

高等学校教学用书

# 电 机 学

第一册

Г. Н. 彼特罗夫著

高等教育出版社

高等学校教学月



4160359811

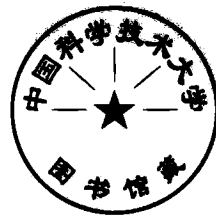


# 电 机 学

第一册

Г. Н. 彼特罗夫 著

天津大学电力机械教研室译



高等教育出版社

本書系根据苏联国立动力出版社 (Государственное Энергетическое издательство) 出版的 Г. Н. 彼特罗夫 (Петров) 著“电机学” (Электрические машины) 1956 年修訂第二版第一册譯出。原書为紀念荣获列宁勳章的莫斯科莫洛托夫动力学院五十周年而作, 并經苏联高等教育部多科性高等工業学校和机械制造高等学校主管司审定为电工及动力高等学校和系的教科書。

本書共分兩章。第一章总論, 第二章变压器。

本書不仅研究原理及基本結構, 而且还介紹关于电机的檢查試驗、型式試驗及运行試驗的必要知識。

本書系供学习电机課程的电工系学生及希望在电机方面补充知識的工程师閱讀。

参加本書翻譯工作的有庄秉常、許之江、呂家元、梁燭光四位同志, 参加校閱工作的有王董豪、庄秉常、許之江、梁燭光四位同志。

## 电 机 学

### 第一册

---

Г. Н. 彼特罗夫 著

天津大学电力机械教研室譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7号

(北京市書刊出版業營業許可証出字第054号)

京华印書局印刷 新华書店發行

---

統一書号15010·674 開本787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印張12 字數283,000 印數0001—3,500

1958年6月第1版 1958年6月北京第1次印刷 定價(10) 1.50

# 序

本書的第一版在 1940 到 1947 年間出版。從第一版印出以來，各動力學院和多科性工學院的電機課程教學有了進一步的發展。本課程的教學大綱以及先後有關的各課程的教學大綱均有改變。作為電氣工業主要部門之一的電機製造業獲得了很大的發展。電機的理論由於新的研究而得到補充，這些新的研究使得綜合地研討各種型式和結構的電機和變壓器中發生的電磁過程和機電過程成為可能。

由於這些緣故，在第二版中，本書的內容作了全面的修改，而其總的結構則未改變。

本書新版分為三冊。

在第一冊中講述電機課程的總論並敘述了變壓器部分。第二冊包括交流無整流子電機原理的一般問題以及異步電機和同步電機的部分。此處還敘述了應用在同步連接系統中的感應電機原理。第三冊包括直流和交流整流子電機的部分。

與第一版不同，在書中不僅研究原理問題和基本結構，而且還介紹關於各種電機的檢查試驗、型式試驗和運行試驗的必要知識，並給出它們的簡要的計算方法。

在主要的各章中，同時報導了關於國外電機製造業發展的簡單情報。

這些補充資料可使學生獲得更全面的有關電機在現代技術發展水平方面的概念。

本書所有章節的敘述是這樣編排的：在第一遍閱讀時，對某些較專門的問題可以略去而不致破壞其餘內容的完整性。在敘述到這些問題的各節上注以星標(\*)，以表示它們的專門性質。

本書的次要章節，主要包括參考資料以及數字例子，都用小號字刊印。

本教程第一冊開端的總論，在書中占着某些特殊的地位。

總論中試圖把每一種電機當作能量變換機看待，從而說明在這個基礎上存在的一般規律；此處還列舉了電機按照它們的電磁關係和結構方式而劃分的基本類別，並確定了電機的幾何尺寸和容量之間的一般關係。

總論還包括導電材料、磁性材料和絕緣材料的參考資料，這些資料對於敘述本書以後的內容是必需的。

在總論末尾簡短的历史概論中僅僅涉及電機製造業历史發展的一般問題。

至於與電機原理的逐漸發展有關的一些問題，則在本書以後的各章節中敘述。

為了更好地理解總論的理論資料和參考資料，作者建議於學習本書以後的內容時，隨時回頭再來閱讀總論。

2-14 節和 2-15 節是根據作者的請求由 П. М. 基霍夫羅夫(Тихомиров)副教授編寫。

А. В. 科里茨基(Корицкий)、С. С. 奧庫尼(Окунь)、А. Г. 克拉依芝(Крайз)和 П. М. 基霍米羅夫 Тихомиров 在閱讀初稿時提出的寶貴指示，以及 А. И. 阿勃拉莫夫(Абрамов)、Ю. С. 特耶慶科(Дьяченко)和 И. П. 科勃洛夫(Копылов)在準備出版時的幫助，作者認為有責任愉快地向他們致謝。

有關本書的一切批評意見和願望，作者將以感謝的心情來接受，並請投寄以 В. М. 莫洛托夫命名的莫斯科動力學院電機教研組。

Г. Н. 彼得羅夫

# 主要字母符号

(带有含义的下标不作注解)

$A$ ——线负载, 全电流, 能量。

$B$ ——磁通密度。

$C$ ——电容, 热容量。

$c$ ——比热。

$D, d$ ——直径。

$E$ ——电势的有效值, 电场强度。

$e$ ——电势的瞬时值。

$F$ ——力(机械的, 电磁的), 磁势。

$f$ ——频率, 误差。

$G$ ——重量。

$H$ ——磁场强度。

$I$ ——电流的有效值。

$i$ ——电流的瞬时值。

$K$ ——散热系数。

$k$ ——变比, 系数。

$L$ ——自感和互感系数。

$l$ ——长度, 线度。

$M$ ——转矩。

$M_1$ ——单位电机的转矩。

$m$ ——相数。

$N$ ——导线数。

$n$ ——转速, 数目。

$P$ ——功率, 容量。

$p$ ——极对数。

$p_1$ ——单位电机的功率。

$p_m$ ——铁磁比耗。

$p_b, p_r$ ——比磁化功率。

$Q$ ——电荷。

$R, r$ ——(有效)电阻。

$S$ ——面积。

$s$ ——转差率。

$T$ ——时间常数, 周期。

$t$ ——时间。

$U$ ——电压的有效值。

$u$ ——电压的瞬时值。

$u_k, u_a, u_p$ ——短路电压的百分值及其有功分量和无功分量。

$V$ ——体积。

$v$ ——体积, 速度。

$w$ ——匝数。

$x$ ——电抗。

$Y$ ——导纳, 绕组的星形联接。

$Z$ ——阻抗, 绕组的曲折联接。

$z$ ——阻抗的模。

$\alpha$ ——系数, 相角。

$\beta$ ——系数, 相角。

$\gamma$ ——比重, 原边电压与其额定值的比值。

$\Delta$ ——电流密度, 绕组的三角形联接。

$\delta$ ——相角, 铁心中气隙长度, 导线绝缘厚度。

$\zeta$ ——系数。

$\eta$ ——效率。

$\theta$ ——稳定温差, 角度。

$\vartheta$ ——温度。

$\varepsilon$ ——原边电流对副边电流之比。

$\lambda$ ——外圆物质热传导系数, 系数。

$\mu$ ——导磁系数。

$\xi$ ——在激磁电流具有高次谐波的情况下, 振幅对有效值的比值。

$\rho$ ——电阻系数。

$\sigma$ ——系数。

$\nu$ ——在多载情况下副边电压的变化。

$\Phi$ ——磁通。

$\varphi$ ——相角。

$\Psi$ ——磁链。

$\psi$ ——角度。

$\omega$ ——角频率, 角速度。

$W$ ——损耗功率, 单位时间内发出的热量。

$w$ ——热流密度。

$C$ ——价值, 截面。

$c$ ——截面。

# 目 录

序 .....	v
主要字母符号 .....	vi

## 第一章 总論

1-1. 电机及其用途和分类 .....	1
1-2. 电机的能量圖和功率轉变圖、額定值 .....	1
1-3. 电机的可逆原理 .....	4
1-4. 电机的基本的电磁关系 .....	5
1-5. 电机的基本的構造方式 .....	13
1-6. 电机的几何尺寸与它的額定容量和額定轉速之間的 关系 .....	16
1-7. 电机的主要尺寸 .....	17
1-8. 电机里应用的材料 .....	20
1-9. 电机和电机制造發展簡史 .....	30

## 第二章 变压器

2-1. 变压器的用途和使用范围 .....	38
2-2. 变压器的額定数据 .....	38
2-3. 变压器的运行过程 .....	38
a) 变压器的微分方程式和复数方程式 .....	38
б) 变压器的向量圖 .....	42
в) 变压器的等值电路 .....	43
г) 三相变压器 .....	44
д) 無載狀況 .....	46
e) 短路狀況 .....	48
ж) 負載狀況 .....	50
з) 效率 .....	55
2-4. 变压器的磁路系統 .....	57
a) 鉄心的結構 .....	57
б) 鉄心磁化时产生的現象 .....	62
в) 变压器的磁路計算 .....	68
г) 由独立磁路并联而成的鉄心 .....	71
д) 用計算方法确定等值电路內的互感阻抗 $Z_0$ .....	72
2-5. 变压器的繞組 .....	72
a) 繞組的基本要求 .....	72
б) 繞組的結構 .....	72
в) 繞組的联接方式和联接組 .....	77
г) 变压器繞組电压的調整 .....	82
д) 繞組电抗的計算 .....	85
e) 繞組电阻的計算 .....	87
ж) 用計算方法确定等值电路的阻抗 $Z_1$ 和 $Z_2$ .....	90
2-6. 多繞組变压器 .....	90
a) 多繞組变压器的应用范围和分类 .....	90
б) 具有两个副边繞組的三繞組变压器 .....	90
в) 具有两个原边繞組的三繞組变压器 .....	93
2-7. 自耦变压器和串联的变压器 .....	94
a) 自耦变压器 .....	94
б) 串联变压器 .....	97
2-8. 变压器的并联联接 .....	98
a) 在变比相等的情况下負載的分配 .....	98
б) 在并联联接时繞組的联接組 .....	101
в) 当变比不同时的負載分配 .....	101
г) 三繞組变压器的并联运行 .....	103
д) 并联运行时的損耗功率 .....	103
2-9. 三相变压器的不对称負載 .....	103
a) 不对称負載的一般特性 .....	103
б) 沒有零序电流时的不对称負載 .....	104
в) 具有零序电流时的不对称負載 .....	106
г) 当一相断路时变压器的运行 .....	109
д) 零序阻抗 .....	110
2-10. 变压器中的瞬变过程 .....	110
a) 瞬变过程的一般特性 .....	110
б) 变压器的合閘 .....	110
в) 变压器副边繞組繞端的短路 .....	113
г) 繞匝短路 .....	119
д) 当过电压时变压器繞組中的瞬变过程 .....	120
2-11. 特殊用途的变压器 .....	128
a) 变更交流相数用的变压器 .....	128
б) 整流设备用的变压器 .....	130
в) 变频用的变压器 .....	133
г) 电弧爐电源变压器 .....	134
д) 具有平滑电压調节的变压器 .....	135
e) 电弧焊接用的变压器 .....	137
ж) 实验室设备用的高压試驗变压器 .....	137
з) 低頻电子工程方面应用的变压器 .....	139
и) 干式防火变压器 .....	140
к) 具有鉄心的电抗器和电抗繞圈 .....	140
л) 电流互感器和电压互感器 .....	142
2-12. 变压器的發热和冷却 .....	145
a) 变压器中的热过程 .....	145
б) 用来表明变压器傳热性能的經驗数据 .....	148
в) 在稳定热状态下变压器的發热 .....	151
г) 在变动的負載情况下, 变压器的發热 .....	152
д) 变压器冷却的方式 .....	153
2-13. 变压器的試驗 .....	154
a) 試驗的目的和分类 .....	154
б) 繞組的絕緣試驗 .....	155
в) 溫升試驗 .....	156
г) 运行試驗 .....	158
2-14. 变压器計算 .....	159

a) 计算所用的原始数据.....	159	a) 苏联制造厂生产的变压器的主要型式.....	164
б) 计算的程序.....	160	б) 变压器的辅助装置和附件.....	169
B) 主要尺寸的选定.....	160	B) 外国制造厂所生产的变压器的结构和型式的特点.....	177
г) 电磁负荷.....	161	2-16. 变压器理论的发展与近况.....	180
д) 绝缘距离的选择.....	162	主要参考文献.....	182
e) 热的计算.....	162	索引.....	(1)
2-15. 变压器型式和结构的简述.....	164		

# 第一章 总論

## 1-1. 电机及其用途和分类

在現代工程里,生产电能和利用电能时,要把机械能轉变为电能,把电能轉变为机械能以及把这一种电流的电能轉变为另一种电流的电能<sup>①</sup>。这种轉变是借助于电机来实现的。

电机,作为能量的轉变者来看,它是各种能量設備的基本元件之一。它广泛应用在發电站里,在工業設備方面,在运输方面,在航空自动控制 and 自动調整系統,無綫电設備,有綫通訊和其他許多方面。

在發电站里生产电能时,燃料、水或風的能量借助于內燃机、蒸汽机、水力或風力原动机轉变为机械能,然后又轉变为电能。在原子能發电站里,核子的能經過热能的形式也轉变为机械能然后再变为电能。

把机械能轉变为电能所利用的电机称为發电机。

在許多情况下使用电能时要把它轉变成旋轉的或往复运动的(拖动各种机器和机床)机械能。实现这种轉变时所利用的电机称为电动机。

在現代的电力設備里,为了合理地使用电能,时常牽涉到的不仅是把它轉变为机械能,而且要把一种电能轉变为另一种电能。例如:低压的交流电能轉变为高压的交流电能,交流电能轉变为直流电能,三相电能轉变为二相电能等。实现这些轉变所利用的电机,称为电能變

換机。

在現代工程中,特別广泛应用的是把某一电压的交流电能轉换为其他电压的同頻率的交流电能的變換机,它被称为變压器。

近年来使用电机的新的部門發展得很快以电机作为机电系統里面的調整器和放大器。

这些电机就被称为电机調整器和电机放大器。

根据电气設備的电流种类,这些电机(發电机,电动机,變換机)可以考虑为运行在交流系統的和运行在直流系統。因此它們可以分成交流电机和直流电机。

电机課程的任务就是研究各种电机的运行原理,結構和性能,它們的設計方法以及研究它們的实际構造的主要形式。

## 1-2. 电机的能量圖和功率轉变圖、額定值

电机的能量圖表示在圖 1-1, a 上。

在時間  $dt$  內,輸入电机的能量  $P_1 dt$  在电机里轉变成能量  $P_2 dt$ ,而且功率  $P_2 < P_1$ ,因为电机在运行中具有損耗,这損耗是和电机里能量的變換过程有关的。这种能量損耗等于  $(P_1 - P_2) dt$ ,不能有效地利用,而以热能的形式散失,使电机的各部發热。

电机运行时的損耗的形成是由于: 1) 电气損耗,这損耗的大小决定于那种在繞組的和其他导电閉路的導綫里有电流通过时的發热情况; 2) 由于电机里被反复磁化的鉄磁部分的磁滯和渦流而引起的鉄磁損耗; 3) 由軸承和空气

<sup>①</sup> 在这里以及在以后,电能一詞均指电流的能量。



的(或其它气体的)阻力形成的机械損耗; 4) 处在交变电場中的絕緣的(在高压电机里)介質損耗(在低压电机里这种損耗是微不足道的)。

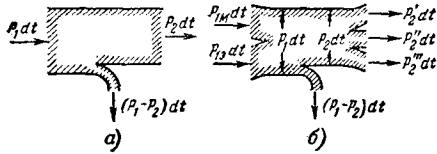


圖 1-1. 电机的能量圖。

a — 最簡單的情况; b — 較复杂的情况。

在电机里能量損耗的存在引起电机各部显著的發热, 促使我們对电机各个部分的正确的和均匀的冷却要加以特别的注意。这种情况之所以重要, 是因为在电机構造上广泛应用的絕緣材料只有一定限度的耐热性, 在溫度 100 到 150°C 的作用下, 这些絕緣材料可能很快地被破坏。

按照电机的用途, 輸入功率  $P_1$  和輸出(有效的)功率  $P_2$  有以下几种(表 1-1):

表 1-1.

电机的种类	功 率	
	$P_1$	$P_2$
發 电 机	机械的	电 的
电 动 机	电 的	机械的
变换机和变压器	电 的	电 的

在某些情况下, 电机里能量的轉变可能更复杂些。輸入电机的能量  $P_1 dt$  可能一部分是机械的  $P_{1,m} dt$ , 另一部分是电的  $P_{1,e} dt$ ,  $P_1 dt = (P_{1,m} + P_{1,e}) dt$ ; 在电机里轉变为各种形式的电能, 例如不同的电压、頻率、相数等等的电能(圖 1-1, b),

$$P_2 dt = (P_2' + P_2'' + \dots) dt.$$

比值  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$  称为电机的效率, 用百分数或小数表示。現代的电机运行时的損耗功率是比

較小的, 它們的效率相当高。

大容量的电机(几千和几万千瓦的)具有 97 到 99% 的效率; 中小容量的电机有 80 到 90%; 只有容量十分小的, 几瓦或几十瓦的电机(称为微容量电机)它們的效率才是不大的(不大于 20 到 30%)。

当旋轉的机械能在电机里轉变为电能时或当相反的轉变时, 总是可以按照力学的基本定律列出等式:

$$P_{\text{mech}} = M\omega = P_{\text{el}}$$

或

$$M = \frac{P_{\text{el}}}{\omega};$$

式中  $P_{\text{mech}}$ ——直接轉变为电功率的机械功率;

$M$ ——作用在轉变过程中的轉矩;

$\omega$ ——电机的角速;

$P_{\text{el}}$ ——从机械功率轉变来的(或轉变为机械功率的)电功率。

在圖 1-2, a 和 b 上表示了关于發电机和电动机的运行情况的功率轉变圖。在發电机情况(a)下:

$$P_{\text{mech}} = P_1 - \Pi_{\text{mech}}$$

和

$$P_{\text{el}} = P_2 + \Pi_{\text{el}};$$

式中  $P_1$ ——發电机的輸入机械功率;

$P_2$ ——發电机輸出的有效电功率;

$\Pi_{\text{mech}}$ ——由發电机的旋轉所引起的机械損耗功率;

$\Pi_{\text{el}}$ ——發电机里的电气損耗功率。

在电动机情况(b)下:

$$P_{\text{el}} = P_1 - \Pi_{\text{el}}$$

和

$$P_{\text{mech}} = P_2 + \Pi_{\text{mech}};$$

式中  $P_1$ ——电动机的輸入电功率;

$P_2$ ——电动机的有效机械功率;

$\Pi_{\text{mech}}$ ——由电动机的旋轉所引起的机械損耗功率;

$\Pi_{\text{el}}$ ——电动机里的电气損耗功率。

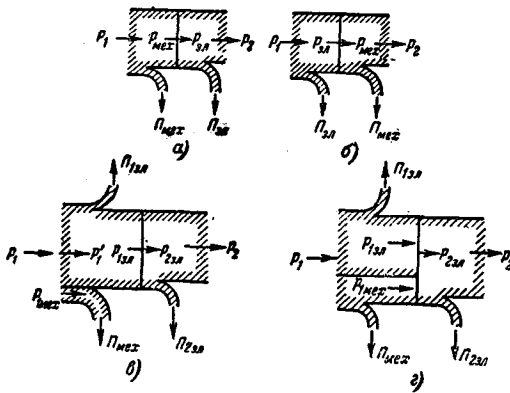


圖 1-2. 功率轉变圖。

a—发电机; б—电动机; в和г—电能变换机。

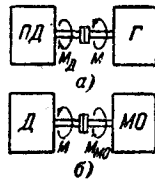
在发电机 ( $\Gamma$ ) 的能量轉变过程中, 作用在电机里的轉矩  $M$  的方向是和原动机 ( $\Pi A$ ) (圖 1-3, a) 的轉矩  $M_A$  相反的。当发电机在一定的轉速下所發出的功率  $P_{2A}$  越大, 則它的反作用轉矩  $M = \frac{P_{2A}}{\omega}$  亦越大。

在电动机 ( $A$ ) 的情况下, 轉矩  $M$  被利用来完成有用的机械工作; 它克服工作机 ( $MO$ ) (圖 1-3, б) 的阻力轉矩  $M_{MO}$ 。

当电流变换机运行时, 可分为二类情况, 它們的功率轉变圖表示在圖 1-2, в 和 г 中。

圖 1-3. 电机运行时轉矩的方向。

a—发电机; б—电动机;  
 $\Pi A$ —原动机;  $\Gamma$ —发电机;  
 $A$ —电动机;  $MO$ —工作机。



在变换机的第一类情况下 (圖 1-2, в) 除电功率  $P'_1$  外, 还要輸入一些不大的机械功率  $P_{1.mex}$  (或是从电功率轉变来), 来抵偿变换机在旋轉时所發生的損耗  $\Pi_{mex}$ 。在这种情况下作用在变换机里的轉矩  $M = \frac{\Pi_{mex}}{\omega}$ ; 此时第一种电功率

$$P_{12A} = P'_1 - \Pi_{12A}$$

轉变为其他一些参数 (例如另一种电压、頻率

等) 的第二种电功率

$$P_{22A} = P_2 + \Pi_{22A}$$

在第二类情况下 (圖 1-2, г) 电功率  $P_{22A}$  的一部分从电功率  $P_{12A}$  变来, 而另一部分則从机械功率  $P_{1.mex}$  变来。在两种情况下  $\Pi_{12A}$  和  $\Pi_{22A}$  分别表示在电机里由于第一种电流和第二种电流所形成的电气損耗功率。

最簡單的电能变换机的例子是变压器, 它和旋轉电机不同, 即沒有旋轉的部分。因此在变压器里, 在变换的过程中沒有机械能, 而它的功率变换圖就和圖 1-2, в 相似, 只要取  $P_{1.mex} = 0$ 。从以上所列出的能量圖和功率变换圖, 尽管还没有研究电机本身的構造和在电机里所發生的电磁过程, 已經可以作出关于利用电机来变换能量的特性方面的一些結論:

1. 在电机的运行过程中發生了机械能和各种不同的电能——例如不同的电压、頻率、相数等等的电能——之間相互的和等值的变换。

2. 电机的輸入功率的总和总是大于电机的輸出功率的总和。在变换的过程中消失的能量轉变为热能使电机發热。

3. 由电机各个部分的旋轉或运动直接造成的損耗功率, 靠电机的机械功率来补偿, 其余的損耗功率則靠电功率来补偿。

4. 电机里变换的有用功率越大, 即电机的“負載”越大, 电机的損耗和电机的發热程度就越大。电机所容許的有用的負載主要为它的發热程度所限制。按照發热的条件, 电机在短时期内比在長时期内能担負起更多的負載。

按照發热条件算出的电机的有用功率称为額定值, 标志于电机的名牌上。在名牌上还标志着其它数值, 用以說明电机所設計的运行条件, 也称为額定值, 例如: 額定电压, 額定电流等。

对交流电机說, 具有說明性質的不仅是用

千瓦(或瓦)作單位的有效功率  $P_1$  和  $P_2$ , 而且是用千伏安(或伏安)作單位的視在功率, 因为在給定电压时, 知道視在功率能够确定电流的大小。

說明电机的运行性質的数值, 例如电流、电压、功率、轉速、阻抗和其它数值, 常用相对單位来表示, 就是說把它們的額定值当作 1 而用額定值的小数(或百分数)来表示。相对單位用字母  $\delta/e$  来表明, 例如  $U = 1.1 \delta/e$  或  $U_* = 1.1$ , 这意味着电压  $U$  等于它的額定值的 1.1 倍。在实际計算中用相对單位制度在某些情况下是較方便的。

### 1-3. 电机的可逆原理

在任何电机里, 能量的变换都是可以逆向的。

如果从电机軸上輸入机械能, 那末在电机里它可以轉变为电能。反之, 如果从同一电机的繞組里輸入电流, 那末, 电能可以在既定的条件下轉变为旋轉的机械能。这样每个發电机都可以当作电动机运行, 反过来說也是一样。每个变换机都可改变它的能量轉变的方向。这个性能称为电机的可逆性。

必須注意, 虽然可逆性是所有电机固有的性能, 但远不是全部电机在实际运行中都考虑改变其能量的轉换方向。

为了了解可逆原理, 讓我們研究一个由放在磁場中的导体所組成的雛形电机(圖 1-4)。在导体上施以外力  $F$ , 使导体在磁場里按磁通密度向量  $B$  的垂直方向用恒定速度  $v$  运动。在导体里發生的电势

$$e = Blv, \quad (1-1)$$

其中  $B$ ——沿导体長度  $l$  的磁通密度的平均值。

如果导体通过某些外部电阻而閉合, 那末

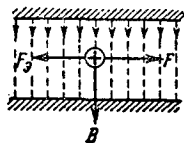


圖 1-4. 雛形电机圖。

导体里就通过电流  $i$ , 其方向如圖 1-4 所示(“右手”定則)。在均匀磁場中, 电流  $i$  將保持不变。現在讓我們研究这个雛形电机的能量平衡。当电流  $i$  通过导体时, 就有电磁力

$$F_e = Bil \quad (1-2)$$

作用在导体上, 其方向是反抗导体的运动的(“左手”定則)。

在等速运动下作用在导体上的外力就应该等于

$$F = F_e,$$

而被它产生的功率

$$Fv = F_e v.$$

把(1-1)和(1-2)式  $F_e$  和  $v$  的数值代入上式的右部得:

$$Fv = Bilv = ei.$$

这个等式証明: 在發电机里所消耗的外来的机械功率全部被轉变为电功率。

如果导体上不加外力  $F$ , 由外部电源输送电流  $i$  通过該导体, 那末导体上仅有电磁力  $F_e$  的作用, 在这个力的作用下, 导体在磁場中的运动方向和它作为發电机运行的运动方向正相反。这种导体的运动可以利用来作有用的机械的功。在此情况下, 导体可以看作雛形的电动机。

由外部輸入至电动机的电功率將等于  $ui$ 。作用在电动机上的电压  $u$  应当平衡导体里所發生的电势  $e$  和在它的电阻  $r$  里的电压降:

$$u = e + ir.$$

所以从網路上取用的功率等于

$$ui = ei + i^2 r.$$

把电势的数值(1-1)代替  $e$  得:

$$ui = Blvi + i^2 r.$$

或依照(1-2):

$$u_i = F_g v + i^2 r.$$

从这个等式得知电动机从电网取用的电功率,一部分转变为有用的机械功率,一部分为了偿付电气损耗而散失。

所讨论的示例阐明了电机的可逆原理。

#### 1-4. 电机的基本的电磁关系

依靠电机来实现的能量转变是以电磁感应现象做基础的。也可以用静电感应的原理来制造电机,但能在实际中广泛应用的这样的电机到现在还没有制造出来。

电机具有两个基本部分: 1) 磁的部分——通常是用铁磁材料做成的铁心和 2) 电的部分——两个或几个绕组<sup>①</sup>。电机的绕组可能是相互不动的(变压器),也可能是连着安装这些绕组的铁心部分一起彼此相对地移动的(旋转电机)。

在电机的运行过程中,在铁心里或它的各个部分里发生连续不断的磁通变化,通常是按照简谐的(或近似于简谐的)规律变化的。此时在铁心内外产生交变的电场,沿着铁心上安装的绕组的闭路的长度  $l_w$  所积出的电场强度,等于在闭路里所产生的电势  $e_w$ :

$$\oint E dl_w = e_w = -\frac{d\Phi_w}{dt}.$$

在这个等式里  $E$  是电场强度的沿围绕着的闭路切线方向的分量;  $\Phi_w$  是和绕组链系的磁通(图 1-5)。在电机里绕组的电势将被利用在电能的转

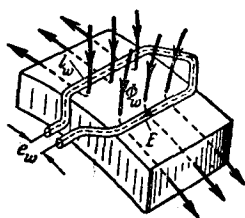


图 1-5. 在电机里由于磁场变化而发生的电场。

① 在某些情况下,具有铁心的直流绕组被永久磁铁所代替。

变过程中。

由此可见,电机是一种电磁系统,其中铁心的磁场是和绕组线圈的电场相互关联的。

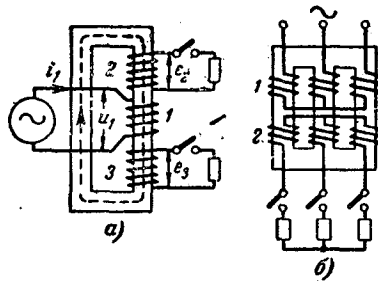


图 1-6. 变压器的电磁图。  
a—单相变压器; b—三相变压器。

在电机里磁场不断改变的过程可由机械的方法或电的方法来实现,各具有不同的电磁关系。

最简单的是单相变压器的电磁关系(图 1-6, a)。它由二个或几个不动的绕组所组成。为了使磁的链系更好,这些绕组安装在用铁磁材料(电工钢片)<sup>①</sup>做成的闭合铁心上。假如绕组之一,例如 1 (所有其它绕组开路),联接到按正弦变化的交流电源,其频率  $f = \frac{\omega}{2\pi}$ , 电压  $u_1 = \sqrt{2} U_1 \sin \omega t$ , 其中  $U_1$  为电压的有效值,  $\omega$  为角频率; 那末,绕组内通过的正弦电流  $i_1$ , 决定于以下等式

$$u_1 = i_1 r_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} = i_1 r_1 - e_1,$$

式中  $r_1$ —绕组 1 的电阻;

$L_{11}$ —它的电感;

$$e_1 = -L_{11} \frac{di_1}{dt} \text{—自感电势。}$$

在其它绕组里(2, 3, ...)产生正弦的互感电势:

$$e_2 = -L_{12} \frac{di_1}{dt}, \quad e_3 = -L_{13} \frac{di_1}{dt}, \quad \dots\dots$$

① 当磁通随时间变化时电机的铁心总是用薄钢片做成来限制涡流。

每一个电势都可以用作为具有相同频率  $f$ , 但具有其他电压值的新交流电源。

这些繞組电势的瞬时值( $e$ )和有效值( $E$ )的比值等于:

$$e_1:e_2:e_3:\dots = E_1:E_2:E_3:\dots = L_{11}:L_{12}:L_{13}:\dots$$

可以在很大的准确程度上来認為

$$L_{11}:L_{12}:L_{13}:\dots = w_1:w_2:w_3:\dots \textcircled{1}$$

所以

$$E_1:E_2:E_3:\dots = w_1:w_2:w_3:\dots; \quad (1-3)$$

或近似地假設  $U_1 = E_1$ :

$$U_1:U_2:U_3:\dots \approx w_1:w_2:w_3:\dots,$$

其中  $U_1, U_2, U_3, \dots$  为繞組电压的有效值。

由此可見,在給定电压  $U_1$  下选用相应于等式(1-3)的繞組匝数,可以在繞組端获得所希望的电压  $U_2, U_3, \dots$ 。

假如繞組 2、3、... 被用作电源而接到負載阻抗上,那末就有交流电流在繞組里流通。这些电流引起在繞組 1 里电流的对应的变化,而这种变化决定于能量不灭定律:繞組 2、3、... 發出的有功功率和無功功率,將等于由外界电源傳送給繞組 1 的除去消耗于磁化变压器鉄心方面的功率以后所余的有功功率和無功功率。

从等式(1-3)得出每匝的电势  $E_w$ :——

$$\frac{E_1}{w_1} = \frac{E_2}{w_2} = \frac{E_3}{w_3} = \dots = E_w;$$

在所有的繞組里都是相同的。繞組的視在电磁功率

$$P_{1s} = E_1 I_1 = \frac{E_1}{w_1} I_1 w_1 = E_w (I_1 w_1),$$

$$P_{2s} = E_2 I_2 = E_w (I_2 w_2),$$

$$\dots\dots\dots;$$

也就是可以看成繞組电势与它的电流的乘积或者看成每匝电势( $E_w$ )与整个繞組的全电流( $Iw$ )

的乘积。

在最簡單情况下,变压器有两个繞組。

在这种情况下,忽略了变换过程中的損耗功率,得到:

$$P_{1s} \approx P_{2s},$$

或

$$E_w I_1 w_1 \approx E_w I_2 w_2,$$

因此

$$I_1 w_1 \approx I_2 w_2,$$

也就是說,在双繞組变压器里,有負載时繞組里的电流近似地反比于这些繞組的匝数。

当变换三相电能时,可以在每一相里采用一个独立的單相变压器(圖 1-6, a) 或者把三个变压器在構造上联合成一个三相变压器(圖 1-6, b)。在后一种情况下,前面对單相变压器所推导出的关系,对三相的任何一相都是正确的。

异步电机的电磁关系是变压器电磁关系的發展。在变压器的繞組里,当通过电流时作用在原边繞組和副边繞組之間的机械力,在异步电机就被利用来轉变电能为旋轉的机械能,或利用来进行相反的轉变。

三相异步电机(最普通的)的电磁关系表示在圖 1-7 中<sup>①</sup>。它不同于变压器的电磁关系的是:它的磁路系統造成(用电工鋼片)为两个同心的圓柱体,里面的圓柱体(轉子)裝在用軸承支持的軸上,可以在外面的不动的圓柱体(定子)内自由旋轉。

繞組 1 均匀地分布在定子圓周上,使它的諸相彼此相差  $120^\circ$ 。轉子上的繞組 2 可做成三相或多相的形式,在最簡單的情况下是短接的。为了改善磁的联系,定子和轉子之間的空气隙 3 尽量地做得小些。假如定子繞組接到三相电源上,那末,在繞組里的电流就將建立起磁場,这个磁場的軸在空間不断地移动(旋轉)形成旋

<sup>①</sup> 大家知道:  $L_{11} = \lambda_{11} w_1^2$ ,  $L_{12} = \lambda_{12} w_1 w_2$ ,  $L_{13} = \lambda_{13} w_1 w_3$ , ...; 而且当繞組分布在閉合的鉄心上时  $\lambda_{11} \approx \lambda_{12} \approx \lambda_{13} \dots$

<sup>①</sup> 为了簡化圖形起見在圖 1-7 中把相繞組适当地集中在定子和轉子圓周的不大的部分上面。

轉磁場(圖 1-8, a<sup>①</sup>)。这个旋轉磁場將在轉子的短接繞組中引起电流, 这电流在磁場的作用下产生电磁力使轉子順着旋轉磁場的方向而旋轉, 这从簡單模型上(圖 1-8, b)很容易看明白。

周期(圖 1-8, a)。假如用  $n_1$  表示磁極每分鐘的轉数, 則它的每秒钟轉数將是  $\frac{n_1}{60}$ , 因此,

$$f_1 = \frac{n_1}{60},$$

或

$$n_1 = 60 f_1,$$

其中  $f_1$  是建立旋轉磁場的定子电流的頻率。

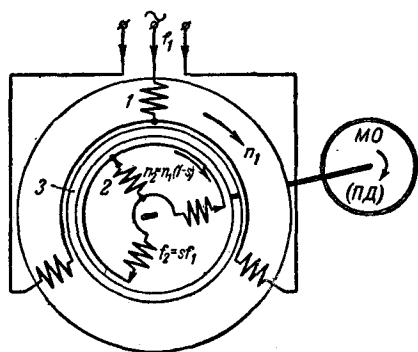


圖 1-7. 三相异步电机的电磁关系。

例如当磁場从左向右旋轉时, 在轉子的导体  $A$  中發生从圓形平面的后面向前的电势(“右手”法則)。假如这时候导体里的电流和电势同相, 那末作用在导体上的电磁力  $F$  將使轉子在磁場运动的方向里旋轉(“左手”法則)。

根据这个原則, 电动机的轉子总是轉得比磁場慢(异步于旋轉磁場), 因为只有在這種情况下, 在轉子繞組里才会發生电势而有电流流通。这种轉子对磁場落后的現象叫做轉差率。轉差率越大那末發生在轉子繞組里的电流也越大(在磁場不变的条件下), 而且拖动工作机  $MO$  (圖 1-7) 的轉子所能克服的机械阻力也越大。由此可見, 异步电动机的旋轉速度随着負載改变, 随着負載的增加而降低。

假如由交流电建立的旋轉磁場在定子圓周上形成一个北極( $C$ )和一个南極( $IO$ )(亦即一对磁極), 那末在這種簡單的情况下磁極軸旋轉  $360^\circ$  而回到起始位置, 就相当于交流电的一个

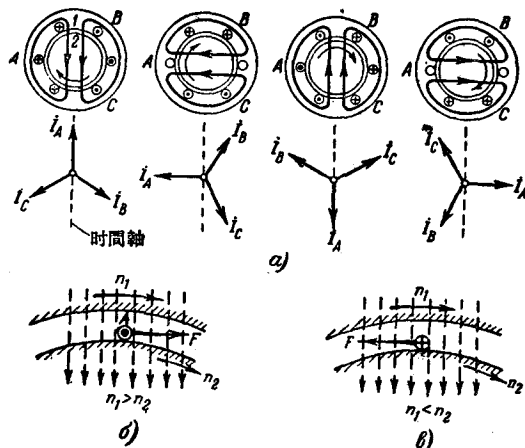


圖 1-8. 三相异步电机运行原理的說明。

a - 旋轉磁場的形成; b - 电机当作电动机运行时轉子电流与磁場的相互作用; c - 当作發电机运行时轉子电流与磁場的相互作用。

假如定子繞組这样来制造, 使得沿着空气隙的圓周上的磁極对数为  $p$ , 那末磁場的旋轉速度, 所謂“同步速度”, 在同一頻率之下, 將減到  $p$  分之一, 因为磁極軸現在要在  $p$  周期內才旋轉  $360^\circ$ ; 因此在一般情況下

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \tag{1-4}$$

或

$$f_1 = \frac{p n_1}{60}, \tag{1-5}$$

异步电动机轉子的轉差率  $s$ , 化作同步速度  $n_1$  的小数时等于:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \tag{1-6}$$

由此

$$n_2 = n_1(1-s) = \frac{60 f_1}{p}(1-s). \tag{1-7}$$

<sup>①</sup> 假設讀者已从电工基础教程里熟悉了旋轉磁場的發生条件和基本性能。

轉子的电势和电流的頻率可以从与 (1-5) 相似的等式来找出, 不过要用旋轉磁場对轉子的相对速度, 即  $n_1 - n_2 = sn_1$  来代替  $n_1$ ; 那末

$$f_2 = \frac{p sn_1}{60} = s f_1. \quad (1-8)$$

通常异步电机运行时  $s \ll 1$ , 所以, 如等式 (1-7) 所示, 它的轉子以近似于同步轉速的速度旋轉着, 只随着負載的增加而略微降低轉速而已。

三相异步电动机由于它本身構造簡單而可靠, 已經广泛地应用在交流电設備中。

如所有的电机那样, 异步电机也是可逆的, 也就是說, 它可以当作电动机运行, 也可以当作發电机运行来轉变旋轉的机械能成为交流电能。在作为發电机运行时, 电机的轉子应该由原动机  $\Pi \Delta$  拖动得快于磁場的速度 ( $n_2 > n_1$ )。此时 (圖 1-8, 6) 在轉子繞組里感应的电势和电流的方向, 以至于定子电流的方向都改变了<sup>①</sup>。在这种条件下, 电机已經不消耗功率, 而且供給电網以有功功率, 此有功功率相当于原动机消耗在拖动轉子上的机械功率 (电磁力  $F$ , 如圖 1-8, 6 所示, 在發电机运行下改变它的方向而反抗轉子的旋轉)。

如上所述, 异步电机的基本特点純粹是原边繞組和副边繞組之間的变压器式的磁性联系。副边电流只是憑借原边电流的变化而产生的。因此电机电磁关系的更进一步的發展就是分別供电給定子繞組和轉子繞組的方式。

当轉子轉速不变时, 轉子电路内电流的頻率 (1-8)  $f_2 = s f_1$ 。假如在  $n_2 = \text{常数}$  的情况下从頻率  $f_2$  的輔助交流电源供电給轉子电路, 那就得到一种新的电机形式。实际中应用得最多的就是  $n_2 = n_1$  和  $s = 0$  的电机。在这种情况下, 由

定子的旋轉磁場在轉子繞組里感应的电势等于零, 轉子电路里的电流只有依靠輔助电源来供給。当  $f_2 = 0$  时輔助电源是直流电源 (圖 1-9, a)。

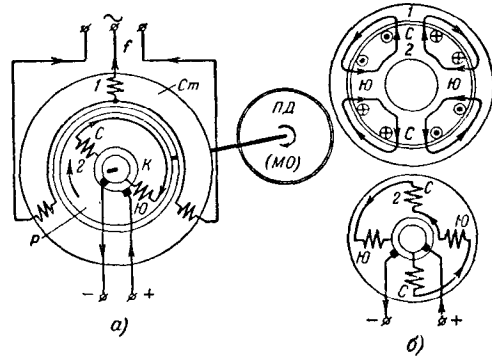


圖 1-9. 三相同步电机的电磁关系圖。  
a—兩極轉子; b—四極轉子。

旋轉的轉子  $P$  的繞組 2 和电源之間的联系是利用接触环  $K$  和与环接触而不动的电刷来完成的。在定子  $C_m$  上放置着交流繞組 1 (三相的)。

假設所研究的电机是作为發电机使用的。当轉子由原动机  $\Pi \Delta$  拖动时, 繞組 2 的磁場就和轉子一起在空間移动, 在定子 (电樞) 繞組 1 里就將感应交变电势。假如繞組 1 联接到任何一个电用户, 那末在繞組里就將有交流电流流通 (在所研究的綫路里是三相电流)。根据能量不灭定律, 固定繞組中电流的有功分量, 在与旋轉繞組的电流互相作用下, 产生机械作用 (轉矩) 以反抗轉子的旋轉。固定繞組 1 發出的有效电功率越大, 消耗在旋轉的轉子上的机械功率也应当越大。由此可見, 消耗在旋轉轉子和改变定子磁場方面的机械能將轉变为在定子繞組里發生的交流电能。

应该指出, 定子电流的無功分量, 根据楞次定律也产生作用, 但这作用純粹是磁性的, 只改变轉子的磁場, 它不产生 (根据能量不灭定律) 反作用的机械轉矩。轉子繞組的直流电功率輸

<sup>①</sup> 异步电机就是变压器, 所以所有副边电流 (轉子的) 的变化都要引起原边电流 (定子的) 的相应的变化。

入完全消耗在偿付这个绕组的电气损耗上。

在我们研究的发电机里，定子绕组里交变电势的一个周期相当于转子旋转一转，因此电势的频率

$$f = \frac{n}{60},$$

式中  $n$  是转子每分钟的转数，而  $\frac{n}{60}$  是每秒钟的。

假如转子不是如图 1-9, a 所指的一对磁极 (C—IO)，而是在一般情况下的  $p$  对磁极 (图 1-9, b)，那末在同样的转子转速下频率将增为  $p$  倍：

$$f = \frac{pn}{60}. \quad (1-9)$$

从这个等式可见，按图 1-9 制成的发电机将具有这样的特性，它发生的电流的频率和转子转速有关，并且和后者成正比。这发电机称为同步发电机。它已广泛地采用在近代的电气设备里<sup>①</sup>。同步发电机可以在定子上做成任何数值的相数。最普通的是三相发电机。

同步电机，和所有其它电机一样，是可逆的，也就是说，它既可以用作发电机，也可以用作电动机。因此假如同步电机的定子绕组接到频率  $f$  的交流电源（在现在所研究的情况下是三相电源）上，而转子绕组则由直流电源供给，并把转子用任何方法拖动到由等式 (1-4) 所确定的转速  $n = \frac{60f}{p}$ ，那末，由定子的三相电流所建立的旋转磁场和与定子磁场同方向同速度旋转的转子磁场相互作用下将产生转矩，这转矩不仅能够旋转空载的转子，并且能够克服加在电机轴上的负载转矩。

在这种情况下，电机将按同步电动机的方式运行。同步电动机具有这样的性能，它的转

速决定于等式 (1-4) 而与轴上的机械负载无关。同步电动机的严重的缺点是启动时必须把它的转子拖到“同步”转速。但如后面所指出的，已在很大程度上克服了这些困难。因此同步电动机在电力拖动方面得到了更广泛的应用了。

上面研究的变压器、异步机和同步机的电磁关系包括了近代电气设备方面采用的交流电机的主要型式 (种类)。但在许多情况下对电机所提出的要求，如果利用变压器或者利用同步电机或异步电机，是不可能完成的，例如：直流电 ( $f=0$ ) 的产生或电动机在频率不变的电源下平滑而广泛地调速，电动机在直流电网上的运行等等。

当电机用在这些情况时，它的电磁关系由于引入了变频器而不得不更加复杂些。

变频器通常接在转子的电路内。当改变转子转速而不改变供给转子绕组的电源频率的情况下，它可以自动地在转子中改变交流电的频率。变频器有机械的，也有离子的。但用得最广泛的是机械的变频器，即换向器，在构造上是和电机的转子联在一起的。

带有换向器的转子图表示在图 1-10 内，它

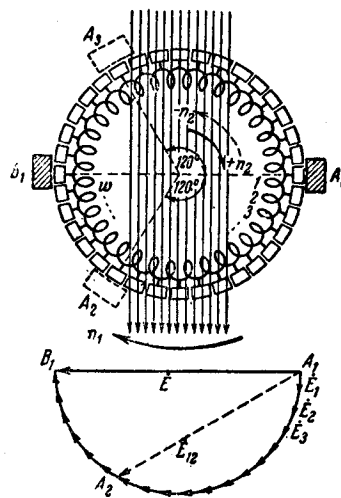


图 1-10. 带有换向器和接触电刷的转子的电磁关系图。

<sup>①</sup> 异步发电机和同步发电机相比，具有许多严重缺点，采用得较少。同步发电机和异步发电机的比较，将在后面研究。



是每一种整流子电机电磁关系圖的組成部分。

变频器——换向器——是由許多金屬的（銅的）薄片所組成。它們彼此互相絕緣着，排列成圓柱面而且各与圓柱的軸平行，联成多角形的多相繞組每隔一匝或几匝接到一塊薄片。换向器的外面紧靠着接触电刷，憑借这些电刷把旋轉的繞組通过换向器薄片而和外部电路接通。

为了理解变换频率的程序，首先假定外部磁場在空間固定着不动( $n_1=0$ )，轉子在磁場里用速度  $n_2$  旋轉。在繞組的綫匝里就發生交变电势，其频率(1-9)

$$f_2 = \frac{pn_2}{60}$$

此时作用在不动的电刷  $A_1$  和  $B_1$  之間的电势等于串联綫匝  $1, 2, 3, \dots, w$  的电势  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_w$  的瞬时值之和。当  $n_2 = \text{常数}$  并且在匝数足够多的情况下这个电势总和 ( $E$ )，如向量圖(圖 1-10)所示，將不随時間改变并且等于电势多边形外接圓的直径<sup>①</sup>。因此当轉子旋轉时，繞組綫匝的频率  $f_2$  的电势  $E_1, E_2, E_3, \dots$  变换成电刷  $A_1$  和  $B_1$  之間频率  $f=0$  的电势  $E$ ，由此可見这两个电刷可以成为直流电源的兩極。

兩刷之間电势  $E$  正比于轉子的轉速，因为后者决定繞組每匝电势的振幅。直流发电机的結構就根据这个原理。它的电磁关系表示在圖 1-11 上。在定子上安放繞組，通入直流电，产生不以時間和空間改变的磁場。在轉子（电樞）上布置着和换向器（用圓周的形式来示意地指出）相接的多相繞組。不难看出，直流发电机可以看成反裝的同步发电机（圖 1-9,  $a$  繞組 2 裝在定子上，繞組 1 裝在轉子上），在这种电机里交变电势借助于换向器而轉变为直流电势。

在直流发电机里时常采用自激的方式，那

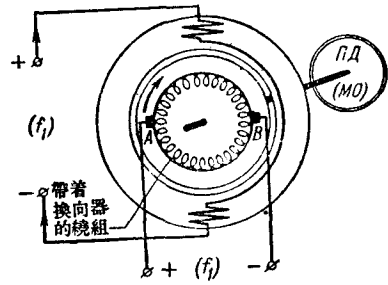


圖 1-11. 直流电机的电磁关系圖。

就是建立恒定磁場的定子繞組由电机本身的电樞的二端  $A$  和  $B$  来供电。

当直流电机作为电动机运行时(圖 1-12)轉子繞組通过电刷  $A$  和  $B$  接向直流电源。在轉子繞組里流通的直流电流与定子磁場作用，产生轉动轉子的轉矩。当轉子旋轉时，在它的繞組里产生电势，根据楞次定律，这个电势的方向和加在电刷上的电压  $U$  的方向相反，因此轉子电路里的电流

$$I = \frac{U - E}{r}, \quad (1-10)$$

其中  $r$  表示电路电阻。

另一方面，因为电刷之間电势与磁極的磁通  $\Phi$  和轉子的轉速  $n$  成正比：

$$E = k\Phi n, \quad (1-11)$$

其中  $k$  是比例常数，由(1-10)和(1-11)

$$n = \frac{U - Ir}{k\Phi} \approx \frac{U}{k\Phi}, \quad (1-12)$$

因为  $U$  通常是远大于  $Ir$  的。

等式(1-12)指明，依靠着平滑地改变磁通  $\Phi$  或电压  $U$  可以使直流电机在很广泛的範圍内实现平滑的轉速調節。

异步电机可以像同步电机那样与变频器即换向器連接在一起。换向器可以在轉差率  $s$  变动的情況下把轉子电路和定子电路連接起来，轉子电路内感应电势的频率为  $f_2 = sf_1$  (1-8)，而定子电路的频率却是  $f_1$ 。

① 向量圖是在假設綫匝电势是正弦变化且  $p=1$  的前提下作出的。