

153902

基本馆藏

电机学参考文叢

(第一集)

許应期編著



科学技术出版社

电机学参考文献叢

(第一集)

許应期編著

科学技術出版社

內 容 提 要

本書乃是选取电机学中一些关键問題如同步机的向量圖、电机的轉矩、异步机的圓圖、变压器的并联运行等加以闡述,作为大專学生學習电机学时参考之用,亦可供厂礦工程技術人員參閱。

同步机的向量圖一文旨在建立各参数間時間与空間关系,因而对同步机的基本原理能得進一步的認識。同步机的圓圖指出發电机及电动机共同的运行原理。电机的轉矩統一几种主要电机的基礎原理。异步机的轉矩与圓圖对普通教材有所补充。变压器的并联运行对该問題作全盤詳尽的介紹借使讀者得一清楚的了解。

电机学參考文獻 (第一集)

編 著 者 許 应 期

*

科 学 技 術 出 版 社 出 版

(上海陞國西路 336 弄 1 号)

上海市書刊出版業營業許可證出〇七九号

上海广華印刷厂印刷 新華書店上海發行所总經售

*

統一書号: 15119·296

開本 787×1092 1/32·印張 2 5/16·字數 45,000

一九五六年七月第一版

一九五六年七月第一次印刷·印數 1—7,000

定價 1 (10) 三角四分

前 言

几年來采用苏联教材，鉅研之余稍有体会之处，有时偶得啓發，触緒旁通，小作印証。为了拋磚引玉，交流經驗起見拟付印几篇作为大專同学参考之用。

因本册僅作参考，无意代替教材，故在教材中有詳細說明者各篇中除为行文貫穿前后略加叙說外，概从簡略。因此讀者最好先讀相应教材，再讀本册有关各篇。

限于業務水平，定多舛誤之处，希望大專教师及讀者予以指正。

本册所載各篇承吳文華先生提供宗貴意見特此志謝。

許应期

1956年5月

目 錄

1. 同步机的向量圖	1
2. 隱極同步机并聯运行时的簡化圓圖	12
3. 电机的轉矩方程式	24
4. 异步机的等值电路与圓圖	40
5. 变压器的并聯运行	52
6. 变压器簡單同心繞組的漏磁計算	66

1. 同步机的向量圖

本文主旨在于确立同步机中時間向量与空間向量間的关系，从而了解同步机的作用原理。本文只涉及三相同步机，先講隱極，后講凸極。本文分5節：1、概論；2，三相电机中电樞反应的物理景象；3，隱極同步机电势向量圖；4，凸極同步机电势向量圖；5，討論。

1. 概論

要了解同步机的向量圖，必須先要了解电樞反应。什么是电樞反应呢？当磁極旋轉而电樞开路的时候，电樞中產生感应电势即所謂空載电势。当电樞繞組閉合的时候，繞組中就有电流。如果繞組是多相繞組，通常是三相繞組，这电流產生旋轉磁势。这旋轉磁势是与旋轉磁極同步旋轉的。这旋轉磁势，也就是电樞磁势，与旋轉磁極的磁势因此在空間有一定的关系，也可以說靜止的关系。两者合起來成为旋轉的合成磁势。这时电樞中感应电势亦有相应的变更。电樞中感应电势現在是由合成磁势所產生，而电樞中电流又是与此感应电势有一定的关系。这关系是被克希荷夫定律所規定。这其間錯綜复雜的关系最后得到平衡。其中电樞磁势对磁極磁势的作用就是电樞反应。究竟电樞磁势怎样影响主磁極的磁势，又怎样影响电樞中的感应电势，从而决定整个同步机的向量圖，这就是本文主旨所在。

在上節中我們講了同步机中磁势、电势与电流間相互作用的大概情况，并且說明了什么是电樞反应。現在我們把扑德罗夫斯基对于电樞反应所下的定义記錄于下：电樞磁势的第一諧波对極磁势的第一諧波所起的作用，称为同步发电机的电樞反应。这定义說明我們只考慮第一諧波或基波。由于短距及分布关系电樞磁势中的高次空間諧波已大为削弱，所以只有第一諧波起着主要作用。用分布繞組激磁的隱極机也有同样情况。用集中繞組激磁的凸極机極磁势确实有可觀的高次空間諧波。但是在任何情况之下，一切磁势都可用富礼氏級数來分解成为基波及各次諧波。电樞磁势的高次空間諧波与主磁極的基波磁势極数不同、旋轉的轉速不同，有的旋轉方向也不同，不可能有固定的关系，因而其作用可以不計。由此我們把削弱剩的电樞高次空間諧波就它們对电樞电势的作用而言归入电樞漏磁通內。

下節我們將說明电樞磁势与主極磁势的时间与空間关系。这是同步机向量圖的基本環節。

2. 三相电机中电樞反应的物理景象

在本節中我們將闡明电樞磁势与主極磁势間的向量关系。在此之前我們將先闡明电樞中空載电势或开路电势与主極磁势間時間关系，并賦以空間意义。圖 1 示主極北極在 A 相繞組中間位置并在向左移动。我們以一向量代表主極的磁势幅值 F_0 或一極磁通 Φ_0 。当極在相 A 的中間时，相 A 的磁鏈最大，相 A 的电势等于零。当北極向右移动时，相 A 中开始有感应电势。（电势方向如 $\odot$ 及 $\otimes$ 所示）。当 F_0 到达 A 的地位时，也就是極軸或向量轉动了 90° 电角度时，相 A 的电势最大。我們說电势

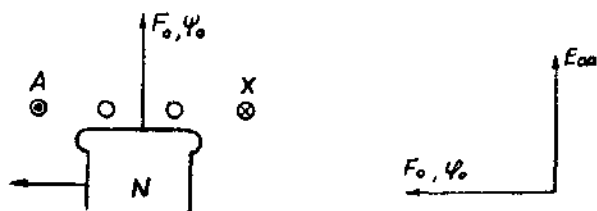


圖 1 主極與電樞繞組的相對位置 圖 2 E_{0a} 與 F_0 的向量關係

落后于磁鏈 90° 。於是我們完全有理由將 F_0 或 Φ_0 與 E_{0a} 的矢量關係画成如圖 2 所示， F_0 或 Φ_0 與 E_{0a} 間的關係是磁鏈的變率關係，是時間關係，但它同時亦規定了空間的關係，因為磁鏈的變化乃由於主磁極在空間的移動所致。

圖中主極是画的凸極但是磁通的分布是設為正弦分布的，因為電勢向量的含義應該說電勢是正弦變化的。這是說我們假定轉子為平滑圓柱形而磁路是不飽和的。

我們現在進一步假設電樞中有電流後的情況。電樞有了電流，就有磁勢。根據下面兩個條件我們可以確定電樞磁勢與主極磁勢間空間關係。第一個條件是：電樞磁勢是與主極磁勢同步旋轉的。因此我們只須求得某一時刻兩磁勢間的關係，這關係會得維持不變。兩磁勢同步旋轉，形影不離。第二個條件是：電樞旋轉磁勢的軸是與電流最大一相的軸重合的。這就確定了電樞電流時間變化與電樞磁勢空間旋轉地位的關係。現在我們來講幾個特殊情況，然後說明普遍的關係。

第一我們設想電樞電流與空載電勢間時間相角 $\psi = 0$ 時的電樞反應。在這假定之下空載電勢最大之時電流亦是最大。電樞磁勢的軸就在 A 相的軸上，其每極磁勢的量值可用短路實驗

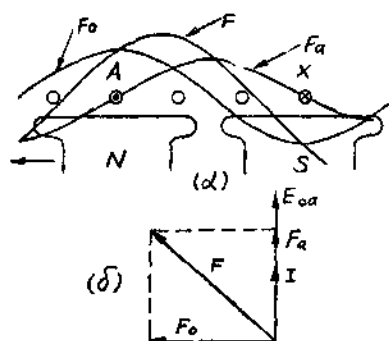


圖 3 (a) $\psi=0$ 时主極磁勢与电
樞磁勢的合成 (b) 磁勢向量圖

法求出之。圖 3 (a) 示主極磁勢与空气隙电樞磁勢合成为总磁勢。(b) 示主極磁勢与电樞磁勢的向量圖。我們看見在此圖中怎样空載电勢与电流的时间向量和磁勢的空間向量相結合。在此情況下即电樞电流与空載电勢同相之时、同步机的电樞反应完全与直流机中电刷放在几何中綫时的电樞反应一样，一半相加，一半相減，所起作用是所謂扭变作用。但是我們應該注意在凸極机中磁路大体为主極所固定时，电樞反应的作用确是与直流机中相似而在隱極机中，磁路是相应地改变了，合成磁通大了許多。

第二我們設想电樞电流落后于空載电勢 90° 时即 $\psi=90^\circ$ 。圖 4 (a) 示主極磁勢与电樞磁勢的合成，(b) 示磁勢向量圖。

由圖中可見 $\psi=90^\circ$ 时电樞反应对于主極磁勢的去磁作用、

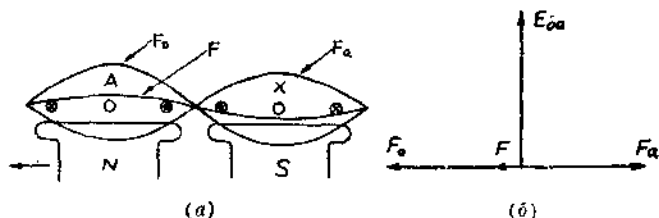


圖 4 (a) $\psi=90^\circ$ 时主極磁勢与电樞磁勢的合成 (b) 磁勢向量圖

第三我們設想電樞電流超前于空載電勢 90° 時即 $\psi = -90^\circ$ 。

圖 5(a) 示主極磁勢與電樞磁勢的合成, (b) 示磁勢向量圖。

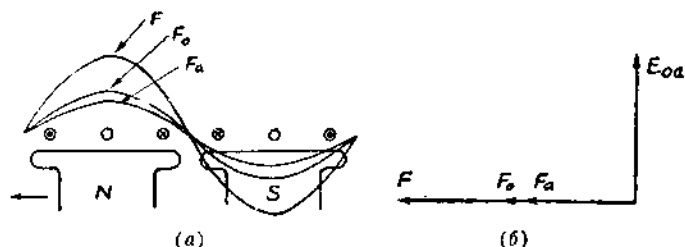


圖 5 (a) $\psi = -90^\circ$ 時主極磁勢與電樞磁勢的合成 (b) 磁勢向量圖

由圖 5 可見當 $\psi = -90^\circ$ 時電樞磁勢有加磁作用。

圖(3)、(4)、(5)假定電樞中有相等電流, 也就是說在三種情況中電樞電路中的阻抗是不同的, 否則電樞反應的作用既各不同, 如果主極磁勢不變, 合成磁勢自然大大不同, 感應電勢也將大大不同, 如果電樞電路中阻抗相同, 不可能有同樣的電流的。

第四我們設想電樞電流落后于空載電勢一只給定相位角 ψ 時, 主極磁勢及電樞磁勢合成圖示于圖 6(a), 磁勢向量圖示于圖 6(b)。

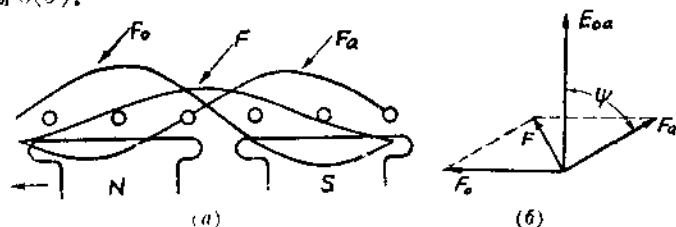


圖 6 (a) 主極磁勢及電樞磁勢的合成 (b) 磁勢向量圖

3. 隱極同步机电势向量圖

从圖(3)、(4)、(5)、(6)可見 F_a 与 E_{0a} 間的空間相位角也就是电樞电流与 E_{0a} 間時間相角。我們假定轉子是平滑的圓柱形，空氣隙是均勻的，而磁路是不飽和的。在此假定条件下，磁勢的向量圖也就是分布磁場的空間向量圖。在第二節中我們已說明 F_a 与 E_{0a} 的空間与時間关系，那么合成磁勢 F 在电樞繞組中產生的电勢 E_a 也同样落后于 F 90° ， E_{0a} 与 F_a 成比例，而 E_a 与 F 成比例。从上所言各向量比例关系，可以証明 $\triangle OF'F_a$ 与 $\triangle OE_{0a}E_a$ 是相似的而连接 E_a 与 E_{0a} 的綫是和电流垂直的，因而 E_aE_{0a} 表示为电抗性質，我們称为电樞反应电抗电勢，此电勢向量不妨从下面推論來說明。主極磁勢与电樞磁勢分別產生磁場，轉而產生电勢， E_a 为两电勢的合成电勢，这就是电樞中由于空气隙磁通所感应的电勢。

要進一步求得完全的向量圖我們还得考慮到电樞漏磁通所產生的漏电勢和电阻压降。漏磁通是由电樞磁勢 F_a 所產生，因而漏电勢亦是落后于 F_a 90° 。此外則前所言的空氣隙中电樞磁勢的高次空間諸波磁通亦產生电勢落后于 I 90° ，所以可以计入

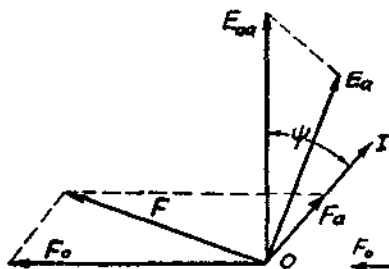


圖 7 隱極电机感应电势向量圖

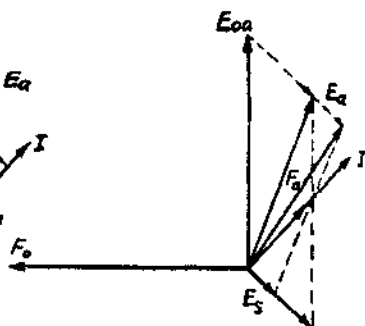


圖 8 隱極电机感应电势向量圖

漏电势中一同计算。因为电枢反应电势及漏电势均与 I 成比例，而且与 I 成 90° ，所以也可视为电抗压降，称为同步电抗压降。于是最后的电势向量图如图 9 所示，图中：

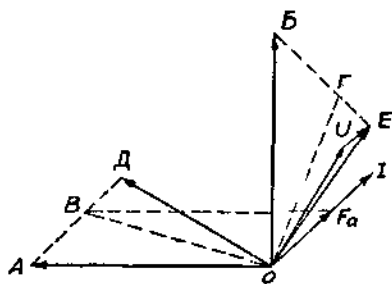


图 9 隐极电机向量图

$OA = E_0$ 、 $OE = E_{0a}$

OB — 空气隙基波合成磁场轴

OF — OB 所感应的电枢电势 E_a

OD — 设想的电枢合成磁场轴（空气隙合成磁场再加电枢漏磁场总合成磁场轴）

OE — 电枢端感应电势

OE 再减去电阻压降即为端电势，图 9 中 OU 即端电势。

从上所言我们可以写方程式

$$EB = IX_{cz}$$

式中 EB — 从 E 到 B 的向量

X_{cz} — 同步电抗，这是电枢反应电抗和漏电抗之和。

在实际应用中我们可以量出 U 及 I ， U 和 I 间的功率因数角，电枢电阻， I 与 E_{0a} 间的 ψ 角无从量计。但如果我们能量计 X_{cz} ，我们就可以从端电势反求空载电势，从而求得电压调整。怎样用计算或实验求得 X_{cz} 将不在本文讨论范围之内。

4. 凸极同步机电势向量图

第 (3) 节中的解析法不能适用于凸极同步机，因为凸极机

磁路磁阻須視磁路在轉子上的地位而定。合成磁勢所產生的磁

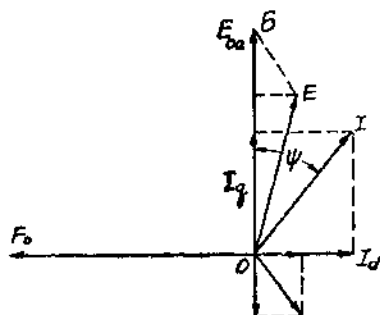


圖 10 凸極同步机电势向量圖

場轉面感应的电势不能說是与合成磁勢成比例，因而 E_{0a} 与 E_a 的矢量差所謂电樞反应电势不与电流成 90° ，也就不能視作电抗压降。对于凸極同步机我們应用下面分析法。將 I 分成两个分量 I_q 及 I_d 。 I_q 所產生的磁場与主極磁路

相差 90° 空間角度，所以它的磁路总是为極間区域如圖 11 中一条虛綫所示。

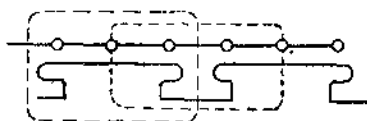


圖 11 縱軸磁路与横軸磁路

I_d 所產生的磁場与主極磁路同，如圖 11 中另一条虛綫所示。如果 ψ 为已知則任何电流可以分解为 I_q 及 I_d 。 I_q 及 I_d 分別產生空气隙磁通及漏磁通。空气隙磁通及漏磁通又分別產生反应电势及漏电势。如果磁路是不饱和的，那么这些电势將分別与 I_q 及 I_d 成比例。我們称电樞反应电势及漏电势的总和为电樞同步电势。因为 I_q 及 I_d 的同步电势分別与 I_q 及 I_d 成比例，参考第 3 節我們可以寫

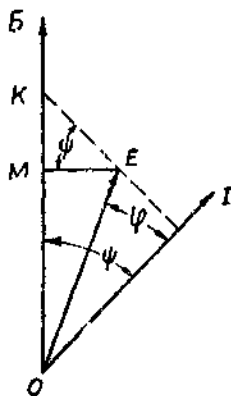
$$I_q \text{ 的同步电势} = -jI_q X_q \quad 4-1$$

$$I_d \text{ 的同步电势} = -jI_d X_d \quad 4-2$$

式中 X_q 及 X_d 为横軸及縱軸同步电抗。

从設計数据或从实验求得 X_q 及 X_d 之后，如果 ψ 为已知，

則很容易从已知端电势反求 E_{0a} 。由此得出电压調整，但问题是 ψ 为未知，所以我们必須从已知端电势及电枢电流和功率因数角求出空载电势。根据已知 OE 及 OI 和 OE 与 OI 間的夾角 φ ，从 E 画一綫与 OI 垂直并等于 IX_q ，由此得出 K 点， OK 綫即为 E_{0a} 的方向。这样求出 ψ ，然后从 E 画 EM 垂直于 OK 綫 ($EM = I_q X_q$)。从 M 量出 MB 使等于 $I_d X_d$ 得 B 点， OB 即为 E_{0a} 向量。作法的根据是 圖 12 求 E_{0a} 的向量圖



$$KE = \frac{ME}{\cos \psi} = \frac{I_q X_q}{\cos \psi} = \frac{I \cos \psi X_q}{\cos \psi} = I X_q.$$

5. 討論

同步机向量圖的基本環節是电枢反应。电枢反应对于同步机电电压調整及短路电流起着主要的作用而电压調整及短路电流是同步机最重要的特性。了解了电枢反应，也就了解了电机内部的作用，了解了电机内部磁势与感应电势的关系，主極磁势与电枢磁势的关系。在另一文中我們研究电机轉矩方程式，这可用主極磁势，电枢磁势和它們間的夾角來表示。在圖 9 中 OA 代表着 F_0 ， OD 代表着电枢磁軸而 $\angle AOD$ 就是它們間的夾角。

电枢反应也可以說是电机中第二繞組对于第一繞組磁势上的反应。所謂反应就是影响或作用。通常电机学中的主要电机都是两个繞組，一条磁路。在發电机中產生主極磁势的激磁繞組是第一电路，电枢是第二电路。变压器中供給互磁通激磁势

的原电路是第一繞組，副电路是第二繞組。各电机（包括直流机，交流同步机，交流异步机和变压器）中第二繞組的磁势怎样作用于第一繞組的磁势，而第一繞組中又有怎样的变化以适应此作用，大体上决定了这一种电机的性能。

在直流机中第一繞組的磁路在空間是固定的，磁势在時間上是不变的，（穩定运行情况之下）。如果电刷放在几何中心綫上，电樞磁势是橫軸的，影响不大。空載时的磁通与負載时的合成磁通是相差不多的。这在很大程度上决定了直流發电机以下两个性能：（1）电压調整率比較小，（这当然是指的通常所用的分激或复激發电机）；（2）短路电流与额定电流之比相当大。这第二个性能是因为电樞反应作用比較小，所以沒有像同步机中第二繞組由于比較强的反应所具有的制約作用。

同步机中第二繞組的反应作用是比較大的，尤其在短路中 ψ 几近于 90° 时的去磁作用，所以短路电流与额定电流之比要比直流發电机中的比为小。电压調整率則是比較大的。

在变压器中副电路的磁势与原电路的磁势作用于同一磁路，所以空間是固定的。这好像在直流机中縱軸电樞反应一样。但是在直流机中縱軸反应只有加磁或去磁作用（这須要看炭刷对于几何中綫的地位而定），若在变压器中第二繞組对于第一繞組原來的磁作用須要看副繞組中电流对感应电势的相位而定。不过变压器中反应与直流發电机或交流同步机的反应有一大大不同之点，即是变压器的原电路中必須有足够的磁通，使原电路中有足够的感应电势來与外加电压相平衡。当副电路有磁作用來改变原來的磁通，因而改变原电路中的感应电势时，原电路中

电流就將跟着变动，最后到达平衡时我們可以認為原电路中磁势可以分成两部分，一部分產生互磁通，一部分來平衡副电路的磁化作用(暂时不談漏磁通及自感电势)，由此可見变压器中的反应作用是基本上可以被消滅的，因而电压調整率甚小而短路电流則甚大。

交流异步机的情况与变压器相类。

第三節所述隱極同步机向量圖非常簡單，實質上我們可以把它一只同步机化为一只有电势 E_{0a} 的理想發电机(沒有內阻抗)和同步电抗(忽略电阻，

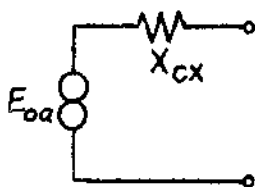


圖 13 同步發电机等值电路

这在大型發电机中电阻压降不到额定电压百分之一时是可以容許的。不过还須注意当我们是在計算电势从而求得电压調整时我們可以忽略电阻不計，当我們在計算損耗和效率或計算發热时就不能这样作了。

照第三節解析法我們假定了磁路磁阻不隨磁路在轉子上的地位而变，我們还假定了磁路是不飽和的，如果磁路飽和則 X_{cx} 將不是常数而且失掉我們立論的根据，因为电樞反应电势將不与电流成 90° 。

第四節的分解虽然說是为了凸極，但亦无妨应用于隱極。此解析法对于磁路有一定範圍內的飽和时也可適用。

本文最重要的主旨在于闡明空載电势和端电势間時間关系与电樞磁軸和主極軸間的空間关系兩者之間的联系，从而为另一台电机的轉矩作好准备。

2. 隱極同步机并联运行时的簡化圓圖

同步机并联运行当功率变动或激磁变动时發生怎样的作用，最好有簡易的圖解法。这样使我們对于同步机的并联运行可有概括性的和清楚的概念。为了使圖解法簡單而容易了解，我們必須有若干假定。为了使圖解有最大的概括性、各种量值最好用标么值，即相对值。

本文分 7 節：1、假定条件及初步概念；2、圓圖的作法；3、对于圓圖的認識；4、圓圖的意义；5、如何利用圓圖；6、在同步电动机情况时的圓圖；7、討論。

1. 假定条件及初步概念

为了使圓圖簡化起見我們假定了以下各項条件：(1)电網容量是无限大的，(2)电机是隱極机并有均匀的空气隙，(3)电机磁路是不饱和的，(4)电机电阻是可以忽略的。根据第一个假定条件，任何一只在并联中的电机电磁功率有变动时亦即輸出电流有变动时，电網电压 U_c 是不变的而且 U_c 的頻率亦是不变的。根据第 (2)、(3) 及 (4) 各假定条件我們可以寫出作为發电机时同步机的下列方程式

$$\vec{E}_0 = \vec{U}_t + j\vec{i}X_{cx} \quad 1-1$$

式中 $\vec{E}_0$ ——空載电势

$\vec{U}_t$ ——作为發电机的端电势，与电網电压相等相反。

$\vec{i}$ ——輸出电流

X_{cx} ——同步电抗。