

电机学参考文叢

(第二集)

許应期編著



104
2
133736/27 10
科学技术出版社

电机学参考文叢

(第二集)

許应期編著

科学技術出版社

內 容 提 要

本書繼第一集之後，選取朴德羅夫斯基著電機學（第四冊）中有关旋轉磁場及多相、單相電機各問題，作深入淺出的闡述，以備大專學生學習電機學時參考之用，可以供工廠工程人員參閱。

電 機 學 參 考 文 獻 （第二集）

編 著 者 許 應 期

★
科 學 技 術 出 版 社 出 版

（上海南京西路 2004 號）

上海市書刊出版業營業許可證出 079 號

上海啟智印刷廠印刷 新華書店上海發行所總經售

★

統一書號：15119·627

開本 787×1092 1/32 • 印張 3 1/16 • 字數 60,000

1958 年 3 月第 1 版

1958 年 3 月第 1 次印刷 • 印數 1-2,500

定 價：(11) 0.65 元

前 言

本書第二集总共包括五篇：第一篇为旋轉磁場的物理解釋及矢量圖解，目的在使旋轉磁場形象化，使讀者对于旋轉磁場的物理概念更为明确。第二篇为三相整流子电动机的基本原理，本文意在从物理概念用旋轉磁場來作闡明，使讀者对于三相整流子电动机感觉容易了解。第三篇为若干三相整流子电动机的等值电路及其解析，本文与第二篇相反，用化旋轉电动机为静止电路的方法來分析三相整流子电动机的运行原理。第四篇为串級异步电动机的作用原理，一方面从旋轉磁場的物理情况來說明串級控制的运行特性，另一方面用等值电路來分析。第五篇为單相整流子电动机，詳細闡述該机的作用原理、功率因数及整流問題，轉速特性曲線的圖解以及設計上的問題。

現在我國各高等学校大都采用苏联 A. M. 朴德罗夫斯基教授所著电机学作为教本。本書主要是作为研讀該課本(第四册)时参考之用。亦如在第一集中前言所說明，本書僅作参考，無意代替教材，所以編著并無系統，讀者如欲对于电机学作系統之研究，还請閱讀教材。

著者編寫第二集的目的在於將电机学中若干較為复雜难懂的問題作深入淺出的闡述，使讀者对于此等問題物理概念認識

更为清楚，感觉容易了解，发生兴趣。但因限于水平及能力，恐有不妥之处，尚望读者予以指正。

本著承蔡君时先生代为阅读一遍，特此志谢。

许应期 1957年7月

目 錄

前言

1. 旋轉磁場的物理解釋及矢量圖解	1
1. 緒言	1
2. 一相集中繞組的磁勢及其矢量分解	3
3. 从总的三相基波磁勢來看磁場的旋轉	7
4. 从三个相各別分解后分別合成來看磁場的旋轉	8
5. 磁勢高次空間諧波	9
6. 磁勢高次時間諧波	14
7. 最后語	17
2. 三相整流子电动机的基本原理	18
1. 緒言	18
2. 旋轉磁場轉速及感應電勢頻率	18
3. 异步电动机轉子电路中用插入电压來調節轉速与功率因數	23
4. 异步电动机調速及改变功率因數的实际裝置	28
5. 三相并聯与串聯整流子电动机	42
3. 若干三相整流子电动机的等值电路及其解析	46
1. 緒言	46
2. 普通异步电动机等值电路及其解析的簡述	47
3. 轉子电路內插入电压后的等值电路及其解析	51
4. 并聯电动机的等值电路及其解析	56
5. 串聯电动机的等值电路及其解析	59

4. 串級异步电动机的作用原理	64
1. 緒言	64
2. 串級异步电动机的运行原理	65
3. 串級异步电动机的等值电路	69
4. 兩只电动机間功率的分配	72
5. 最后語	73
5. 單相整流子电动机	74
1. 緒言	74
2. 作用原理	74
3. 功率因数	76
4. 整流問題	78
5. 功率及轉矩	85
6. 轉速特性曲綫的圖解	86
7. 从設計观点來看單相整流子电动机存在的問題	88
8. 結語	91

1. 旋轉磁場的物理解釋及矢量圖解

1. 緒 言

多相繞組通以交流電之後產生旋轉磁場，是電機學中最基本及最有趣的物理概念。在大學課本中用數學分析來說明磁場的旋轉，往往使人對此部分感覺有些神秘而不易領會。對於旋轉磁場的存在，僅有含糊的抽象，而缺乏現實的形象。其實從大體的物理方面來看磁場的旋轉，似乎是顯而易見的。設定子上有繞組 AA' ，通以交流電。當電流從 A 進去，從 A' 出來時，此繞組 AA' 產生磁場，如虛線所示。磁通從定子進入空間之處稱為北極，磁通從空間進入定子之處稱為南極，如圖 1(甲)所示。當電流換一方向時，極性也換一方向，如圖 1(乙)所示。這樣我們可

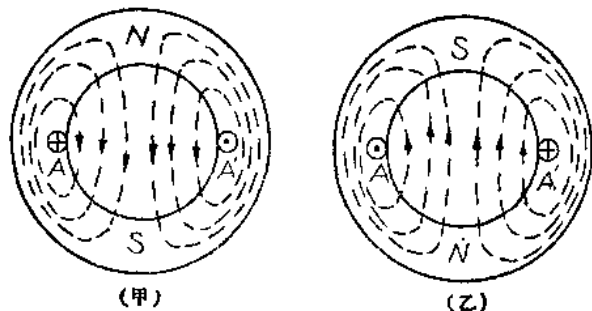
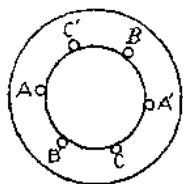


圖 1 一個簡單繞組的磁場

以設想磁極在空間轉了半周。电流方向再換之后，極性也再換，我們可以設想磁極又轉了半周。如圖所示，只有二極。在此二極电机中，电流变化一周，磁極旋轉一周，因此 50 赫的电流，使磁場每分鐘旋轉 $50 \times 60 = 3000$ 轉。注意此二極电机中，究竟磁場是順時針方向旋轉，還是逆時針方向旋轉，是無從確定的。實際上，在下節中我們將見一相繞組的磁勢可用兩個相反方向旋轉的磁勢來代表。這就是說，在單相电动机中同時存在着順時針



方向旋轉及逆時針方向旋轉的兩個磁場。如果不是單相而是三相，那麼旋轉方向完全可以確定，這也就是說，在二極三相电动机中只有一個方向旋轉的磁場。圖 2 示二極三相

圖 2 二極三相繞組。如果繞組 BB' 落后于繞組 AA' 120 度電角度，那麼磁場是順時針旋轉的。如果繞組 CC' 落后于繞組 AA' 120 度電角度，則磁場將是逆時針方向旋轉的。磁場旋轉的轉速系決定于電動機的極數。

如果定子上繞了四極繞組，則电流变化一周，磁場將只旋轉半周，因此旋轉磁場的轉速將為 $25 \times 60 = 1500$ 轉/分。以方程式表示任何極對數 P 的旋轉磁場轉速時，則為

$$n = \frac{60f}{P} \text{ 轉/分} = \frac{f}{P} \text{ 轉/秒。}$$

圖 3 示簡單二極三相繞組磁場的变化。從甲到丁，电流变方向（從整個三相看），磁場轉半周。從丁到庚，电流再变方向，磁場再轉半周。我們可以得出和上面同樣的結論，即在此二極电动机中电流变化一周，磁場轉一周。磁場轉速 $= 50 \times 60 = 3000$

轉/分。在多極繞組中， $n = \frac{60f}{P}$ 。

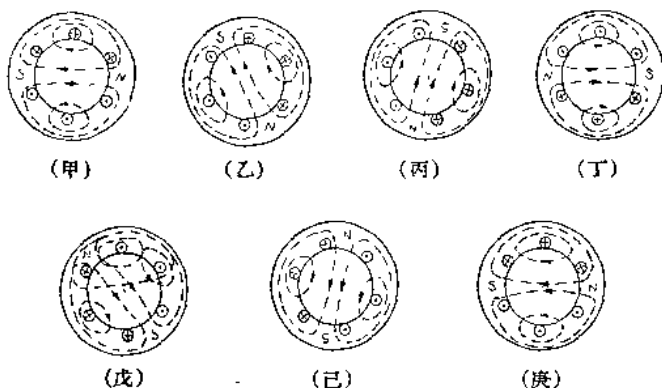


圖3 簡單二極三相繞組磁場的旋轉

以上為旋轉磁場淺近的物理解釋。我們將在下節說明如何用矢量來表示。先講基波，再講高次諧波。

2. 一相集中繞組的磁勢及其矢量分解

圖4示四極一相集中繞組。設空氣隙為均勻的；槽中導體數為 S 。從電磁理論中可知，任何磁路如圖4(乙)中虛線所示，其磁勢為 iS ；式中 i 為導體中電流即時值。如果忽略了鐵的磁壓降，每個空氣隙的磁壓降（也稱為每極磁勢）將等於 $\frac{1}{2}iS$ 。如



圖4 四極一相集中繞組

圖 4(丙)所示,磁势是矩形分布的。因为

$$i = \sqrt{2} I \sin \omega t. \quad (1)$$

$$f_x = \frac{1}{2} i S = \frac{1}{2} I \sqrt{2} S \sin \omega t = F_{mx} \sin \omega t, \quad (2)$$

式中 $F_{mx} = \frac{\sqrt{2}}{2} IS. \quad (3)$

我們可用傅里叶級数法分解此矩形磁势波为空間基波及高次空間諧波。基波的幅值为 $\frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} IS = 0.9 IS$ 。三次諧波的幅值为基波幅值的三分之一,五次諧波的幅值为基波幅值的五分之一,其余类推。現在我們只討論基波。此磁势为脉动磁势,即

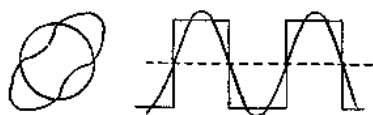


圖 5 基波磁势的空間分布

是在空間为固定的,而其量值則是随時間变化的。在某一時間我們可以想象,空气隙中的基波磁势的分布如圖

5 所示。如果不是集中繞組而是分布繞組,則可用分布因数來归算为等值集中繞組,課本中有詳細說明。如果是短距繞組,則可用下法归算。現在用例來說明:設有每極九槽,每相三槽的繞組。繞組为双層短距。如圖 6 所示,繞組距为 7/9。計算磁势时,可先用分布因数归併为集中繞組,如圖 6(乙)所示。此处我們可以注意,在計算磁势之时,不必定要把端接相連的导体合併計算。換言之,我們不妨把 A_r 与 B_r 及 C_r 等合併起來, A_{1r} 与 B_{1r} 及 C_{1r} 等合併起來計算。如此合併,則 A_r 、 B_r 及 C_r 等的磁势,以及 A_{1r} 、 B_{1r} 及 C_{1r} 等的基波磁势,將如圖 6(丙)曲綫所示。然后將此兩磁势用短距因数再归併为等值集中繞組。短距因数为

$\cos \frac{\beta}{2}$, 式中 β 为 $\pi \frac{\tau-y}{\tau}$, τ 为極距。

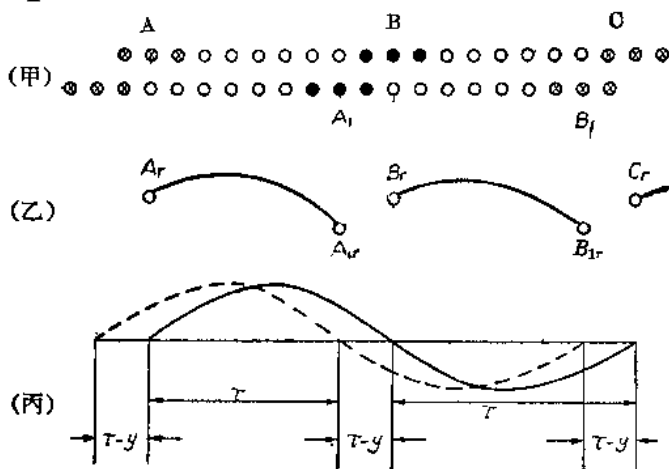


圖 6 短距繞組磁勢的歸算

最后我們得到一相繞組的基波磁勢公式是

$$f = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} ISqK_{p1}K_{y1} \cos \frac{\pi}{\tau} x = 0.9 ISqK_{o\delta 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x, \quad (4)$$

式中 I ——導體中電流； S ——每槽導體數； q ——一相槽數；

K_{p1} ——基波分布因數， $K_{p1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$ ，式中 α ——槽距電角；

K_{y1} ——基波短距因數； $K_{o\delta 1}$ ——基波繞組因數； x ——從相軸算起的空間距離。

一個脈動磁勢可用兩個幅值一半旋轉方向相反的旋轉磁勢來代表。從第一節可見，一只兩極機中電流變化半周，磁勢旋轉半周，也就是旋轉一個極距，或者說旋轉空間相角 180° 。從此我

們可以得出一个結論，就是磁势旋轉的空間相角等于电流变化的時間相角。繞組中随着時間的变化而有电流的变动，磁場因繞組中电流的变动而有空間的位移。如果時間的变化以电流变动的电角度來量度，而空間的位移以磁場在空間移动的电角度來量度，兩者在数量上是相等的。这一点是很重要的，因为三相繞組三个相磁势的合成，就是根据这一道理。圖 7 表示四个不同時間的电流矢量。圖 7 (甲) 示兩個旋轉矢量重合之时。圖 7 (乙) 示兩個矢量相反旋轉 30° 后的合成矢量。圖 6 (丙) 示兩個矢量旋轉 60° 后的合成。圖 7 (丁) 示兩個矢量旋轉 90° 后的合

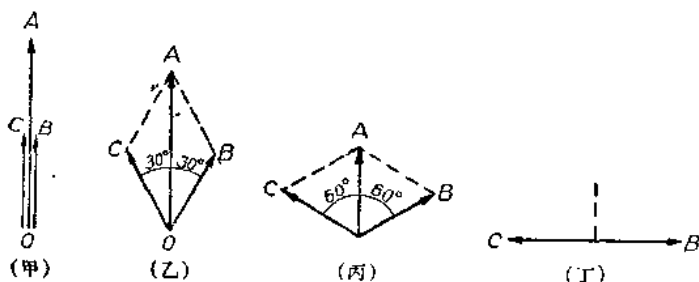


圖 7 脉动磁势分解成兩個旋轉磁势

成。綜觀合成矢量总是在垂直線上，但其量值則上下变化，所以是空間固定而量值变化的脉动矢量。圖中角度是旋轉矢量的空間角，在数值上等于电流的時角。

如果用分布波來表示，則如圖 8 所示。圖 8 的 (甲)、(乙)、

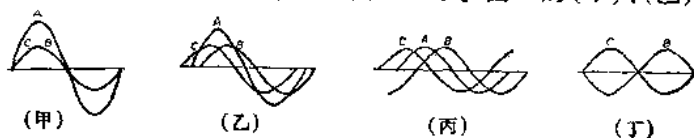


圖 8 脉动磁势分解成兩個旋轉磁势的空間形象

(丙)、(丁)是与圖 7 的(甲)、(乙)、(丙)、(丁)相对应的。

3. 从总的三相基波磁势來看磁場的旋轉

圖 9 示三相繞組基波磁势的时间变化与空間移动。圖 9(甲)示三相繞組的空間位置。圖 9(乙)左面示三相中电流矢量，右面示各相磁势及合成磁势的分布。圖 9(乙)是当 A 相中电流最大，即幅值，而 B 相及 C 相中电流为幅值之半。圖 9(丙)是当 C 相中电流最大而 A 及 B 相则为幅值之半时，圖 9(丁)是当 B

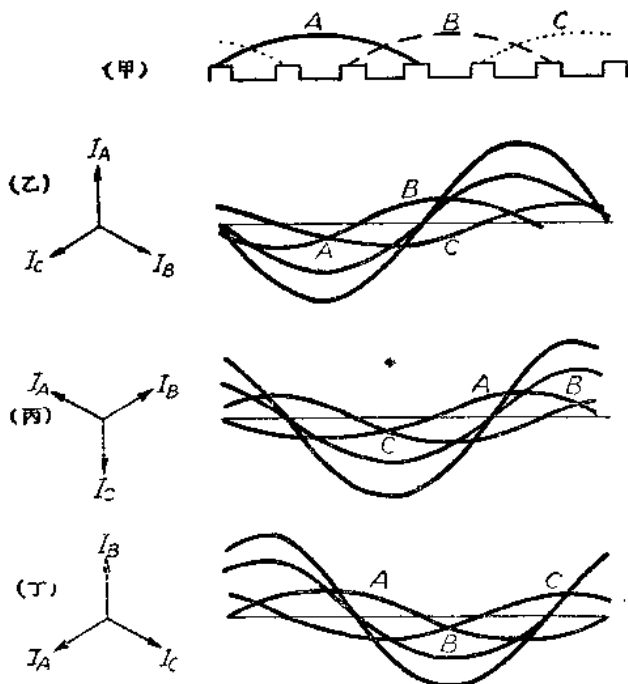


圖 9 三相繞組的基波磁势

相中电流最大而 A 及 C 相中电流为幅值之半时。

从圖 9 中,我們可以得出下列結論:

(1) 三相基波总合磁势的幅值等于 $3/2$ 倍于每一个脉动磁場的幅值。以公式來表示是

$$f = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} q K_{051} IS = 1.35 q K_{051} IS. \quad (5)$$

(2) 总合磁势幅值的空間位置,也可說总合磁势的軸与电流最大一相的軸相重合。

(3) 电流变化的時間相角等于总合磁势橫扫空間的空間电角。电流变化一周,空間移兩個極距。如果極对数是 1, 那么磁場的轉速等于頻率,即 $n=f$ 。如極对数是 P , 那么磁場轉速

$$n = \frac{f}{P}.$$

(4) 磁場旋轉的方向是从領前相到落后相。

設发电机的磁極以 n 轉/秒旋轉,則在定于中產生 $f=Pn$ 頻率的电流。三相定子有了 f 頻率的电流,產生 $n'=\frac{f}{P}$ 轉/秒的旋轉磁場。 $n'=n$, 也就是說旋轉磁場的轉速是与旋轉磁極的轉速相同的,或者說是同步的。

4. 从三个相各別分解后分別合成來看磁場的旋轉

先將 A 、 B 、 C 三相各別分解为振幅一半,向相反方向旋轉的矢量。 B 相的空間位置落后于 A 相 120° 空間角,但 A 相电流的变化領前于 B 相 120° 時間角。 B 相与 C 相間的关系也象 A 相与 B 相間的关系。 C 相的空間位置落后于 A 相 240° 空間角,

但 A 相電流的變化領先於 C 相 240° 時間角。根據磁場移動的空間角等於電流變化的時間角，三個向右旋轉的矢量 A^+ 、 B^+ 、 C^+ 是相加的。

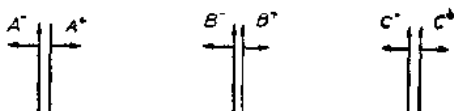


圖 10 三個相磁勢各別分解為兩個旋轉矢量

同時 B^- 落后於 A^-240° 空間角，(120° 是因為空間位差，另 120° 是因為 A^- 的電流變化領先 120° 的緣故) C^- 落后於 B^-240° 空間角，或落后 A^-120° 空間角。結果是 A^-B^- 及 C^- 空間相差 120° ，其合成是零。

總起來，三個相合成每極磁勢的幅值是

$$f_1 = 3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} q K_{061} IS = 1.35 q K_{061} IS. \quad (6)$$

我們還可以用下面矢量圖來表示：設時間是當 A 相電流最大時。這時 A 相的兩個旋轉矢量是重合於 A 相的空間軸，如圖 11(甲)所示；同時 B 相的兩個旋轉矢量是如圖 11(乙)所示；再過時間 120° 電角時， B^+ 及 B^- 將重合於 B 相的空間軸。 C 相的兩個旋轉矢量是如圖 11(丙)所示。經過時間 240° 電角後， C^+ 及 C^- 將重合於 C 相的空間軸。從圖 11(甲)、(乙)、(丙)綜合起來， A^+ 、 B^+ 、 C^+ 相加，而 A^- 、 B^- 、 C^- 是星形，合成為零。

5. 磁勢高次空間諧波

(甲)三次空間諧波 三次空間諧波的幅按傅里葉級數為基

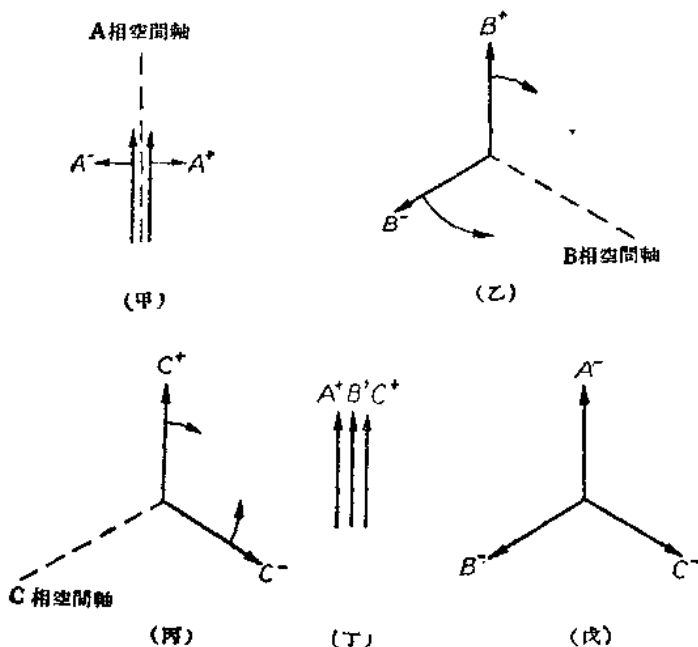


圖 11 空間矢量圖解

波幅的 $1/3$ 。仍照圖 10 來看, A^+ 、 B^+ 及 C^+ 各相之間相差空間角

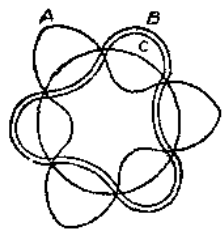


圖 12 二極三相三次空間諧波的形象

360° , 即三个相的三次空間諧波在空間是重合的, 但其相差的时间角为 120° , 因此其合成为零。同样 A^- 、 B^- 及 C^- 亦是如此, 故其合成亦为零。圖 12 示 A 相电流最大时三次空間諧波的空间形象。三相的三次空間諧波在空間是重合的, 但其量值則按电流時間变化, 相差 120° 时