

电 机 学

第三册

Г. Н. 彼特罗夫主編

高 等 教 育 出 版 社

知识就是力量

PDG

14.3

蘇子卿
船
PDG

統一書號 15010·785
定價 1.00



电 机 学

第三册

Г. Н. 彼特罗夫主編
吳 鉄 坚 編 譯

高等教育出版社

新
華
書
局
PDG

本書系根據蘇聯國立動力出版社出版的 Г. Н. 彼特羅夫 (Г. Н. Петров) 教授主編“電機學”第一冊 (Электрические машины, часть I) 1940 年版編譯的。原書經蘇聯電力人民委員會教育司審定為動力高等工業學校的教科書。

原書總論和變壓器部分已經有了新版，新版譯本已由我社於 1958 年 6 月出版，譯者是天津大學電力機械教研室。為了供應學校教學之需，我社決定按照旧版將其余部分(交流電機理論的一般問題，异步電機，同步電機，直流電機，換流機，交流整流子電機)編譯出版。這些部分分為三冊，即第二、三、四冊(第一冊因已有新版譯本，不再編譯了)，第二冊內容包括交流電機理論的一般問題和异步電機，第三冊內容包括同步電機，第四冊是根據蘇聯動力出版社出版的 Г. Н. 彼特羅夫著“電機學”第二冊 1947 年版翻譯的，內容包括直流電機、換流機和交流整流子電機。

本書是第三冊，它綜合研究同步電機的各种問題。這些知識是工科學院的電機製造、發電廠、輸配電以及和電機有關的其他電工部門各專業的学生所必需的。

編譯者根據目前同步電機發展情況，刪去了原書中一些已經過時的資料，增添了最近幾年在同步電機製造方面的新成就，並補充了一些國產同步電機的技术數據。

本書對於從事電機製造和電機运行的工程技術人員也有參考價值。

電 機 學

第三冊

Г. Н. 彼特羅夫教授主編

吳鈇堅編譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內孫思邈寺 7 號

(北京郵書刊出版業營業北許可書出字第 054 號)

京華印書局印裝 新華書店發行

統一書號 15940.755 開本 787×1092¹/₁₆ 印張 8.7/8

字數 265000 印數 0001—7,000 定價(7) 洋 1.90

1959 年 7 月第 1 版 1959 年 7 月北京第 1 次印刷

新華書店
PDG

主要字母符号

- E_0 —在定子绕组中由气隙磁通感应的电势。
 E_s —在定子绕组中由合成的气隙磁通感应的电势。
 E_l —在定子绕组中感应的漏电势。
 E'_d —在定子绕组中的瞬变电势(为了近似地确定同步电机在瞬变过程时的电磁功率)。
 f_{k0} —在相当于无载时额定电压激磁下的稳定三相短路电流的倍数。
 f_{kN} —同上,在额定激磁下。
 f_0 —自由振荡频率。
 I —定子电流。
 I_k —稳定的三相短路电流。
 $I_{k\nu}$ —稳定的短路电流(下标 ν 说明短路状态: $\nu=3$ —三相, $\nu=2$ —两相, $\nu=1$ —单相)。
 I_{k20} —当两相与中綫短路时在中綫中的稳定电流。
 I_n —激磁电流。
 $I'_{dm\nu}, I''_{dm\nu}$ —在突然短路时瞬变和超瞬变过程的定子电流周期性分量最大初值(ν 参看 $I_{k\nu}$)。
 $I'_{d\nu}, I''_{d\nu}, I'''_{d\nu}$ —在突然短路时瞬变,超瞬变过程的定子电流周期性分量的有效(均方根)值(ν 参看 $I_{k\nu}$)。
 I'_c, I''_c —在突然短路时瞬变,超瞬变过程的定子电流非周期性分量的初值。
 i —定子电流的瞬时值。
 i_n —激磁绕组电流的瞬时值。
 i'_d, i''_d —在突然短路时瞬变,超瞬变过程的定子电流周期性分量的瞬时值。
 i'_a, i''_a —同上,对定子电流非周期性分量。
 J —机組旋轉部分的慣量。
 k_d —定子縱軸磁势对激磁繞组的折合系数。
 k_q —同上,为定子橫軸磁势。
 M_a —电磁力矩。
 M_c —比整步力矩。
 M_n —起动力矩。
 M_s —进入力矩。
 P_ψ —电磁功率。
 p_ψ —电磁功率 P_ψ 的分数值。
 P_c —比整步功率。
 P_r —电功率。
 P'_ψ —在瞬变过程时的电磁功率。
 r —在直流电时的定子绕组电阻。
 r_n —同上,为激磁绕组。
 r_a —对顺序电流的定子绕组有效电阻。
 r_s, r_0 —同上,对逆序和零序电流的。
 r_{ed} —沿縱軸阻尼籠的有效电阻。
 T_{d0} —在定子绕组开路时激磁绕组时间常数。
 T'_d —在瞬变过程期间决定定子电流周期性分量衰减的时间常数。
 T''_d —同上,为超瞬变过程。
 T_a —决定定子电流非周期性分量衰减的时间常数。
 T_0 —自由振荡周期。
 x_1, x_2, x_0 —对于顺序、逆序与零序电流的定子绕组电抗。
 x_c —同步电抗。
 x_{ad} —取决于縱軸电枢反应的定子绕组电抗。
 x_{aq} —同上,取决于橫軸的。
 x'_d, x''_d, x'''_d —沿縱軸的定子绕组电抗:同步、瞬变和超瞬变。
 x'_q, x''_q, x'''_q —同上,对于橫軸。
 x_n —在定子绕组开路时的激磁绕组电抗。
 x'_n —同上,在定子绕组闭合时。
 x_s —定子绕组的漏抗。
 x_{ns} —同上,对于激磁绕组。
 x_{esd} —同上,对于沿縱軸的阻尼绕组。
 x_{esq} —同上,对于沿橫軸的阻尼绕组。
 x''_{ed} —在定子绕组和激磁绕组闭合时沿縱軸的阻尼绕组电抗。
 x_p —波梯(Потье)电抗。
 θ —电压 \dot{U} 和电势 \dot{E} 間的位移角(决定同步电机的电磁功率)。
 Θ_a —定子绕组磁势。
 Θ_{ed} —折合至激磁绕组磁势的縱軸电枢反应磁势。
 Θ_{aq} —同上,对于橫軸。
 Θ_r —定子和轉子的合成磁势。
 Φ_0 —在气隙中的激磁绕组(極)磁通量。
 φ —定子电压和电流的相位移角。
 ψ —电势 \dot{E} 和定子电流 \dot{i} 的相位移角。

目 录

第五章 同步电机

5-1. 概述	1	а) 同步电动机的运行特性	60
а) 额定值	1	и) 同步电动机应用范围和异步电动机的比较	66
б) 定子绕组	1	5-7. 同步补偿器	68
в) 同步电机的励磁	2	5-8. 并联运行电机间有功功率和无功功率的分配	70
5-2. 三相同步发电机·对称负载	3	5-9. 反应式同步电机	72
а) 无载情况	3	5-10. 同步发电机在容性负载的运行	72
б) 电枢反应	4	5-11. 同步电机突然短路	73
в) 电枢漏抗	5	а) 无阻尼绕组同步电机的三相短路	74
г) 电枢绕组的有效电阻	6	б) 有阻尼绕组同步电机的三相短路	80
д) 向量图	6	в) 两相及单相短路	83
е) 隐极电机的向量图(波梯图)	7	г) 短路电流的一般方程式	84
ж) 凸极电机的向量图(布郎迭尔图)	9	д) 短路冲击电流	85
з) 简化的向量图(彭-爱廷堡图)	14	е) 同步电机的参数	86
и) 变换过的凸极电机的向量图	15	ж) 短路电流的作用	87
к) 相对单位制在同步电机理论中的应用	17	а) 采用双绕组发电机以限制短路电流	92
л) 特性曲线和向量图	18	5-12. 同步电机的振荡	92
м) 短路特性	18	а) 同步电机在振荡过程中作用在转子上的转矩	93
н) 负载特性	20	б) 周期性变化的轴上力矩作用下转子的振荡	95
о) 外特性	21	в) 电机单独运行时转子的振荡	96
п) 调整特性	23	г) 共振系数或增大系数	97
р) 短路电流的倍数	24	д) 当电机轴上的力矩为冲击式变化时转子的振荡	97
5-3. 单相同步发电机	24	е) 阻尼绕组对同步电机振荡过程的影响	99
а) 概述	24	ж) 自由振荡的频率和周期的计算公式	100
б) 单相发电机和三相发电机的比较	24	з) 一般结论	100
в) 单相同步发电机的电枢反应	25	и) 自振荡的现象	101
г) 阻尼绕组	27	5-13. 同步电机的动态稳定	102
д) 有阻尼绕组的单相发电机电枢反应的计算和向量图	27	а) 在瞬变过程时电机的电磁功率	102
5-4. 三相发电机的不对称负载	28	б) 动态稳定的概念	104
а) 不对称负载下的向量图	28	5-14. 同步电机的波过程	106
б) 逆序电流的容许值	29	а) 波过程的一般特征	106
в) 不对称短路	30	б) 绕组绝缘	107
г) 参数 Z_0 与 Z_2 及其试验确定	34	в) 波过程时定子绕组的参数	108
5-5. 发电机的并联运行	38	5-15. 同步电机的损耗与效率	109
а) 整步和投入并联运行	39	а) 同步电机的损耗	109
б) 同步发电机与功率无穷大电网的并联运行	43	б) 效率	112
в) 两台容量相近的发电机的并联运行	49	5-16. 同步电机的发热与冷却	112
г) 凸极电机的电磁功率与整步功率	50	а) 发热	112
д) 同步电机的过载能力	51	б) 冷却	113
5-6. 同步电动机	52	5-17. 同步电机的构造及其发展远景	121
а) 电机从发电机状态过渡到电动机状态	52	а) 同步电机的构造	121
б) 同步电动机的向量图	52	б) 同步电机发展远景	134
в) 同步电动机的电磁功率和整步功率	54	в) 我国同步电机制造发展概况	136
г) 同步电动机的 V 形曲线	55	文献	137
д) 圆图	56		
е) 同步电动机的起动	60		
ж) 同步电动机的起动特性和起动线路图	63		

第五章 同步电机

第一章 1-5 已经把同步电机的构造和运行原理予以一般性的描述。根据这些预备知识以及第三章中所讨论的交流电机理论的一般性问题，下面将阐明同步电机更详尽的理论并引导出关于同步电机结构上的基本知识。

为了更好地掌握后面的内容，首先讨论与同步电机有关的某些一般性问题，这些问题在第一章 1-5 里未曾谈到过。

5-1. 概述

a) 额定值。同步电机指定的运行状态，以电机名牌(表格)上所标记的额定值表征。标记在同步电机名牌上的有：1) 电机指定的运行状态(发电机、电动机或补偿器)^①；2) 容量(发电机——视在功率用伏安、千伏安或兆伏安表示，电动机——轴上功率用瓦、千瓦或兆瓦表示，补偿器——无功功率用伏安、千伏安或兆伏安表示。)；3) 线电流，用安培表示；4) 线电压用伏或千伏表示；5) $\cos \varphi$ (对于电动机一般在 $\cos \varphi$ 数值前面另加“领先”字样)；6) 相数；7) 定子绕组的接法(星形或三角形)；8) 频率，用赫表示；9) 转速(每分钟转数)；10) 激磁电压；11) 最大允许的激磁电流，用安培表示(额定激磁电流是指相应于额定运行状态下的激磁电流)。必须指出，如果变压器的允许负载完全取决于视在容量的千伏安数，那么，对于同步发电机来说，它的输出容量的千伏安数并不完全决定其允许负载。同时还须指明发电机负载的 $\cos \varphi$ 。这是因为发

电机以落后电流运行时， $\cos \varphi$ 愈低，这电流对主磁场的祛磁作用就愈大；因此 $\cos \varphi$ 愈低，需要更大的激磁电流以保持发电机端的额定电压。

6) 定子绕组。第三章中所研究过的交流绕组可用作同步电机的定子(电枢)绕组。

在这方面，同步电机的定子和异步电机的定子没有任何区别。但各种交流绕组按其本身的性能是各不相同的，所以它们并不是同样广泛地用于同步电机。通常短节距 ($y \approx 0.8\tau$) 双层绕组获得了最普遍的推广。这种绕组既用于小容量同步电机，也用于巨型的汽轮发电机和水轮发电机。

小容量和中等容量 (60—80 千伏安以下) 的电机采用半开口槽。大容量电机采用开口槽。

根据电流的大小，绕组制造成多匝式(每元件有若干匝)或条式(每元件一匝)。小容量和中等容量电机的多匝式绕组的制造已在第四章 4-1 中讨论过。

在大容量电机中，多匝式绕组的线圈做成相同的形状，其线圈由许多通常截面不超过 15 平方公厘的并联导体所组成。每根导体有石棉绝缘。每一匝用云母带绝缘。所有线圈一起沿线圈全长用许多层云母带绝缘(所谓“连续绝缘”)。线圈用云母带绝缘后再加压。绝缘好了的线圈在真空中烘干，然后在同一锅爐内在压力下浸漆。线圈直线部分的外表面扎上半导体的石棉带，使绕组离开槽处的电场均匀，因而防止该处发生无声放电。

上述的绝缘种类属于 B 级(参看第一章 1-8)。

^① 在电动机状态下运行的无功功率发电机称为同步补偿器。

条式繞組是由半圈所組成，半圈的導線是由截面不超過 15—20 平方公厘且用石棉絕緣的獨立的導體編成的。用云母帶對條式繞組進行絕緣和多匝式繞組的相似。

半圈彼此用特制的并頭套連接起來，並且焊接在一起。極數多的時候常採用波繞組，以免掉位於各磁極下繞圈群間的連接綫。但每極每相槽數為分數時不可能繞成波繞組，有時候採用分數槽是為了減小高次齒諧波。

圖 5-1 所示的蘇聯第聶伯水電站水輪發電機定子槽的截面為大容量電機繞組絕緣的例子。

B) 同步電機的激磁。一般以并激發電機作為同步電機激磁用的直流電源，它和同步電機連在同一軸上。這發電機稱為激磁機。

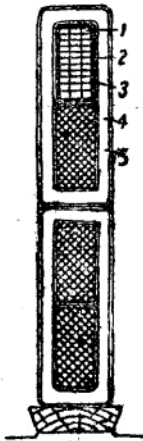


圖 5-1. 13800 伏第聶伯水電站的水輪發電機定子繞組的槽部分絕緣。1—用石棉絕緣的紫銅條；2—繞匝絕緣；云母帶厚為 0.127 公厘，單層半疊式；3—0.15 公厘厚的棉紗帶，單層緊接式；4—槽絕緣；0.127 公厘厚的云母帶，十六層半疊式；5—0.4 公厘厚的石棉帶，緊接式，上面塗一層漆。繞組在壓力下浸漆。

同步電機和激磁機合畫在一起的普通的綫路圖如圖 5-2 所示。其中 S 表示定子繞組， R 表示同步電機的激磁繞組， B 表示激磁機的電樞。在綫路圖中還有兩個變阻器： MP 和 MP 。前者稱為磁場調整器，後者稱為分路調整器。分路調整器是借助於調節激磁機的激磁電流，因而，也就是借助於改變激磁機端電壓來改變同步電機的激磁電流。經過磁場調整器的是同步電機的全部激磁電流。因此調整磁場調整器

能夠直接改變激磁電流的大小。

磁場調整器顯然比分路調整器的尺寸要大得多，因而磁場調整器的損耗要比分路調整器大。所以目前在很多場合下，特別是汽輪發電機及大型水輪發電機，只採用分路調整器，以便

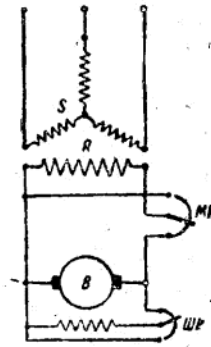


圖 5-2. 同步電機激磁綫路圖。

降低成本和運行時的損耗，同時安裝的地方也經濟。激磁電路的電壓一般不超過 250 伏。激磁機的容量介於電機額定容量的 0.3 到 1% 範圍內，並且對於大型電機，激磁機容量選擇得略微富裕些：例如“電力”工廠的汽輪發電機的激磁機，它的容量超出相當於汽輪發電機滿載時激磁功率的 70—100%。

現代的汽輪發電機及大型水輪發電機的激磁機的磁路通常運行於欠飽和情況。對應於同步電機全激磁功率的負載下的電壓位於無載特性曲綫十分靠近直綫的部分。這一電壓比切除分路調整器時的極限電壓低得多，約為極限電壓的 50—70%。極限（最大）電壓等於額定電壓的 135—140%。

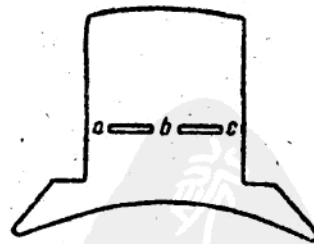


圖 5-3.

上述大型同步電機激磁機的特點是為了力圖加快調整電壓的速度，以提高電機並聯運行的穩定度（參看第五章 5-13）。

为了保証激磁机本身充分稳定地运行于无載特性曲綫的直綫部分，磁極鉄心采用特殊的构造^①。圖 5-2 表示这类构造之一。極心內的切口減小了它的有效截面。由于 a 、 b 和 c 处飽和，激磁机无載特性曲綫在开始部分业已有些弯曲。适当地选择 a 、 b 、 c 处的截面，在激磁机两端可以得到相当稳定的并且比它的額定值低得多的电压。

近来大型同步电机常采用的不是自激的激磁机，而是从与主激磁机連在同一軸上的另一台輔助激磁机激磁。

“电力”工厂出产的約 4000 千伏安以及容量更大的大型水輪发电机，它的激磁机是他激的。这种激磁綫路如圖 5-4 所示。圖中除了主激磁机 B 以外，还画有被称为副激磁机的輔助激磁机 $ПБ$ 。

激磁机在他激时，电压調节的范围可能比自激时大得多。此外，同步电机調节电压的速度可以显著地提高，这就使得它和其他同步电机并联运行更加稳定。

5-2. 三相同步发电机·对称負載

a) 无載情况。我們从研究无載开始来討

^① 关于直流发电机稳定运行的問題将在第六章詳細討論。

論同步发电机的运行。

同步发电机的无載情况就是指电樞繞組的电流等于零时的运行状态。在这种情况下，电机中的磁場将只由激磁繞組产生。

在无載时，和激磁繞組交鏈的磁通可以認為由两部分組成，通过空气隙中并与电樞繞組交鏈、在电樞繞組中感应电势 E_0 的这部分磁通，我們称之为磁極磁通或气隙磁通，用 Φ_0 表示；仅和激磁繞組相交鏈的另一部分磁通則称为磁極漏磁通。

磁極的磁势和由这磁势所产生的、不随時間变化但在空間旋轉的磁場，与在時間上交变，但对电樞繞組不动的相应的磁势和磁場类似。正象指出的那样，可以在同步电机和变压器間举出相似之点：激磁繞組相当于变压器的原边繞組，而电樞繞組相当于变压器的副边繞組。

当轉子以恒定的速度旋轉时，由磁通 Φ_0 与电樞繞組所組成的磁鏈数，一般按照近似于正弦的規律作周期性的变化，因此，磁通 Φ_0 及电势 E_0 可用時間向量表示。

无載特性曲綫是同步发电机最重要的特性之一。如前所述，如电机所用材料的磁化曲綫、磁路的几何尺寸以及电樞繞組的数据已知，則

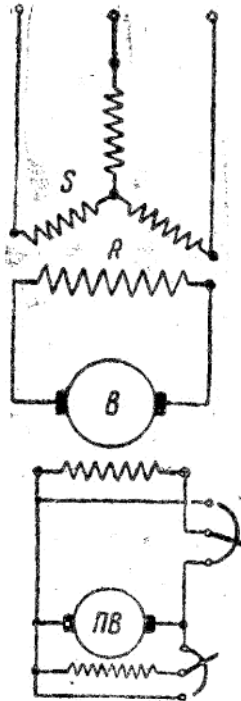


圖 5-1.

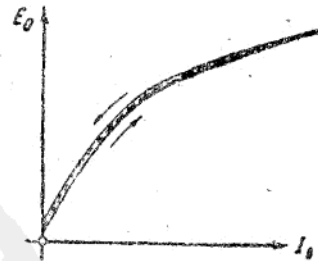


圖 5-5.

无載特性曲綫可用計算方法作出。无載特性曲綫也可用实验方法得到。为此，发电机必需由任一原动机以額定速度拖动，改变激磁繞組电流 I_f 自零到某一最大值，然后反过来从同一最大

值减小到零。测出与每一规定的激磁电流相对应的电枢端电压，得到无载特性曲线的两条支綫——上升的和下降的(圖 5-4)。由磁極和磁軛中磁滯現象所决定的支綫間的差別不大：相当于同一激磁电流两条支綫縱坐标的差額，一般不超过額定电压的 3—4%。实际計算时可取位于上升和下降曲綫之間平均位置的曲綫作为实际的或真正的无载特性曲綫。在圖 5-5 上此曲綫用虛綫表示。

根据大量現代同步發電机的无载特性曲綫比較結果，可以確認，如果这些无载特性曲綫都以相对單位作圖时，那么，它們彼此之間的差別是很小的。

类似的特性曲綫已表示于圖 3-91, 3-92, 在实际計算时可以利用。不論是凸極机或是汽輪發電机，实际的无载特性曲綫和标准特性曲綫相差一般不超过 $\pm 5\%$ 。

6) 电枢反应。我們研究三相發電机在对称负载下的稳定运行过程，这时候，發電机在它自己的独立電網上运行，与其他的同步發電机无关。

当發電机有负载时，电枢繞組中将流通电流，它的磁势引起空载电机磁場的变化，因而导

致电枢繞組感应电势的变化。此外，在繞組內产生电压降落，因此，在一般情况下，负载时电机的端电压和无载时的电压不同。

电枢磁势对电机磁場的作用称为(定子的)电枢反应。

首先从性質上討論电枢反应現象。电枢反应数量上的計算，象电枢繞組内部电压降落一样，借助于向量圖来进行，向量圖将在以后討論。

电枢繞組流过电流时产生磁势。当各相电流組成对称的向量星时，这磁势是圓形的旋轉磁势，如果只取各相磁势的基波，在任一瞬間，磁势沿电枢圓周为正弦分布。这个圓形旋轉磁势和电机的磁極同一的方向并以相同的速度旋轉，亦即对磁極相对不动，因而有可能談到电枢磁势对电机磁場一定的作用。如果不改变發電机的负载，这作用的結果是不变的。

同步發電机能够以落后或領先的电流运行，亦可以在电流与磁極磁通的感应电势同相的情况运行。

电流和电势同相时的电枢反应。圖 5-6, a_1 表示电流 I 、电势 E_0 和磁極磁通 Φ_0 的向量。用 ψ 代表的、向量 E_0 和 I 間的角度等于零。

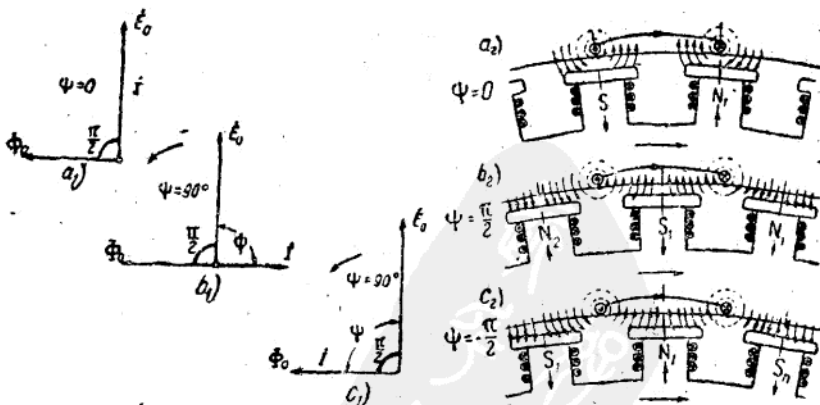


圖 5-6.

这里电势 E_0 是指无载时磁极磁通 Φ_0 在电枢绕组内感应的电势。在负载时，和电枢绕组交链的磁通显然要发生变化，因而它所感应的电势也要改变。图 5-6, a_2 表示电机磁极及只有一相的定子，并且用一个线圈来代表这一相绕组，当该相与磁极的相对位置如图所示时，绕组内感应电势将达到最大，因为在此瞬间，穿过线圈的磁极磁通等于零。显然，相电流也将最大，因为 $\psi=0$ 。以前曾经讲过，多相绕组所产生的旋转磁势的轴线和电流为最大的那一相的轴线重合。因而由三相电枢绕组所产生的旋转磁势的轴线与图 5-6, a_2 所画的线圈的轴线重合。

在此图上表示出电枢绕组所产生的磁场感应线。磁场感应线的方向依据感应电流方向用螺旋法则决定，在表明了旋转方向和磁极极性下，感应电流的方向可用右手法则决定。从图 5-6, a_2 可见，电枢磁场对磁极轴线是正交的，因此产生电枢磁场的电枢磁势称为正交作用磁势。图 5-6, a_2 说明，电枢磁势削弱磁极前半部的磁场，而增强磁极后半部的磁场。

电流 I 落后电势 E_0 90° 时的电枢反应（参看图 5-6, b_1 ）。图 5-6, b_2 表示线圈电流为最大的瞬间，线圈（相）对磁极的位置。电流比电势迟四分之一周期达到最大值，也就是磁极从电势为最大值的位置向右移动半个极距后电流才达到最大值。正象从图 5-6, b_2 所见，在所讨论的情况，线圈轴线与磁极轴线重合，因而这里的电枢磁场是纵轴的，故产生它的磁势是纵轴作用的。它将减弱磁场，也就是起去磁作用。图 35 所示两极同步电机的例子中，横轴和纵轴电枢反应磁场的相互方位可以看得特别清楚。

电流 I 领先电势 E_0 90° 的电枢反应（参看图 5-6, c_1 ）。这里电流比电势早四分之一周期达到最大值，也就是当磁极对线圈处于如图 5-

5, c_2 所示的位置时，线圈中的电流为最大。显然，电流的方向和四分之一周期以后的电势方向相同。由图 5-6, c_2 可见，在这种情况下，电枢磁势也是纵轴作用的但它将增强电机磁场，也就是起增磁的作用。

在一般情况下，电流对电势相差的角度大于零，但其绝对值小于 90° ，我们可以把电流分为 $I \sin \psi$ 和 $I \cos \psi$ 两个分量（图 5-7, a 和 b ），并且分别讨论这些电流分量中的每一分量所产生的磁势的作用。因此得到以下结论：在落后电流时，发电机中的电枢反应将是去磁的。而在领先电流时则为增磁的。

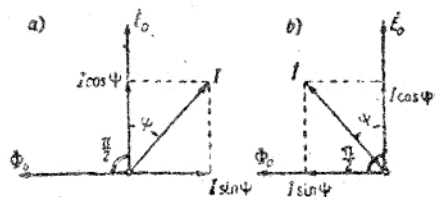


图 5-7.

从性质上讨论了电枢反应以后，先阐明当负载时电机中将出现怎样的磁场，电枢绕组的内部电压降落又是些什么。此后再转到研究向量图和电枢反应的数量计算。

如上所述，在无载时，电机中的磁场仅由激磁绕组所产生。这磁场大部分的感应线沿着电机的主磁路通过，也就是通过空气隙。电枢的齿和铁芯，通过转子的磁极和磁轭。这一部分磁场，仿照变压器，可以称之为主磁场或互感磁场。由激磁绕组所产生的磁场感应线的另一部分只与激磁绕组交链。它组成激磁绕组的漏磁场。

变压器与同步电机之间的类比，甚至可以推广到电机带负载的运行情况，因为此时磁场将由激磁绕组磁势和电枢绕组磁势的共同作用所产生的。在时间上不变，而在空间旋转的这

两个磁势和它們所产生的磁場，将与在時間上交变，但对电樞繞組不动的相应的磁势和磁場是等效的，因此，正如从圖 5-6 所見，可以認為两个磁势軸綫間的空間位移角度 $90^\circ + \psi$ ，和这两个磁势在時間上的同值的相位移是相当的。

一部分磁場感应綫仅与电樞繞組交鏈。这些磁場感应綫組成电樞漏磁鏈 ψ_s 。

为了决定合成磁势以及合成磁势所产生的磁場，把定子磁势和轉子磁势相加时，必須考虑到它們的空間分布。凸極机和隱極机的气隙磁場和磁通的計算将在后面討論。

И) 电樞漏抗，作为同步电机电樞繞組某一个参数的漏抗的概念是从第三章中曾經討論过的漏磁場的一般定义得来的。

可以設想电樞的漏磁場只与电樞繞組交鏈，而与电机的其他磁場无关。实际上这磁場的部分感应綫将通过电樞的齿及其鉄芯，而那里也經過电机主磁場的感应綫，但一般認為这些磁場彼此互不影响。同时可以認為：漏磁鏈只决定于漏磁場感应綫所經過的空气部分的磁导。后一假設可以使电樞电流与漏磁鏈之間取正比的关系，从而可以使电樞电流与漏磁鏈所感应的电势之間取正比的关系，即可以写成：

$$\dot{E}_s = -jI x_s \quad (5-1)$$

其中 \dot{E}_s 为漏电势， x_s 为电樞漏抗，它的数值可以看作是恒定的。

正如在第三章 3-4, 6 所指出，电樞繞組的漏磁場可分为三部分：槽內的磁場，繞組端接周圍的磁場以及决定于电樞繞組高次諧波磁势的气隙磁場。在同步电机中，这三部分磁場的前两部分是主要的，并且漏抗 x_s 的大小主要是由前两部分所决定。电抗 x_s 中与气隙磁場有关的部分比較小，例如，繞組是短节距，并且每極每相槽数很多的汽輪發电机，与气隙磁場有关的这部分一般不大于 x_s 的 3—4%。在每極每

相槽数不多而且繞組端接相当短的低速电机中，气隙的高次諧波磁場表現得比較突出些，因此， x_s 中决定于气隙高次諧波磁場的部分也将大些，它平均达到 x_s 的 20%。

大型同步电机的漏抗 x_s ，不应小于某一定值，因为容量大于 2000 千伏安的电机的短路冲击电流，要求不超过額定电流振幅值的 15 倍，短路冲击电流主要决定于 x_s 。这种情形在設計大型同步电机时必須考虑。 x_s 的計算方法如第三章所述。

Г) 电樞繞組的有效电阻。电樞繞組的有效电阻 r_a 比它的直流电阻 r 大些，这是由于电樞繞組的漏磁場所感应的渦流所致。在現代大型电机中，这个增量一般是个不大的值，而主要是在大型电机才必須考虑这个增量。对于这样电机，往往采取一系列的措拖以减小漏磁場所引起的損耗。用换位导綫芯做成定子繞組应当看成是最有效的方法，即用特殊方法把若干根單元导体彼此較合在一起的导綫芯制造定子繞組。电樞繞組的有效电阻及由它引起的电阻压降不大，例如，对大型电机來說，电阻压降小于額定电压的 1%。电阻 r 和 r_a 的大小按照第三章 3-5, a 來計算。

Д) 向量圖。三相發电机在对称負載时，各相所發生的現象完全一样，因此，研究电机的一相并只对电机的一相作出电压、电流和磁势的向量圖就足够了。

同步电机有許多問題是必須通过向量圖來解决的。

在計算电机时，为了决定在各种負載条件下激磁繞組所需要的磁势，以及决定由負載所引起的电压变化，必須繪制向量圖；在这种情况下，向量圖根据电机的計算数据繪制。

在电机成品試驗时，为了用間接的方法，即不用实际加負載决定电压变化时也必須作向量

圖，由于試驗的条件所限，实际加負載总难实现，即使实现得了，也因發电机容量巨大而浪费了時間和費用；在这种情况下，向量圖的繪制是根据用实验方法决定的發电机的特性曲线以及它的繞組参数来进行的。

先討論根据計算的数据作向量圖。根据实验数据作向量圖将在以后討論發电机的特性曲线时說明。

e) 隱極电机的向量圖(波梯圖)。在計算隱極机时，一般借助于 A. 波梯(A. Potier) 所提出的向量圖，这个向量圖与变压器的向量圖类似。

在計算隱極电机时，如要作出向量圖，需要具备从計算方法所决定的无載特性曲线、电樞繞組的参数 x_s, r_a 以及定子和轉子的繞組数据。按照第三章所述电樞反应磁势基波的振幅(每極)决定于：

$$\theta_a = 1.35k_w \frac{wI}{p} \quad (5-2)$$

只在决定电抗 x_s 时才考虑高次諧波磁势。圓柱形轉子激磁繞組的磁势用下法决定。

假設轉子繞組占 $\frac{2}{3}\tau$ ，而且放置繞組的每極槽数相当之多，轉子磁势曲线可以看成高为 $\frac{1}{2} I_n s_r q_r$ 的梯形，这里 I_n 是激磁繞組中的电流， q_r 是放置繞組的每極槽数，而 s_r 是每槽导体数(圖 5-8)。激磁繞組梯形磁势曲线的基波

振幅等于

$$\theta_{n0} = \frac{4 \sin \alpha}{\pi \alpha} \frac{1}{2} I_n s_r q_r \quad (5-3)$$

轉子磁势曲线中其他的諧波可以忽略不計，因为在 $\alpha = \frac{\pi}{3}$ 时，次数为 3 的倍数的諧波振幅都等于零，而其余的諧波是微不足道的。因而，在 $\alpha = \frac{\pi}{3}$ 时，激磁繞組的磁势(每極的)等于

$$\theta_{n0} = \frac{1.05 I_n w_r}{2p} \quad (5-4)$$

其中 $w_r = s_r p q_r$ 是激磁繞組的全部串联匝数。

这样，我們便得到两个振幅各为 θ_a 及 θ_{n0} 的正弦分布磁势，它們可以用彼此相差 $90^\circ + \psi$ 的两時間向量来表示。正如所指出的，这两个磁势与变压器的副边繞組和原边繞組的磁势相似。把向量 θ_a 和 θ_{n0} 加起来以后得到作用于电机中的合成磁势。

在計算时，常常需要在給定的(通常是額定的)数值：电流 I 、电压 U 及 $\cos \varphi$ 下决定激磁繞組的磁势。对于隱極机，这个问题可以用波梯圖来解决。圖 5-9 表示發电机在落后电流运行时的向量圖。先作向量 \dot{U} 以及与 \dot{U} 成已知角 φ 的向量 I 。然后在向量 \dot{U} 上添加电压降落的向量：电阻降落 $I r_a$ 和漏磁通所感应的 $j I x_s$ 降落。用这种方法便求得气隙合成磁通在电樞繞組中所感应的电势向量 \dot{E}_s 。这一合成磁通

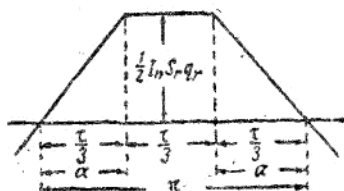


圖 5-8.

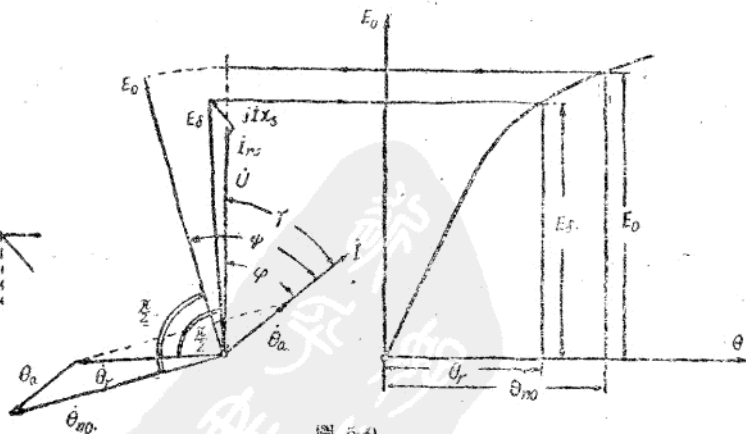


圖 5-9.

是由磁势 $\hat{\theta}_a + \hat{\theta}_{n0} = \hat{\theta}_r$ 所产生的。从 \dot{E}_s 自无载特性曲线求出此磁势 $\hat{\theta}_r$ 。在向量图上，向量 $\hat{\theta}_r$ 必须画在领先向量 \dot{E}_s 90°。知道了合成磁势 $\hat{\theta}_r$ 及其一个分量 $\hat{\theta}_a$ (后一个向量必须画在 \dot{I} 的方向)，我们便求得另一个分量 $\hat{\theta}_{n0}$ ，如图 5-9 所示①。

在同一图中还表明了，在同一激磁磁势 $\hat{\theta}_{n0}$ 下决定发电机无载时所感应的电势 \dot{E}_0 。因此借助于隐极电机的向量图可以决定发电机的电压变化，所谓电压变化是指当激磁电流和转速不变的情况下，自额定负载状态转变为无载状态时电压的上升。这电压上升一般用额定电压的百分率表示。因此电压的变化率等于

$$\Delta U \% = \frac{U_0 - U_n}{U_n} \cdot 100, \quad (5-5)$$

其中 $U_0 = E_0$ 。

上述的作图法，虽然它没有十分精确地考虑转子的饱和，但是可以用于实际的计算。不精确的地方是：包括在 θ_r 内的转子磁极和轭部分的磁位降由对应于电势 E_s 的磁通和对应于磁势 θ_r 的转子漏磁通来决定，其实转子漏磁通所对应的并不是磁势 θ_r ，而是磁势 θ_{n0} ，也就是说，当发电机在落后电流运行时，转子漏磁通将会多一些，因而转子的磁极和轭的饱和程度也将高一些。如果从无载特性曲线来决定 θ_r ，我们便会把 θ_r 的大小稍微小估了一些。因为转子磁极和轭的磁位降只是 θ_r 的不甚大的一部分，所以不计转子漏磁的增加实际上是允许的②。

对于以领先电流运行的发电机，其向量图的作图顺序和前一种情况是一样的。此向量图示于图 5-10 中。这里也是先画出已知的向量 \dot{U} 和 \dot{I} ，然后决定电势 \dot{E}_s 。从 \dot{E}_s 自无载特性曲线

① 如果作向量图时，用与磁势成正比的激磁电流 I_n 来代替磁势 θ_{n0} ，那么整个磁势向量三角形必须除以 $\frac{1.05 \omega_r}{2p}$ ，这从式(5-4)可以推知。在这种情况下，向量图上的 θ_a (5-2) 必须代以

$$\theta_{a1} \frac{2p}{1.05 \omega_r} = 2.57 k \omega_l \frac{\omega}{\omega_r}$$

② 例如参考 P. 里煦特 (Пуштор) 著电机学第 II 册，第 143 页(俄译本)。

找到合成磁势 θ_r 。其次决定激磁绕组磁势 θ_{n0} ，并且根据它从无载特性曲线来求电势 \dot{E}_0 。由图 5-10 可见，在以领先电流运行时，发电机电压可能比无载时高。

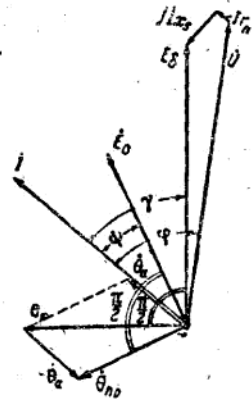


图 5-10.

隐极电机的向量图也可用以决定从无载转变为额定负载或其他任何负载时的电压降。在这种情况下不得不先假定 γ 角的大小(图 5-11)，用逐次接近法作图，在作图前，角度 γ 还是一个未知量。作图时已知：激磁绕组磁势 $\hat{\theta}_{n0}$ ，无载时的电压或电势 E_0 ，定子电流 I 以及 $\cos \varphi$ 。

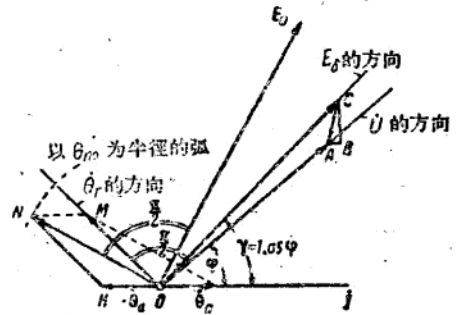


图 5-11.

在额定的落后电流情况下， γ 角可先近似地取 $\gamma \approx 1.05 \varphi$ (领先电流时取 $\gamma \approx 0.95 \varphi$)。使电流向量 \dot{I} 与横坐标轴重合，向量 \dot{E}_s 的方向与 \dot{I} 成 γ 角度，向量 $\hat{\theta}_r$ 的方向与向量 \dot{E}_s 方向成 90°，以 θ_{n0} 为半径，从 O 点作一弧。作出了 $\overline{OK} = -\hat{\theta}_a$ 后，平行于向量 $\hat{\theta}_r$ 的方向引 \overline{KN} 与所作的弧交于 N 点。显然， $\overline{KN} = \overline{OM} = \hat{\theta}_r$ 。根据 $\hat{\theta}_r$ 从无载特性曲线找到 \dot{E}_s ，并且在图上画出 $\overline{OC} = \dot{E}_s$ 。作出了 $\triangle ACB$ 后，它的 \overline{AB} 和 \overline{BC} 边各等于 $I r_a$ 和 $I x_s$ ，我们求得向量 $\overline{OA} = \dot{U}$ 的方

向和大小，它也就是所求的負載時的電壓。
如果角度 γ 是猜對了，那麼 \overline{OA} 與 \dot{I} 之間的角度應該等於給定的角度 φ 。否則必須改變 γ 並且重新作圖。

作波梯向量圖決定電壓降這個課題，也可用 X. H. 科特金德^① 所提出的方法來解決。這個方法避免了猜測 γ 角的必要性。方法如下(圖 5-12)。畫磁勢向量 $\theta_a = OI$ ，並且，以 θ_{m0} 為半徑，從 L 點畫圓弧。然後畫出幾個向量 θ_r 的可能的位置。利用無載特性曲線，對每一求得的向量 θ_r 成 90° ，取相應的電勢值 E_s ($\overline{OC}_1, \overline{OC}_2, \overline{OC}_3 \dots$)。將 $C_1, C_2, C_3 \dots$ 各點連成平滑的曲線。按照所給的電樞繞組阻抗作出壓降 ($I r_a$ 和 $I x_s$) 三角形 $OB'C'$ 後，通過 C' 點平行於 OQ 作直線 $C'C$ ，這裡 OQ 與電流向量 \dot{I} 成給定的角度 φ 。顯然， C 點便給出所求的向量 $\dot{E}_s = \overline{OC}$ 的位置。平行於 $\overline{O'O}$ 引 \overline{CA} 與直線 OQ 相交得到電機端電壓 $\dot{U} = \overline{OA}$ 。

從波梯圖得到的結果，對隱極機來說，可以認為是精確的，因為這裡在同一合成磁勢振幅下，氣隙中的磁場曲線可以認為與合成磁勢振幅對轉子磁極軸線的位置無關。

對凸極機來說，後一假定便不能成立，因為在凸極電機中，由合成磁勢所產生的磁場在很大程度上取決於這磁勢軸線對於磁極軸線的位置。因此，對於凸極機中電樞反應的計算採用別的方法——即 A. 布郎達爾 (A. Blondel) 所提出的雙反應法。根據此法所作的向量圖稱為布郎達爾圖。

⊕ 凸極電機的向量圖 (布郎達爾圖)。雙反應法是將電樞磁勢分解成縱軸和橫軸兩個磁勢為基礎的。電樞磁勢的縱軸分量等於

$$\theta_d = \theta_a \sin \psi \quad (5-6)$$

① 電學雜誌，1928，93 頁。

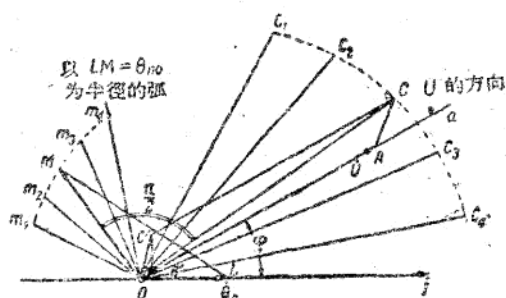


圖 5-12.

此磁勢的軸線與激磁繞組磁勢的軸線重合， $\psi > 0$ 時， θ_a 與激磁繞組磁勢 θ_{m0} 反向， $\psi < 0$ 時， θ_a 和 θ_{m0} 作用於同一方向。電樞磁勢的橫軸分量等於

$$\theta_q = \theta_a \cos \psi \quad (5-7)$$

此磁勢的軸線與極間空間的正中央重合。

圖 5-13 表示當電流 I 落後於電勢 \dot{E}_s 為 ψ 角度時，電樞磁勢 θ_a 及其分量 θ_d 和 θ_q 的曲線。由圖 5-13 可見，角度 ψ 是電流經過最大值那一相的軸線和極間空間正中央軸線間的角度。

象磁極一樣， θ_d 和 θ_q 兩磁勢對電樞繞組以同步速度旋轉，因而它們對磁極是靜止的。可以認為這兩個磁勢各自建立磁場。

由圖 5-13 可見，縱軸磁勢和橫軸磁勢所產生的磁場感應線沿着磁導不相等的路徑閉合。因此，對於凸極電機來說， θ_d 與 θ_{m0} 的向量相加不便于決定電機的合成磁場。磁勢 θ_d 和 θ_q 分別研究較為適當。

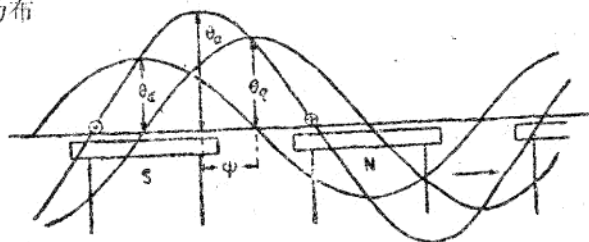


圖 5-13. 電樞磁勢 θ_a 及其分量——縱軸的 θ_d 和橫軸的 θ_q 的曲線。

注意圖 5-14。这里 \dot{E}_0 是假定电机中只作用着激磁繞組这一个磁势时磁通 Φ_0 在电樞繞組中所感应的电势。

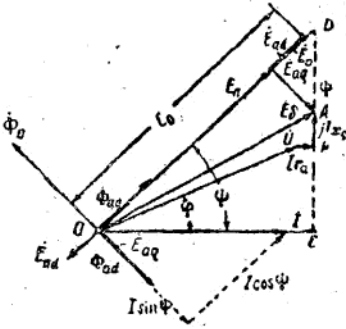


圖 5-14. 凸極电机的向量圖。

电樞反应磁势的縱軸分量 θ_d 使得沿电机縱軸作用的磁势减小（当落后电流时），或者是使得沿电机縱軸作用的磁势增加（当引前电流时），这还引起与此磁势相应的电势的变化。

圖 5-14 中的 \dot{E}_n 是在落后电流时，电机合成縱軸磁势产生的气隙磁通所感应的电势，差额 $\dot{E}_0 - \dot{E}_n = \dot{E}_{ad}$ 可以认为是縱軸电樞反应磁通 Φ_{ad} 所感应的电势。

电樞磁势橫軸分量 θ_q 在气隙中产生磁通 Φ_{aq} 。此橫軸电樞反应磁通在电樞繞組中感生落后于电势 $\dot{E}_0 90^\circ$ 的电势 \dot{E}_{aq} ，如圖 5-14 所示。合成电势 $\dot{E}_n + \dot{E}_{aq} = \dot{E}$ ，可以看成是气隙的合成磁通在电樞繞組中所感应的实际的电势。一般从 \dot{E} 减去电抗压降和电阻压降来求发电机的端电压 \dot{U} 。

在圖 5-14 中所示的向量圖就是以双反应理論为基础的凸極电机的向量圖。

电势 \dot{E}_0 是由集中的激磁繞組磁势 θ_{n0} 建立的磁極磁通所感应的。电樞反应磁势 θ_d 和 θ_q 是

由分布的繞組所产生，并且沿电樞圓周是正弦分布的磁势（圖 5-13）。显然，为了确定它們沿縱軸的合成共同的磁化作用，不能直接从磁势 θ_{n0} 减去磁势 θ_d ，因为这两个磁势的空間分布有着重大的区别。尚需考虑 θ_q 所作用的橫軸磁路与縱軸磁路的区别。考虑上述区别的近似方法将在下面闡明。

圖 5-15 中的曲線 B 为无载时气隙中的磁感应分布曲綫或磁場曲綫，那时候在电机中只作用着一个激磁繞組的磁势。我們不計饱和，并且認為激磁磁势变化时，磁場曲綫的形状仍不变。磁場曲綫可用下列形式表示：

$$B = c\theta_{n0}f(\gamma), \quad (5-8)$$

因为曲綫 B 对于通过磁極中央的軸綫对称，所以式中函数 $f(\gamma)$ 可以表示为只由奇次諧波組成的富里哀級数的形式。曲綫 B 的縱坐标可看成与相应的磁感应力管的磁导成正比的量，这些磁感应力管可以从已知方法（參閱第三章，3-4）中任何一种所作的磁場圖求得。对于 $\gamma = \frac{\pi}{2}$ 的那一点來說，我們認為 $f(\gamma) = 1$ 。

假如只有一个縱軸磁势单独地作用着，則用 $c f(\gamma)$ 乘正弦曲綫 θ_d 的縱坐标，我們可以相当精确地得到縱軸磁势所建立的磁場分布曲綫（圖 5-15 中的曲綫 A ）。当 $\psi > 0$ 时，在 θ_{n0} 和 θ_d 两个磁势共同作用下磁場曲綫用下列方程式表示：

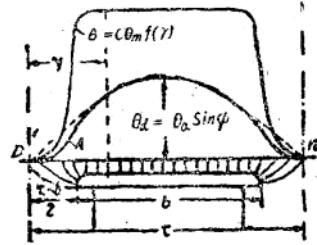


圖 5-15.

$$B_d = C[\theta_{n0}f(\gamma) - \theta_d \sin \psi f(\gamma) \sin \gamma]. \quad (5-9)$$

这一方程式所表示的函数可分解为基波及高次諧波。基波振幅等于

$$B_{d1} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B_d \sin \gamma d\gamma, \quad (5-10)$$

而基波的平均值等于 $\frac{2}{\pi} B_{d1}$ 。若电樞的計算長度（參看第三章，3-4. a）等于 l_c ，那么，相应于磁場曲綫基波的磁通将等于

$$\begin{aligned} \Phi_{d1} &= \frac{2}{\pi} B_{d1} l_{ir} = \frac{4cl_{ir}}{\pi^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} [\theta_{n0} f(\gamma) \sin \gamma - \\ &\quad - \theta_a \sin \psi f(\gamma) \sin^2 \gamma] d\gamma = \\ &= \frac{4cl_{ir}}{\pi^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\gamma) \sin \gamma d\gamma \left[\theta_{n0} - \right. \\ &\quad \left. \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\gamma) \sin^2 \gamma d\gamma}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\gamma) \sin \gamma d\gamma} \right] \end{aligned} \quad (5-11)$$

引用符号 $\gamma_d = \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\gamma) \sin^2 \gamma d\gamma; \quad (5-12)$

$$\gamma_n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\gamma) \sin \gamma d\gamma; \quad (5-13)$$

$$k_d = \frac{\gamma_d}{\gamma_n} \quad (5-14)$$

如果只考虑基波,由方程式(5-11)可见,在磁轴磁电枢反应的作用下,激磁绕组磁势的减小等于

$$\theta_{ad} = \frac{\gamma_d}{\gamma_n} \theta_a \sin \psi = k_d \theta_a \sin \psi. \quad (5-15)$$

方程式(5-11)和(5-15)说明,为了求出在作用上与它等效的激磁绕组磁势,必须把磁轴电枢磁势 $\theta_a \sin \psi$ 乘以系数 k_d ; 换句话说,激磁绕组磁势 $\theta_{ad} = k_d \theta_a \sin \psi$ 所建立磁势分布是这样的,它的基波在定子绕组中所感应的电势,和定子绕组磁势 $\theta_a \sin \psi$ 产生的磁势基波所感应的电势一样。

根据无载特性曲线,我们可以求得电机在那种饱和情况运行时,与激磁磁势 $k_d \theta_a \sin \psi$ 相应的电势 E_{ad} 。根据无载特性曲线决定 E_{ad} 的方法将在以后阐述。磁势的高次空间谐波,由于其振幅不大,通常忽略不计。

如果认为极间空间磁感应力管的磁导等于零,而沿着极弧所有点的磁导相等,当磁极下的空气隙均匀时,这与实际是近似符合的,那么,系数 γ_d 和 γ_n 的确定可以用不带控制磁势曲线。那时候与图5-15相似的曲线变成了图5-16中所示的形状。在这种情况下,函数 $f(\gamma)$ 在 γ 自零到 $(1-\alpha)\frac{\pi}{2}$ 和自 $(1+\alpha)\frac{\pi}{2}$ 到 π 的变化范围内等于零,而在 γ 自 $(1-\alpha)\frac{\pi}{2}$ 到 $(1+\alpha)\frac{\pi}{2}$ 的变化范围内等于1①,因此

$$\gamma_d = \int_{(1-\alpha)\frac{\pi}{2}}^{(1+\alpha)\frac{\pi}{2}} f(\gamma) \sin^2 \gamma d\gamma = \frac{1}{2} (\alpha\pi + \sin \alpha\pi), \quad (5-16)$$

① 这里 $\alpha = \frac{b}{r}$ 是极距系数。

$$\gamma_n = \int_{(1-\alpha)\frac{\pi}{2}}^{(1+\alpha)\frac{\pi}{2}} f(\gamma) \sin \gamma d\gamma = 2 \sin \frac{\alpha\pi}{2} \quad (5-17)$$

且 $k_d = \frac{\gamma_d}{\gamma_n} = \frac{\alpha\pi + \sin \alpha\pi}{4 \sin \frac{\alpha\pi}{2}} \quad (5-18)$

在作用上与横轴电枢反应磁势等效的激磁绕组磁势的确定问题用类似的方法解决。

绘出横轴磁势所产生的磁感应力管的图形,我们得到这些磁力管沿电枢圆周的磁导分布曲线。

在图5-17中此曲线以 $\varphi(\beta)$ 形状表示。这里 β 角自磁轴算起,并且认为当 $\beta=0$ 和 $\beta=\pi$ 时,函数 $\varphi(\beta)$ 等于1。

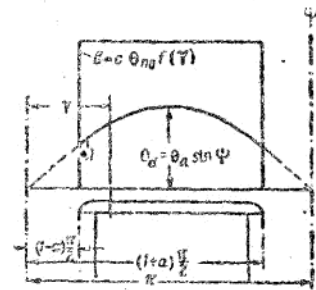


图 5-16.

显然,振幅为 $\theta_a = \theta_a \cos \varphi$ 的正弦分布的横轴电枢磁势在 β 点处所建立的磁感应值等于

$$B_q = c\varphi(\beta)\theta_a \cos \psi \sin \beta \quad (5-19)$$

当 β 变化时,方程式(5-19)是图5-17所示的 B_q 曲线的方程式。如果把这马鞍状曲线分解成富里哀级数,那么,其基波振幅为:

$$B_{q1} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} B_q \sin \beta d\beta, \quad (5-20)$$

并且这基波的平均值等于 $\frac{2}{\pi} B_{q1}$, 而与之相应的气隙磁通

$$\Phi_{q1} = \frac{4cl_{ir}}{\pi^2} \theta_a \cos \psi \int_0^{\pi} \varphi(\beta) \sin^2 \beta d\beta. \quad (5-21)$$

因为与磁轴磁势 θ_{n0} 相应的基波电势正比于 $\frac{4cl_{ir}}{\pi^2} \theta_{n0} \gamma_n$, 所以,为了按照无载特性曲线确定电势 E_{aq} , 必须把横轴磁势乘以系数

$$k_q = \frac{\gamma_q}{\gamma_n} = \frac{\int_0^{\pi} \varphi(\beta) \sin^2 \beta d\beta}{\int_0^{\pi} f(\gamma) \sin \gamma d\gamma} \quad (5-22)$$

式中 γ 和 β 是辅助角度。

和以前一样,不必绘制磁导分布图形以及从此图形绘