

中央人民政府高等教育部推薦
中等技術學校教材試用本

電 機 學

Л. М. НИОТРОВСКИЙ 著
哈爾濱工業大學孔昌平等
長春電力工業學校馬昭彥等 合譯



商 務 印 書 館

中央人民政府高等教育部推薦
中等技術學校教材試用本



電 機 學
下 冊

J. M. 朴 德 羅 夫 斯 基 著
哈爾濱工業大學孔昌平等
長春電力工業學校邢文第、馬昭彥等 合譯



商 務 印 書 館

本書係根據蘇聯國立動力出版社(Государственное энергетическое издательство)出版的朴德羅夫斯基(Л. М. Пиотровский)所著“電機學”(Электрические машины) 1952年版譯出。原書經蘇聯電氣工業部教育司審定為電機中等技術學校教學參考書。

本書俄文版包括六篇，一、直流電機；二、變壓器；三、同步電機；四、無換器式異步電機；五、換向器式異步電機；六、變流機器。中譯本分三冊出版，上冊包括直流電機；中冊包括第二和第三兩篇；下冊包括第四、第五、第六三篇。

中譯本直流電機部份係哈爾濱工業大學孔昌平等同志所譯，並經長春電力工業學校電機教研組和馬昭彥同志校對；變壓器部份由哈爾濱工業大學孔昌平等和長春電力工業學校邢文第、馬昭彥等同志合譯，其餘部份均為長春電力工業學校邢文第、馬昭彥兩同志所譯。

電 機 學

下 冊

哈爾濱工業大學孔昌平等合譯
長春電力工業學校馬昭彥等

★版權所有★

商 務 印 書 館 出 版

上海河南中路二一一號

新 華 書 店 總 經 售

北 京 萃 斌 閣 印 刷 廠 印 刷

(61471C)

1954年2月初版 版面字數174,000

印數1—10,000 定價¥8,400

中央人民政府高等教育部推薦 中等技術學校教材試用本的說明

充分學習蘇聯的先進經驗，根據國家建設需要，設置專業，培養幹部，是全國中等技術學校調整後的一項重大工作。在我國中等技術學校裏，按照所設置的專業試用蘇聯教材，而不再使用以英美資產階級教育內容為基礎的教材，是進一步改革教學內容和提高教學質量的正確方向。

一九五二年九月二十四日人民日報社論已經指出：‘蘇聯各種專業的教學計劃和教材，基本上對我們是適用的。它是真正科學的和密切聯繫實際的。至於與中國實際結合的問題，則可在今後教學實踐中逐漸求得解決。’我們現在就是本着這種認識來組織人力，依照需要的緩急，有計劃地翻譯蘇聯中等技術學校的各科教材，並將繼續向全國推薦，作為現階段我國中等技術學校教材的試用本。

我們希望：使用這一試用本及今後由我們繼續推薦的每一種試用本的教師和同學們，特別是各有關教研組的同志們，在教學過程中，對譯本的內容和譯文廣泛地認真地提出修正意見，作為該書再版時的參考。我們並希望各有關教研組在此基礎上逐步加以改進，使能結合中國實際，最後能編出完全適合我國需要的新教材來。

中央人民政府高等教育部

下 册 目 录

第四篇 無換向器式異步電機

第三十章 有關無換向器式異步電機的基本知識	357
30—1 異步電機的類型	357
30—2 三相異步電機的作用原理及其工作情況	358
30—3 異步電機的基本工作情況	361
30—4 三相異步電機的基本構造部件	362
第三十一章 轉子不動時的三相異步電機	366
31—1 異步電機的空載	366
31—2 異步電機的短路	368
31—3 感應調壓器	370
31—4 移相器	372
第三十二章 異步電動機在旋轉時的現象	373
32—1 空載	373
32—2 轉差率和轉子電流的頻率	374
32—3 異步電動機有負載時的工作	376
32—4 異步電動機的向量圖	377
第三十三章 異步電動機的轉動力矩	379
33—1 能量圖	379
33—2 異步電動機的轉動力矩	380
33—3 力矩公式的研究	382
33—4 轉動力矩的計算公式	385
33—5 高次諧波對轉動力矩的影響	386
33—6 數字實例	387
第三十四章 異步電動機的工作特性	389

第三十五章 異步電動機的圓圖	394
35—1 前言	394
35—2 簡化圓圖的討論	394
35—3 異步電動機的圓圖	395
35—4 空載試驗和短路試驗	396
35—5 圓圖的作法	399
35—6 有可變參數的電動機的圓圖作法	406
35—7 數字實例	406
35—8 柯斯欽柯精確圓圖	408
第三十六章 異步電動機的起動	4 9
36—1 異步電動機的起動特性	409
36—2 異步電動機的起動電流	409
36—3 異步電動機的起動法	410
36—4 在 $U_n = U_N$ 的條件下電動機直接投入網路	411
36—5 在 $U_n < U_N$ 的條件下電動機投入網路	414
36—6 滑環式電動機的起動	414
36—7 反接起動法	415
36—8 滑環式電動機在轉子電路中的電阻不對稱時的起動	416
36—9 同步電動機的異步起動	418
36—10 按混合方式的異步起動	419
第三十七章 特殊製做的異步電動機	419
37—1 特殊異步電動機的種類	419
37—2 雙鼠籠電動機	419
37—3 帶深槽的電動機(深槽電動機)	421
第三十八章 異步電動機的速度調節	426
38—1 異步電動機的調節特性和調節轉速的方法	426
38—2 用轉子電路中的變阻器以調節轉速	426
38—3 改變電動機的磁極對數以調節轉速	428
38—4 在轉子電路中引入附加電勢以調節轉速	430
38—5 改變電源網路的頻率以調節轉速	432

第三十九章 異步電機的特殊工作狀態及其特殊型式	434
39—1 異步電機作為發電機工作	434
39—2 電磁制動機狀態	438
39—3 雙電源狀態	439
39—4 單相異步電動機	442
39—5 用電容器起動的單相電動機和單相電容電動機	445
39—6 用定子的短路蔽極繞圈起動	446

第五篇 換向器式異步電動機

第四十章 有關交流換向器式電機的基本知識、單相換向器式電動機	449
40—1 基本知識	449
40—2 單相串激電動機	449
40—3 單相串激電動機的向量圖	452
40—4 單相串激電動機的特性	452
40—5 本遜吉科特 (O.B. Бенедикт) 電動機	454
40—6 正常製做的推斥電動機	455
40—7 雙推斥電動機	457
第四十一章 三相並激換向器式電動機	458
41—1 用轉子電路中引入附加電勢的方法調節異步電動機的速度和 $\cos \varphi$ 的原理	458
41—2 換向器用做頻率變換機	460
41—3 三相並激電動機	461
第四十二章 補償異步電動機, 整步異步電動機和進相機	465
42—1 補償異步電動機的概念	465
42—2 整步異步電動機 (синхрон) 的概念	465
42—3 進相機	466
第四十三章 異步電機的串級聯結	470
43—1 前言	470
43—2 機械聯結的串級 А—О—П.	470

43—3 電氣聯結的串級 A—O—II	472
43—4 串級 A—O—II 的特性	473
第四十四章 電機的發熱和冷却	474
44—1 前言	474
44—2 固體發熱原理	475
44—3 散熱條件	479
44—4 電機的發熱	480
44—5 絕緣材料的分級	480
44—6 測量溫度的方法	481
44—7 溫度計法	482
44—8 電阻法	482
44—9 埋入溫度探測器法	58
44—10 電機的最大許可溫度和最大許可溫昇	483
44—11 電機的基本額定工作情況	487
44—12 間歇工作時的發熱	488
44—13 電機的冷却與通風	489

第六篇 變流機器

第四十五章 旋轉變流機	493
45—1 變流機器的類型	498
45—2 電動機發電機組	493
45—3 單樞變流機	494
45—4 單樞變流機的作用原理	494
45—5 交流電壓和直流電壓的比率	495
45—6 交流電流和直流電流的比率	497
45—7 電樞繞組中的合成電流和電樞反應	499
45—8 單樞變流機的特性曲綫	501
45—9 單樞變流機的其他運用形式	502
45—10 單樞變流機的應用	502

第四十六章 整流器	503
46—1 作用原理.....	503
46—2 整流器的分類.....	503
46—3 電氣整流器的種類.....	504
46—4 固體整流器.....	504
46—5 氧化亞銅整流器.....	504
46—6 液體(電解液)整流器.....	507
46—7 電子整流管.....	507
46—8 離子整流管.....	513
第四十七章 交流整流的綫路	525
47—1 單相單拍節的整流綫路.....	525
47—2 單相電橋綫路.....	527
47—3 多相整流綫路.....	528
47—4 三相電橋綫路.....	531
47—5 星形——雙曲折結綫.....	534
47—6 星形——帶平衡綫圈的雙星結綫.....	534
47—7 變壓器的電感對整流器工作的影響.....	536
47—8 整流設備的效率.....	536
47—9 功率因數.....	538
47—10 離子整流管的逆灼.....	538
47—11 柵控整流器.....	539
47—12 離子整流器作為倒用變流器的運用.....	540
附錄 電機在工作時所形成的無線電干擾及其抑制方法	541
主要參考書	551

電機學

第四篇 無換向器式異步電機

第三十章 有關無換向器式異步電機的基本知識

30-1. 異步電機的類型

所謂異步電機^①乃是這樣一種交流電機，即在網路電流的一定頻率下，其轉子速度 n 隨着負載而變化。

異步電機分爲：a) 無換向器式和 б) 有換向器式兩種。

無換向器式異步電機主要是作爲電動機而取得廣泛應用，而有換向器式的電機則是一種特殊型式的電機，其使用範圍有一定的限度。本篇將只敘述無換向器式異步電機，或簡稱異步電機。這種電機的基本型式爲三相異步電動機，主要做成兩種：a) 繞綫轉子電動機 和 б) 短路轉子電動機^②。最早的異步電機是費拉利斯(Феррарис)在1885年製成的，但那種電機在技術上有極嚴重的缺陷，不合工業上的使用。

首先應用於工業上的三相異步電動機，是俄羅斯的天才工程師多里沃-多布羅沃斯基(М. О. Доливо-Добровольский)在1889—1890年所擬製的。它的構造簡單，價格便宜，效率高及工作可靠，這些優點使它迅速爲人們所公認，並促成它在多方面(在這以前是由直流供給的)

① 我國通稱感應電機。

② 即滑環式電動機。

③ 即鼠籠式電動機，本書亦稱短路式電動機。

得到廣泛應用。

異步電動機的某些缺點，並不能影響它在工業上的廣泛應用。它的缺點是：a) 需要感性的激磁電流，因此使網路的 $\cos \varphi$ 變壞；b) 調節特性不好，特別是在較大範圍內速度調節時；和 B) 最經濟的短路轉子電動機的起動特性不好。克服這些困難的企圖，僅僅獲得局部的效果。就 $\cos \rho$ 而言，異步電動機不如同步電動機，就調節特性而言，則又不如直流電動機。

在不用調節的較小容量的傳動機中，異步電動機保持着首要的地位。在此，短路轉子電動機日益獲得重要的意義，而在 1920 年以前，繞綫轉子電動機却佔着主要地位。原因是短路轉子電動機比繞綫轉子電動機構造簡單，工作可靠，便宜，並有較好的 $\cos \varphi$ 和效率。但它比繞綫轉子電動機有較壞的起動特性，尤其是在很小的起動力矩下却有很大的起動電流。

為了改善這些特性，已提出所謂特種型式的短路轉子電動機，目前其中最重要的有：a) 深槽電動機；b) 雙鼠籠電動機。此外，極數可變電動機、放大轉差電動機等，亦獲得廣泛推廣。

製造異步電動機的所有環節的合理化，特別是對此種電動機的全面研究，使異步電動機的重量和尺寸大為降低，而並未損害其工作特性。例如，容量為 3.7 仟瓦 1500 轉/分的電動機，在 1892 年重 150 公斤，而在 1930 年“電力”工廠出品的 4.5 仟瓦 1500 轉/分的電動機，僅重 50 公斤。而某些工廠所製造的同樣電動機，其重量還要小些。

30-2. 三相異步電機的作用原理及其工作情況

在 § 23-5 中我們曾經指出，施三相電流於三相電機的定子時，則電機內將產生旋轉磁場，其速度為

$$n_1 = \frac{60f}{p}, \quad (30-1)$$

式中 f 是網路頻率：

p 是磁極對數。

設若在定子的孔洞中裝上一個鼠籠形的(見圖 30-5)轉子,則定子與轉子間發生電磁的相互作用。這種電磁作用就其物理本質來說,完全與變壓器主繞組和副繞組間的相互作用相同。但是,在變壓器中,副繞組在空間中是不動的,而在異步電機中,一般則是以速度 n 旋轉。如果這個速度等於旋轉磁通的速度 n_1 , 而且方向一致,則定子與轉子間的電磁相互作用就不會發生,因為這時定子磁通對轉子來說,已是不動的了。因此,速度 n_1 和 n 之差就是無換向器式異步電機兩部分間發生相互作用的必要條件,從而也就是它進行工作的必要條件。比值

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (30-2 a)$$

或

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} 100\% \quad (30-2 b)$$

叫做異步電機的轉差率。我們根據 n_1 和 n 之間的關係,把異步電機的工作情況分為三種: a) 作為電動機工作; b) 作為發電機工作; B) 作為電磁制動機工作。

現在我們來研究異步電機的工作情況和轉差率的關係如何。

A. 作為電動機工作 設定子磁場沿時針方向(自左向右)旋轉,並有如圖 30-1, a 所示的極性。如果轉子不動或以速度 $n < n_1$ 旋轉,則定子磁場力綫對轉子以速度 $n_1 - n$ 自左向右移動。應用右掌法則,我們可以發現,在轉子繞組導體 a 中感應起一個電勢,其方向是指向我們。導體 a 中電流的有功分量同樣也是這個方向。此電流所產生的磁場(圖 30-1, a 的虛綫)與定子磁場互相作用形成一個合成磁場,如圖 30-1, b 所示。我們看到,在現在情況下,加於導體上的力 F_0 , 在電機軸上產生一個力矩,力矩使轉子沿磁場旋轉方向轉動,亦即,此力矩乃是一個轉動力矩。所有單個導體所產生的力矩的總和,就是電機的合成轉動力矩,在合成轉動力矩的作用下,轉子以速度 $n < n_1$ 旋轉。在這種情況

下，從網路輸入定子的電能變為軸上的機械能，亦即電機工作於電動機狀態。

電動機的旋轉速度 n 視其負載而定。在空載時，速度 n 差不多等於 n_1 ，但不能達到 n_1 ，因為在 $n = n_1$ 時，定子與轉子間的電磁作用就消失了。

由上述可見，異步電機在 $n = 0$ 到 $n \approx n_1$ 的範圍內亦即在轉差率 $s = +1$ 到 $s \approx 0$ 的範圍內是作為電動機運用的。

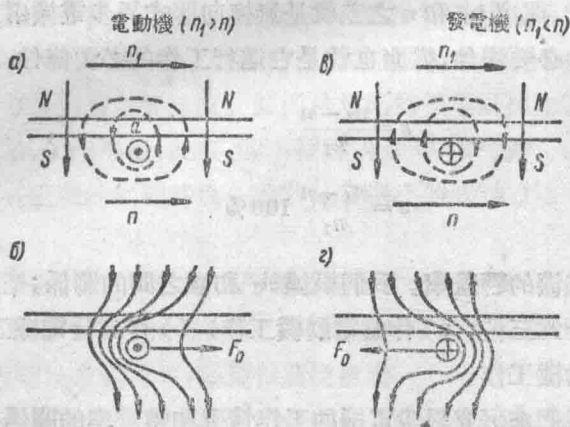


圖 30-1 異步電機作為電動機和發電機時的工作原理。

5. 作為發電機工作 設定子磁場旋轉的方向和極性仍然如圖 30-1, a 所示，我們令轉子加速以使 n 大於 n_1 (圖 30-1, b)。在這種情況下，轉差率變為負值，而定子磁場對轉子的旋轉方向，和以上作為電動機工作時的方向比較，變為相反的了。對應於此，導體 a 中的電勢和電流以及電機軸上的力 F_D 的符號都變了 (圖 (30-1, c))。所以，異步電機所發生的力矩，對於用來使異步電機轉子加速的原動機來說，變成了制動力矩。在這種情況下異步電機是工作於發電機狀態，而把原動機所輸入的機械能變為電能送到網路中去。異步電機作為發電機的工作情況在 § 39-1 中有較詳細的敘述。

理論上，我們能够使轉子任意快於旋轉磁通。因此，當異步電機作為發電機運用時，其轉差率的範圍是從 $s=0$ 到 $s=-\infty$ 。

在實用中，從電動機工作狀態轉為發電機工作狀態是可能的，例如火車在斜坡上向下駛行時就是如此。

B. 電磁制動機的工作情況 設若由於任何外在原因，異步電機的轉子開始對旋轉磁通反向旋轉。在這種情況下，引向異步電機的能量是來自兩個方面——從網路來的電能和從原動機來的機械能。這種情況叫做電磁制動狀態。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機工作時，其轉差率的範圍是從 $s=+1$ 到 $s=\frac{n_1 - (-\infty)}{n_1} = +\infty$ 。詳細情形見 § 39-2。

在實用中，作為電磁制動機的工作情況，多半被用在卸下重物時的起重運輸設備中。

30-3. 異步電機的基本工作情況

異步電機幾乎專門作為電動機運用。由於它的簡單、便宜、效率高及工作可靠，繞綫轉子以及短路轉子三相異步電動機已廣泛應用在工業中，特別是在中小容量的不需要調節的傳動機中。相反地，異步發電機就其性質來說不如同步發電機，故僅用於特殊設備中。最後，電磁制動狀態，可以作為異步電動機在某種類型設備中工作時的輔助情況來研究，因此我們首先研究定子接受外能的三相異步電動機，而在第三十九章再指出特殊情況的異步電機的特點。

作為研究異步電動機工作的基礎，仍然像研究變壓器的工作一樣，我們把電動機的工作分為兩種極限狀態，那就是：a) 在轉子不動和旋轉時的空載工作狀態，b) 短路工作狀態。根據這兩種工作狀態的數據，我們就可以用作圖或計算的方法求出異步電動機的工作特性，以估定它的運用。

30-4. 三相異步電機的基本構造部件

三相異步電動機在構造上分為兩個主要部分，不動部分或定子，旋轉部分或轉子，它們彼此間被空氣隙分開。

異步電動機的定子與同步電機的定子毫無區別(見第三篇)。

定子與轉子間的空氣隙，在機械方面所許可的條件下，儘量做得最小。例如，在 1.5—2 仟瓦的異步電動機中，空氣隙 $\delta=0.3-0.35$ 毫米。在 250—350 仟瓦的異步電動機中， $\delta=1.0-1.5$ 毫米。這樣作的原因是由於定子與轉子僅僅藉助定子所產生的磁通穿過轉子來作電磁的耦合，間隙愈小，則這個耦合愈好，也就愈容易獲得特性較好的電動機，反之則反是。

轉子由裝在軸上的鐵心和嵌於鐵心中的繞組所構成。

鐵心由矽鋼片做成，其厚度通常為 0.5 毫米。各個片間用絕緣漆或薄紙層絕緣。在小容量的電動機中可用鐵銹絕緣。矽鋼片間的絕緣與在其他種電機中一樣，都是為了同一目的，那就是為了減少定子和轉子中的渦流損失。

轉子繞組嵌在均勻配置於轉子周沿的槽內。按繞組型式轉子分為：a) 繞綫轉子和 b) 短路繞組轉子或短路式轉子。

A. 繞綫轉子電動機 這種電動機的縱剖面示於圖 30-2 中。在轉子槽中通常裝置與定子繞組相似的三相繞組。此繞組的各相末端，引到裝在軸上的並且彼此絕緣的滑環上，由此處經過電刷而到起動變阻器上。轉子繞組可以做成任意相數(從兩相起始)，但通常是做成與定子相同的相數，即三相繞組。

為了避免電刷很快地磨蝕，並減少在工作時的摩擦損失，許多電動機都附有舉刷裝置。

轉子槽通常做成半封閉的，因此轉子雙層繞組做成棒狀繞組，每槽中有兩根棒，棒伸入槽中，折轉它們的末端，並按適當的繞組圖聯結起來。

現在我們來研究一個具體的例子：設相數 $m=3$ ；槽數 $Z=24$ ；極數 $2p=4$ ；每極每相槽數

$$q = \frac{Z}{2p \cdot m} = \frac{24}{4 \times 3} = 2;$$

繞組做成全節距的(圖 30-3)，亦即

$$y = \tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6.$$

把繞組適當地安排，以使三個相的始端均勻地放在轉子周沿上。這樣可易於導向滑環，同時也可使轉子平衡。

如把相 A—X 的始端 A 置於槽 2 內，則相 B—Y 的始端 B 將在槽

$$2 + \frac{2}{3}\tau + 2\tau = 2 + \frac{2}{3} \times 6 + 2 \times 6 = 18 \text{ 中,}$$

而相 C—Z 的始端 C 在槽

$$2 + \frac{4}{3}\tau = 2 + \frac{4}{3} \times 6 = 10 \text{ 中。}$$

現在我們來做相 A—X 的繞組，取槽 2 上層的棒當作始端。這一根棒應該與槽 $2+y=2+6=8$ 下層的棒串聯。類似地順次討論下去，即得下面的電路：

沿轉子的第一轉：2 上——8 下——14 上——20 下……

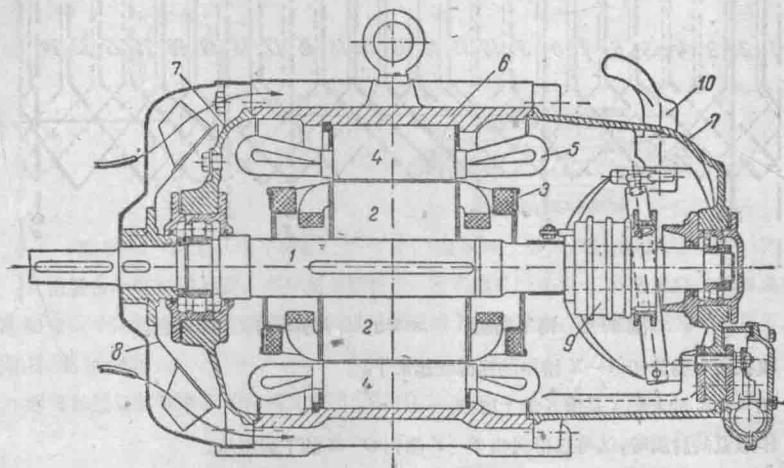


圖 30-2 繞綫轉子異步電動機的縱剖面。

上半相當於 $n_1=1500$ 轉/分，下半相當於 $n_1=1000$ 轉/分。

- 1——軸； 2——轉子鐵心； 3——轉子繞組； 4——定子鐵心；
 5——定子繞組； 6——定子軀體； 7——軸承端蓋； 8——扇風器；
 9——滑環； 10——舉刷把手。

我們看到，若沿轉子走一週，就會回到以前我們開始走的那個槽 2 的上層。因此，為了使繞組繼續繞下去，我們把最後一個節距縮短一槽，亦即在結束第一轉時不是回到槽 2 上而是 1 上。

沿轉子的第二轉 1 上——7 下——13 上——19 下……

槽 19 下層的棒本應串聯到槽 1 的上層 ($19+6-24=1$) 即 1 上，但此棒已被聯結，而槽 1 的下層棒 (即 1 下) 尚未聯結。因此，我們只好把槽 19 的下層棒和槽 1 的下層棒聯結起

來，並繼續環繞轉子，但以相反的方向繞下去。於是：

沿轉子的第三轉：1下——19上——13下——7上——2下；

沿轉子的第四轉：2下——20上——14下——8上。

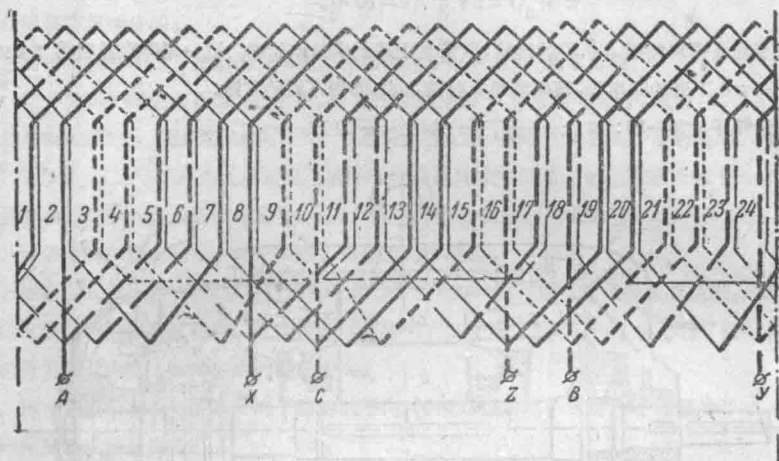


圖 30-3 轉子繞組： $m=3$ ； $2p=4$ ； $Z=24$ 。

現在所有屬於相 A—X 槽中的棒都聯起來了。

相 A—X 的末端 X 是槽 8 的上層棒。

作類似的討論時，就可以得到相 B—Y 和相 C—Z 的下列聯結：

相 B—Y

18上——24下——6上——12下——17上；

17上——23下——5上——11下——17下；

17下——11上——5下——23上——18下；

18下——12上——6下——24上。

相 C—Z

10上——16下——22上——4下——9上；

9上——15下——21上——3下——9下；

9下——3上——21下——15上——10下；

10下——4上——22下——16上。

下層成對的聯結(第一相的 19 和 1, 第二相的 11 和 17, 第三相的 3 和 9)是在繞組端接部分的下面完成，並名之謂橫向聯結，而這些棒的本身叫做反向棒，因為從它們開始，繞組