華大學電力機械教研組。

本書原由龍門聯合書局出版，現轉移我社出版，用該局原紙型重印。

電 機 學

第 四 冊

J. M. 林德羅夫斯基著

清華大學電力機械教研組譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7號
(北京市書刊出版業營業許可證出字第034號)

商務印書館上海廠印刷 新華書店發行

統一書號 15010·894 開本 850×1168 1/32 印張 8 3/16

字數 191,000 印數 6,000—10,500 定價(10) 1.20

1957年2月第1版 1959年1月上海第4次印刷

目 錄

第四篇 異步無整流子電機

第三十八章 概論	689
1. 異步無整流子電機的發展史	689
2. 異步無整流子電機的運行原理	692
3. 異步電機的轉差及它的運行情況	693
4. 異步電機的基本運行情況	695
5. 異步電動機的基本構造數據	695
6. 額定值(OCT 183-41)	703
第三十九章 在轉子不動下的三相異步電機	704
1. 概要	704
2. 當 $n=0$ 時異步電機的無載運行	704
3. 異步電機的短路	707
4. 鼠籠的參數	709
5. 被制動的異步機在負載下的運行	711
6. 感應調整器	713
第四十章 異步電機在轉子旋轉時的運行	718
1. 概要	718
2. 異步機在旋轉時所發生的主要現象	718
3. 轉子電動勢和轉子電流 I_2 的方程式	720
4. 轉子磁動勢 F_2 的轉速	721
5. 旋轉時異步機之磁動勢方程式	721
6. 異步機轉子之等值電路	722
7. 異步機之等值線路	724
第四十一章 在電動機情況下運行的異步電機	726
1. 概要	726

2. 異步電動機當 n 為常數時的能量圖	726
3. 異步電動機的力矩	727
4. 力矩 M 的一般公式	728
5. 轉矩 M 與轉差的關係(機械特性)	730
6. 異步電機的最大力矩	732
7. 異步電動機的啓動力矩 M_n	733
8. 力矩 M 與電阻 R_2' 的關係	733
9. 當 $\frac{U_1}{f}$ 為常數時力矩 M 與頻率 f 的關係	734
10. 力矩的設計計算公式	735
11. 異步電動機的附加力矩	736
12. 異步附加力矩	736
13. 齒諧波	737
14. 同步力矩	738
15. 擾動力矩	739
16. 防止附加力矩的方法	739
17. 異步電動機的運行特性	741
18. 轉矩的實用公式	746
19. 計算舉例	747
第四十二章 異步電機的圓圖	751
1. 概要	751
2. 異步電機圓圖的基本方法	751
3. 圓圖的簡化。電流圖形的畫出	752
4. 功率直線的畫出	755
5. 損耗和有用功率在圓圖上的確定	757
6. 功率因數, 效率, 轉差和過載能力的決定	759
7. 簡化圓圖的實用畫法	763
8. 珂夫泰珂的較準確的圓圖	765
9. 異步電機有可變參數時電流的幾何軌跡	766
10. 無載試驗	767
11. 短路試驗	767
12. 例題	770
第四十三章 三相異步電動機的啓動	773
1. 啓動的問題	773
2. 異步電動機的啓動特性	774

3. 異步電動機的啓動電流	774
4. 電動機的加速時間	775
5. 異步電動機的啓動力矩	777
6. 相籠轉子電動機的啓動	777
7. 鼠籠式電動機的直接啓動	780
8. 鼠籠式電動機降低電壓啓動	781
9. 同步電動機的異步啓動	785
10. 單電樞換流機的異步啓動	796
11. 異步電動機從電網上斷開	796
第四十四章 深槽電動機	798
1. 概要	798
2. 深槽電動機的運行原理	798
3. 轉子的電阻與電抗	800
4. 深槽電動機的等值電路	802
5. 深槽電動機電流圖	803
6. 深槽電動機的啓動及運行特性	806
第四十五章 多里沃-多布羅夫斯基(Долливо-Добровольский)的雙鼠籠電動機	808
1. 概要	808
2. 雙鼠籠電動機的作用原理	808
3. 雙鼠籠電動機的等值電路	810
4. 雙鼠籠電動機的電流幾何軌跡	812
5. 雙鼠籠電動機的啓動及運行特性	813
第四十六章 三相異步電動機旋轉速度的調節	815
1. 概要	815
2. 三相異步電動機速度的調節方法	815
3. 變更電壓 U_1 調節電動機的轉速	816
4. 變更極數調節電動機的轉速	816
5. 變更原邊頻率調節電動機的轉速	821
6. 變更轉子電阻調節電動機的轉速	822
7. 異步電動機的串級	823
8. 逐步調節速度的特殊電動機	826

第四十七章 三相異步電機在發電機和制動情況下的運行.....828

1. 在發電機情況的運行.....828
2. 異步發電機的向量圖.....829
3. 異步發電機的電流圖.....829
4. 異步發電機和電網並聯運行.....831
5. 自激異步發電機.....832
6. 在電網制動情況的異步電機運行.....832

第四十八章 異步電機的特殊情況.....834

1. 概要.....834
2. 當 $U_1 = \text{常數}$ 及 $f = \text{常數}$ 時異步電動機的運行.....834
3. 當 $f \cong f_n$, $U_1 = \text{常數}$ 及 $M = \text{常數}$ 時正常異步電機的運行.....836
4. 在非正弦電壓下電動機的運行.....837
5. 在不平衡電壓 U_1 下電動機的運行.....838
6. 在變饋情況下異步電動機的運行.....839
7. 在同步聯接系統中的異步電機的運行.....844
8. 單相異步電動機.....851
9. 單相電容器電動機.....856
10. 弧形定子.....859
11. 滑動電磁聯接器.....861
12. 在不平衡轉子時電動機的運行.....862
13. 異步電動機的電制動.....862

第五篇 異步整流子電機

第四十九章 異步整流子電機的一般問題.....865

1. 異步整流子電機發展的簡史.....865
2. 異步整流子電機電樞內之感應電動勢.....867
3. 異步整流子電機電樞的電流及磁動勢.....873
4. 異步整流子電機之整流.....373

第五十章 單相整流子電動機.....880

1. 單相串激電動機的作用原理及轉矩.....880
2. 單相串激電動機的向量圖.....881

3. 改善單相串激電動機整流的方法	888
4. 單相串激電動機的特性	884
5. 單相串激電動機的應用範圍	883
6. 在定子上有兩個繞組的推斥電動機	887
7. 有一套電刷及一個定子繞組的推斥電動機	880
8. 有一套電刷及一個定子繞組的推斥電動機的特性	890
9. 有兩套電刷及一個定子繞組的推斥電動機	892
10. 貝納狄(O. B. Бенедикт)電動機	898
第五十一章 三相並聯與串聯整流子電動機	896
1. 前言	896
2. 在異步電機副邊電路內加入附加電勢	896
3. 從附加電勢電源所引入的功率	900
4. 利用整流子變換頻率	901
5. 有兩套電刷的三相並聯反裝電動機。基本構造元件	903
6. 有兩套電刷的三相並聯反裝電動機的速度調節及 $\cos \varphi$ 的調節	904
7. 有兩套電刷的三相並聯反裝電動機的向量圖	907
8. 有兩套電刷的三相並聯反裝電動機的特性	908
9. 三相串聯整流子電動機。電動機的圖示法及作用原理	910
10. 三相串聯電動機的電壓圖	913
11. 三相串聯電動機的實際聯裝圖	914
12. 三相串聯電動機的特性	916
第五十二章 補償電動機和相位補償器	917
1. 前言	917
2. 補償異步電動機, 由轉子方面餵電	918
3. 轉子激磁的相位補償器, 異步機和補償器的聯合運行	920
4. 各種不同類的轉子激磁的補償器	924
第五十三章 異步電機的串級聯接	927
1. 前言	927
2. 異步電機串級系統, 使用一個單電樞換流機和一個直流電機做為調節之用 (A-O-II 串級系統)。串級系統的作用原理和能量分配圖	929
3. 實用的 A-O-II 串級系統和它的特性	931
4. 雙邊調速的 A-O-II 串級系統的接線法	933

5. 異步電機以補償整流子電機做爲調節電機的串級系統	933
第五十四章 多相整流子發電機	935
1. 作用原理和主要的關係	935
2. 激磁繞組在定子上有補償的整流子凸極式發電機	935
3. H. C. 牙波斯基和 M. II. 珂矢秦珂的補償整流子隱極式發電機	936
4. 整流子發電機的視在功率	939
5. 整流子發電機的整流	940
6. 整流子發電機的應用	941

第四篇 異步無整流子電機

第三十八章

概 論

1. 異步無整流子電機的發展史

異步無整流子電機(爲了簡單起見,以下簡稱爲異步電機)的發展和工業頻率三相交流電氣技術發展的全部歷史一樣,都是和天才的俄羅斯工程師M.O.多里沃-多布羅夫斯基(M.O.Долливо-Добровольский)的名字分不開的,我們在緒論裏已經講過關於他所引起的作用及其意義。

由 M.O. 多里沃-多布羅夫斯基所發明的三相電動機,在它的不同樣式裏,其構造簡單、效率高、運行時可靠以及價格低廉,已爲大家所公認,這些優點使得它能夠被廣泛地應用到工業中去。從 1890 年到本世紀初年的期間內,在已經著名的電動機型式的改良上,在設計電動機新的樣式上以及在一系列問題(這些問題一部份是使用上直接需要所引起的,另一部份是由於這些需要的影響所引起的)深入研究上都做了巨大的工作。

但是可以預料得到的,在異步電動機的使用過程裏,不僅僅出現了它的好的特性,而且還出現了壞的特性。後者最主要的是: a) 異步電動機相當壞的調節特性和 b) 電動機需要從電網裏獲得磁化的感應電流,因此使供給電動機電力的電網 $\cos \varphi$ 變壞。

關於異步電動機速度調節的問題,在本世紀初年具有極其實際的

意義。下面兩個問題相繼被提了出來：那就是市郊和幹線鐵路的電氣化以及需要在廣泛的範圍內調節速度的那些工業部門的電氣化。

經驗說明，在鐵路牽引方面，三相系統不能夠和直流及單相系統競爭。

在起重運輸機裏，關於輸電的問題不像在鐵路牽引方面那樣重要。相反地，還可以利用異步電動機一些有價值的特性，特別是它能在制動情況下運行的能力。所以在起重運輸機裏，三相系統和直流系統都應用得很廣泛。

在金屬製造工業方面，對電動機的速度調節特性特別的重視。異步無整流器電動機不可能同時完全滿足所有的要求，曾經企圖創造一種能在較小的範圍內一級一級地調節轉速的所謂多速度異步電動機，但是沒有達到要求的結果。利用變阻器在轉子電路裏調節速度是很普通的方法，但是這種方法祇能在同步速度以下進行調節，並且還不經濟。所以它主要是在那些電能的價值不佔重要意義的地方，即主要在小容量的設備裏才被應用。在中容量和特別是大量容量的設備裏，電能的經濟有着重大的意義，這種方法就不合適了。在這種情況下，可以利用串級來調節轉速，所謂串級，是一種系統，其中主要的異步電動機在電上或在機械上和輔助的電機聯接起來，這種輔助的電機常常是直流的或交流的整流器電機。最著名的串級型式已經在1908—1910年間提出，並且在某些工業部門裏已經用得相當廣泛了。

如果轉速在大於1:2的範圍裏調節，那麼還不如採用直流的系統。電動發電機及帶有飛輪的電動發電機系統應用得最廣，其中的問題除了調節速度以外，使工作電動機容易起動，也是它們的一個問題。

交流系統和直流系統，在一系列的工業部門裏，平行的存在着，到現在還無法認為其中那一個系統能最後代替了另一個系統。

第二個決定異步電動機發展的問題和電力系統的功率因數問題有關。實際上，非同步電動機也和變壓器一樣，使供給它電力的電網的功率因數變壞。在1915年以前，這個問題還沒有什麼實際的意義。但是以後情形就完全不同了，主要是因為戰爭的需要，工業電力消耗迅速增長的緣故。在解決這個問題上，電機製造是按照改善同步電動機的方法（第三十五章）來進行的，以後還在本世紀20年間，曾經嘗試創造一種補償的和同步化的電動機，即改善了 $\cos \varphi$ 的異步電動機。但是這些電動機的應用說明了，從它們本身總的特性來看，它們還是不如通常型式的電動機，因此也沒有能夠推廣。

差不多在同時，關於綫繞轉子及鼠籠式異步電動機的使用問題上，產生了新的看法。最初綫繞轉子電動機有主要的意義。這是因為：一方面，它在組合拖動的工業裏佔主要地位；而另一方面，由於那個時候，電網還相當脆弱，不能夠承受電動機在起動時那樣大的電流衝擊，在這樣的條件下，綫繞轉子電動機比鼠籠式電動機具有較好的起動特性便起了決定性的作用。但是由於工業企業電力需要的增長，特別是由於在工業上逐漸過渡到個別拖動，即將組合電動機的容量分散成一系列容量小的小電機，原來的情形開始轉變了。在這些條件裏，更便宜，在運行上更可靠以及有更好的運行特性的鼠籠式電動機在所有情況下都成功地代替了綫繞轉子電動機。除此之外，特殊型式的鼠籠式電動機，例如深槽的、雙鼠籠、極數可變的電動機等等都獲得了極大的推廣。在今天鼠籠式電動機已毫無例外地廣泛地應用到小容量的不用調節的拖動上，並且還常常在中容量或甚至在大容量的拖動範圍裏代替了綫繞轉子的電動機。

從上述明顯地知道，異步電動機的發展和其他電機製造部門的發展是密切連繫的，一部份是由於它們的影響，而一部份是自己也影響了

它們，如果直流和交流系統在調節的特性上彼此競爭，那麼在功率因數上，各類型的交流電動機——同步的和異步的交流電動機，都將作為競爭者而出現。最後從電機設備的最簡單及最經濟的方向來看，可以在各類型異步電動機間進行電機的選擇，所有這些事情使得電流種類以及工業企業電機設備的選擇成為相當複雜和嚴重的任務。

在蘇聯，從擬定這些作為大量生產的電機的“統一規格”的觀點來看，關於異步電動機發展過程的詳細敘述可以參看本書的緒論。

2. 異步無整流子電機的運行原理

異步電機是在固定的電網週率下，轉子的轉速隨着負載而變化的交流電機，此外異步電機和同步電機不一樣，在於它是由交流激磁的。在原理上，激磁電流可以從定子邊，也可以從轉子邊產生，但是實際上，從不動的定子邊激磁比從轉動的轉子邊要合理些（作為感應調壓器時例外，請參看第三十章第5節），就不說上面這個關係，在鼠籠式電動機的製造上，從轉子邊激磁也是行不通的。從實際的合理的觀點來看，三相電流比單相更好。因為三相電流產生旋轉的磁通，比由單相所產生的脈振磁通有着一系列的優點。所以在下面我們將祇研究從定子邊激磁的三相異步無整流子電機。

異步電機的運行基於定子與轉子間的電磁相互作用，這種作用，按着它自己的物理性質來說，很類似變壓器原繞組與副繞組間的相互作用。但是變壓器的副繞組在空間裏是不動的，而異步電機，一般情況下，是以速度 n 在旋轉。如果這個速度等於磁通旋轉速度 n_1 並且向着同一的方向，那麼在定子與轉子之間就沒有電磁相互作用存在，因為定子磁通對於轉子來說是不動的。因此轉速 n_1 和 n 的差別是無整流子異步電機兩部份發生相互作用的必然條件，也就是它運行的必然條件。

3. 異步電機的轉差及它的運行情況

$$\text{比率} \quad s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (38-1a)$$

$$\text{或} \quad s = \frac{n_1 - n}{n_1} 100[\%] \quad (38-1b)$$

稱為異步電機的轉差。由於速度 n_1 和 n 彼此間所處的關係上，我們可以將異步電機分成三種運行情況：a) 作為電動機的運行情況；b) 作為發電機的運行情況及 B) 作為電磁制動器的運行情況。

讓我們研究，異步電機的轉差和運行情況是處在怎麼樣的相互關係上。

A. 作為電動機的運行情況 假設，我們在電機裏建立一個對定子沿時針方向以速度 n_1 轉/分旋轉的磁通(在圖 38-1 a 的實線)。其次令轉子不動，即 $n = 0$ 。在這種情況，磁通以全部速度掃過轉子並且在它的繞組上感應出電動勢來。電動勢的方向可以按照右手定則來決定。例如，如圖示的磁通方向在導線 a 裏感應出向着我們的電動勢。電流的有效分量也有同樣的方向。由這個電流所產生的磁通(在圖 38-1 a 上的虛線)和定子磁通的相互作用形成了如圖 38-1 b 所示的總磁通。我們看出，在這個情況下，加到導線上的力 F ，在電機的軸上產生一個

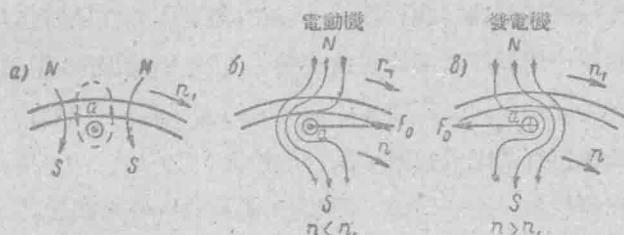


圖 38-1. 異步電機在電動機和發電機情況的運行原理

力矩，這個力矩企圖使轉子向磁通的旋轉方向旋轉，即是轉動力矩。由各個導線所產生的力矩的總和形成了電機的總轉矩，在總轉矩的作用

之下，轉子可以以速度 n 轉動。同時從電網饋送到定子的電能轉換為在軸上的機械能，即電機作為電動機運行。

電動機旋轉的速度 n 決定於它的負載。當無載時，轉速 n 差不多等於 n_1 ，但是不能夠達到 n_1 ，因為當 $n = n_1$ 時，電機不可能作為電動機。

這樣，在從 $n=0$ 到 $n \approx n_1$ 的範圍裏，即在從 $s=+1$ 到 $s \approx 0$ 的轉差裏，異步電機作為電動機運行。

B. 作為發電機的運行情況 假設，由於某原動機的幫助，我們使異步電機的轉子加速到使 n 變得大於 n_1 。在這種情況下，轉差變成負的，因而旋轉磁場對於轉子的方向變得和以前作為電動機運行時相反了。由於這個緣故，在導線 a 裏的電動勢和電流的方向以及在軸上的力矩符號（圖 38-1 a）也變了。因此，由異步電機所發生的力矩成為對於原動機的制動轉矩。在這些條件下，異步電機作為發電機運行，把原動機從軸上饋送給它的機械能轉換成電能，輸送到電網上去。

理論上，我們可以很方便地使轉子快於旋轉磁通。因此，當異步電機作為發電機運行時，轉差處在從 $s \approx 0$ 到 $s = -\infty$ 的範圍內。

實際上，從作為電動機的運行情況到作為發電機的運行情況的轉變是可能的，例如當列車在斜面上下坡時。

B. 作為電磁制動器的運行情況 假設，在某種外在原因作用之下，異步電機的轉子開始反着旋轉磁通旋轉。在這種情況下，從兩方面來的能量——從電網來的電能和從原動機來的機械能——都加到異步電機裏。這樣的運行情況稱為電磁制動的情況。它從 $n=0$ 開始並且在理論上可以繼續到 $n = -\infty$ 。因此，當異步電機作為制動器運行時，轉差處在從 $s=+1$ 到 $s = \frac{n_1 - (-\infty)}{n_1} = +\infty$ 的範圍內。

實際上，在電磁制動情況下的運行，常常被利用在當負載卸下時的起重設備裏。

4. 異步電機的基本運行情況

異步電機差不多毫無例外地在電動機情況下運行。由於它的簡單、價廉、效率高及運行可靠，繞繞轉子的或鼠籠式的三相異步電動機在工業上有廣大的用途，特別在小的和中等的容量，不需要調節的拖動上。相反地，異步發電機由於它的特性不及同步發電機（參看第四十七章），因此僅僅應用在特殊的裝置上。最後，電磁制動的情況可以作為在某類型裝置裏的異步電動機運行的輔助情況來研究。所以我們首先研究由定子邊饋電的三相異步電動機的運行，僅在特別的一章裏才敘述異步電機在特殊情況裏的特性。

5. 異步電動機的基本構造數據

異步電動機有兩種基本的類型：a) 繞繞轉子（相轉子）的和 b) 鼠籠式（或短路轉子）的。

各類型異步電動機的定子彼此間是毫無分別的，在轉子間才能觀察到顯著的不同。

A. 異步電動機的定子 異步電動機定子鐵心的裝配和同步電機一樣，是用 0.5 公厘厚的電工鋼片（矽鋼片）來製造的，在製造定子時，主要的問題是：a) 槽區的幾何形狀；b) 由絕緣和機械固定的問題而聯系到的繞組安裝問題和 B) 定子的通風。

在槽區幾何形狀的問題中，有關的問題是槽的最有利的形狀以及槽寬與齒寬間最有利的比率的問題。

從減少電動機的齒損耗及改善 $\cos \varphi$ 的觀點來看，半閉的槽形是最好的。但是在這種情況下，繞組在槽裏的安裝以及它的絕緣都複雜了，特別是在 3—6 仟伏的電機裏。所以在容量小的電動機裏，繞組由圓銅線做成，經過縫隙將它安裝到槽裏（所謂灌入繞組）並且採用梯形截面的半閉槽。這種單層和雙層灌入繞組的兩個槽表示在圖 38-2 a 和 b

上。後者，在繞組層間插入厚約 0.5 公厘的壓板絕緣層。

中容量，電壓在 500 伏以下的電動機毫無例外地廣泛採用半開槽（圖 38-3），在效率以及 $\cos \varphi$ 的關係上，它保存了半閉槽的優點，但是可以安裝模型繞組（шаблонная обмотка）。

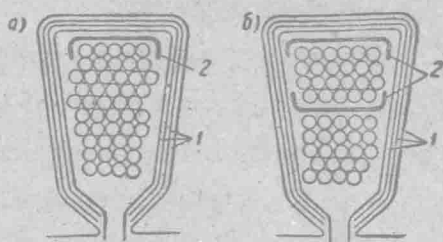


圖 38-2. 定子梯形槽：

1. 浸漆絕緣壓板（三層）； 2. 壓板絕緣層

中容量及大容量，電壓超過 500 伏的電動機採用和同步電機一樣的開口槽，它可以使繞組用連續的絕緣，但是對於電動機的電的性質，却有不好的影響。為了減小這個影響，曾屢次嘗試以磁性物代替通常的木質楔，這樣的楔在 1931 年已經由全蘇工程局設計好，並編為聯號 AT，最有趣的磁楔構造，1936 年在 ХЭМЗ 工廠做了出來。這個楔包含了木質的或纖維質的芯子，差不多沿着整個截面的四周包以 0.25—0.35 公厘厚的鋼片，使它具有槽口的形狀。這個楔的作用主要是使槽裏的磁場得到更均勻的分佈，根據在工廠所做的實驗數據，楔的作用使得無載電流和附加損耗大大地降低了。



圖 38-3. 半開槽

為了儘可能地產生更大的磁通而不增加齒的磁通密度，在許多情況下，例如在低壓的電機裏，齒的寬度顯著的寬於槽的寬度。

定子繞組常常是制成雙層短距的。短距單層的繞組僅在小容量的電機裏才應用。

繞組的絕緣如圖 38-2 a, б 和 38-3 所示。500 伏以下的電動機的繞組的線圈浸以漆；電壓在 2—3 仟伏的繞組的線圈在真空中浸漆，電