

第一篇 直流电机

一. 直流电机(DC Machines)概述

直流电机是电机的主要类型之一。直流电机可作为发电机使用，也可作为电动机使用。

用作发电机可以获得直流电源，用作电动机，由于其具有良好的调速性能，在许多调速性能要求较高的场合，得到广泛使用。

直流电机的用途:作电源用:发电机；作动力用:电动机；信号的传递:测速发电机, 伺服电机



作电源用:直流发电机将机械能转化为直流电能



作动力用:直流电动机将直流电能转化为机械能



信号传递:直流测速发电机将机械信号转换为电信号



信号传递-直流伺服电动机将控制电信号转换为机械信号

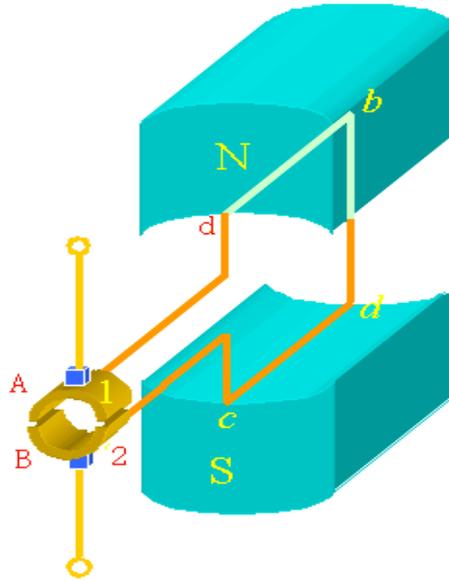
二. 直流电机的优缺点

1. 直流发电机的电势波形较好，受电磁干扰的影响小。
2. 直流电动机的调速范围宽广，调速特性平滑。
3. 直流电动机过载能力较强，起动和制动转矩较大。
4. 由于存在换向器，其制造复杂，成本较高。

1-1 直流电机工作原理

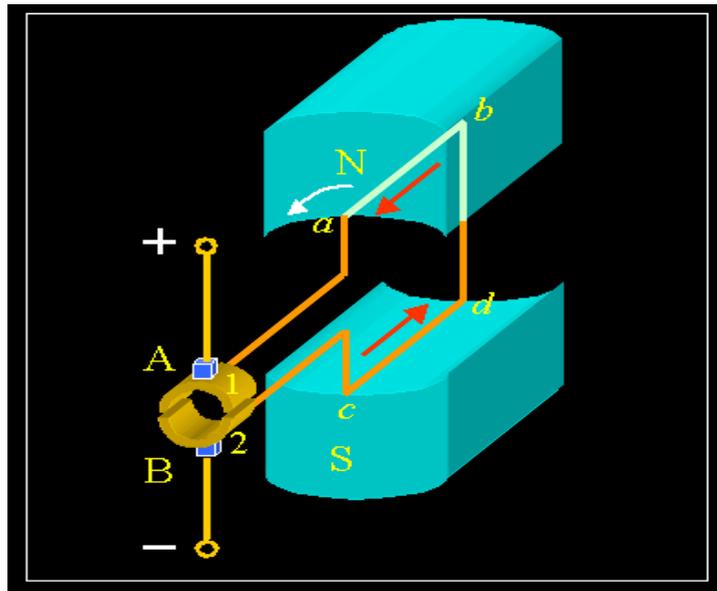
一、原理图(物理模型图)

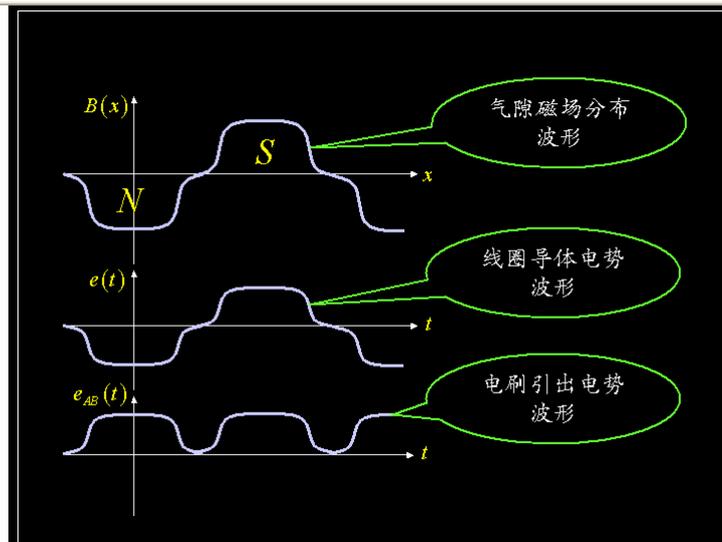
磁极对 N、S 不动，线圈（绕组）abcd 旋转，换向片 1、2 旋转，电刷及出线 A、B 不动



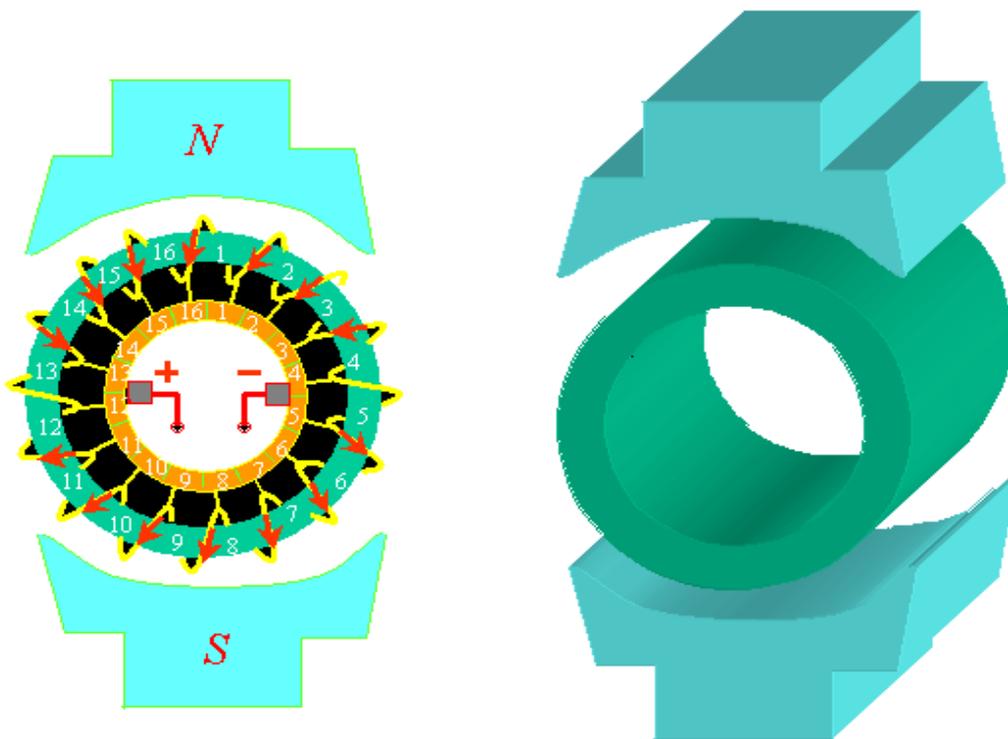
二、直流发电机原理（机械能 \rightarrow 直流电能）（Principles of DC Generator）

1. 原动机拖动电枢以转速 n (r/min) 旋转；
2. 电机内部有磁场存在；或定子（不动部件）上的励磁绕组通过直流电流（称为励磁电流 I_f ）时产生恒定磁场（励磁磁场，主磁场）（magnetic field, field pole）
3. 电枢线圈的导体中将产生感应电势 $e = B l v$ ，但导体电势为交流电，而经过换向器与电刷的作用可以引出直流电势 E_{AB} ，以便输出直流电能。（看原理图 1，看原理图 2）
(commutator and brush)



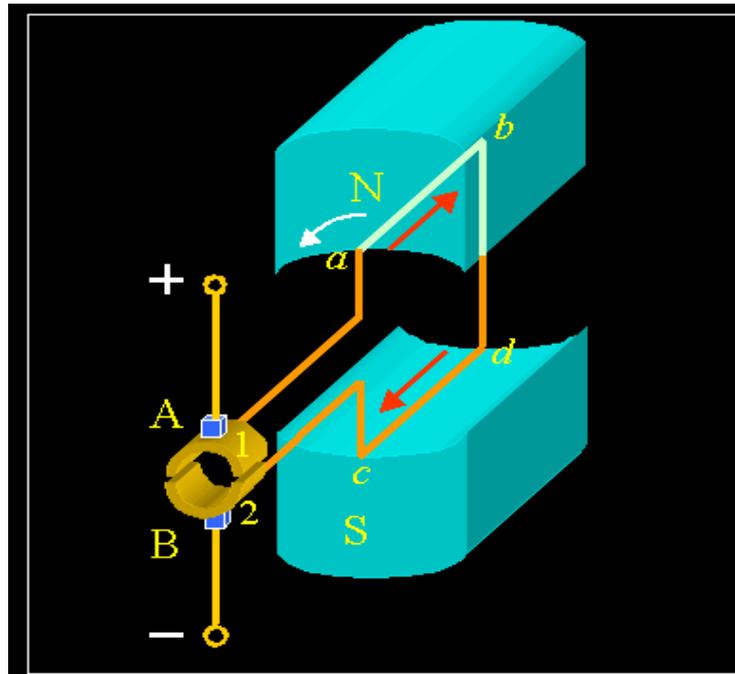


1. 问题 1-1: 直流电机电枢单个导体中感应电势的性质?
2. 问题 1-2: 直流电机通过电刷引出的感应电势的性质?
3. [看直流发电机原理动画](#)
4. 问题 1-3: 直流发电机如何得到幅值较为恒定的直流电势?
5. 为了得到稳定的直流电势, 直流电机的电枢圆周上一般有多个线圈分布在不同的位置, 并通过多个换向片联接成电枢绕组。以前曾使用环形绕组。
6. 问题 1-4: 环形绕组的缺点是什么?

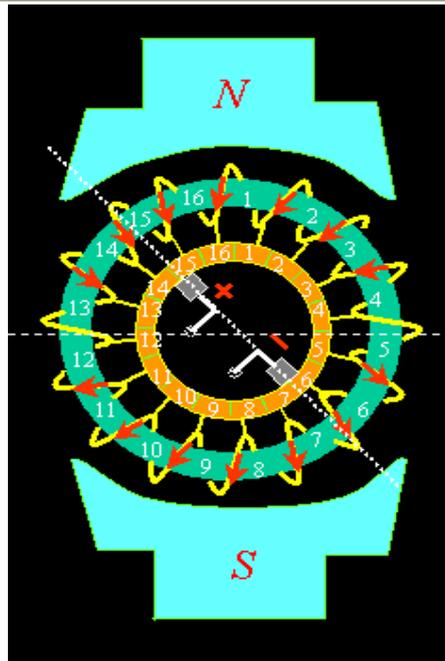


三. 直流电动机的原理 (Principles of DC Motor)

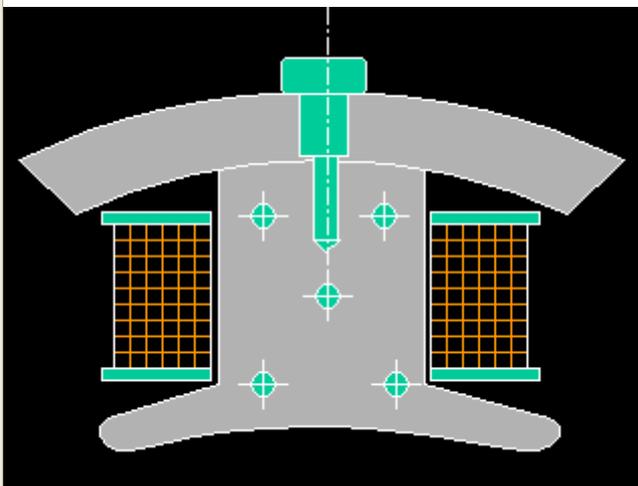
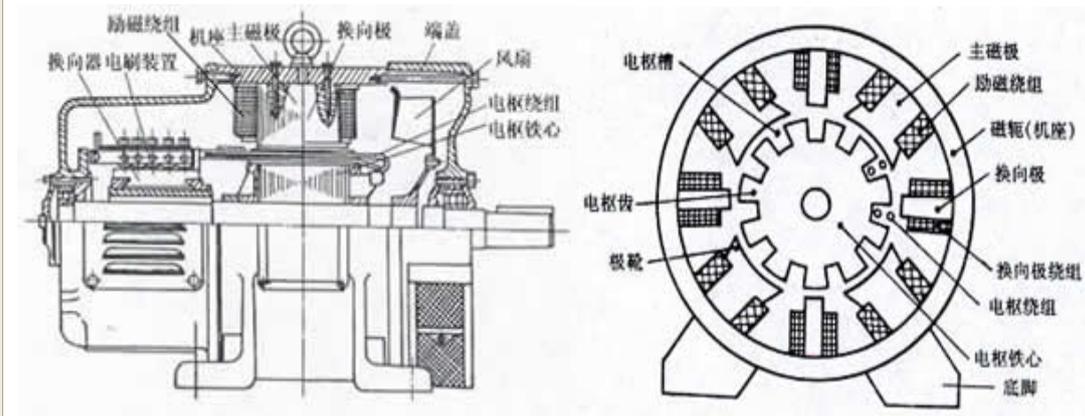
1. 将直流电源通过电刷和换向器接入电枢绕组, 使电枢导体有电流 i_a 通过。
2. 电机内部有磁场存在。
3. 载流的转子 (即电枢) 导体将受到电磁力 f 的作用 $f = B I i_a$ (左手定则)
4. 所有导体产生的电磁力作用于转子可产生电磁转矩, 以便拖动机械负载以 n (r/min) 旋转。
5. 结论: 直流电机的可逆性原理: 同一台电机, 结构上不作任何改变, 可以作发电机运行, 也可以作电动机运行。



1. [看直流电动机原理动画](#)
2. 问题 1-5: 讨论电刷的位置。
3. 结论: 为了得到最大的直流电势, 电刷的位置必须与位于几何中线上的导体相接触。

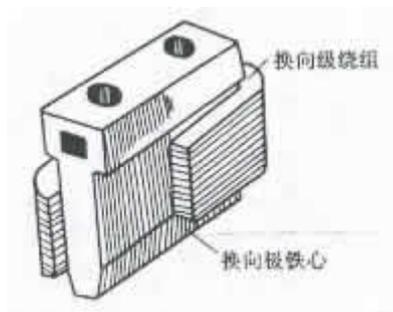


1-2 直流电机的结构 (Structure)



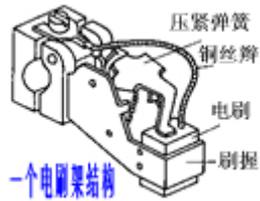
主磁极——主磁极的作用是建立主磁场。绝大多数直流电机的主磁极不是用永久磁铁而是由励磁绕组通以直流电流来建立磁场。主磁极由主磁极铁心和套装在铁心上的励磁绕组构成。主磁极铁心靠近转子一端的扩大的部分称为极靴，它的作用是使气隙磁阻减小，改善主磁极磁场分布，并使励磁绕组容易固定。为了减少转子转动时由于齿槽移动引起的铁耗，主磁极铁心采用1~1.5mm的低碳钢板冲压一定形状叠装固定而成。主磁极上装有励磁绕组，整个主磁极用螺杆固定在机座上。主磁极的个数一定是偶数，励磁绕组的连接必须使得相邻主磁极的极性按N, S极交替出现。

机座——机座有两个作用，一是作为主磁极的一部分，二是作为电机的结构框架。机座中作为磁通通路叠部分称为磁轭。机座一般用厚钢板弯成筒形以后焊成，或者用铸钢件（小型机座用铸铁件）制成。机座的两端装有端盖。

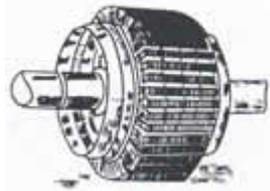


换向极——换向极是安装在两相邻主磁极之间的小磁极，它的作用是改善直流电机的换向情况，使电机运行时不产生有害的火花。换向极结构和主磁极类似，是由换向极铁心和套在铁心上的换向极绕组构成，并用螺杆固定在机座上。换向极的个数一般与主磁极的极数相等，在功率很小的直流电机中，也有不装换向极的。换向极绕组在使用中是和电枢绕组相串联的，要流过较大的电流，因此和主磁极的串励绕组一样，导线有较大的截面。

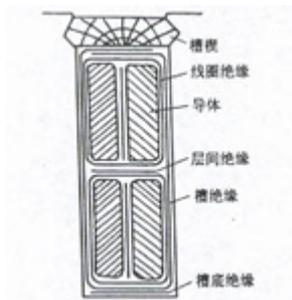
端盖——端盖装在机座两端并通过端盖中的轴承支撑转子，将定转子连为一体。同时端盖对电机内部还起防护作用。



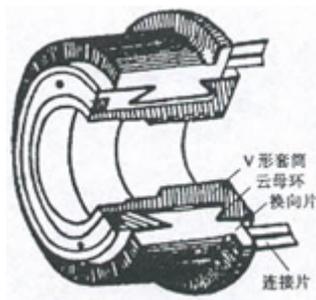
电刷装置——电刷装置是电枢电路的引出（或引入）装置，它由电刷，刷握，刷杆和连线等部分组成，右图所示，电刷是石墨或金属石墨组成的导电块，放在刷握内用弹簧以一定的压力按放在换向器的表面，旋转时与换向器表面形成滑动接触。刷握用螺钉夹紧在刷杆上。每一刷杆上的一排电刷组成一个电刷组，同极性的各刷杆用连线连在一起，再引到出线盒。刷杆装在可移动的刷杆座上，以便调整电刷的位置。



电枢铁心——电枢铁心既是主磁路的组成部分，又是电枢绕组支撑部分；电枢绕组就嵌放在电枢铁心的槽内。为减少电枢铁心内的涡流损耗，铁心一般用厚0.5mm且冲有齿、槽的型号为DR530或DR510的硅钢片叠压夹紧而成，如左图所示。小型电机的电枢铁心冲片直接压装在轴上，大型电机的电枢铁心冲片先压装在转子支架上，然后再将支架固定在轴上。为改善通风，冲片可沿轴向分成几段，以构成径向通风道。



电枢绕组——电枢绕组由一定数目的电枢线圈按一定的规律连接组成，他是直流电机的电路部分，也是感生电动势，产生电磁转矩进行机电能量转换的部分。线圈用绝缘的圆形或矩形截面的导线绕成，分上下两层嵌放在电枢铁心槽内，上下层以及线圈与电枢铁心之间都要妥善地绝缘（右图），并用槽楔压紧。大型电机电枢绕组的端部通常紧扎在绕组支架上。



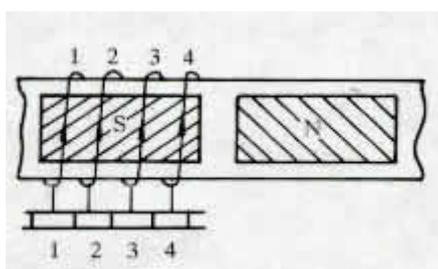
换向器——在直流发电机中，换向器起整流作用，在直流电动机中，换向器起逆变作用，因此换向器是直流电机的关键部件之一。换向器由许多具有鸽尾形的换向片排成一个圆筒，其间用云母片绝缘，两端再用两个V形环夹紧而构成，如图所示。每个电枢线圈首端和尾端的引线，分别焊入相应换向片的升高片内。小型电机常用塑料换向器，这种换向器用换向片排成圆筒，再用塑料通过热压制成。

1-3 电枢绕组

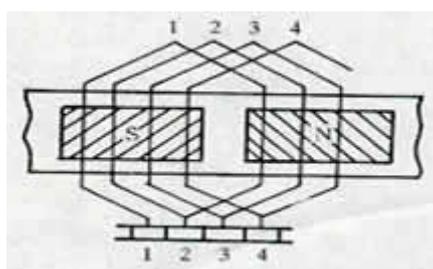
电枢绕组是直流电机的电路部分，亦是实现机电能量转换的枢纽。电枢绕组的构成，应能产生足够的感应电动势，并允许通过一定多电枢电流，从而产生所需的电磁转矩和电磁功率。此外，还要节省有色金属和绝缘材料，结构简单，运行可靠。

一. 主要分类

宏观分类为环形和鼓形；环形绕组只曾在原始电机用过，由于容易理解故讲原理时也用此类绕组；鼓形绕组比环形绕组制造容易，又节省导线，运行较可靠，经济性好，故现在均用鼓形绕组。鼓形绕组又分为叠绕组、波绕组和蛙形绕组。

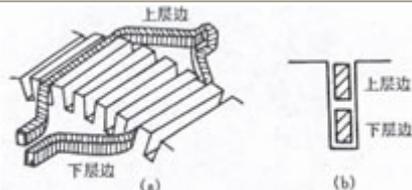


环形电枢绕组（展开图）

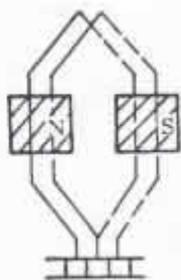


鼓形电枢绕组（展开图）

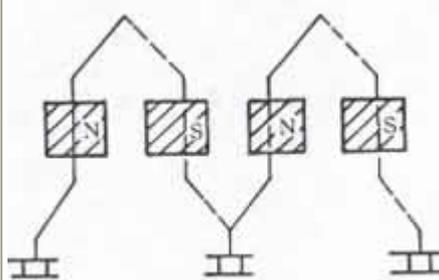
1. 鼓形绕组有许多个形状相同的线圈组成，每个线圈有两个有效边，分别位于电枢圆周相距约一个极距的两个槽中。
2. 一个边在上层时，另一个边一般在下层。



1. 每个换向片接两个不同的线圈端头。
2. 将所有电枢线圈按照一定的规律联接起来，就构成电枢绕组。
3. 在实际电机中，电枢绕组有多种形式。
4. 每个换向片接两个不同的线圈端头。
5. 将所有电枢线圈按照一定的规律联接起来，就构成电枢绕组。
6. 在实际电机中，电枢绕组有多种形式。



叠绕组示意图



波绕组示意图

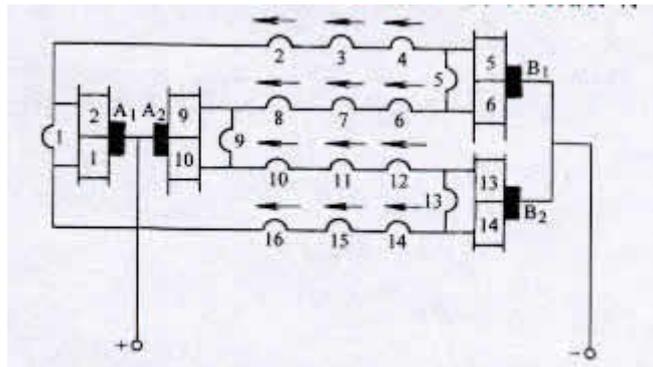
二、单叠绕组的联接方法

1. 强调概念：极数 $2p$ ，极对数 p ，极距，绕组元件，元件边，上层边，下层边，第 1 节距，第 2 节距，合成节距等。

2. 单叠绕组的展开图举例

一台 4 极 16 槽直流电机，已知换向片数 $K=16$ ；电枢绕组的线圈数 $S=16$ ；试画出整距右行单叠绕组展开图。

3. 【析】每槽两个边，每个线圈两个边，所以槽数 z =线圈数 $S=16$ ，极距 $\tau = z/2p = 4$ 槽。因为要求整距线圈即第一节距 $y_1 = \tau = 4$ (槽)，又因为单叠右行，则合成节距 $y = 1$ ；则第二节距 $y_2 = y_1 - y = 3$ (槽)，也就是说一个线圈的一个有效边若放在 1 号槽内，另一个有效边必须放在 5 号槽内。即一个线圈跨过 4 个槽的位置。元件联接图如图绕组展开图。其等效电路图如下图所示：



【画出展开图的具体步骤】

1. 画出均匀分布的平行竖线代表电机各槽的元件边，下层边用虚线，上层用实线画；
2. 标出槽号：画出第一个元件，跨 1~5。展开图中可以把一个元件画成一匝。【注意元件的端部要画对称。】
3. 在第一个元件的引出线端画出换向器的两根横平行线，并标出换向片号；换向片号与所连的上层边槽号要相同。
4. 依次串联 16 个元件。
5. 再画出各磁极 N、S、N、S。
6. 鼓形绕组的电刷中心线在每个磁极的中心线上。【即保证电刷必须与位于几何中线处的导体相接触。】
7. 画出电枢转向和电刷连线。

三. 结论

1. 常用直流电机绕组型式的支路数 $2a$ ：
2. 单叠绕组： $2a=2p$ ， 单波绕组： $2a=2$
3. 双叠绕组： $2a=4p$ ， 双波绕组： $2a=4$



额定值---是制造厂对各种电气设备(本章指直流电机)在指定工作条件下运行时所规定的一些量值。在额定状态下运行时,可以保证各电气设备长期可靠地工作。并具有优良的性能。额定值也是制造厂和用户进行产品设计或试验的依据。额定值通常标在各电气的铭牌上,故又叫铭牌值。

直流电机的额定值(Rating)主要有:

1. 额定功率 P_N : 指电机在铭牌规定的额定状态下运行时,电机的输出功率,以“W”为量纲单位。若大于 1kW 或 1MW 时,则用 kW 或 MW 表示。
2. 额定电压 U_N : 指额定状态下电枢出线端的电压,以“V”为量纲单位。
3. 额定电流 I_N : 指电机在额定电压、额定功率时的电枢电流值,以“A”为量纲单位。
4. 额定转速 n_N : 指额定状态下运行时转子的转速,以 r/min 为量纲单位。
5. 额定励磁电流 I_f : 指电机在额定状态时的励磁电流值。

注意:

1. 对于直流发电机, P_N 是指输出的电功率,它等于额定电压和额定电流的乘积,即 $P_N = U_N I_N$
2. 对于直流电动机, P_N 是指输出的机械功率,所以公式中还应有效率 η_N 存在,即 $P_N = U_N I_N \eta_N$

第 2 章 直流电机的基本理论

内 容 简 介

1. 直流电机的磁场:励磁方式、磁场分布、电枢反应
2. 感应电势:电势公式、电势方程式
3. 电磁转矩:转矩公式、转矩平衡方程式
4. 功率与损耗:损耗分析、功率平衡方程式

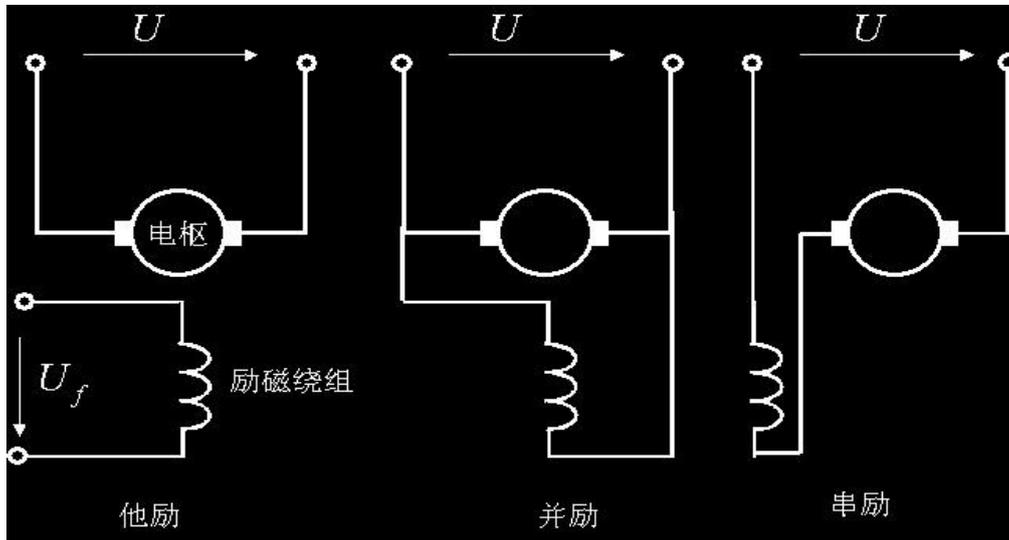
2-1 直流电机的励磁方式

一、定义

直流电机励磁绕组的接线方式称为励磁方式。实质上就是励磁绕组和电枢绕组如何联接。

二、分类

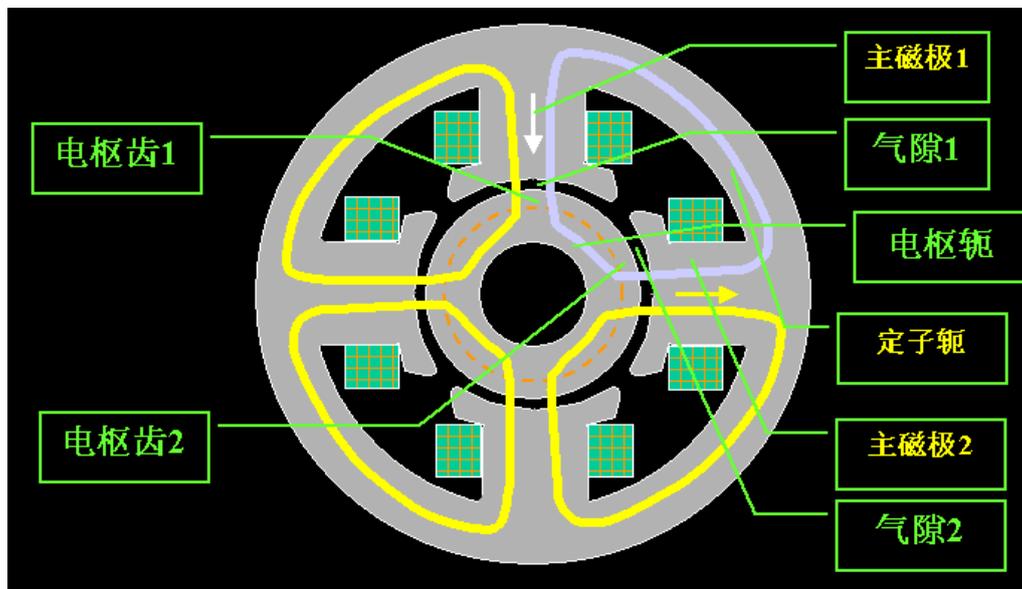
除了永磁直流电机外，直流电机的励磁方式有他励式和自励（串励、并励和复励）式。



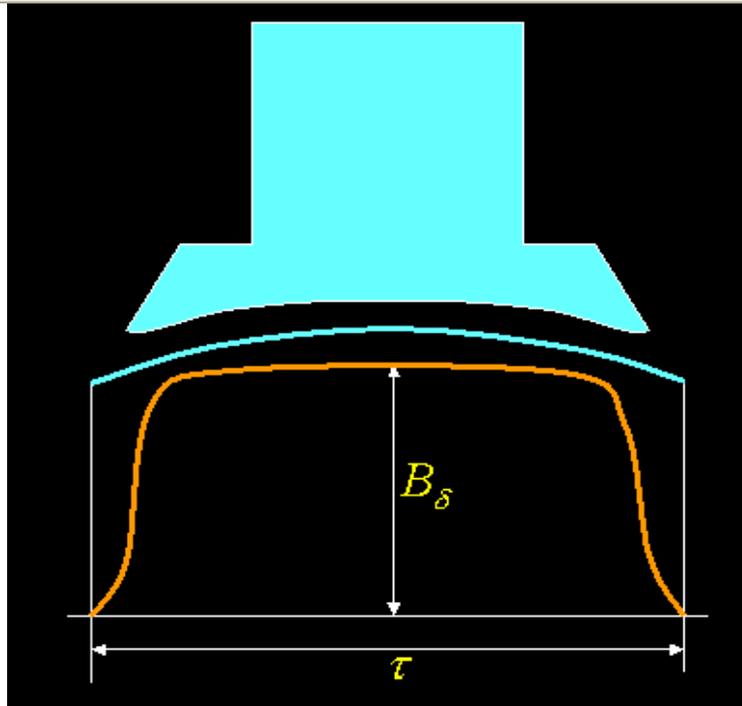
2-2 空载时直流电机的磁场

一、直流电机的磁通路径

磁路从主磁极 1 出发经气隙 1—电枢齿 1—电枢轭—电枢齿 2—气隙 2—主磁极 2—定子轭—主磁极 1。



二、空载磁通密度波形



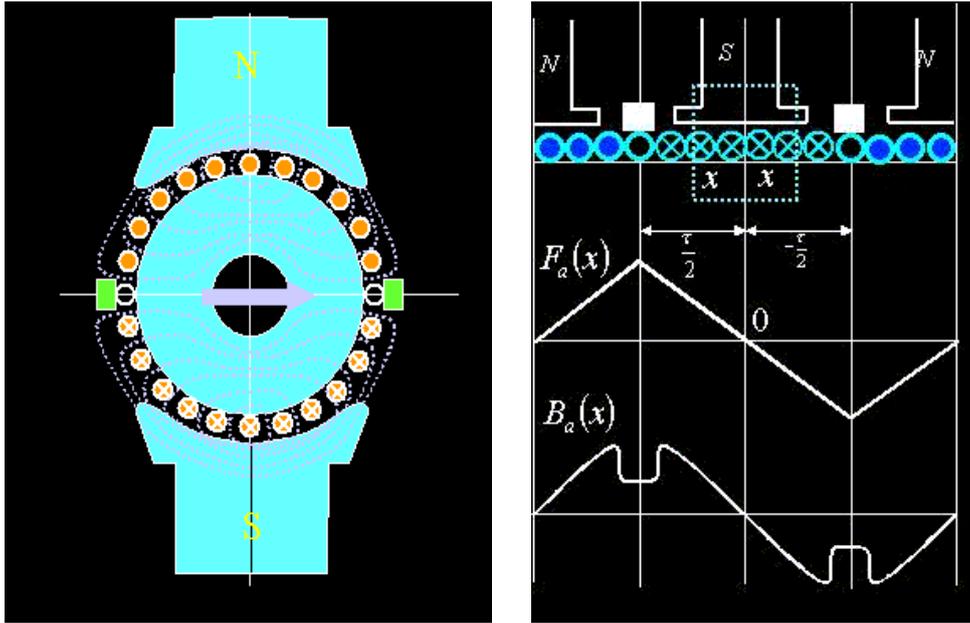
- 空载时电枢电流为 0，气隙磁场是由励磁电流单独决定。
- 磁极面下气隙较小且均匀，磁密较强且均匀。
- 极面外，气隙迅速增大，磁密也迅速减弱，几何中性线处磁密为 0。
- 空载气隙磁密沿电枢外圆的分布用函数 $B_0(x)$ 表示；分析可知它是平顶波。

2-3 负载时直流电机的磁场——电枢反应

概述

- 直流电机负载后，电枢绕组有电流通过，并产生电枢磁场。
- 负载时气隙磁场由主磁场和电枢磁场共同作用
- 电枢磁场会对主磁场产生一定的影响，这一影响称为电枢反应。
- 电枢反应会使得每极磁通发生变化，也会使气隙磁场发生畸变，从而影响电机的性能。

一、电枢磁势的分布



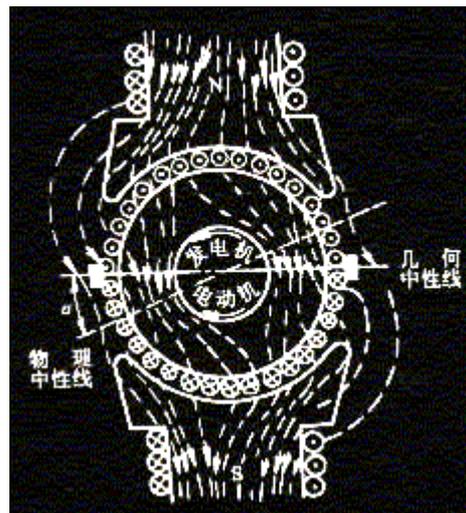
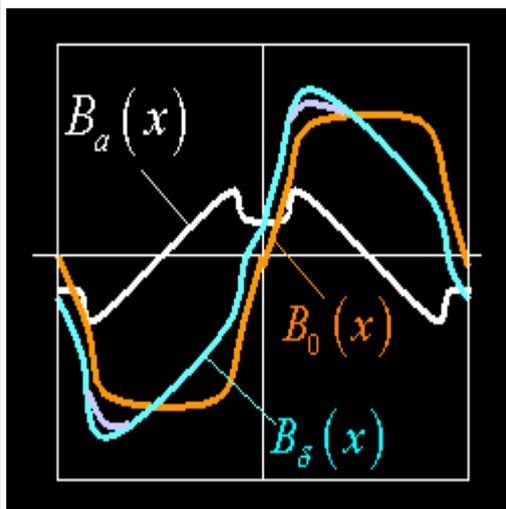
1. 电枢磁势的分布与电枢电流的分布有关。
2. 电枢电流的方向由电刷来界定。图中电刷以上电流为流入纸里，电刷以下为流出纸面。
3. 这样的电流分布所产生的磁力线如图所示。（右手定则）
4. 可见，电枢磁势的轴线总是与和电刷接触的导体的连线重合。或者说电刷位置决定了电枢磁势的轴线。
5. 当电刷与处于几何中性线上的导体相接触时，电枢磁势的轴线在交轴方向。并把这一磁势称为交轴电枢反应磁势。
6. 设直轴与电枢外圆的交点为 0 点，在距 0 点为 x 处作一闭合磁力线回路。该闭路包围的电流数即为总磁势 F_a 。
7. 电枢表面单位长度上的安培导体数称为电机的线负荷 A ， $A = Ni_a / (\pi D_a)$ 。
8. x 处闭路上的总磁势 $F_a(x) = A * 2x$ ，忽略铁心磁阻，则每个气隙消耗的磁势为 $F_a(x) = Ax$ ($-t/2 < x < t/2$)
9. 上式为一个极距的电枢磁势分布，将一对极的电枢磁势波形画出，（忽略齿槽影响）将得到三角波。

二、电枢磁势单独产生的磁感应强度的分布：

$$B_a(x) = \mu_0 F_a(x) / \delta$$

- 该磁密由磁势和气隙共同决定。
- 极面下气隙基本不变，磁密正比于磁势；
- 两极之间的区域内，气隙变大，磁密迅速减小。一个周期的磁密波形呈马鞍形。

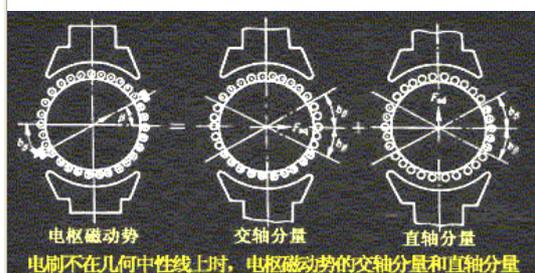
三、电枢磁场与励磁磁场（主磁场）的合成及电枢反应



- 主磁场为平顶波，电枢磁场为马鞍形波。
- 在一个极距内相加时，一半极距内磁密加强，另一半极距内磁密减弱。
- 如果电机的磁场不饱和，则半个极距内增加的磁通量与另半个极距内减少的磁通量相等。即每极总磁通 Φ 与空载时一样。
- 实际上由于饱和，使得每极磁通总体上有所减少。
- 由图可知，原来的磁场发生了畸变，0点发生了位移。
- （交轴）电枢反应：气隙磁场发生畸变（对发电机而言
- 前极端去磁、后极端增磁；而对电动机而言则为前极端增磁、后极端去磁）；每极磁通减少。此反应会对电机性能产生不良影响。

四、直轴电枢反应

- 电枢磁势的轴线总是与和电刷接触的导体的连线相一致。
- 当电刷与几何中性线上的导体相接触时，电枢磁势的轴线也处于几何中性线上，即与主极轴线正交，称其为交轴电枢磁势。
- 以上讨论的实际上是交轴电枢反应。



- 如果将电刷位置逆时针移动 β 角，则电枢磁势可分为两部分。
- 2β 范围内的磁势为直轴电枢磁势 F_{ad} 。
- $(\pi - 2\beta)$ 角度内的磁势为交轴电枢磁势 F_{aq} 。

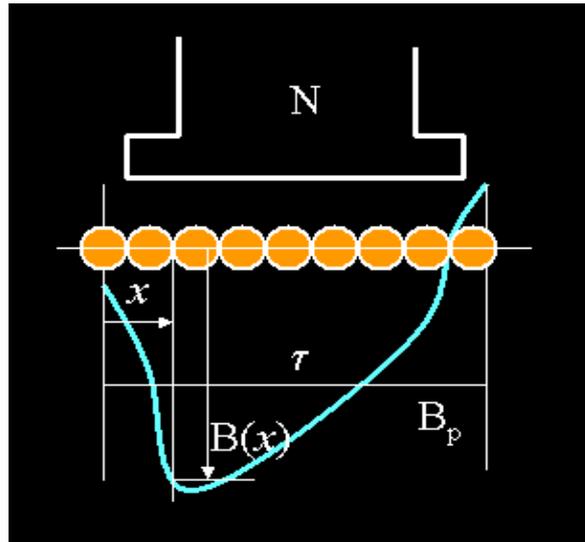
直轴电枢磁势的作用为：

1. 对发电机来说，电刷顺转向偏移时为去磁，逆转向偏移时为增磁；
2. 对电动机来说，电刷顺转向偏移时为增磁，逆转向偏移时为去磁。

2-4 电枢绕组中的感应电势

- 当电枢以一定的转速 n 向一个方向转动时，电枢绕组的导体便会切割磁力线，产生感应电势。
- 由电刷引出的感应电势 E_a 也就是每条支路的感应电势，即一条支路中所有串联导体的感应电势之和。
- 本节将推导感应电势的计算公式。

- 公式推导

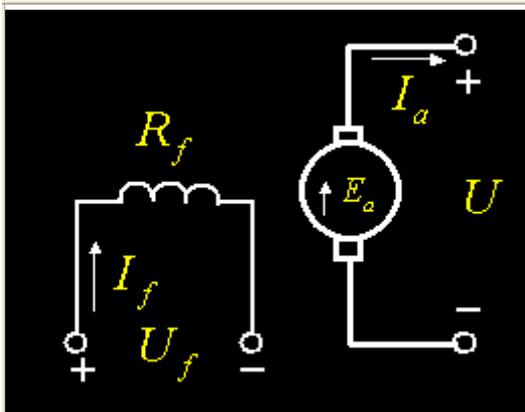


- C_e 为电势的结构常数，由绕组结构决定。可见感应电势正比于每极磁通量和转子转速。
- 这一感应电势公式把电量 E_a 、机械量 n 、磁场量 Φ 联系起来来了。

2-5 直流电机的电势平衡方程式

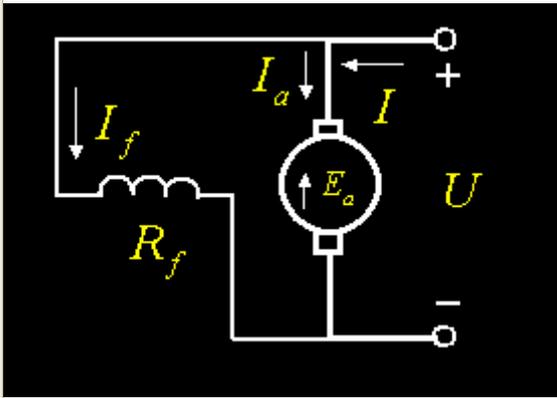
- 直流电机的电路包括电枢支路和励磁支路。
- 在分析直流电机时，最好先根据励磁方式画出电机的电路连线。
- 发电机按照发电机惯例标注电势，电流和电压。电动机则按照电动机惯例标注。

一、直流发电机的电势平衡方程



- 以他励发电机为例。
- 注意图中电枢和励磁的图符。
- 作为发电机运行时，电势 E_a 和电枢电流 I_a 同方向。
- 除了电阻压降 $I_a R_a$ 外，还要考虑电刷压降 ΔU_s 。
- 电势平衡方程为 $E_a = U + I_a R_a + 2\Delta U_s$ 。
- 如有串励绕组，则 R_a 中应为串励、补偿和换向极绕组电阻。

二、直流电动机的电势平衡方程

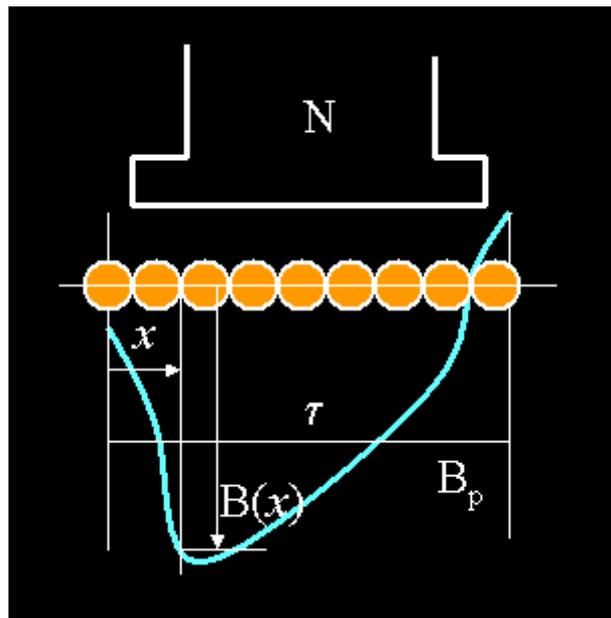


- 以并励电动机为例。
- 电枢接通直流电源。
- 流的转子导体在磁场中受力产生转矩
- 子一旦旋转，就有电势产生。
- 势与电流方向相反。故电动机的感应电势又叫反电势。 $U = E_a + I_a R_a + 2\Delta U_s$

2-6 电磁转矩 (Magnetic-electric Torque)

- 在直流电机中，当电枢绕组通过电流时，与气隙磁场作用会产生电磁转矩 T 。
- 在电动机中，电磁转矩属于拖动转矩；而在发电机中则为阻力转矩。

一、公式推导



- C_T 为转矩常数，由电机结构决定。可见电磁转矩正比于每极磁通量和电枢电流。
- 这一电磁转矩公式把机械量 T ，磁场量 Φ 和电量 I_a 联系起来。

二、稳态时的转矩平衡

- 对发电机来说，转轴上输入的是机械转矩 T_1 。 T_1 克服各种阻力转矩（如摩擦，铁耗，风阻等） T_0 后与负载后电枢电流 I_a 产生的电磁转矩 T 相平衡： $T_1 = T + T_0$
- 对于电动机来说，从电枢端输入电流并产生电磁转矩 T ， T 克服各种阻力转矩 T_0 后与机械负载转矩 T_2 相平衡： $T = T_0 + T_2$

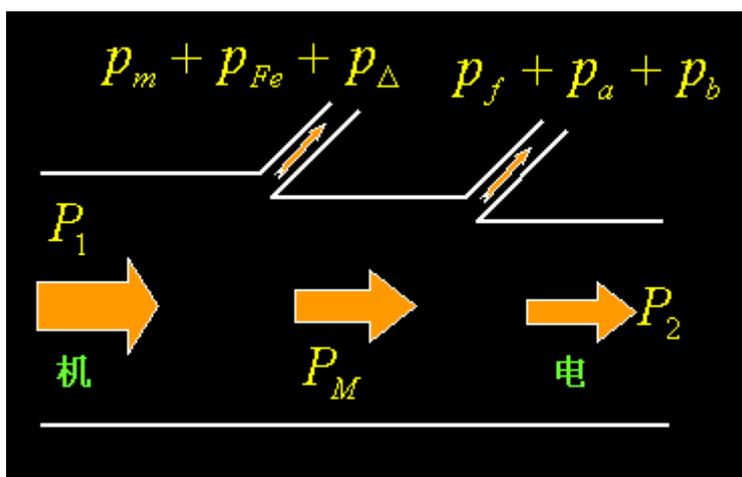
2-7 直流电机的损耗和功率平衡方程

一、损耗

- 机械损耗 p_m : 轴与轴承摩擦、电刷与换向器摩擦、通风损耗等。这些损耗主要与转速有关, 转速变化不大时, 基本为常量。
- 铁心损耗 p_{Fe} : 电枢铁心中磁场交变, 会产生涡流损耗和磁滞损耗。铁耗近似与磁密的平方及转速的 1.2-1.5 次方成正比。
- 励磁损耗 p_f : $p_f = U_f I_f = I_f^2 R_f$
- $p_m + p_{Fe} + p_f$ 统称为空载损耗(不变损耗)。
- 负载损耗: 电枢回路电阻损耗 $p_a = I_a^2 R_a$; 电刷接触压降损耗 $P_b = 2 \Delta U_s I_a$ (可变损耗)
- 杂散损耗 p_Δ : 齿槽引起磁场脉动引起的铁耗, 一些机械部件切割磁通产生的铁耗等 $p_\Delta = (0.5-1)\%P_2$ 。

二、发电机功率平衡方程

- 功率流程图 (永磁式时)



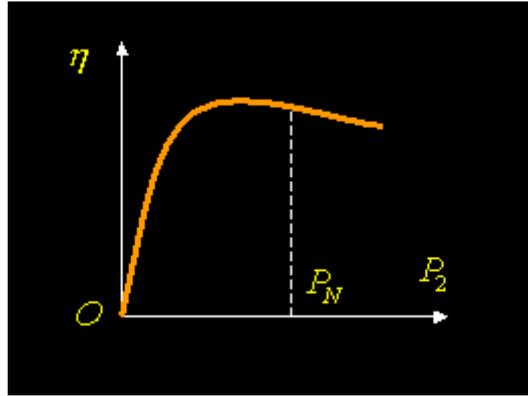
- 功率平衡方程

$$P_1 = R_M + p_m + p_{Fe} + p_\Delta = P_2 + p_a + p_b + p_f + p_m + p_{Fe} + p_\Delta = P_2 + \sum p$$

- 电磁功率 R_M : 从机械功率转化为电功率的那一部分功率, 它是能量形态变化的基础。

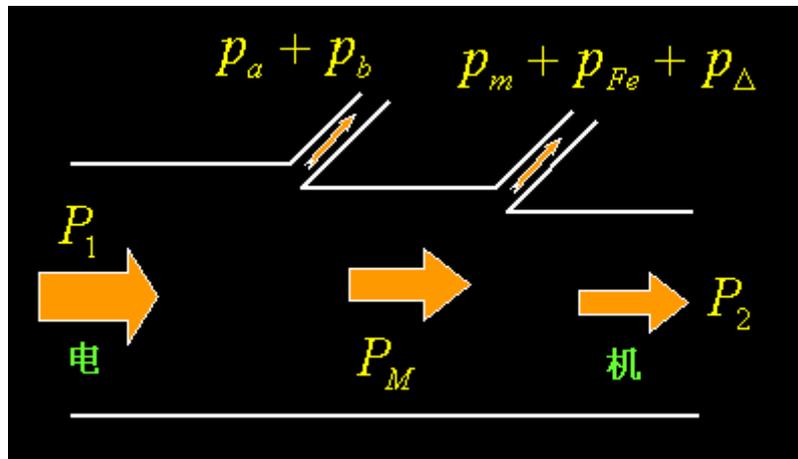
$$\begin{aligned} R_M &= T\Omega = C_T \Phi I_a \Omega = pN / (2\pi a) \Phi I_a * (2\pi n / 60) \\ &= pN / (60a) \Phi n I_a = E_a I_a \end{aligned}$$

- 效率 $\eta = P_2 / P_1 = (1 - \sum p) / P_1$



三、电动机功率平衡方程

- 功率流程图（永磁式时）



- 功率平衡方程

$$P_1 = R_a + p_a + p_b = P_2 + p_a + p_{Fe} + p_{\Delta} + p_a + p_b + p_r = P_2 + \Sigma p$$

- 电磁功率 P_M : 从电功率转化为机械功率的那一部分功率。 $P_M = E_a I_a$
- 效率 $\eta = P_2 / P_1 = (1 - \Sigma p) / P_1$

本章小结

- 直流电机的主磁场一般由套在主极铁心上的励磁绕组通过电流产生。励磁绕组与电枢回路之间的连接方式有：他励、并励、串励、复励。不同的励磁方式对电机的性能将产生较大的影响。
- 直流电机空载时的磁场由励磁绕组单独激励，其分布取决于磁路的情况。一般情况下，直流电机的空载磁通密度分布呈平顶波。
- 当直流电机负载时，电枢绕组绕组中的电枢电流将产生电枢磁势，电枢磁势对主磁场的分布和主磁通的大小将产生一定的影响，这种影响称为电枢反应。
- 交轴电枢反应将使主磁场发生畸变，当磁路饱和时会主磁场产生去磁作用。当电刷偏离几何中性线时，还将产生去磁或者增磁的直轴电枢反应。
- 发电机和电动机是直流电机的两种运行状态。在两种状态下，电枢绕组中均产生感应电势。感应电势的公式 $E_a = C_e \Phi n$ 表明感应电势的大小正比于转速及每极磁通。在发电机中 $E_a > U$ ，在电动机中 $U > E_a$ 。
- 同样，直流发电机和电动机中均存在电磁转矩。其公式 $T = C_T \Phi I_a$ 表明电磁转矩的大小正比于电枢电流和每极磁通。在发电机中，电磁转矩是阻力转矩，在电动机中电磁转矩是拖动转矩。
- 直流电机的电势平衡方程反映了电机电路中各种量之间的关系。功率平衡方程表明了输入功率、输出功率和各种损耗之间的关系。电磁功率 $P_M = T \Omega = E_a I_a$ 显示了机械功率和电

磁功率之间的转换关系。

第 3 章 直流发电机

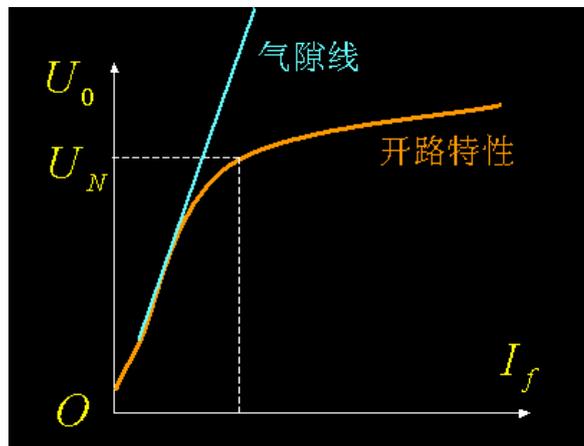
1. 本章介绍直流发电机(DC Generator)的特性。
2. 发电机的转速由原动机决定，一般需要转速恒定。
3. 除转速 n 外，发电机的外部可测量出 3 个电量，即端电压 U 、负载电流 I 、
4. 励磁电流 I_f 。
5. 当发电机正常稳态运行时，3 个物理量中 1 个保持不变，另外 2 个之间的关系称为直流发电机的特性。
6. 不同励磁方式之发电机的运行特性有所不同，本章将分别讨论之。

3-1 他励直流发电机的特性

一、开路特性 $U_0 = f(I_f)$

1. 定义：当 $n = \text{常数}$ ， $I = 0$ 时，改变励磁电流，电枢端电压 U_0 随励磁电流 I_f 变化的关系。
2. $U_0 = E_a - I_a R_a - 2 \Delta U_s = E_a = C_e \Phi n$
3. $I_f = F_f / N$
4. 结论：经过一定比例转换后，开路特性 $U_0 = f(I_f)$ 曲线与电机的气隙曲线 (Magnetization curve) $\Phi = f(F_f)$ 形状完全相同。

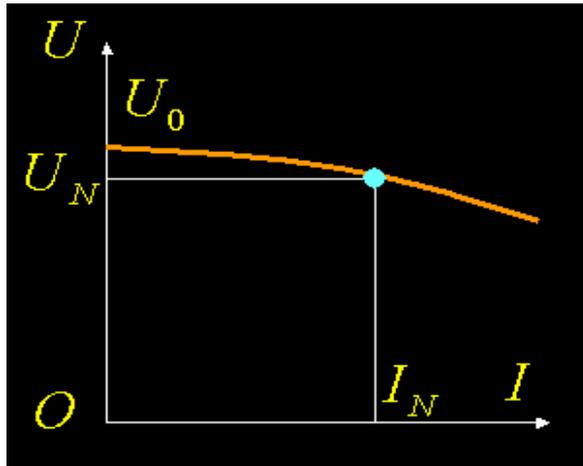
- 一般电机的工作点位于开路特性上曲线开始弯曲的膝点附近。据此可以判断电机的饱和程度。其饱和系数 $K_c = ac/cb$



二、外特性 $U = f(I)$

1. 定义：当 $n = n_N$ ， $R_f = R_{fN}$ 时，改变负载，端电压 U 随负载电流 I 变化的关系。
2. $n = n_N$ ， $U = U_N$ ， $I = I_N$ 时的励磁电流称为额定励磁电流，对应的励磁电阻即 R_{fN} 。
3. $U = E_a - I_a R_a - 2 \Delta U_s = (C_e \Phi n - 2 \Delta U_s) - I_a R_a$
4. 负载电流增加时，电阻压降增大、电枢磁势的去磁效应增大，使得曲线下降。
5. 结论：外特性 $U = f(I)$ 曲线是略微下降的曲线。

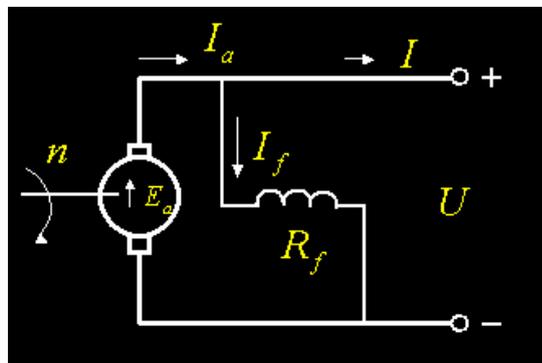
1. 电压调整率：从空载到满载电压变化的程度。
2. $\Delta U = (U_0 - U_N) / U_N$ (100%)
3. 一般他励直流发电机
4. $\Delta U = 5 \sim 10$ %。



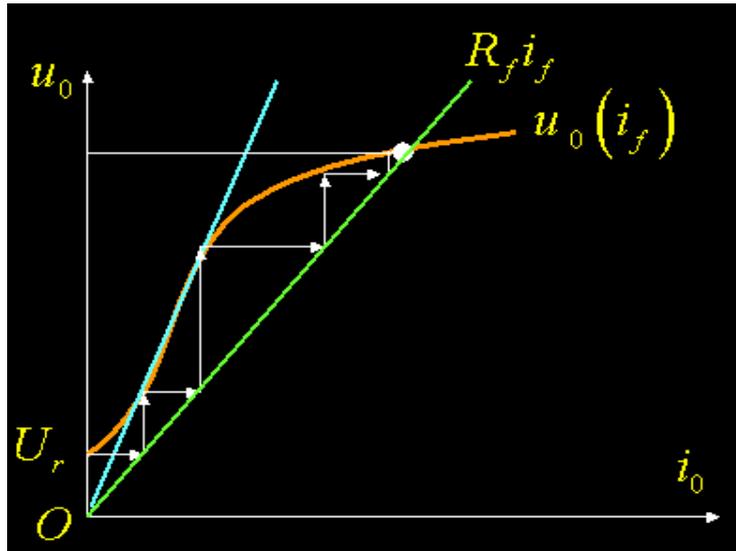
3-2 并励直流发电机的特性

一、建压过程及建压条件

- 自励：励磁绕组并接于电枢绕组两端，由发电机本身的端电压提供励磁，而发电机的端电压又必须在有了励磁电流后才能产生，所以并励发电机由初始的 $U=0$ 到正常运行时 U 为一定值，有一个自己建立电压的过程(自励过程)。



- 电机的主磁极通常总有剩磁存在。
- 原动机拖动转子旋转，电枢绕组切割剩磁场，产生一个不大的剩磁感应电势。
- 这一电势加到励磁绕组将产生一个不大的励磁电流。
- 该励磁电流产生的磁势如果与剩磁同方向，将相互加强，会建立起稳定电压。
- 该励磁电流产生的磁势如果和剩磁反方向，将相互减弱，将无法建立稳定电压。
- 可见励磁绕组的接线对建立电压很重要。



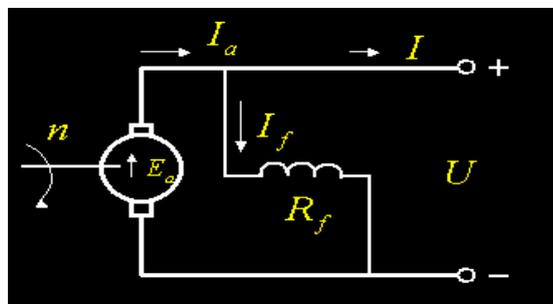
1. 稳定点：由动态方程可知，当
2. $u_0(i_f) - R_f i_f = 0$ 时，励磁电流和电压将达到稳定值。
3. 建压临界电阻：场阻线与空载特性相切时对应的励磁回路电阻。
4. 建压条件： a. 电机中要有剩磁； b. 励磁绕组与电枢绕组并接正确； c. 励磁回路总电阻应小于建压时临界电阻。

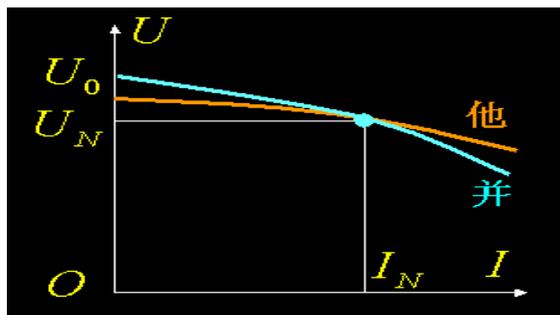
二、开路特性 $U_0 = f(I_f)$

1. 并励发电机的励磁电流很小，只占额定电流的（1~3）%。
2. 这样微小的电流在电枢绕组中引起的电压降和电枢反应的影响很小，可以忽略不计。所以并励发电机的开路电压也就是电枢中的感应电势。 $U_0 = E_a - I_f R_a - 2 \Delta U_s \approx E_a$
3. 并励发电机的开路特性曲线与他励时相同，一般试验时接成他励方式即可。

三、外特性 $U = f(I)$

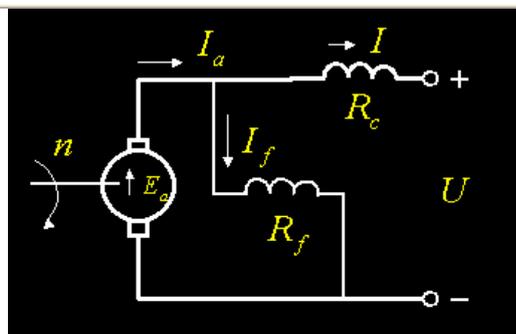
1. $U = E_a - R_a (I + I_f) - 2 \Delta U_s$
 $= (C_e \Phi n - R_a I_f - 2 \Delta U_s) - R_a I$
2. 有三个原因引起端电压随负载电流增加而下降：
 电阻 R_a 上的压降；
 电枢反应的去磁作用；
 以上2因素引起励磁电流的进一步减少。从而导致端电压再下降。一般 $\Delta U = (10 \sim 30) \%$ 。





3-3 复励直流发电机的特性

- 复励发电机同时有两种励磁绕组即串励和并励绕组。
- 如果串励与并励绕组的磁势方向相同，则称为加复励（或叫积复励），反之为差复励（或叫减复励）。



一般来说，并励绕组起主导作用，串励绕组起调节性能的作用。

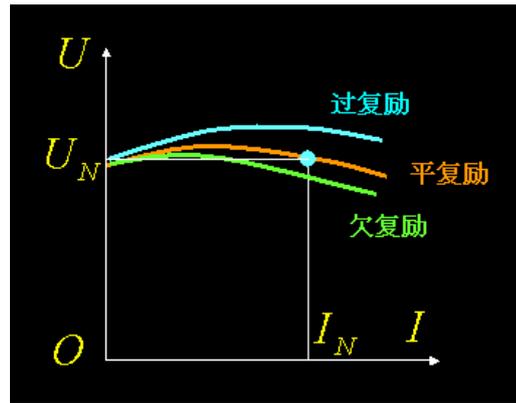
一、开路特性 $U_0=f(I_f)$

开路时串励绕组不起作用，则其开路特性同并励发电机的开路特性。

二、外特性 $U=f(I)$

1. 负载运行时，串励绕组产生磁势，这个磁势将影响主磁通的大小和电机性能。
2. 对加复励发电机来说串励磁势起增磁作用即升压作用，而电阻压降和电枢反应的去磁作用起降压作用，二者的相对影响力会决定发电机的外特性。
3. 如果串励绕组作用较大，即在额定电流时端电压超过额定电压，则为过复励。
4. 如果串励绕组的作用不足，即在额定电流时端电压小于额定电压，则为欠复励。

- 如果串励绕组的作用适当，即在额定电流时端电压等于额定电压则为平复励。
- 差复励发电机的串励绕组为一个去磁磁势，负载增大时端电压迅速下降。



本章小结

- 主要分析了他励、并励、复励式直流发电机空载特性、外特性。
- 着重讨论了并励直流发电机的电压建立条件，他励和并励式直流发电机的外特性曲线随负载电流增加而下降的原因及其区别。
- 重点是：
 1. 并励直流发电机的建压条件；
 2. 并励式直流发电机负载时电压随电流增加而下降的原因。

第 4 章 直流电动机

本章概述：

- 本章介绍直流电动机(DC Motor)的启动、调速和制动方面的知识。同时涉及到直流电动机的机械特性。

4-1 直流电动机的启动

一、启动过程及其要求

- 电动机接到规定电源后，转速从 0 上升到稳态转速的过程称为启动(starting)过程。
- 合闸瞬间的启动电流很大可达 $(10 \sim 20) I_N$ $n=0$, $E_a = C_e \Phi n = 0$, $I_a = (U - E_a) / R_a = U/R_a$
- 这样大的启动电流会引起电机换向困难，并使供电线路产生很大的压降。因此必须采取适当的措施限制启动电流。
- 对启动的要求：
 - (1) 最初启动电流 I_{st} 要小；
 - (2) 最初启动转矩 T_{st} 要大；
 - (3) 启动设备要简单和可靠。

二、直流电动机的启动方法

a. 电枢回路串电阻启动

1. 最初启动电流： $I_{st} = U / (R_a + R_{st})$
2. 最初启动转矩： $T_{st} = C_T \Phi I_{st}$
3. 为了在限定的电流 I_{st} 下获得较大的启动转矩 T_{st} ，应该使磁通 Φ 尽可能大些，因此启动时串联在励磁回路的电阻应全部切除。
4. 有了一定的转速 n 后，电势 E_a 不再为 0，电流 I_{st} 会逐步减小，转矩 T_{st} 也会逐步减小。
5. 为了在启动过程中始终保持足够大的启动转矩，一般将启动器设计为多级，随着转速 n 的增大，串在电枢回路的启动电阻 R_{st} 逐级切除，进入稳态后全部切除。

6. 启动电阻 R_{st} 一般设计为短时运行方式，不容许长时间通过较大的电流。

b、他励电动机降压启动

1. 对于他励直流电动机，可以采用专门设备降低电枢回路的电压以减小启动电流。
2. 串励与复励电动机启动方法基本上与并励电动机相同，即采用电枢回路串电阻的方法减小启动电流。
3. 串励电动机绝对不允许空载启动。（详述见后）
4. 串电阻启动设备简单，投资小，但启动电阻上要消耗能量；电枢降压启动设备投资较大，但启动过程节能。

4-2 他励直流电动机工作特性

工作特性： $U=U_N$ ， $I_f=I_{fN}$ ，电枢回路不串电阻的情况下，负载 P_2 变化时，电机的转速 n 、转矩 T 、效率 η 分别随输出功率 P_2 变化的关系曲线。

一、转速特性 $n=f(P_2)$

$$U = C_e \Phi n + I_a R_a + 2 \Delta U_s$$

$$n = (U - 2 \Delta U_s - I_a R_a) / (C_e \Phi)$$

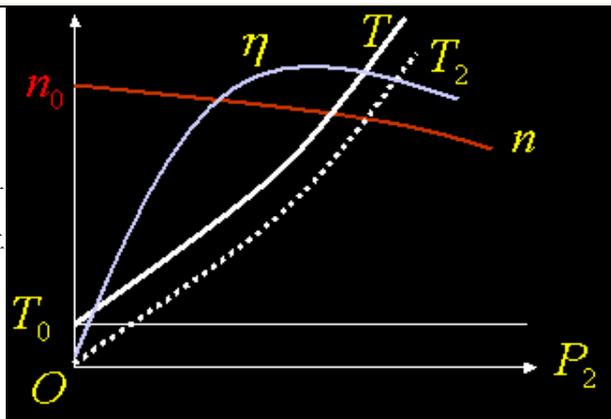
1. 影响转速 n 的因素有二：1) 电流 I_a 增大时电枢电阻压降 $I_a R_a$ 也增大，使转速趋于下降；2) 电流增大时，电枢反应的去磁作用使得磁通 Φ 下降，使转速趋于上升。
2. 一般电阻压降的影响较大，所以随着电流的增大，电动机转速降低。由于电阻 R_a 的值很小，所以转速下降比较平缓。电流增大，电压恒定时意味着 P_2 增大，所以 $n=f(P_2)$ 是一条较平的下降曲线（硬特性）。

二、转矩特性 $T = f(P_2)$

$$T = T_2 + T_0 = P_2 / (2\pi n / 60) + T_0$$

他励直流电动机在负载变化时，转速变化很小，可以近似认为 $T_0 = \text{常数}$ 。

- 如果不考虑转速的变化，则 $T=f(P_2)$ 为一条直线，考虑到转速略有下降，所以 $T=f(P_2)$ 为一条略微上翘的曲线。



三、效率特性 $\eta = f(P_2)$

可以根据本教材 2.3.2 小节介绍的方法计算。

4-3 他励直流电动机机械特性

• 机械特性： $n=f(T)$ 是指 $U=U_N$ ， $I_f=I_{fN}$ 时，改变负载的过程中，转速 n 随电磁转矩 T 变化的函数关系

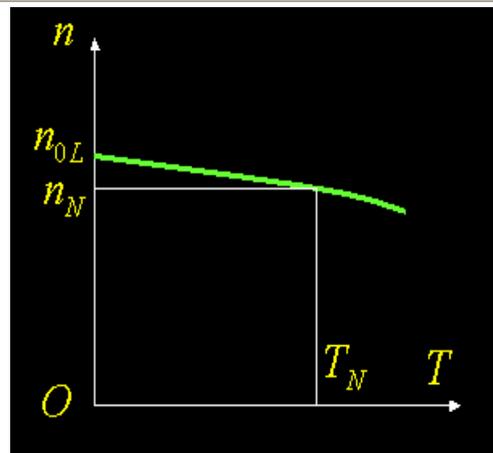
一、机械特性方程式 $n=f(T)$

- 用电枢回路总电阻考虑电刷接触压降。 $n = [U - (R_a + R_p) I_a] / (C_e \Phi)$
 $I_a = T / (C_T \Phi)$
 $n = U / (C_e \Phi) - (R_a + R_p) / (C_e C_T \Phi^2) \times T = n_{0L} - kT$
- 其中， $n_0 = U / (C_e \Phi)$ 为理想空载转速，而 $k = (R_a + R_p) / (C_e C_T \Phi^2)$ 为机械特性的斜率。

二、固有机机械特性 $n=f(T)$

- 改变三个量 U 、 Φ 、 R_p 中任意一个，可以改变机械特性曲线形状。
- $U=U_N$ ， $\Phi=\Phi_N$ ， $R_p=0$ 时的机械特性称为固有机机械特性。其方程为 $n = U / (C_e \Phi_N) - R_a T / (C_e C_T \Phi_N^2)$

- 由于 R_a 很小，转矩 T 增大时， n 下降很小，他励电动机的固有机机械特性是一条比较平的下降曲线。（即属硬特性）



二、人为（人工）机械特性 $n=f(T)$

- 改变三个量 U 、 Φ 、 R_p 之一而其他量不变时可以得到人为机械特性。

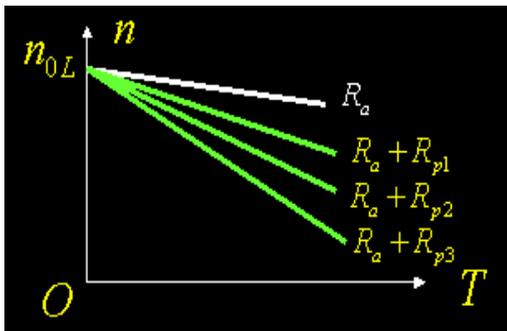


图 1

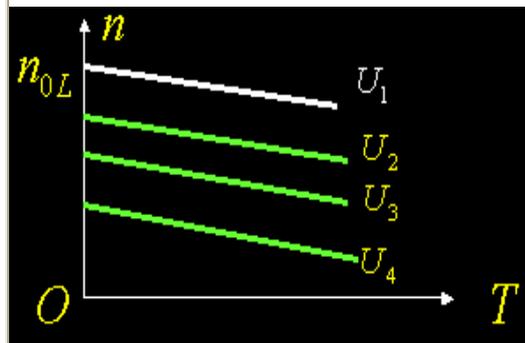


图 2

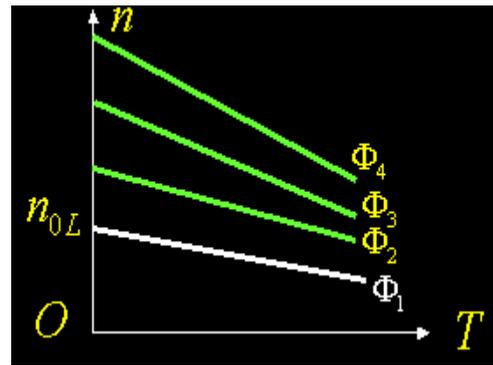
1) 电枢回路串电阻时的人为机械特性，图 1 所示 $n = U / (C_e \Phi_N) - (R_a + R_p) T / (C_e C_T \Phi_N^2)$ 对应于不同的 R_p 可以得到一簇斜率不同的曲线

2) 改变电枢电压的人为机械特性，图 2 所示 $n = U / (C_e \Phi_N) - R_a T / (C_e C_T \Phi_N^2)$ 斜率不变，理想空载转速 n_{0i} 不同的一簇平行线。（ $U < U_N$ ）

(3) 减少电动机气隙磁通的人为机械特性

$$n = U / (C_e \Phi) - R_a T / (C_e C_T \Phi^2)$$

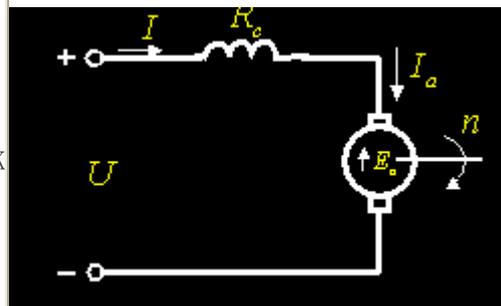
- Φ 减少时, n_{0L} 和 k 同时增大。



4-4 串励直流电动机的机械特性

$$n = U / (C_e \Phi_N) - R_a T / (C_e C_T \Phi_N^2)$$

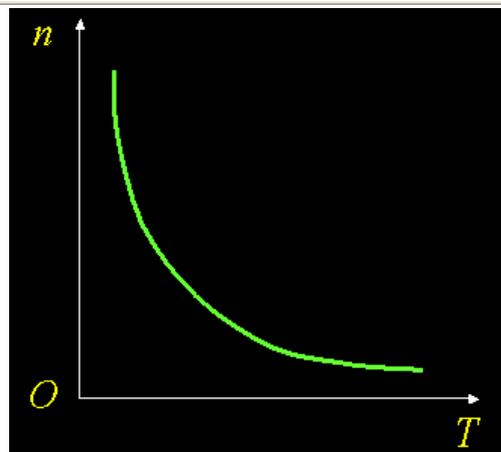
- 串励电动机的励磁绕组与电枢绕组串联, 所以 R_a 是电枢绕组与串励绕组电阻之和且串励电流 $I = I_a$, 故 $T = C_T \Phi I_a = C_T K I_a^2$, 解出 I_a 并带入上式可得:



$$n = \frac{U}{C_e K I_a} - \frac{R_a}{C_e K} = \frac{\sqrt{C_T K U}}{C_e K \sqrt{T}} - \frac{R_a}{C_e K}$$

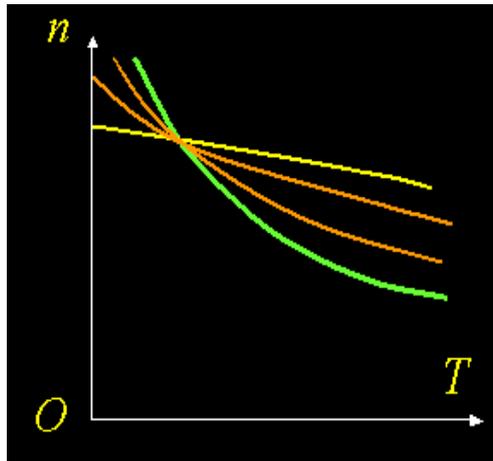
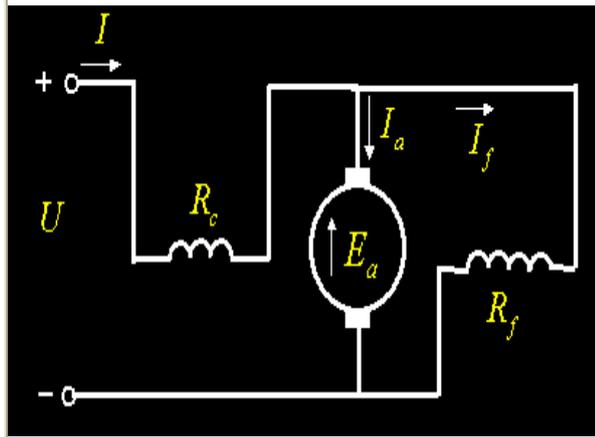
- 电压不变时, n 与 \sqrt{T} 反比, 当负载转矩增大时, 转速 n 下降很快。(软特性)
- 上述结论是在负载较小、电流较小电机不饱和的情况下得出的。
- 并励电动机的 $n = f(T)$ 是斜率很小的一次曲线。(硬特性)
- 当负载转矩很小时, T 也很小, n 会达到危险的高值, 所以串励电动机不允许空载启动和运行。

- 同样大的启动电流时, 串励电动机能产生更大的启动转矩, 常用于启动较为困难的场合。
- 串励电动机转矩增大时转速在减少, 功率增加缓慢, 故该电机过载能力较强。



4-5 复励直流电动机的机械特性

- 复励直流电动机既有并励绕组又有串励绕组。其机械特性介于并励和串励电动机之间。
- 如果并励绕组起主导作用，则特性接近并励电动机。如果串励绕组起主导作用，则接近串励电动机。
- 复励电动机空载时，由于有并励绕组接通，所以空载转速不会太高。



各种直流电动机机械特性比较：

4-6 负载的机械特性

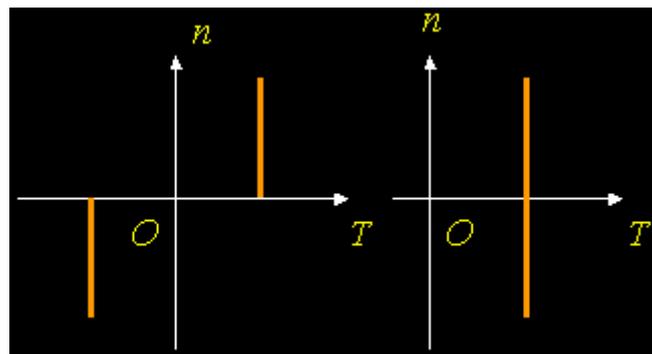
电动机拖动生产机械运转，构成一个电力拖动系统，其工作状况不仅取决于电动机的特性，同时也取决于作为负载的生产机械的特性。

生产机械的负载转矩与转速之间的关系称为负载的机械特性。由负载性质决定。

一、恒转矩负载

负载转矩的大小为常量，与转速无关。

- (1) 反抗性恒转矩负载：转矩方向总是和转速方向相反，永远是阻转矩。
- (2) 势能性恒转矩负载：转矩方向不随转速方向改变。如重力型负载。

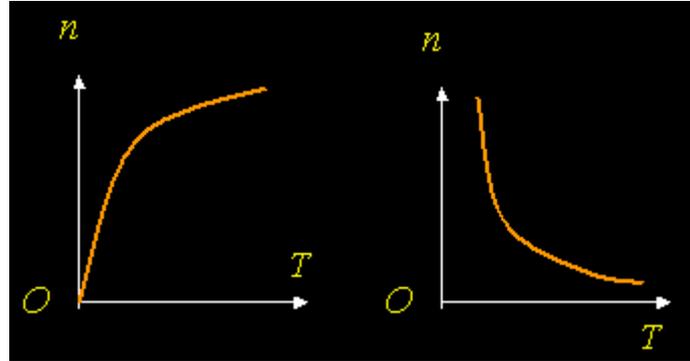


二、泵类负载

转矩的大小与转速平方成正比。例如：泵，风机等

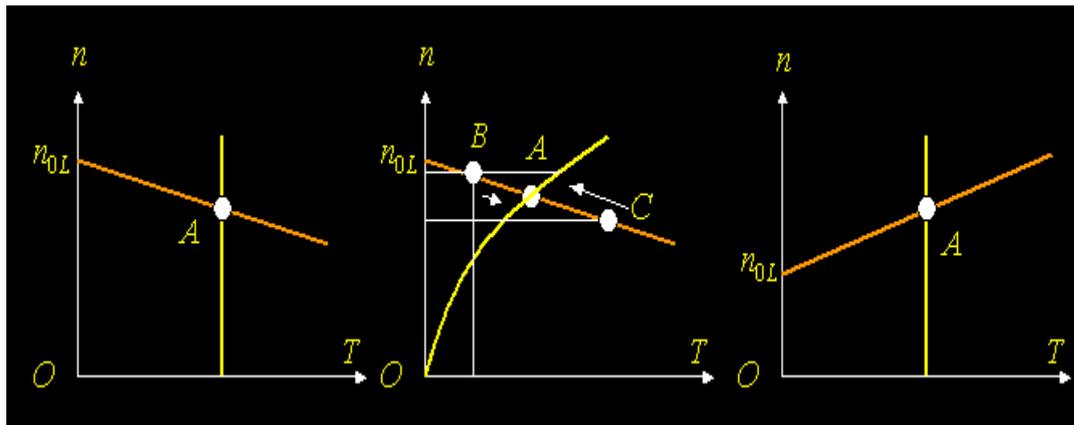
三、恒功率负载

负载转矩基本上与转速反比。例如：车床进刀。功率基本不变。



4-7 电动机稳定运行的条件

- 最简单的电力拖动系统就是电动机与生产机械轴对轴直接相连。
 - 实际情况复杂得多，但可以简化为简单情况来分析。
 - 电动机负载运行时，一般负载转矩 $T_2 \gg T_0$ ，故在拖动分析时忽略 T_0 。
 - 同轴相连时，电动机与负载的转速始终相等。
-
- 当电动机的转矩 $T > T_2$ 时，系统加速；反之，系统减速。 $T = T_2$ 时，系统转速稳定。也就是说在电动机的机械特性与负载的机械特性的交点处转速将不变。
 - 转速不变并不意味着电动机在该点就能稳定运行。
 - 判断工作点是否稳定的方法为：给该点施加干扰，使转速变化，然后取消干扰，如果转速能恢复，则该点为稳定点，反之为不稳定点。图中分别给出了稳定点与不稳定点的实例。



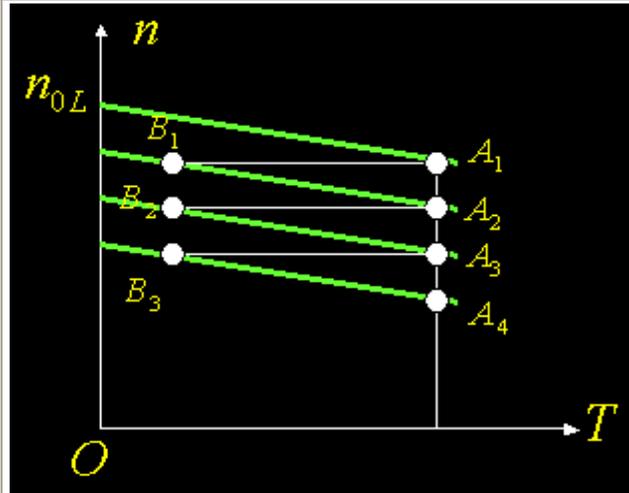
- 稳定运行的条件为：(1) 电动机与负载两条机械特性有交点；(2) 交点处应符合 $\frac{dT_2}{dn} > \frac{dT}{dn}$ 。

4-8 他励直流电动机调速方法

1. 拖动一定的负载运行，其转速由工作点决定。如果调节某些参数，则可以改变转速。
$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{[R_a + R_p]}{C_e C_T \Phi^2} \times T = n_{0L} - kT$$
2. 直流电动机的调速方法有三种：(1) 改变电枢回路外串电阻 R_{tj} ；(2) 改变励磁回路外串电阻 R_f 即改变磁通 Φ ；(3) 改变电枢电压 U 。
3. 三种调速方法实质上都是改变了电动机的机械特性曲线形状，使之与负载机械特性曲线的交点改变，以达到调速的目的。

一、改变电枢电压调速（设 T_z 为常数）

- 降低电枢电压时，电动机机械特性平行下移。负载不变时，交点也下移，速度也随之改变。

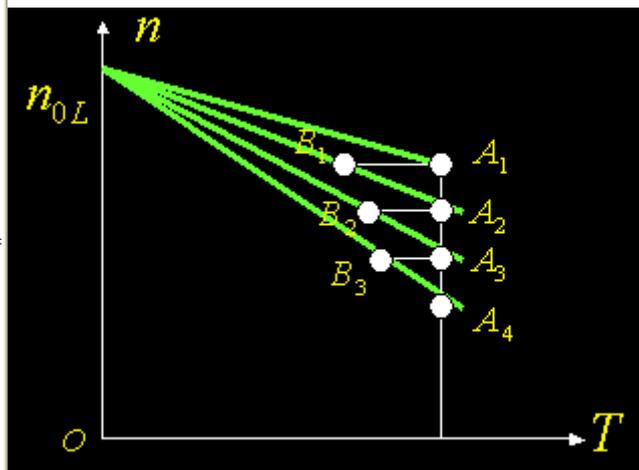


优点：调速后，转速稳定性不变、无级、平滑、损耗小。便于计算机控制。

缺点：需要专门设备，成本较高。（可控硅调压调速系统）

二、改变励磁电流调速（调节励磁电阻）

- （设 T_z 为常数）
- 增大励磁电阻即减少励磁电流时，磁通 Φ 减少，电动机机械特性 n_{0L} 点和斜率增大。负载不变时，交点也下移，速度也随之改变。

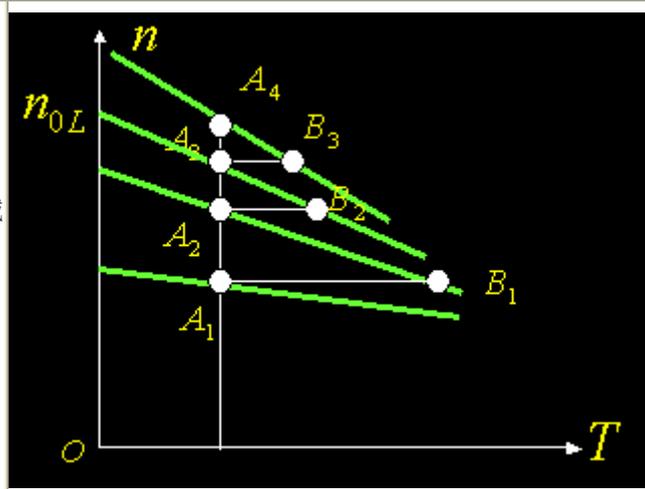


优点：励磁回路电流小约为 $(1 \sim 3)\% I_N$ ，损耗小，连续调速，易控制。

缺点：只能上调，最高转速受机械强度的限制，负载转矩大时调速范围小。

三、电枢回路串入调节电阻调速

- 调节电阻 R_a 增大时，电动机机械特性的斜率增大，与负载机械特性的交点也会改变，达到调速目的。



优点：设备简单、操作方便。

缺点：只能在低于固有机械特性的范围内调速，低转速时变化率较大，电枢电流较大，调速过程中有损耗。

四、改变电动机转向的方法

- 要改变电动机转向，就必须改变电磁转矩的方向。
- $T = C_T \Phi I_a$
- 根据电动机的工作原理，单独改变磁通方向（即通过改变励磁绕组连接）或者单独改变电枢电流的方向，均可以改变电磁转矩的方向。
- 故改变转向的方法：

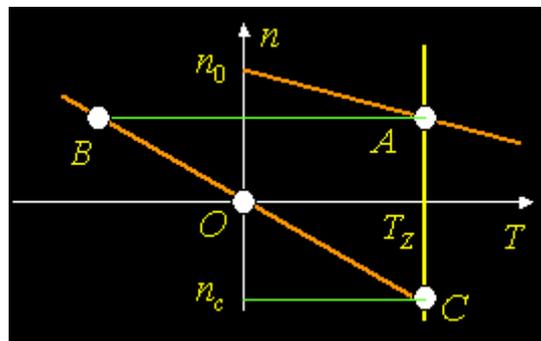
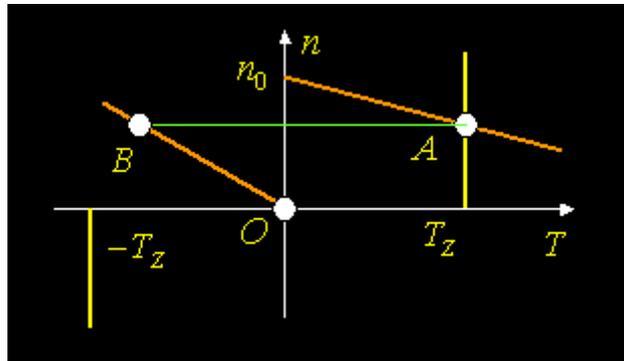
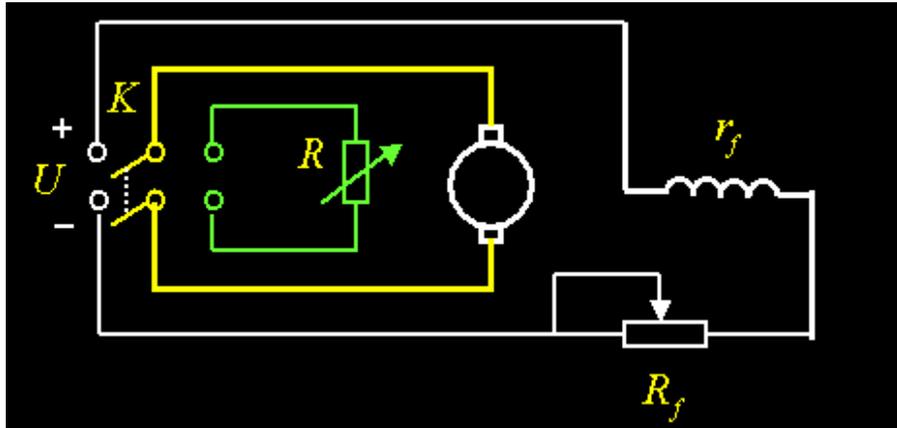
(1) 对于并励电动机，单独将励磁绕组引出端对调。

(2) 单独将电枢绕组引出端对调。对于复励电动机，应将电枢引出端对调或者同时将并励绕组和串励绕组引出段分别对调（维持加复励状态）。

4-9 直流电动机的制动 (Retardation)

- 制动问题：在生产过程中，经常需要采取一些措施使电动机尽快停转，或者从某高速降到某低速运转，或者限制位能性负载在某一转速下稳定运转，这就是电动机的制动问题。
- 实现制动有两种方法，机械制动和电磁制动。电磁制动是使电机在制动时使电机产生与其旋转方向相反的电磁转矩，其特点是制动转矩大，操作控制方便。
- 直流电动机的电磁制动类型有能耗制动、反接制动和回馈制动。

一、能耗制动



(1) 能耗制动过程 B-0

电机：他励； 负载：反抗性恒转矩负载

- 闸刀合向电源时，电动机处于正向电动机运行状态。
- 制动时将闸刀合向制动电阻。转子由于惯性继续旋转，感应电势 E_a 方向不变，电流方向改变了，电磁转矩 $T = C_T \Phi I_a$ 方向也随之改变成为制动转矩，使转速迅速下降。
- 电机处于发电状态，转子动能转化为电能消耗在制动电阻上。所以称为能耗制动。

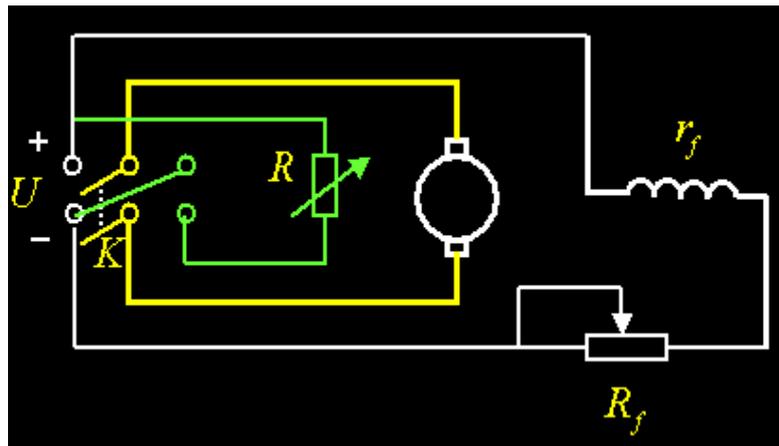
$$n = U / (C_e \Phi_N) - (R_a + R_p) T / (C_e C_T \Phi_N^2)$$

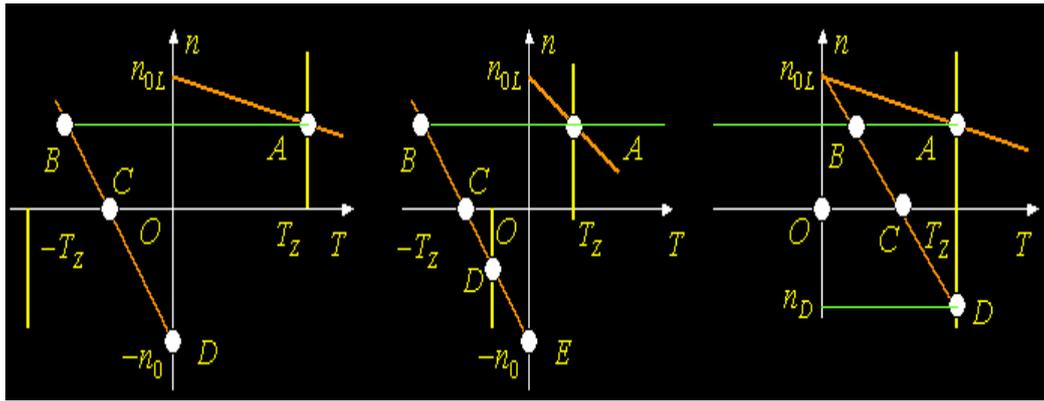
- 制动电阻越小，制动开始时产生的制动转矩就越大。
- 高速时能耗制动作用较大，低速时应配合机械制动装置使系统停掉。

(2) 能耗制动运行 0-C

- 电机：他励； 负载：势感性恒转矩负载
- 采用能耗制动时，工作点从 $A \rightarrow B \rightarrow 0$, $B \rightarrow 0$ 是能耗制动过程，到了 0 点后，如不采取其他制动措施，则系统会在负载转矩的作用下反转，工作点沿着能耗制动曲线到达 C 后才稳定运行。在 C 点，电磁转矩为负，与转速方向相反是制动转矩。在 C 点的运行方式称为能耗制动运行。

二、反接制动





(1) 电压反接制动

- 他励电动机拖动反抗性恒转矩负载运行。
- 通过反接闸刀把电源突然反接，同时在电枢支路串入限流电阻 R 。

$$n = -U_N / (C_e \Phi_N) - (R_a + R) T / (C_e C_T \Phi_N^2)$$

- 如图所示，工作点 $A \rightarrow B \rightarrow C$ ，在 C 点时， $n=0$ 。这时应将电源切掉。在 $B \rightarrow C$ 的过程中转速为正，电磁转矩为负，起制动作用。如果在 C 点时，电动机的转矩大于负载转矩（绝对值）而没有切除电源，则电动机在电磁转矩作用下将反向起动，作为反转的电动机运行。如图中的 D 点。
- 对于频繁正反转的电力拖动系统，常采用这种先反接制动停车，再反向起动的运行方式，达到迅速制动并反转的目的。对于要求准确停车的系统，采用能耗制动较为方便。

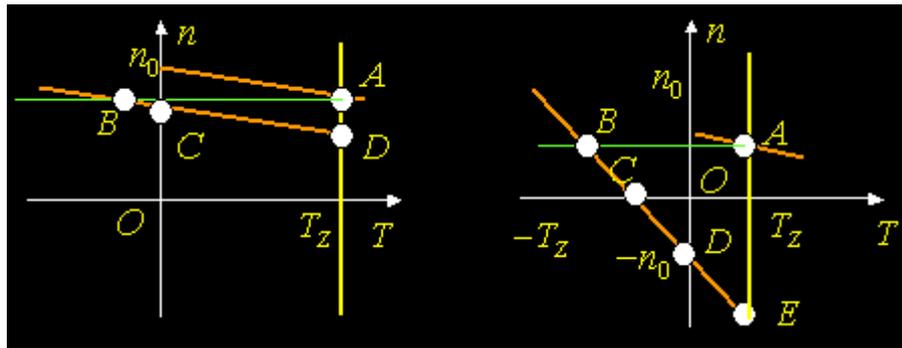
(2) 电势反接制动（倒拉反转运行）

- 他励电动机拖动位能性恒转矩负载运行。电枢支路突然传入较大的电阻，则工作点 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ ， D 点位于第 iv 象限，转速为负，电磁转矩为正，属于制动运行。在 C 点后，负载转矩大于电磁转矩，转速反向，感应电势也反向，所以称为电势反接制动。
- 这种运行方式通常用在起重设备低速下放物体的场合。电动机的电磁转矩起制动作用，限制了重物的下放速度。

三、回馈制动

(1) 正向回馈制动

- 他励直流电动机通过降低电压来减速时，若电压下降幅度较大，会使得工作点经过第 II 象限，如图中的 BC 段，转速为正而电磁转矩为负，电动机运行于制动状态。在这一过程中，由于电源电压下降，使得 $E_a > U$ ，电流方向改变，电能从电动机回馈到电源。
- 在电力机车下坡时，由于重力作用使得电动机转速高于原来的空载转速， E_a 增大，超过 U 以后，电流也会反向，进入正向回馈制动状态。



(2) 反向回馈制动

- 他励电动机拖动势能性恒转矩负载运行。

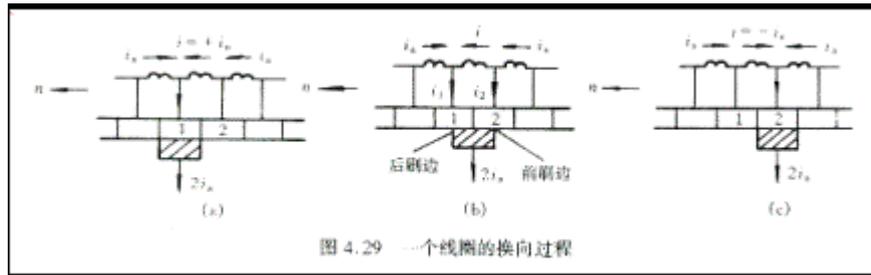
反接电源电压并给电枢支路串入限流电阻。工作点将会稳定在第 iv 象限。在 D 点，电动机的转速高于理想空载转速， $E_a > U$ ，电流流向电源，属于反向回馈制动。

- 反向回馈制动常用于高速下放重物时限制电机转速。

4-10 直流电机的换向

- 旋转着的电枢某元件从一个支路转换到另外一个支路时，元件中的电流变化的过渡过程称为换向过程。

一、换向过程分析



- 电刷是支路的分界线；我们研究电刷与 1、2 片换向片分别和同时接触时的情况。

换向刚开始时，元件仍属于右边支路，其电流为 $+i_a$ （右→左）；

处于换向过程中时，元件被电刷短路，电流大小和方向处于变化的过程中；

换向结束时，元件进入左边支路，其电流已经由 $+i_a$ 变为 $-i_a$ （左→右）。

一个元件的电流换向过程所需的时间就称为换向周期 T_h ，即一个换向片通过电刷所用的时间。换向元件的电流从 $+i_a$ 变到 $-i_a$ 所用的时间即为一个换向周期。 $T_h=0.5\sim 2\text{ms}$

换向问题十分复杂，换向不良会在电刷与换向片之间产生火花。当火花大到一定程度时可能损坏换向器表面，从而使电机不能正常工作。

- 产生火花的原因除电磁原因外，还有电学、工艺、电热等因素，至今尚无很成熟的理论。

二、换向元件中的电势

1. 电抗电势 e_x

- 一般，换向周期非常短暂，电流的变化会在绕组元件中产生自感和互感电势，两者的合成电势称为电抗电势，用 e_x 表示。
- 根据楞次定理，电抗电势的性质总是阻碍线圈中电流的变化，亦即 e_x 的方向企图与换向前的电流方向相同。或者说电抗电势是阻碍换向的。

- 电抗电势大小反比于换向周期。

2. 电枢反应电势 e_a

- 换向元件切割电枢反应磁场，从而产生了电枢反应电势。其方向与 e_a 相同，即其性质也是阻碍换向的。其大小为：
$$E_a = 2W_y B_a I_a$$
3. 换向极电势

e_x

- 换向极电势是由于换向元件切割换向磁极感应的电势，换向磁极是为改善换向而设置的。其方向企图与换向后的电流方向相同，或者说换向极电势是帮助换向的。

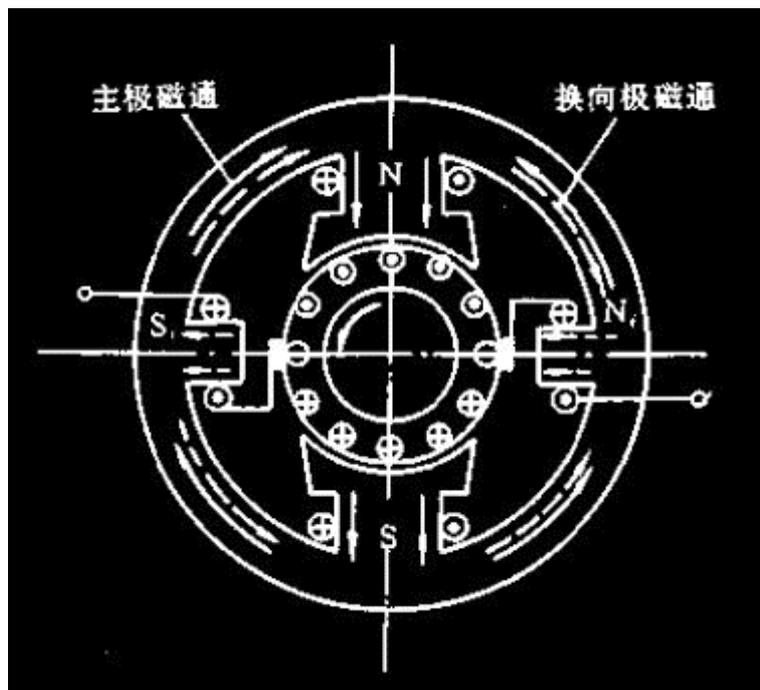
三、影响换向的因素

- 电磁因素：电抗电势和切割电势阻碍换向. 机械、化学、材料等原因
- 机械方面的原因如：换向器偏心、片间绝缘凸出、某个换向片凸出、电刷与换向器表面接触不好等等；化学方面：高空缺氧、缺水、某些化工厂的电机，都可能破坏换向器表面的氧化亚铜薄膜而产生火花。

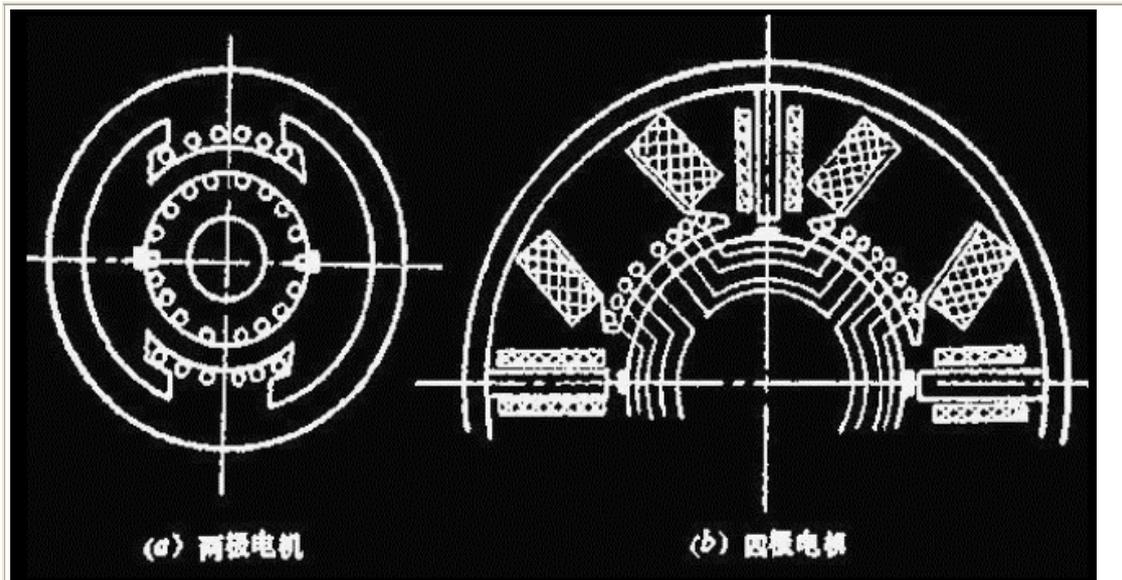
四、改善换向的方法

- 1. 装换向极：在换向元件处产生一个磁势以抵消该处的电枢反应磁势。再产生一个磁密，换向元件切割该磁密时产生一个能抵消电抗电势的电势。换向极绕组应与电枢绕组串联。

换向磁极的极性判断原则：对直流发电机是：*顺转向看*与主极极性相同；对直流电动机是：*逆转向看*与主极极性相同。



- 2. 装补偿绕组：装置在磁极表面的槽内，产生抵消电枢反应的磁势，与电枢绕组串联。



- 3. 移动电刷位置：对于未装换向极的小型串励直流电机，把电刷从几何中性线（与处于几何中性线处的导体接触）移动一个适当的小角度，使得换向元件产生的感应电势与换向后的电流方向相同。但是电刷移动后，会产生直轴去磁电枢反应，导致电压有些降低、转速稍有升高，可能引起运行不稳定，故此方法旨在小容量电机中采用。

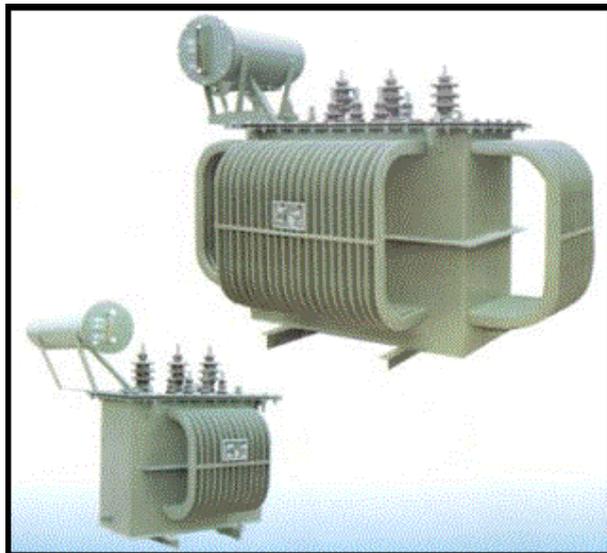
判断电刷移动的方向：对直流发电机是顺转向移动一个小角度；

- 对直流电动机是逆转向移动一个小角度。

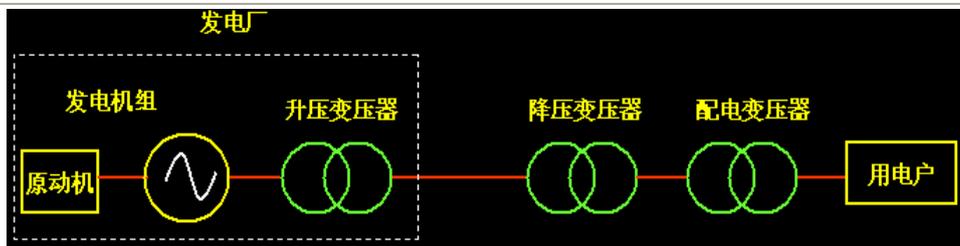
5-1 变压器的用途和工作原理

• 变压器(Transformer)是一种静止电机，它可以将一种电压形式的电能转换为另一种电压形式的电能。

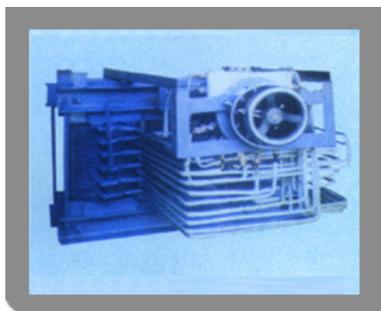
一、变压器分类及用途



电力变压器：电力系统中传输和分配电能用的变压器等。

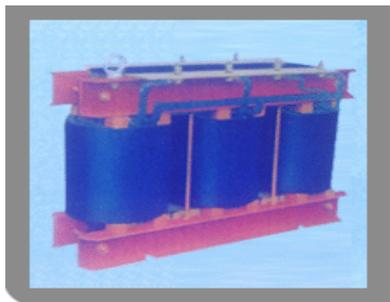


• 问题 5-1 远距离输电为什么必须采用高压输电？



电炉变压器(专用)，
给电炉(如炼钢炉)供电。

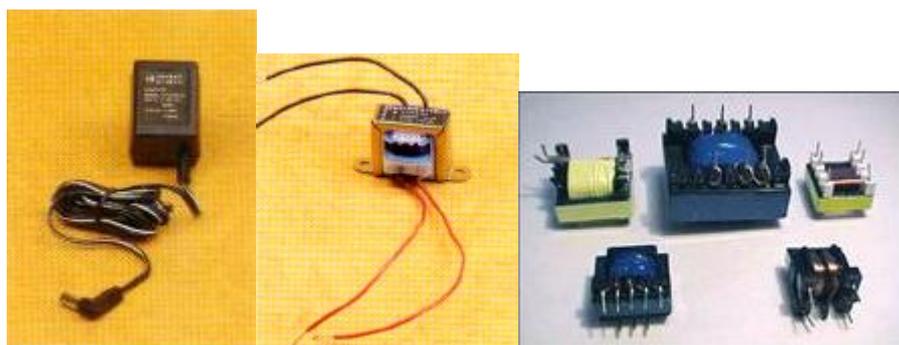
电焊变压器(专用)，
给电焊机供电。



整流变压器(专用):
给直流电力机车供电。
实验变压器(互感器)。

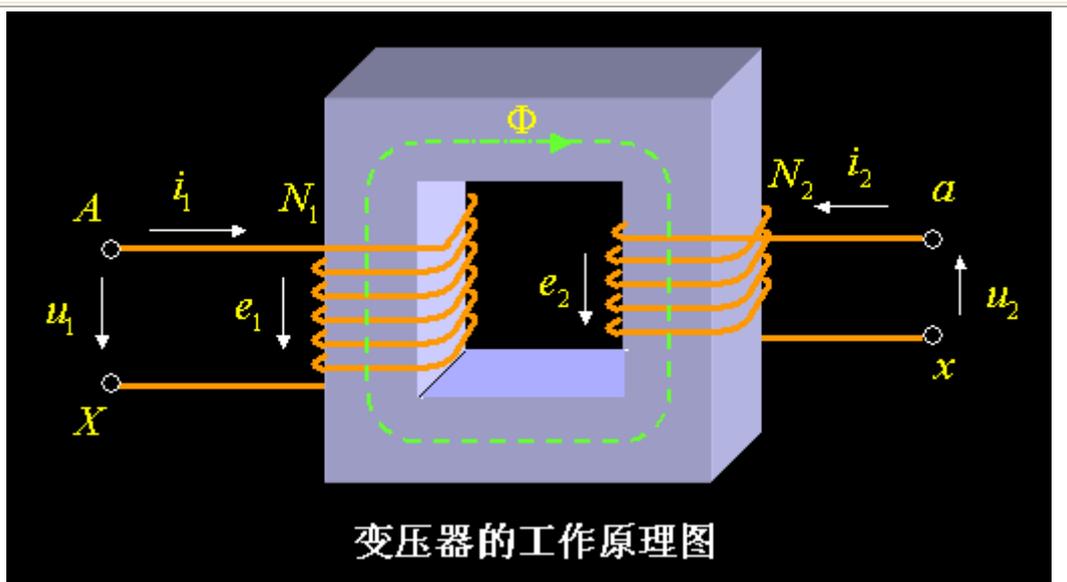


仪用变压器。



控制变压器：用在电子线路中。

二、变压器的工作原理



(1) 原理图

- 一个铁心：提供磁通的闭合路径。
- 两个绕组：一次侧绕组（原边） N_1 ，二次侧绕组（副边） N_2 。

(2) 工作原理

1. 当一次绕组接交流电压后，就有激磁电流 i_0 存在，该电流在铁心中可产生一个交变的主磁通 Φ 。
2. Φ 在两个绕组中分别产生感应电势 e_1 和 e_2

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

3. 若略去绕组电阻和漏抗压降，则以上两式之比为：

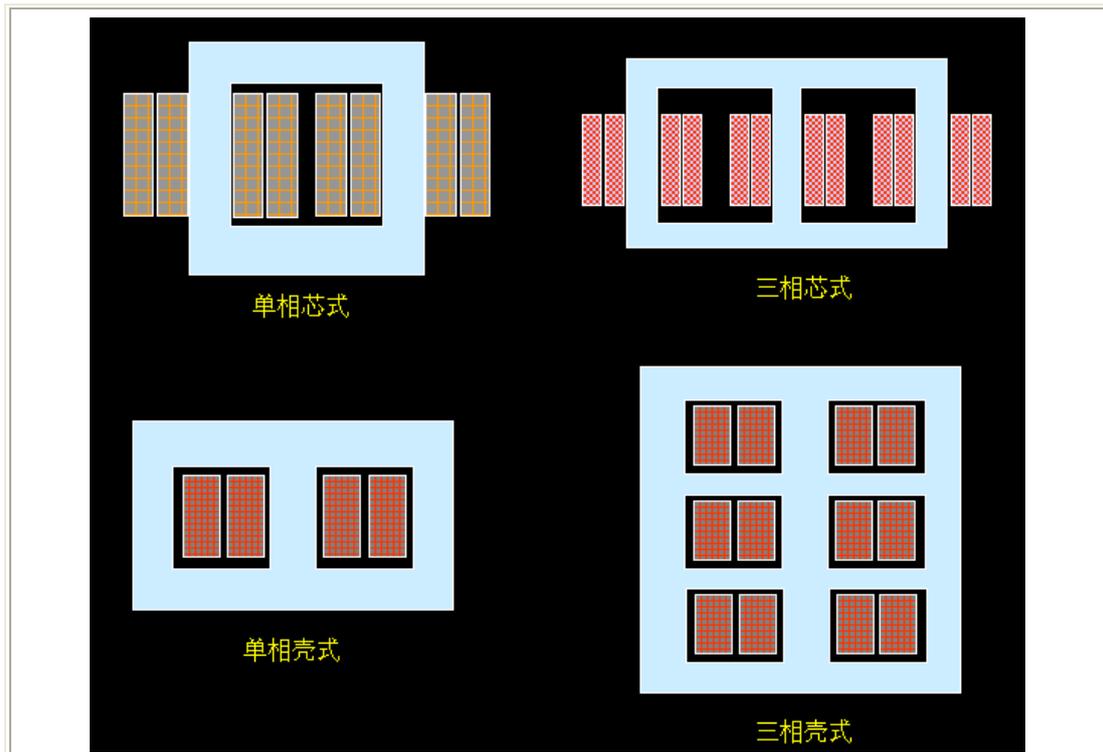
$$U_1/U_2 \approx (-e_1)/(-e_2) = N_1/N_2$$

4. $U_1/U_2 \approx (-e_1)/(-e_2) = N_1/N_2 = k$, k 定义为变压器的变比。即： $U_1/U_2 = N_1/N_2$ 从此式可以看出，若固定 U_1 ，只要改变匝数比即可达到改变电压的目的了，即：
 - 若使 $N_2 > N_1$ ，则为升压变压器 (step-up transformer)；
 - 若使 $N_2 < N_1$ ，则为降压变压器 (step-down transformer)。

5-2 变压器的类型和结构

一、类型

- 除了按以上用途分类外，变压器还可以按相数、绕组数目、铁心形式、冷却方式等特征分类。
- 按相数分：单相、三相、多相变压器等
- 按绕组分：双绕组、自耦、三绕组、多绕组变压器
- 铁心形式：心式、壳式变压器
- 冷却方式：干式、油浸式变压器等

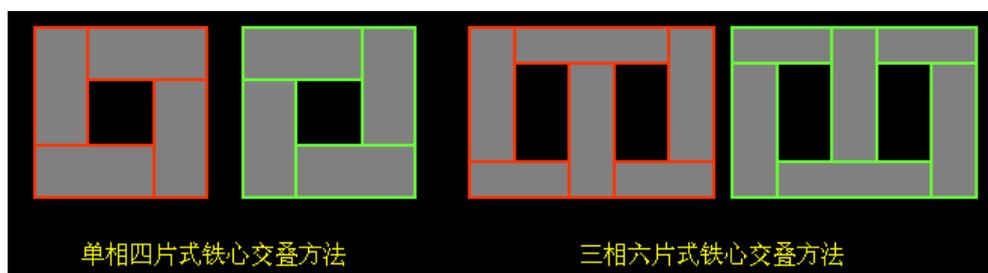


二、结构(电力变压器)

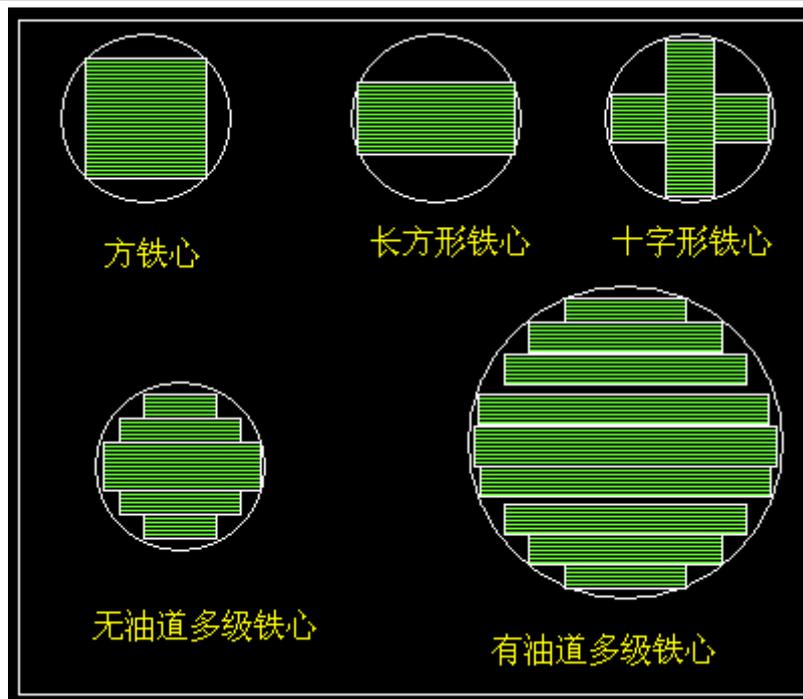
- 变压器主要部件是绕组和铁心(器身)。
- 绕组是变压器的电路，铁心是变压器的磁路。二者构成变压器的核心即电磁部分。
- 除了电磁部分，还有油箱、冷却装置、绝缘套管、调压和保护装置等部件。

(1) 铁心

- 型式：心式变压器(结构简单工艺简单应用广泛)；
壳式变压器(用在小容量变压器和电炉变压器)。
- 材料：一般由 0.35mm 或 0.5mm 冷轧(也用热轧)硅钢片叠成。
- 铁心交叠：相邻层按不同方式交错叠放，将接缝错开。偶数层刚好压着奇数层的接缝，从而减少了磁阻，便于磁通流通。



- 铁心柱截面形状：小型变压器做成方形或者矩形；大型变压器做成阶梯形。容量大则级数多。叠片间留有间隙作为油道(纵向或横向)。(纵向油道见课本图 5.13)

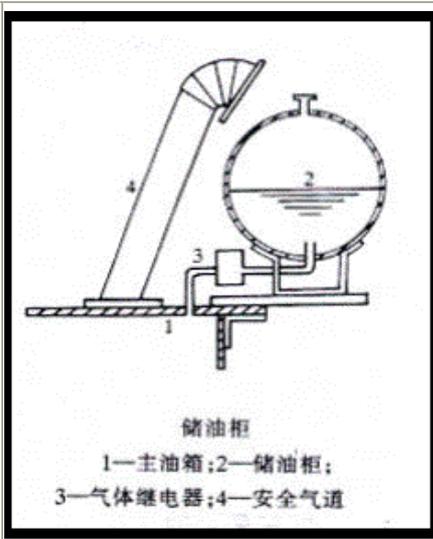


(2) 绕组

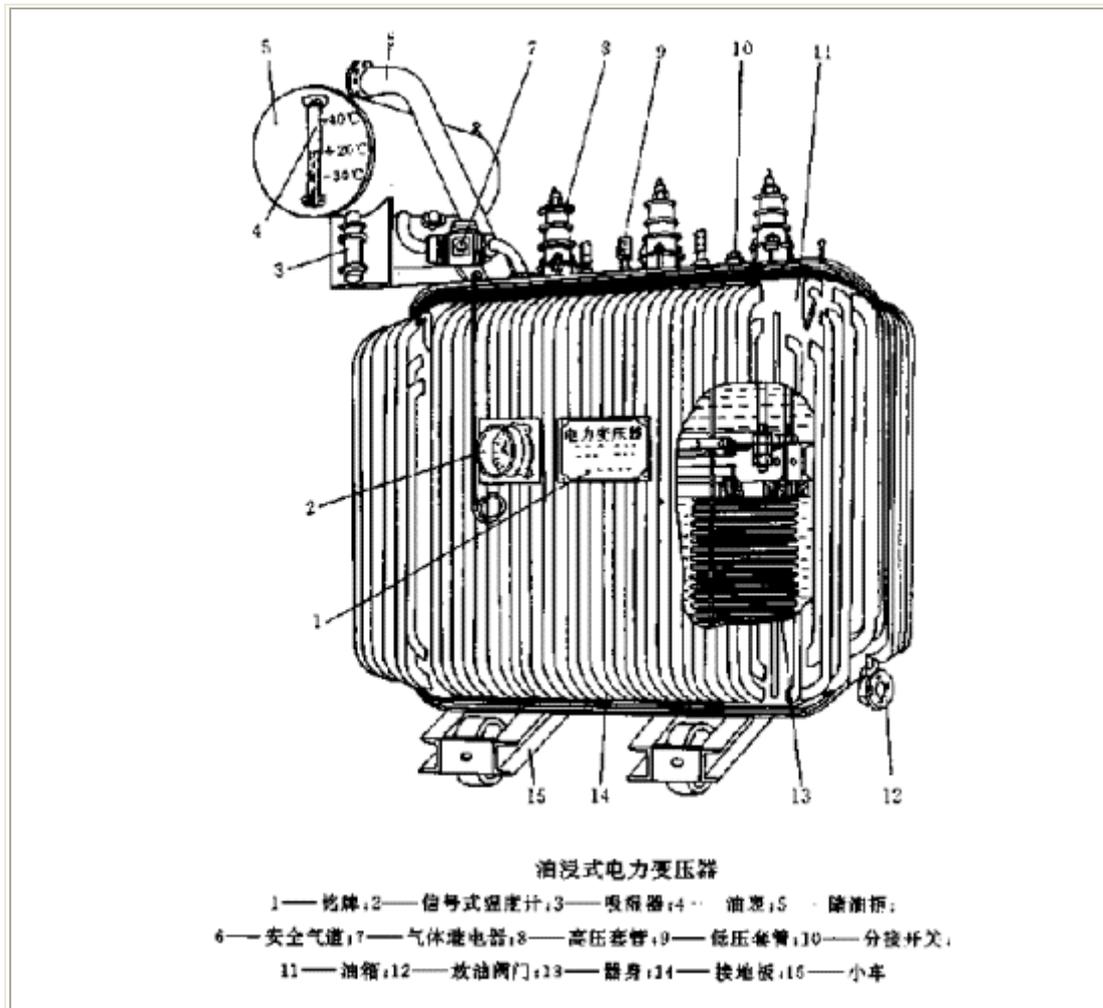
- 一般用绝缘扁铜线或圆铜线在绕线模上绕制而成。
- 绕组套装在变压器铁心柱上，一般低压绕组在内层，高压绕组套装在低压绕组外层，以便于提高绝缘性能。

(3) 油、油箱、冷却及安全装置

- 器身装在油箱内，油箱内充满变压器油。
- 变压器油是一种矿物油，具有很好的绝缘性能。变压器油起两个作用：①在变压器绕组与绕组、绕组与铁心及油箱之间起绝缘作用。②变压器油受热后产生对流，对变压器铁心和绕组起散热作用。
- 油箱有许多散热油管，以增大散热面积。
- 为了加快散热，有的大型变压器采用内部油泵强迫油循环，外部用变压器风扇吹风或用自来水冲淋变压器油箱。这些都是变压器的冷却装置。



- 1. 油箱；2. 储油柜；3. 气体继电器；4. 为安全气道。
- 变压器运行时产生热量，使变压器油膨胀，并流进储油柜中。
- 储油柜使变压器油与空气接触面变小，减缓了变压器油的氧化和吸收空气水分的速度。从而减缓了油的变质。
- 故障时，热量会使变压器油汽化，触动气体继电器发出报警信号或切断电源。
- 如果是严重事故，变压器油大量汽化，油气冲破安全气道管口的密封玻璃，冲出变压器油箱，避免油箱爆裂。



5-3 变压器的额定值 (Rating)

(1) 额定电压 U_{1N}/U_{2N}

- 单位为 V 或者 kV。 U_{1N} 为正常运行时一次侧应加的电压。 U_{2N} 为一次侧加额定电压、二次侧处于空载状态时的电压。
- 相变压器中，额定电压指的是线电压。

(2) 额定容量 S_N

- 位为 VA、kVA、MVA
- S_N 为变压器的视在功率。通常把变压器一、二次侧的额定容量设计为相同。

(3) 额定电流 I_{1N}/I_{2N}

1. 单位为 A、kA。是变压器正常运行时所能承担的电流，在三相变压器中均代表线电流。

2. 对单相变压器：

$$I_{1N} = S_N / U_{1N}$$

$$I_{2N} = S_N / U_{2N}$$

3. 对三相变压器：

$$I_{1N} = S_N / [\sqrt{3} U_{1N}]$$

$$I_{2N} = S_N / [\sqrt{3} U_{2N}]$$

(4) 额定频率 f_N

- 单位为 Hz， 工频用 $f_N=50\text{Hz}$

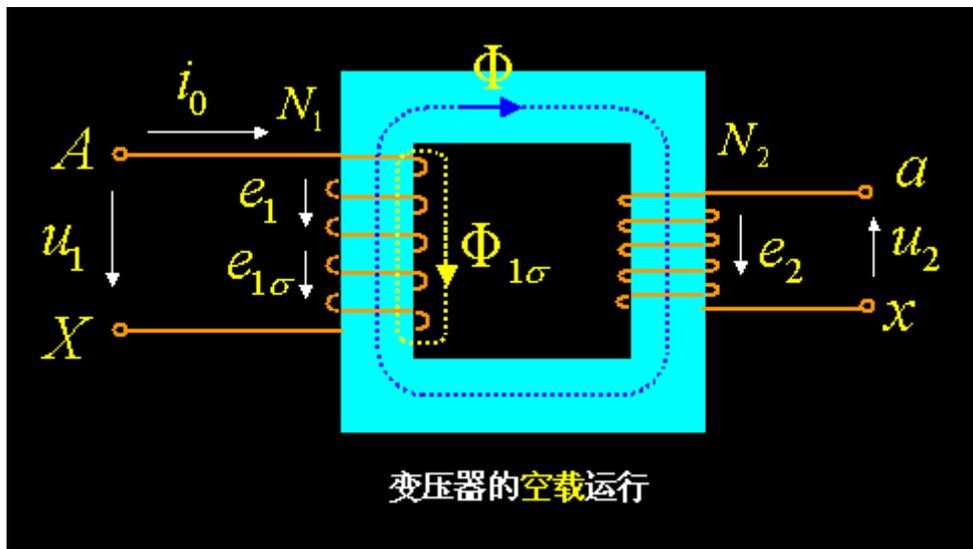
此外，铭牌上还会给出三相联结组以及相数 m 、阻抗电压 U_k 、型号、运行方式、冷却方式和重量等数据。

第 6 章 变压器的基本理论

1. 分析变压器内部的电磁过程。
2. 分析电压、电流、磁势、磁通、感应电势、功率、损耗等物理量之间的关系。
3. 建立变压器的等效电路模型和相量图。
4. 利用等效电路计算分析变压器的各种性能。

6-1 变压器的空载运行

一. 空载运行物理分析



- 一次侧接额定电压 U_N ，二次侧开路的运行状态称为空载运行 ($i_2=0$)。
- 空载时一次侧绕组中的电流 i_0 为空载(或叫励磁)电流，磁势 $F_0=I_0N_1$ 叫励磁磁势。
- F_0 产生的磁通分为两部分，大部分以铁心为磁路(主磁路)，同时与一次绕组 N_1 和二次绕组 N_2 匝链，并在两个绕组中产生电势 e_1 和 e_2 ，是传递能量的主要媒介，属于工作磁通，称为主磁通 Φ 。
- 另一部分磁通仅与原方绕组匝链，通过油或空气形成闭路，属于非工作磁通，称为原方的漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 。
- 铁心由高导磁硅钢片制成，导磁系数 μ 为空气的导磁系数的 2000 倍以上，所以大部分磁通都在铁心中流动，主磁通约占总磁通的 99% 以上，而漏磁通占总磁通的 1% 以下。
- 问题 6-1：主磁通和漏磁通的性质和作用是什么？
- 规定正方向：电压 U_1 与电流 I_0 同方向，磁通 Φ 正方向与电流 I_0 正方向符合右手螺旋定则。电势 E 与 I_0 电流的正方向相同。
- 由于磁通在交变，根据电磁感应定律：

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_{1\sigma} = -N_1 d\Phi_{1\sigma}/dt$$

二. 电势公式及电势平衡方程式推导

- 空载时, 主磁通 Φ 在一次侧产生感应电势 E_1 , 在二次侧产生感应电势 E_2 , 一次侧的漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 在一次侧漏抗电势 $E_{1\sigma}$ 。
- 假设磁通为正弦波 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ 则

$$e_1 = -N_1 d\Phi/dt = -N_1 d\Phi_m \sin \omega t/dt$$

$$= -N_1 \Phi_m \omega \cos \omega t = N_1 \Phi_m \omega \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$= E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$
- 电势在相位上永远滞后于它所匝链的磁通 90° 。
- 其最大值: $E_{1m} = \omega N_1 \Phi_m = 2\pi f N_1 \Phi_m$
 其有效值: $E_1 = E_{1m}/\sqrt{2}$

$$= 2\pi f N_1 \Phi_m / 1.414$$

$$= 4.44 f N_1 \Phi_m$$
- 这就是电机学最重要的“4.44”公式。说明了感应电势 E_1 与磁通 Φ_m 、频率 f 、绕组匝数 N_1 成正比。
- 同样可以推出 e_2 和 $e_{1\sigma}$ 的公式:

$$e_2 = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$E_{2m} = N_2 \Phi_m \omega$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

$$e_{1\sigma} = -N_{1\sigma} d\Phi_{1\sigma}/dt$$

$$= N_{1\sigma} \Phi_{1\sigma m} \omega \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$E_{1\sigma m} = \omega N_{1\sigma} \Phi_{1\sigma m}$$

$$E_{1\sigma} = 4.44 f N_{1\sigma} \Phi_{1\sigma m}$$
- 由于漏磁路的磁导率 μ_σ 为常数, $\Phi_{1\sigma m} = L_{1\sigma} I_0$, 故 $E_{1\sigma} = 4.44 f N_{1\sigma}^2 L_{1\sigma} I_0 = X_{1\sigma} I_0$, 即 $E_{1\sigma}$ 可用漏抗压降的形式表示。
- 以上推导涉及到的电磁量均为正弦变化, 可以用相量来表示。用相量时可同时表示有效值和相位。 $E_{1\sigma} = -jX_{1\sigma} I_0$
- 考虑到一次侧绕组的电阻压降后, 其电势平衡方程为 $U_1 = -E_1 - E_{1\sigma} + R_1 I_0 = -E_1 + jX_{1\sigma} I_0 + R_1 I_0$

$$= -E_1 + I_0 Z_1$$
- 二次侧无电流, 故: $E_2 = U_2$
- 对于一次侧来说, 电阻压降和漏抗压降都很小。所以 $U_1 \approx -E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$, 可见变压器的磁通主要由电源电压 U_1 、频率 f 和一次侧绕组的匝数 N_1 决定。在设计时, 若电压 U_1 和频率 f 给定, 则变压器磁通由匝数 N_1 决定。对于制成运行的变压器, 其磁通 Φ 可以由电压 U_1 和频率 f 控制。
- 问题 6-2: 220V、50Hz 的变压器空载接到 220V、25Hz 的电源上, 后果如何?
- 问题 6-3: 220V、50Hz 的变压器空载接到 220 直流电源上, 后果如何?

三. 变压器的变比 k 和电压比 K

a) 变比 k : 指变压器 1、2 次绕组的电势之比。

1. $k = E_1/E_2 = (4.44 f N_1 \Phi_m) / (4.44 f N_2 \Phi_m) = N_1/N_2$
2. 变比 k 等于匝数比。

3. 一次绕组的匝数必须符合一定条件:

$$U_1 \approx 4.44 f N_1 \Phi_m \approx 4.44 f N_1 B_m S$$

$$N_1 \approx U_1 / 4.44 f B_m S$$

4. B_m 的取值与变压器性能有密切相关。

$$B_m \approx \text{热轧硅钢片 } 1.11 \sim 1.5 \text{T}; \text{ 冷轧硅钢片 } 1.5 \sim 1.7 \text{T}$$

b) 电压比 K : 指三相变压器的线电压之比

5. 在做三相变压器联结绕组试验时用到电压比 K 进行计算。

$$K = (U_{AB}/U_{ab} + U_{BC}/U_{bc} + U_{CA}/U_{ca}) / 3$$

四. 空载运行时的等效电路和相量图

(1) 励磁电流/铁耗电阻、励磁阻抗

- 空载运行时, 电流 i_0 分为两部分, 一部分 i_{0w} 纯粹用来产生磁通, 称为磁化电流, 与电势 E_1 之间的相位差是 90° , 是一个纯粹的无功电流。另一部分 i_{0r} 用来供给损耗, 是一个有功电流。 $I_0 = I_{0w} + I_{0r}$

$$-E_1 = I_0 R_m + j I_0 X_m = I_0 Z_m$$

- I_0 是励磁过程必须的电流(包括磁化电流/有功电流), 称为励磁电流。

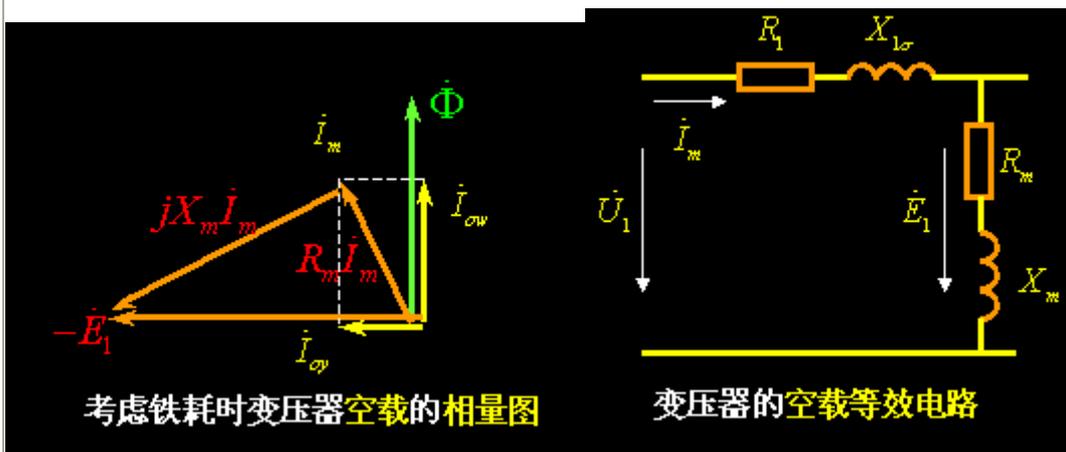
- X_m 的物理意义是:

励磁电抗 X_m 是主磁通 Φ 的电抗, 反映了变压器(电机)铁心的导磁性能, 代表了主磁通对电路的电磁效应。

R_m 是用来代表铁耗的等效(虚拟的)电阻, 称为励磁电阻。 $R_m + jX_m = Z_m$ 则称为励磁阻抗。

(2) 空载时的等效电路

- 用一个阻抗 ($R_m + jX_m$) 表示主磁通 Φ 对变压器的作用, 用另一个阻抗 ($R_1 + jX_{1\sigma}$) 一次侧绕组电阻 R_1 和漏抗 $X_{1\sigma}$ 的作用, 即可得到空载时变压器的等效电路。
- R_1 和 $X_{1\sigma}$ 受饱和程度的影响很小, 基本上保持不变。
- R_m 和 X_m 是随着饱和程度的增大而减小。在实际应用中要注意到这个结论。
- 变压器正常工作时, 由于电源电压变化范围小, 铁心中主磁通的变化不大, 励磁阻抗 Z_m 也基本不变。



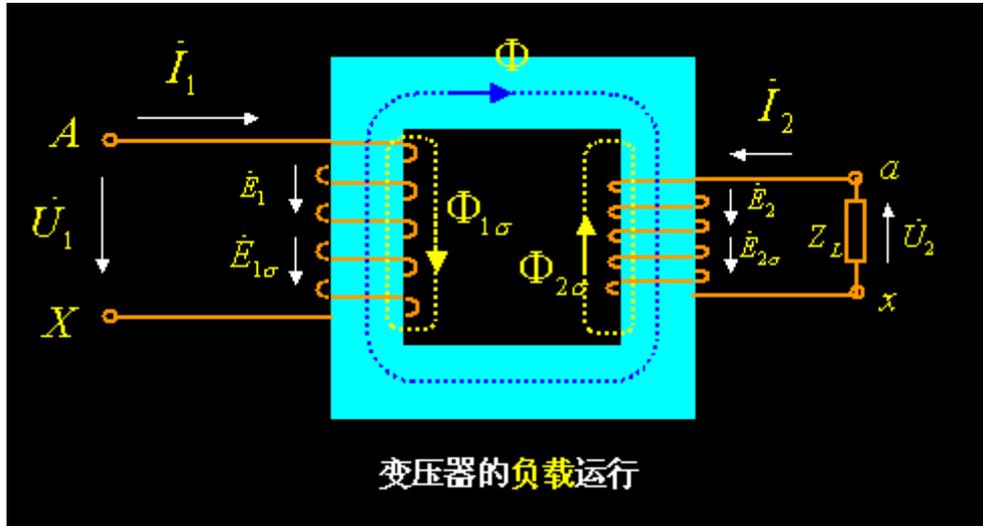
6-2 变压器的负载运行

一. 负载运行

- 一次侧接电源 U_1 , 二次侧接负载 Z_L , 此时二次侧流过电流 I_2 。一次侧电流不再是 I_0 , 而

是变为 I_1 ，这就是变压器的负载运行情况。

- 负载后，二次侧电流产生磁势 $F_2=N_2I_2$ ，该磁势力图改变磁通 Φ ，而磁通是由电源电压决定的，也就是说 Φ 基本不变。
- 要维持 Φ 不变，一次绕组的电流将由原来的 I_0 变为 I_1 。 I_1 产生磁势 $F_1= I_1N_1$ ， F_1 与 F_2 共同作用产生 Φ ， F_1+F_2 的作用相当于空载磁势 F_0 ，也即励磁磁势 F_m 。



二. 磁势平衡方程式

$$1. \quad F_1+F_2=F_m \approx F_0$$

$$I_1N_1+I_2N_2=I_mN_1 \approx I_0N_1$$

$$I_1=I_0+(-I_2/k)=I_0+I_{1L}$$

$I_{1L}=-I_2/k$ 为负载后一次侧增加的电流。

$$I_{1L}+I_2/k=0$$

2. 负载后，一次侧绕组中的电流由两个分量组成，一个是其负载分量 I_{1L} ，另一个是产生磁通的励磁分量 I_0 ， I_{1L} 产生的磁势与二次侧电流产生的磁势大小相等，方向相反，互相抵消。

3. 在满载时， I_0 只占 I_{1L} 的 (2—8) %，有时可将 I_0 忽略，即： $I_1+I_2/k=0$

$$I_1/I_2=1/k$$

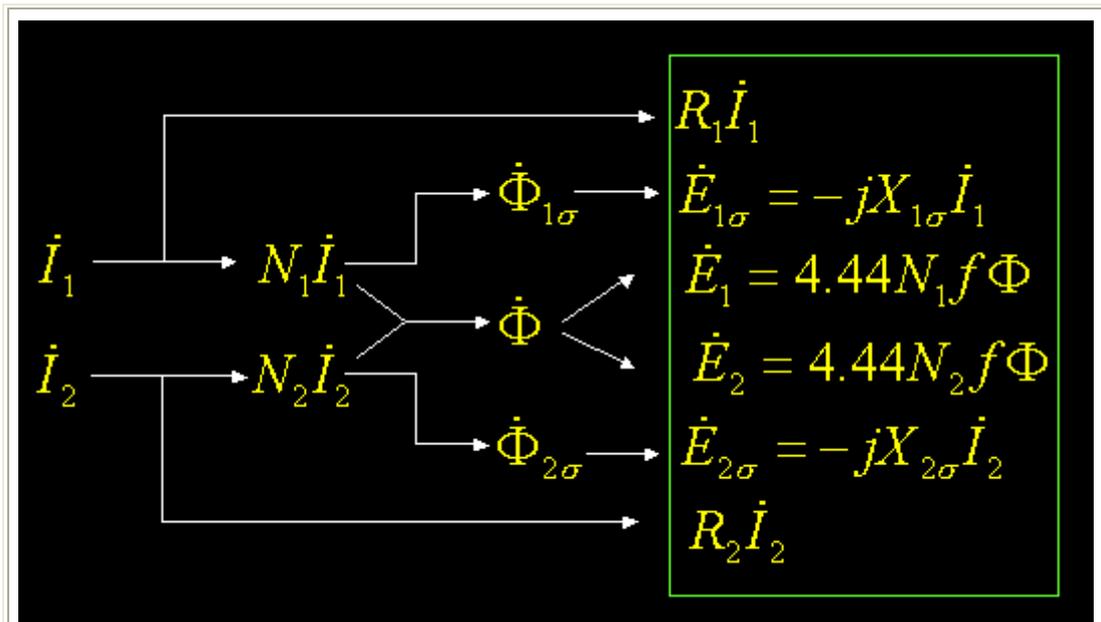
4. 这就是变压器的变流作用，只有在较大负载时才基本成立，用此原理可以设计出电流互感器。

三. 电势平衡方程式

根据规定的正方向可以写出电压平衡方程

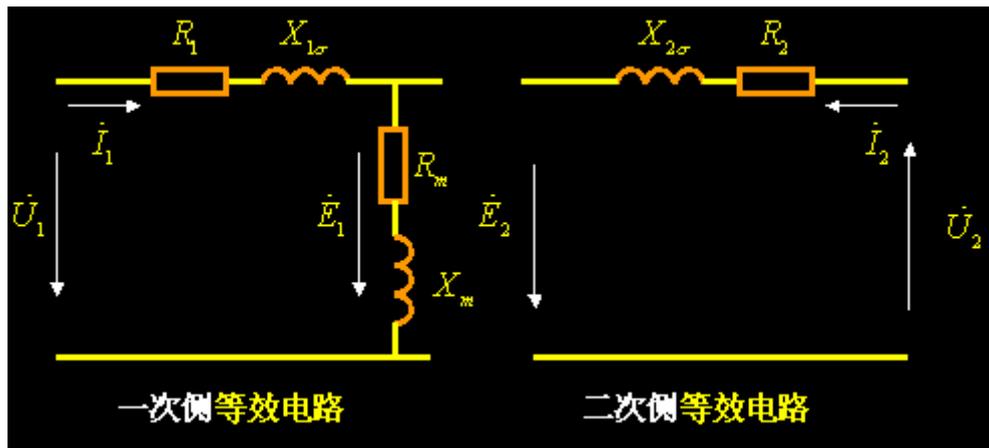
$$U_1= -E_1+I_1(R_1+jX_{1\sigma}) = -E_1+I_1Z_1$$

$$U_2= E_2-I_2(R_2+jX_{2\sigma}) = E_2- I_2Z_2$$



6-3 变压器的等效电路和相量图

根据电势平衡方程可以画出变压器的一次侧和二次侧等效电路(Equivalent Circuit)。



1. 由于一、二次侧绕组匝数不同，其电势 E_1 和 E_2 也不同，难以将两侧的等效电路合并成一个完整的等效电路。
2. 折算原因：为了简化计算和分析；
3. 折算条件：折算前后，变压器的电磁效应不改变，变压器的功率大小也不改变。
4. 折算方法：我们可以将二次侧等效为用一个与一次侧匝数 N_1 相同的绕组来等效替代。折算以后，两侧匝数相等， $E_1 = E'_2$ ， $k=1$ ，原来的磁势平衡方程
5. $I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_m N_1$ 变成了 $I_1 + I'_2 = I_m$ ，两侧的等效电路就可以合并了。具体如下

一. 变压器的折算法

• 将变压器的二次侧绕组折算到一次侧，就是用一个与一次侧绕组匝数 N_1 相同的绕组，去代替匝数为 N_2 的二次侧绕组，在代替的过程中，保持二次侧绕组的电磁关系及功率关系不变。也就是说折算前后，二次侧的磁势、功率和损耗应保持不变。

二. 折算过程

折算前		
-----	--	--

	二次侧	$N_2 \setminus U_2 \setminus I_2 \setminus E_2 \setminus R_2 \setminus X_{2\sigma} \setminus R_L \setminus X_L$	为实际值
折算后			
	二次侧	$N_2' \setminus U_2' \setminus I_2' \setminus E_2' \setminus R_2' \setminus X_{2\sigma}' \setminus R_L' \setminus X_L'$	为折算值

(1) 电势、电压折算

$$E_2' = 4.44 f N_1 \Phi_m = E_1$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

• 所以 $E_2' / E_2 = N_1 / N_2 = k$, $E_2' = kE_2$

• 同样 $U_2' = kU_2$ (2) 电流折算 $N_1 I_2' = N_2 I_2$ $I_2' = I_2 N_2 / N_1 = I_2 / k$

(3) 阻抗折算

• 阻抗折算要保持功率/损耗不变 $(I_2')^2 R_2' = (I_2)^2 R_2$

$$R_2' = (I_2 / I_2')^2 R_2 = k^2 R_2$$

$$(I_2')^2 X_{2\sigma}' = (I_2)^2 X_{2\sigma}$$

$$X_{2\sigma}' = (I_2 / I_2')^2 X_{2\sigma} = k^2 X_{2\sigma}$$

$$(I_2')^2 R_L' = (I_2)^2 R_L$$

$$R_L' = (I_2 / I_2')^2 R_L = k^2 R_L$$

$$(I_2')^2 X_L' = (I_2)^2 X_L$$

$$X_L' = (I_2 / I_2')^2 X_L = k^2 X_L$$

三. 变压器的等效电路 (Equivalent Circuit)

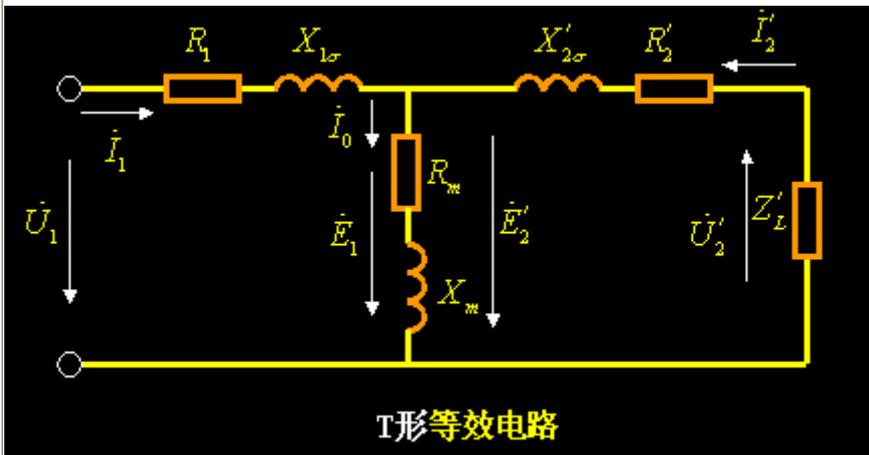
(1) 折算后的方程 $U_1 = -E_1 + I_1 (R_1 + jX_{1\sigma})$

$$U_2' = E_2' - I_2' (R_2' + jX_{2\sigma}')$$

$$I_1 + I_2' = I_m \approx I_0$$

$$-E_1 = -E_2' = I_m (R_m + jX_m) = I_m Z_m$$

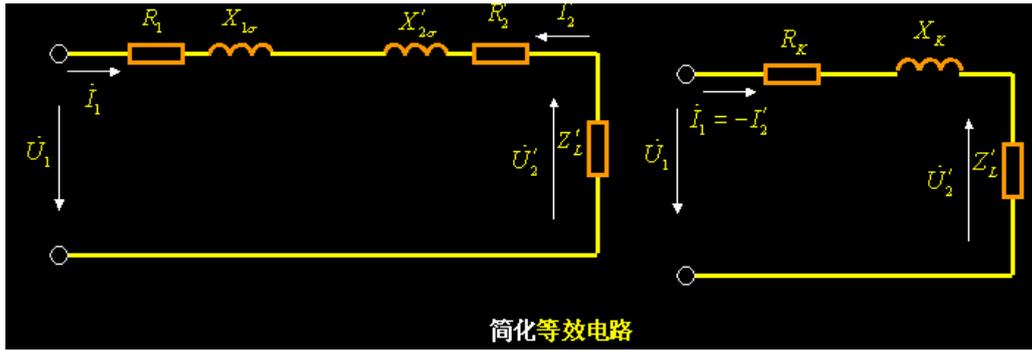
(2) T型等效电路



• 如果知道等效电路中各个参数、负载阻抗和电源电压，则可计算出各支路电流 I_1 、 I_2' 、 I_m / 输出电压 U_2' / 损耗/效率等，通过反折算就能计算出二次侧实际电流 $I_2 = kI_2'$ 和实际电压 $U_2 = U_2' / k$ 。

(2) 简化等效电路

• 由于励磁阻抗很大， I_m 很小，有时就将励磁支路舍掉，得到所谓简化等效电路。



- 简化等效电路中, $Z_k=R_k+jX_k$, R_k 与 X_k 构成变压器的漏阻抗, 也叫短路阻抗, 即变压器的副边短路时呈现的阻抗。 R_k 为短路电阻, X_k 为短路电抗。 Z_L' 为折算到一次侧的负载阻抗。
 $R_k=R_1+R_2'$ $X_k=X_{1\sigma}+X_{2\sigma}'$ $Z_k=R_k+jX_k$
- 用简化等效电路计算的结果也能够满足工程精度要求。
- 当需要在二次侧基础上分析问题, 可将一次侧折算到二次侧。当用欧姆数说明阻抗大小时, 必须指明是从哪边看进去的阻抗。
- 从一次侧看进去的阻抗是从二次侧看进去的阻抗的 k^2 倍。

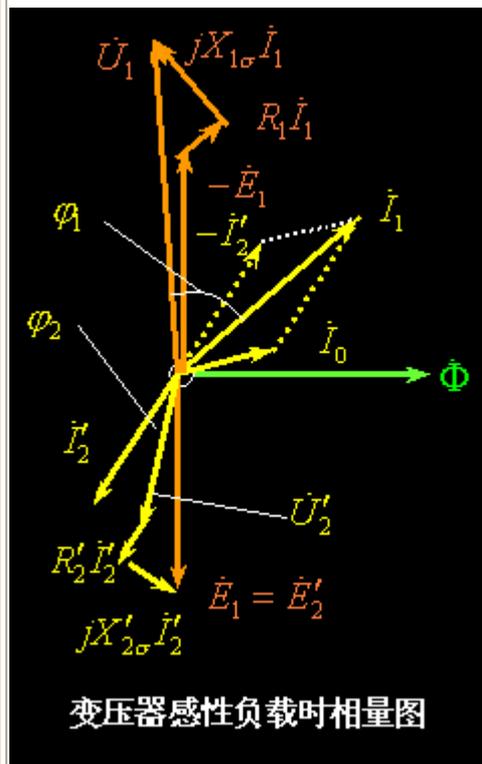
四. 变压器负载运行时的相量图

根据方程式(equation)或者等效电路, 可以画出相量图, 从而了解变压器中电压、电流、磁通等量之间的相位和大小关系。

等效电路, 方程式和相量图是用来研究分析变压器的三种基本手段, 是对一个问题的三种表述, 相量图对各物理量的相位更直观显现出来。定性分析时, 用相量图较为清楚; 定量计算时, 则用等效电路。

6-4 变压器的参数测定和标幺值

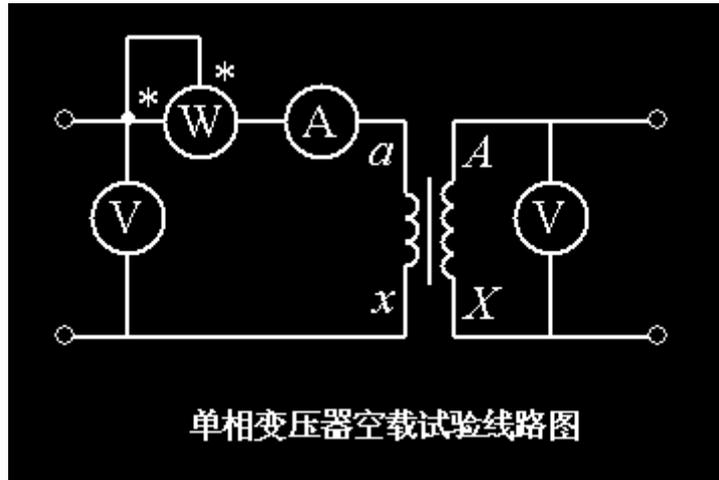
- 等效电路中的各种 R_1 、 R_2 、 $X_{1\sigma}$ 、 $X_{2\sigma}$ 、 R_m 、 X_m 、 k 等, 对变压器运行性能有重大影响。
- 这些参数通常通过空载试验和稳态短路试验来求得



一. 变压器空载试验 (求取 R_m , X_m , I_0 , p_{Fe} , k)

- 一次侧加额定电压 U_N , 二次侧开路, 读出 U_1 、 U_{20} 、 I_0 、 p_0
- I_0 很小, 由 I_0 在绕组中引起的铜耗忽略不计, p_0 全部为铁耗
 $p_0=p_{Fe}=R_m I_0^2$ $Z_m=U_1/I_0$
 $R_m=p_0/I_0^2$ $X_m=\sqrt{Z_m^2-R_m^2}$ $k=U_1/U_{20}$
- Z_m 与饱和程度有关, 应取额定电压时的数据。

- 空载试验也可以在二次侧做，但应注意折算到一次侧，即结果要乘以 k^2 。



二. 稳态短路试验 (求取 R_k, X_k, U_k, p_{Cu})

- 二次侧直接短路时的运行方式为短路运行。如果一次侧在额定电压时二次侧发生短路，则会产生很大的短路电流，这是一种故障短路。
- 稳态短路时，一次侧加很小的电压(额定电压的 10%以下)，并在绕组电流为额定值时读取数据 I_k, U_k, p_k ，并记录室温 θ 。
- 稳态短路时，电压很低，所以磁通很小，铁耗可以忽略。 p_k 全部为铜耗。
 $U_k = I_k Z_k$ $Z_k = U_k / I_k$

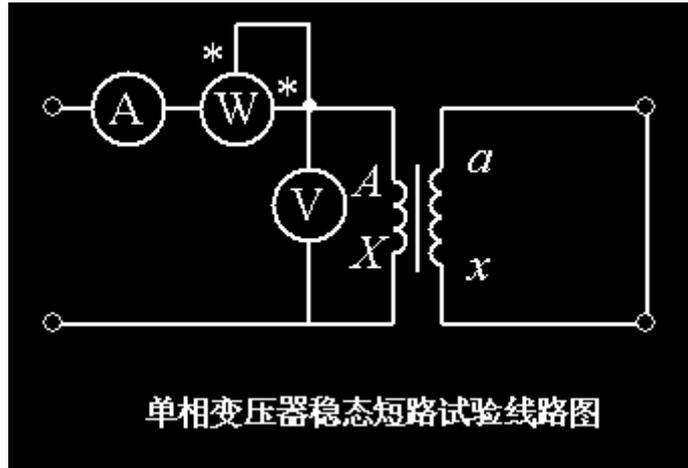
$$R_k = p_k / I_k^2$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

$$r_{k75} = r_k [(234.5 + 75) / (234.5 + \theta)]$$

$$Z_{k75} = \sqrt{r_{k75}^2 + X_k^2}$$

- 阻抗电压：短路电压 U_k 的实际值和额定电压 U_{1N} 的比值的百分数称为阻抗电压 u_k 。
 $u_k = (U_k / U_{1N}) 100\%$
- 阻抗电压 u_k 是变压器的重要参数，其大小主要取决于变压器的设计尺寸。 u_k 的选择涉及到变压器成本、效率、电压稳定性和短路电流大小等因素。
- 正常运行时，希望 u_k 小些，使得端电压随负载波动较小。但发生突然短路时，希望 u_k 大些以降低短路电流。



三. 标么值

(1) 标么值 = 实际值 / 基值

- 基值一般取额定值，标么值就是实际值与基值的比值。

- 一次侧的标么值： $U_1^* = U_1 / U_{1N}$ ， $U_2^* = U_2 / U_{2N}$

$$I_1^* = I_1 / I_{1N}, \quad I_2^* = I_2 / I_{2N}$$

$$P_1^* = P_1 / S_N$$

$$R_1^* = R_1 / Z_{1Np} = R_1 / (U_{1Np} / I_{1Np})$$

$$X_{1\sigma}^* = X_{1\sigma} / Z_{1Np} = X_{1\sigma} / (U_{1Np} / I_{1Np})$$

(2) 优点

- 直观明了，直接反映变压器运行状态，例如 $I_1^* = 1.5$ 说明过载了。
- 计算方便，便于性能比较。不论变压器大小、形状，其两个主要性能指标的大小一般为 $I_0^* = 0.02 \sim 0.08$ ， $U_k^* = 0.05 \sim 0.175$
- 使用标么值后，折算前后各量标么值相同，无需折算，即： $R_2^* = R_2'^*$ ， $I_2^* = I_2'^*$ ， $U_2^* = U_2'^*$

6-5 变压器运行时二次侧电压的变化

- 对于负载的变压器来说，其二次侧的方程为 $U_2 = E_2 - I_2(R_2 + jX_{2\sigma})$ ， $E_2 = 4.44f N_2 \Phi_m$ ，由一次侧(电源)电压 U_1 等量决定，所以 U_2 会随负载电流的变化而变化。这种变化反映了变压器输出电压的稳定与否，一般用电压调整率来描述。

一. 电压调整率 ΔU

- 当一次侧电压不变时，变压器从空载到负载其二次侧电压变化的数值与负载电流的大小和负载的性质(即负载的功率因数 $\cos \phi_2$) 以及变压器本身的参数有关。
- 一次侧加额定电压 U_{1N} 时，变压器空载时的二次侧电压 U_{20} (即是 U_{2N}) 与额定负载时的二次侧电压 U_2 之差值 $(U_{20} - U_2)$ 与二次侧额定电压 U_{2N} 之比值定义为电压调整率。

$$\Delta U = [(U_{20} - U_2) / U_{2N}] \times 100\%$$

$$\Delta U = [(U_{2N} - U_2) / U_{2N}] \times 100\%$$

$$\Delta U = [1 - U_2^*] \times 100\%$$

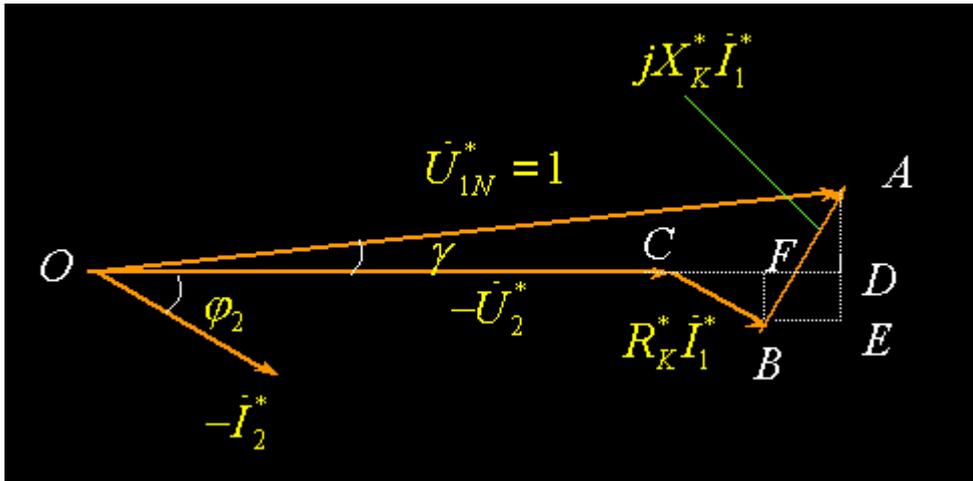
$$\Delta U = [k(U_{2N} - U_2) / (kU_{2N})] \times 100\%$$

$$= [(U_{1N} - U_2') / U_{1N}] \times 100\%$$

- 实用公式

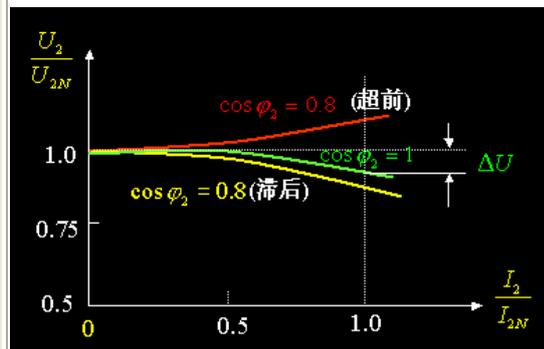
$$\Delta U = \beta (R_k^* \cos \phi_2 + X_k^* \sin \phi_2)$$

- ΔU 是变压器的重要性能指标。它与 3 个因素有关：
- (1) 负载大小，用负载系数 β 来反映；
- (2) 负载性质，用 $\cos \phi_2$ 来表示；
- (3) 变压器本身的漏阻抗， R_k^* 和 X_k^* 来表示。
- 当为感性负载时， ϕ_2 为正 $\Delta U > 0$ 。
- 当为容性负载时， ϕ_2 为负 ΔU 通常为负 (个别情况为正值或 0 值)。



二. 外特性

- 一次侧电压为额定电压，负载功率因数 $\cos \phi_2$ 为常数时，二次侧电压 (一般用标么值) 随负载系数 β (负载电流标么值) 的变化曲线。



第 6 节 变压器损耗和效率

一. 变压器损耗

- 变压器的损耗可以分为两大类：铁耗和铜耗 (铝线变压器称之为铝耗)。每类当中又有基本损耗和附加损耗之分。
- 变压器的空载损耗主要为铁耗，稳态短路负载损耗主要为铜耗。(1) 铁耗 $p_{Fe} = m I_0^2 R_m$
- 铁耗分基本铁耗和附加铁耗。基本铁耗主要是磁滞和涡流损耗。涡流损耗通过采用叠片铁心而大大降低，所以总铁耗中磁滞损耗份额较大约占 60-70%。
- 附加铁耗主要有：在铁心接缝等处由于磁通密度分布不均匀所引起的损耗；在拉紧螺杆、铁轭夹件，油箱壁等构件处所产生的涡流损耗。
- 由于铁耗由磁密及其频率等决定，在一次侧电压不变时，磁密基本不变，所以变压器载额定电源下正常运行时，铁耗基本不变，称为不变损耗。铁耗在等效电路中用励磁电阻上的损耗来表示。

$$p_{Fe} = m I_0^2 R_m$$

$$(2) \text{铜耗 } p_{Cu} = \beta^2 p_{KN}$$

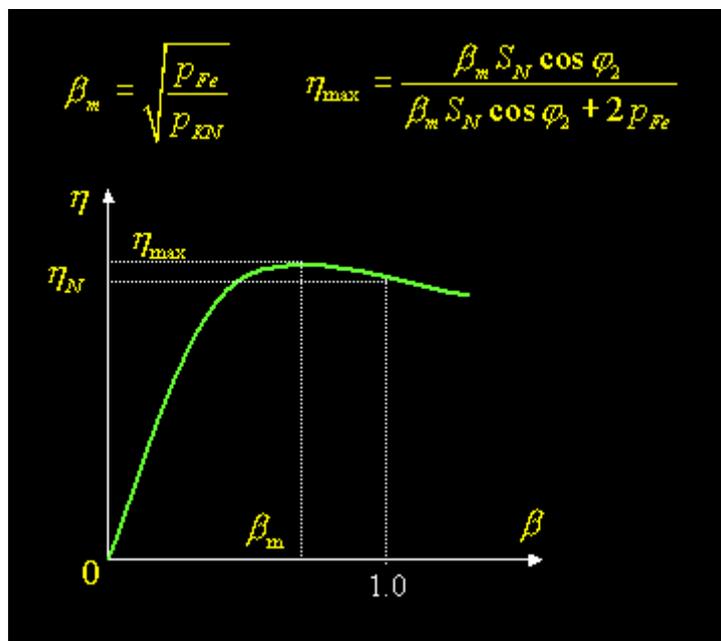
- 铜耗分基本铜耗和附加铜耗。基本铜耗指绕组电流引起的欧姆电阻损耗。附加铜耗指由于集肤效应所引起的电流在导线截面分布不均匀所产生的额外损耗。
- 铜耗随着负载电流的变化而变化。额定电流时的铜耗称为额定铜耗
- $p_{KN}=m(I_{1N}^2R_1+I_{2N}^2R_2)$ 一般负载时的铜耗 $p_{Cu}=m(I_1^2R_1+I_2^2R_2)=\beta^2m(I_1^2R_1+I_2^2R_2)=\beta^2p_{KN}$
- 由短路负载试验在额定电流时测得的损耗可以认为是 p_{KN} 。

二. 变压器的效率 η

- 输入功率: $P_1=mU_1I_1\cos\phi_1=P_2+\Sigma p$
- 输入功率: $P_2=mU_2I_2\cos\phi_2=\beta S_N\cos\phi_2$
- 效率: $\eta=P_2/P_1=P_2/(P_2+\Sigma p)$
 $=\beta S_N\cos\phi_2/(\beta S_N\cos\phi_2+p_{Fe}+\beta^2p_{KN})$

三. 最大效率

- 将效率公式变换为 $\eta=S_N\cos\phi_2/(S_N\cos\phi_2+p_{Fe}/\beta+\beta p_{KN})$
- 假设 $\cos\phi_2$ 不变, 空载时 $\beta=0$, 输出功率 $\eta=0$ 。 β 开始增大时, p_{Fe}/β 变小而 βp_{KN} 增大, 但由于 β 值尚小, p_{Fe}/β 起主导作用, 故效率增大, 当 β 增大到 β_m 时, 效率会达到最大值 η_{max} , 在进一步增大 β 时, η 反而会降低。
- 令 $d\eta/d\beta=0$, 解得 $\beta^2p_{KN}=p_{Fe}$ 。 即当: 可变损耗=不变损耗时 η 最大。 $\beta_m=\sqrt{p_{Fe}/p_{KN}}$, 一般 $\beta_m=0.5\sim 0.77$



第 7 章 三相变压器

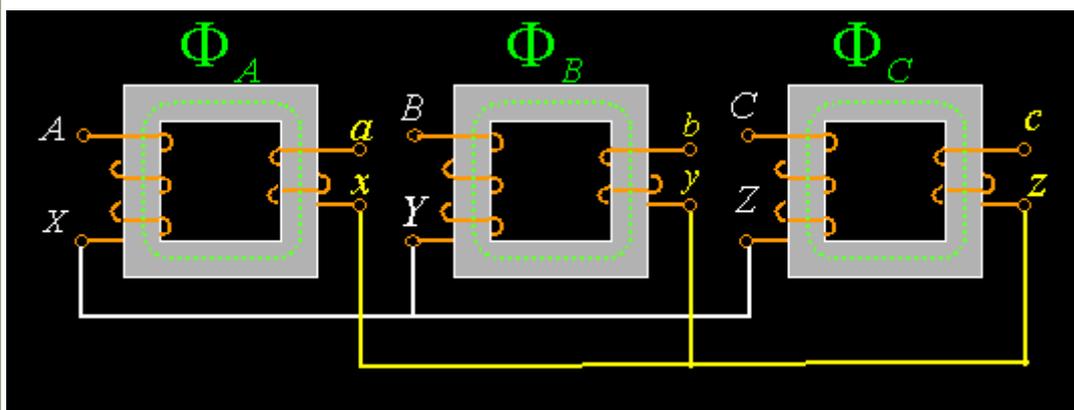
- 目前的电力系统, 输配电都是采用三相制, 三相变压器应用最广泛。
- 三相变压器在对称负载下运行时, 各相的电流(电压)大小相等, 相位相差 120 度, 对任何一相来说, 上一章所得出的基本理论都适用。
- 本章要讲三相变压器本身的问题, 即讲述三相变压器的磁路结构、联结组和磁通波形等。

7-1 三相变压器的磁路结构

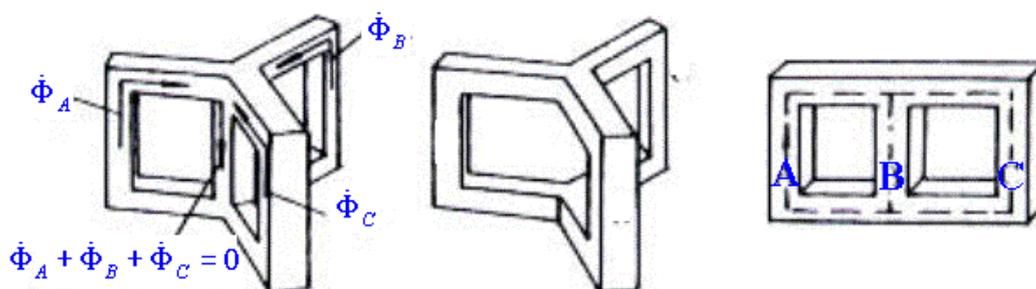
三相变压器可以由三台单相变压器组成的三相组式变压器。大部分三相变压器是将三个铁心柱和铁轭联成一个三相磁路，形成三相一体三相芯式变压器。

一. 三相变压器组的磁路

- 将三台相同的单相变压器一次、二次侧绕组，按对称式做三相联结，可组成三相变压器组，如图所示。
- 这种变压器组的各相磁路是相互独立的。
- 当一次侧加上三相对称正弦电压时，三相空载电流是对称的，三相绕组的主磁通 Φ_A 、 Φ_B 、 Φ_C 也是对称的。
- 对于特大容量变压器，采用这种变压器组时将方便运输。



二. 三相芯式变压器的磁路



- 三相芯式变压器的铁心，是将三台单相变压器的铁心合在一起演变而成的。
- 当绕组流过三相交流电时，通过中间铁心柱的磁通便是 A、B、C 三个铁心柱磁通的相量和。
- 如果三相电压对称，则三相磁通的总和 $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$ ，因此，中间铁心柱可以省去。
- 为了使结构简单、制造方便、减小体积、节省材料，通常将三相铁心柱的中心线布置在同一平面内，演变成为常用三相芯式变压器铁心。
- 这种铁心结构，两边两相磁路的磁阻比中间一相磁阻大一些。当外加三相电压对称时，各相磁通相等，但三相空载电流不等，中间那相空载电流小一些。在小容量变压器中表现较明显，一般 $I_{0A} = I_{0C} = (1.2-1.5) I_{0B}$ 在大型变压器中，其不平衡度较小。
- 在计算空载电流时，可取三者算术平均值。因为空载电流较小，对变压器负载影响不大，与三相变压器组比较起来，还是非常经济的。

三. 比较

- 组式变压器三相铁心相互独立，三相磁路没有关联，三相磁路对称，三相电流平衡，便于拆开运输，并可以减少备用容量。
- 芯式变压器铁心互不独立，三相磁路互相关联；中间相的磁路短，磁阻小，励磁电流不平衡，但对实际运行的变压器，其影响极小。

- 在相同的 S_N 下，芯式变压器经济，省材料，体积小、重量轻。

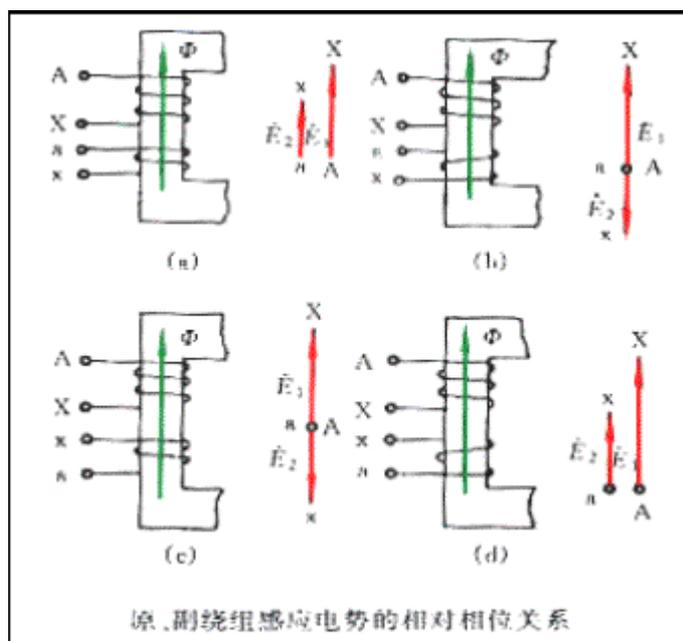
7-2 三相变压器的联结组

- 三相变压器的一、二次侧均有 A、B、C 三相绕组，它们之间的联结方式对变压器的运行性能有较大影响。

- 一般来说三相绕组可以联结成 Y 或者 Δ (d) 型。
- 联结组的问题包括变压器两侧对应相之间的相对极性，同一侧各相之间的标号等问题。

一. 同一铁心柱上高、低压侧绕组之间相电势的相位关系

- 高压侧用 AX、BY、CZ，低压侧用 ax、by、cz 来标记各相绕组的引线端的符号，简称标号。
- 同一铁心柱上一、二次侧之间的相位关系仅有两种：同相或反相
- 规定感应电势的参考正方向为由首端指向末端 A-X。
- 根据绕向（用同名端表示）和标号，可以判断同一柱上一、二次侧之间的相位关系。



- 单相变压器的联结组只有两种，即 I, i0 和 I, i6
- 高、低压侧相电势之间的相位关系判断方法如下：
- 高、低压侧绕组如果

绕向相同，标号相同—则两侧相电势同相

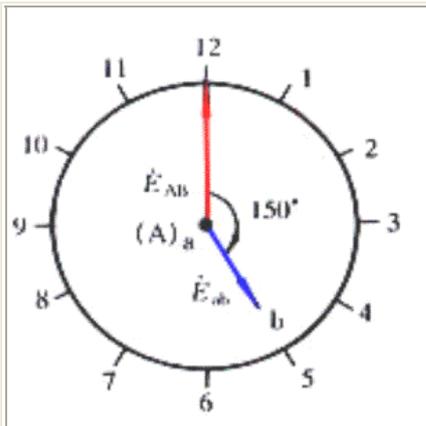
绕向相同，标号相反—则两侧相电势反相

绕向相反，标号相同—则两侧相电势反相

绕向相反，标号相反—则两侧相电势同相

二. 三相变压器的联结组

- 三相变压器的联结组用高低压侧对应线电势之间的相位关系来描述。
- 如果一次侧为 Y 接法，AB 相线电势 E_{AB} 的相位为 0 度，二次侧也为 Y 接法，对应的 ab 相的线电势 E_{ab} 之相位为 0 度，则该联结组记为 Y, y0。
- 实际变压器高低压侧对应线电压之间的相位差一般为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, \dots, 150^\circ, 300^\circ, 330^\circ$ 。正好对应于钟表盘上的 12 个位置。



(1) 时钟表示法

- 将一次侧的某线电势固定在 0 点，二次侧对应相的线电势所指的位置(小时数)可以用来表示二者之间的相位差，即可以用来表征联结组。

(2) 根据绕组连接图判断联结组别

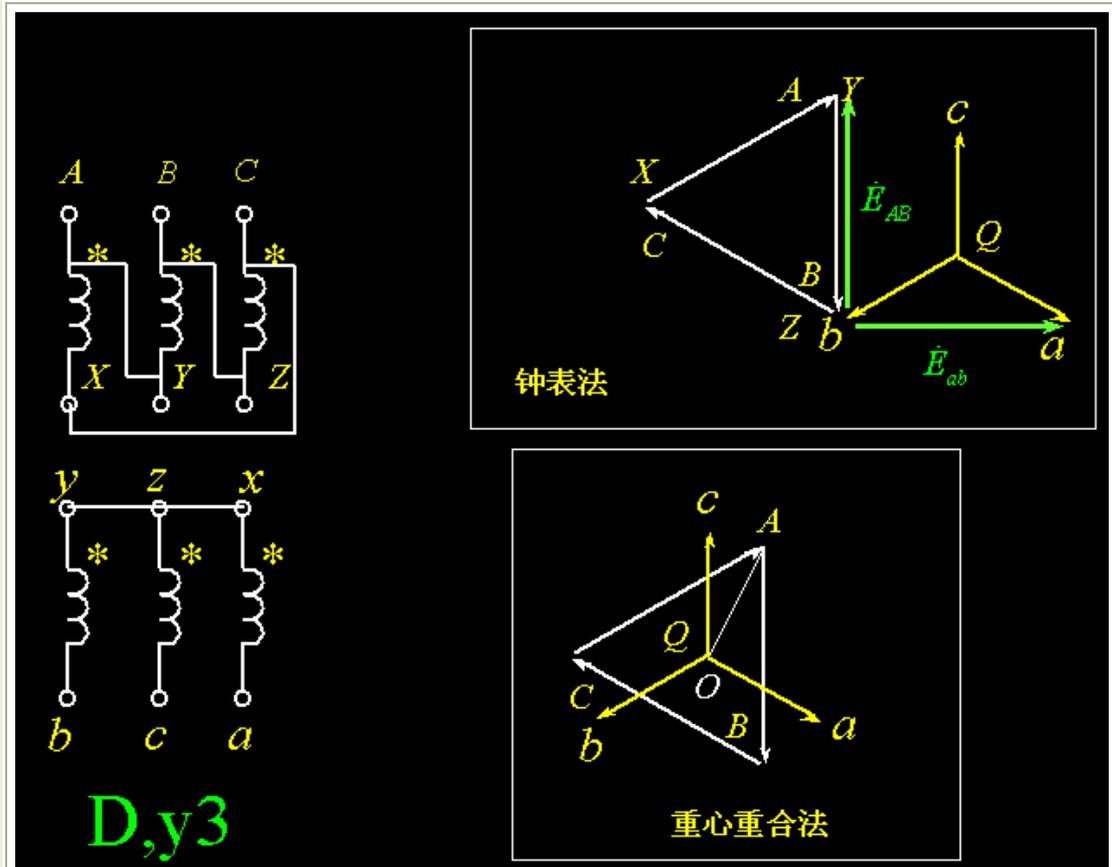
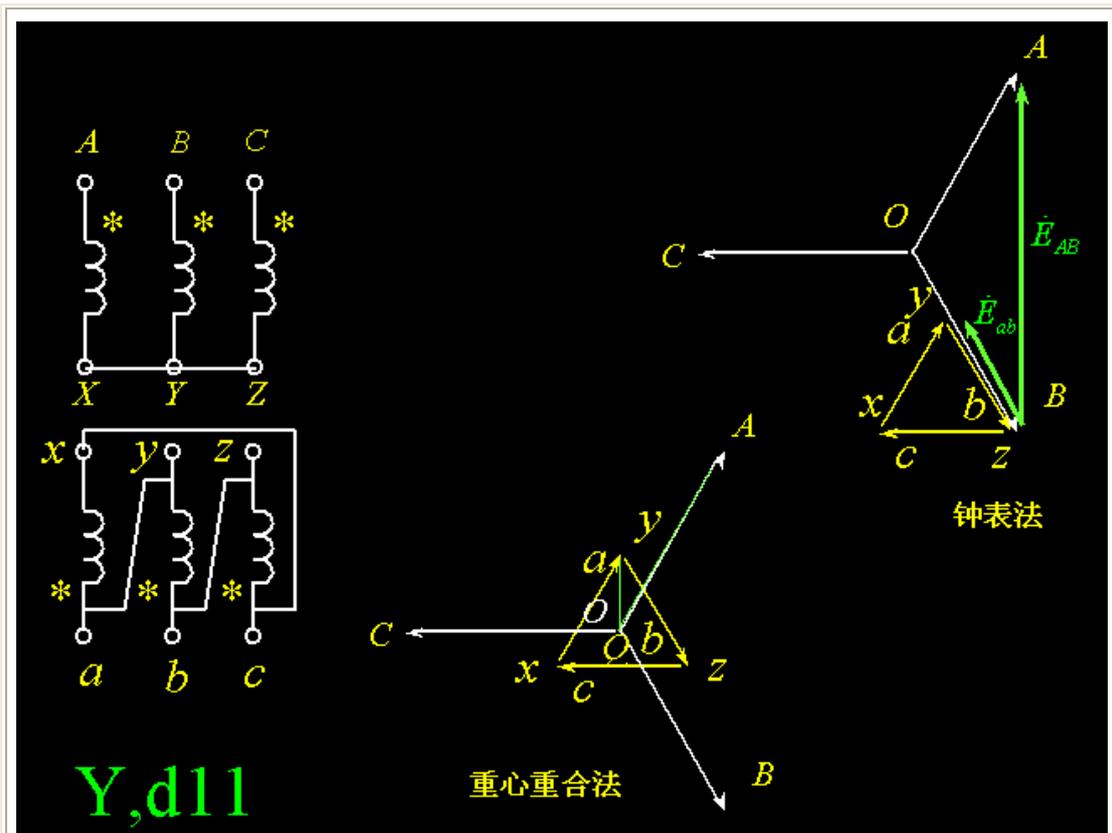
- 举例：Y, y6; Y, d11; D, y3

例：判断联结组别

Y, y6

钟表法

重心重合法

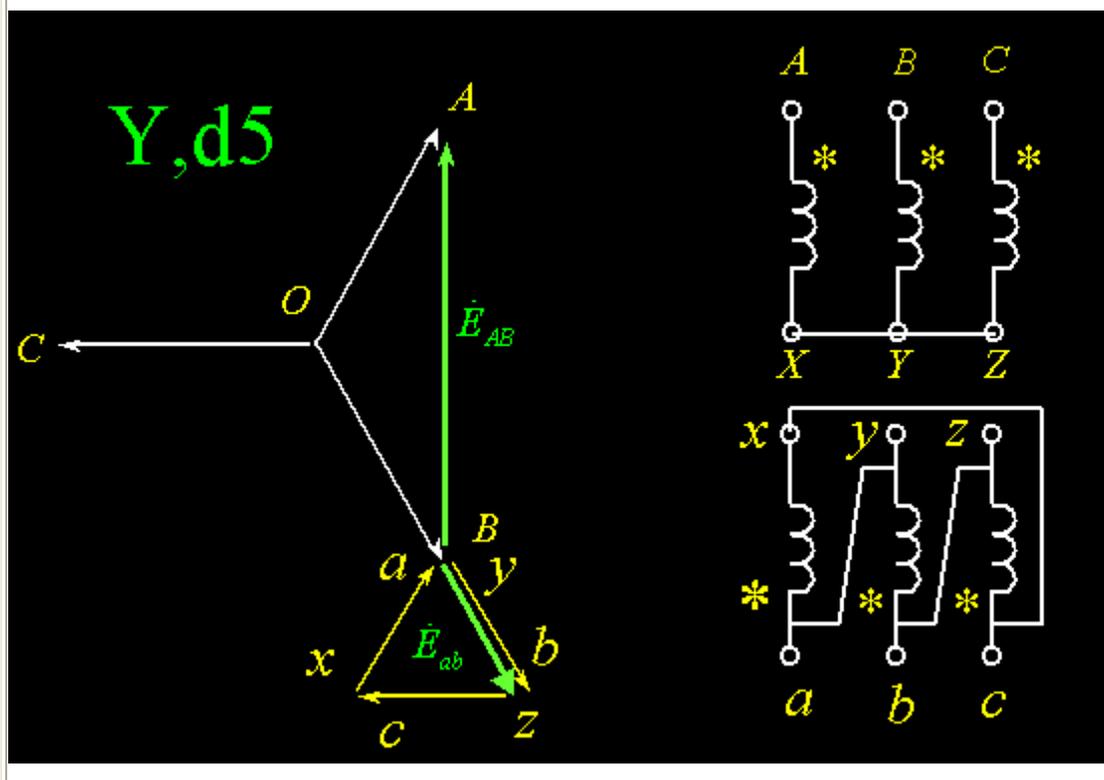


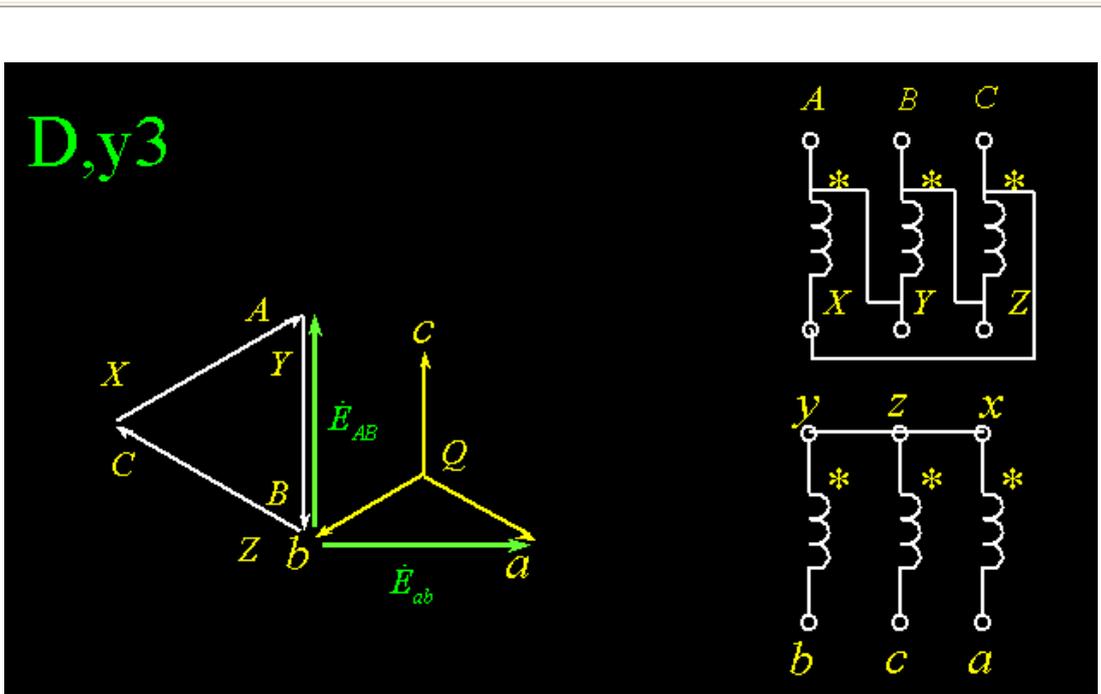
- 总结步骤：（1）钟表法（详见“电机学...典型题解析”一书 56 页）
- 根据接线图画出一二次侧相量图，并找出线电势 E_{AB} 的相位。注：I. 无论是 Y 形或 Δ 形连

接, E_{ab} 均为由 A 指向 B 的相量, 一般为方便起见, A 指向 B 的方向为垂直向上。

- II. 强迫 A、a 同电位。
- III. 原、副方的相序要正确, 即顺时针读 a. b. c. 或 A. B. C (也含 x. y. z 等)。
- IV. 凡 Δ 形联结时, 必须标出首末端和相电压的方向 (即末端指向首端) --- 属正方向问题。
- V. 画完相量图时, 应该有三组两两平行的相量, 只需看 a 指向 b 的射线方向就是几点钟即联结组组号了!
- VI. 原、副方连接相同时的组号是偶数, 否则是奇数。
- 对照两侧的绕组绕向和标号, 根据接线图画出二次侧的相量图。
- 二次侧的相电势与一次侧同一铁心柱上的绕组的相电势同相或者反相。 (2) 重心重合法 (作图详见电机学教材 88-90 页)
- 分别做出一、二次侧的相量图; 三角形联结时要注意绕组的首末端, 并画成三角形相量图。
- 将一、二次侧相量图重心 O 和 Q 重合, 比较 OA 和 Qa 的相对方位, 即可确定联结组别。 其他例题: 例 1, 例 2, 例 3, 例 4

(3) 根据联结组别画绕组接线图 举例: Y, d5, D, y3





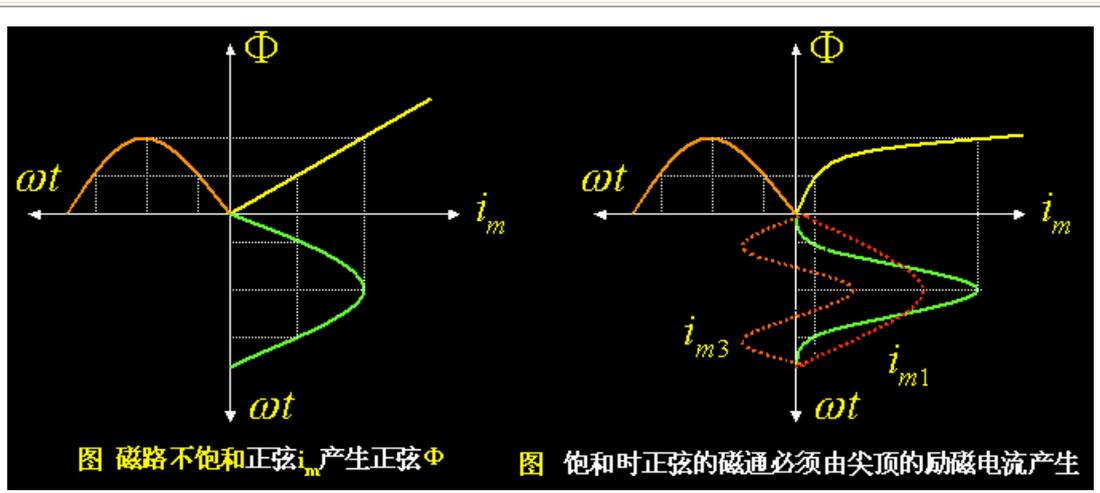
(4) 变压器的标准联结组

- 单相和三相变压器有很多联结组别，为了避免制造与使用时造成混乱，国家标准规定：
- 单相双绕组变压器有一个标准联结组 I, i0
- 三相双绕组变压器有 5 种标准联结组：Y, y_n0 , Y, d11, Y_N, d11, Y, z11, D, z0 。
- z 表示曲折形联结。
- Y, y_n0 用作配电变压器，其二次侧可以引出中线作为三相四线制，可以供动力电和照明电；（高压侧 $U_1 < 35\text{kV}$ ，低压侧 $U_2 < 400\text{V}$ ，单相时为 230V）
- YN, d11 用于 110kV 以上的高压输电线路，高压侧可以接地。
- 有 z 形的联结适用于防雷性能较高的变压器。

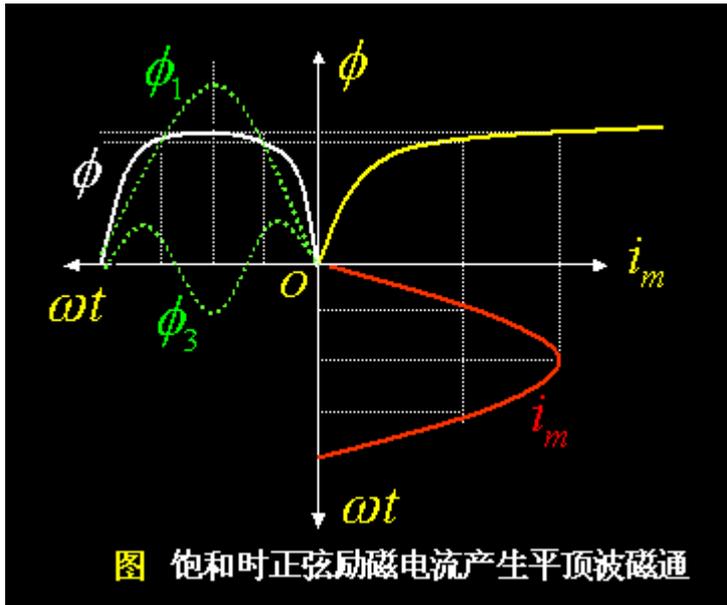
7-3 变压器励磁电流、磁通和电势波形

(1) 励磁电流和磁通波形关系

- 变压器中的电势 e_p 由磁通变化 ($d\Phi/dt$) 引起，当
- Φ 为正弦时， e_p 为相位上滞后 Φ 90 度的正弦函数；若 Φ 非正弦时， e_p 将发生畸变，这是应当避免的。下面讨论如何获得正弦 Φ 。
- 励磁电流 i_m 产生磁势 F_m ， F_m 在铁心中产生磁通 Φ 。 Φ 的波形由 i_m 的波形决定。
- 当磁路不饱和时， Φ 和 i_m 是直线关系。即正弦的 Φ 由正弦 i_m 产生。



- 当磁路饱和时， Φ 和 i_m 不再是直线关系。正弦的 i_m 无法产生正弦的 Φ ，只能产生平顶的 Φ 。
- 正弦的 Φ 必须由尖顶的 i_m 产生。
- 尖顶的 i_m 中除了基波分量 i_{m1} 外，还有较大的 3 次谐波分量 i_{m3} 等。

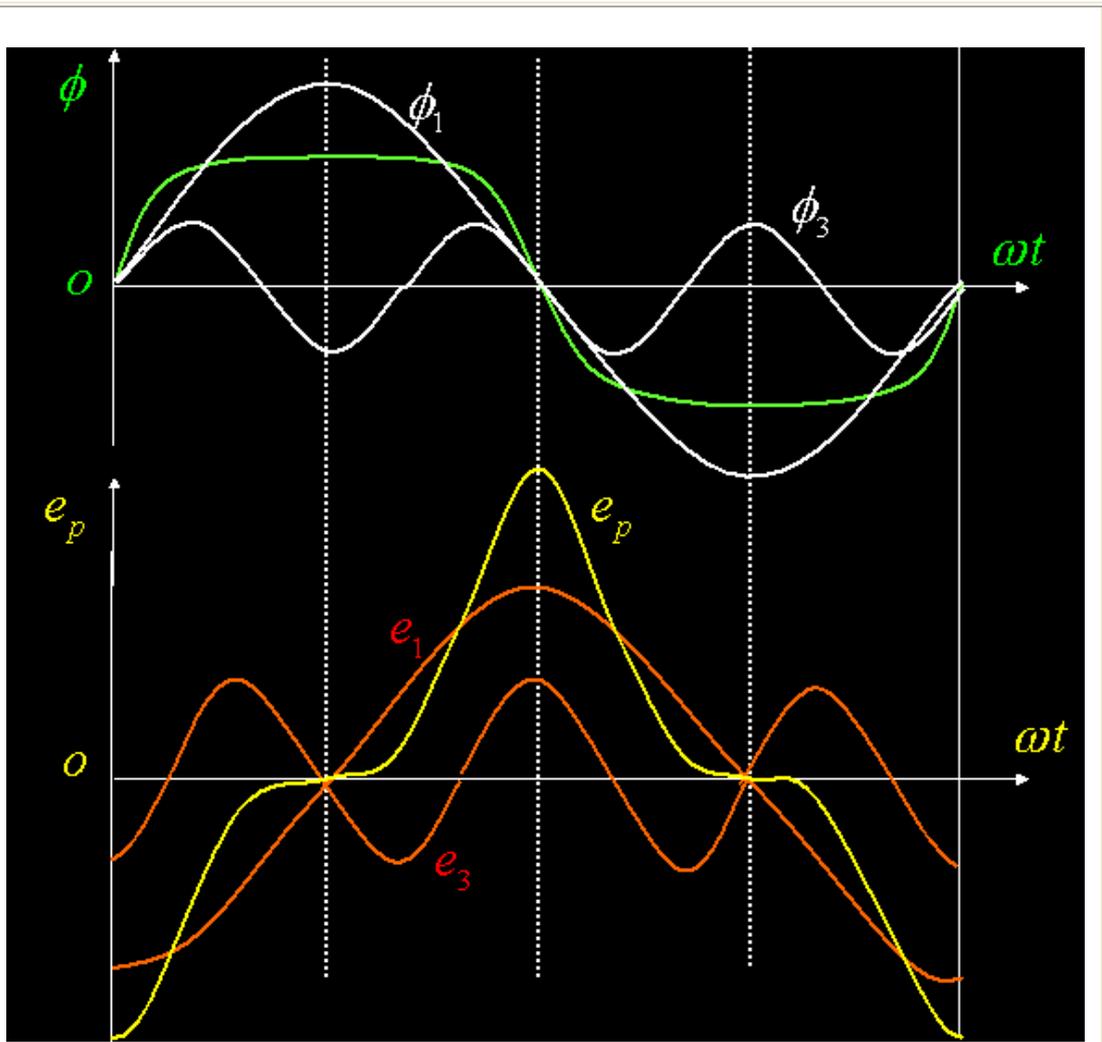


结论：

- 不饱和时，正弦的 Φ 由正弦 i_m 产生。饱和时，正弦的 Φ 必须由尖顶的 i_m 产生。如果 i_m 仍为正弦，则产生 Φ 的是平顶波。
- 平顶 Φ 的中含有较大的 3 次谐波磁通，如果不加以抑制，将产生含有 3 磁谐波的感应电势。

(2) 磁通和感应电势波形关系

- 相电势 e_p 由磁通变化 ($d\Phi/dt$) 引起，当 Φ 为正弦时， e_p 为相位上滞后 90 度的正弦函数；若 Φ 非正弦时， e_p 将发生畸变。

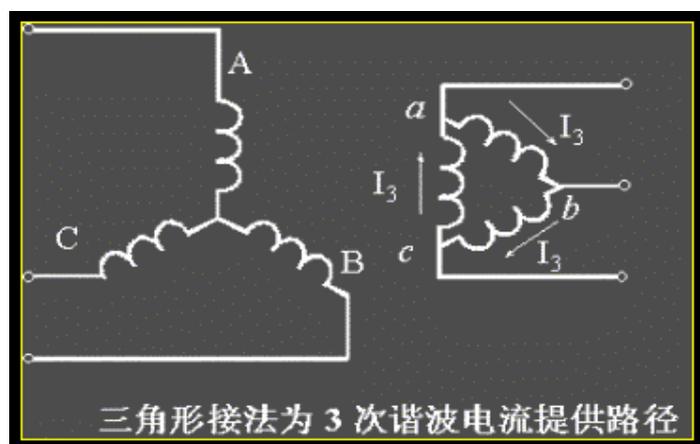
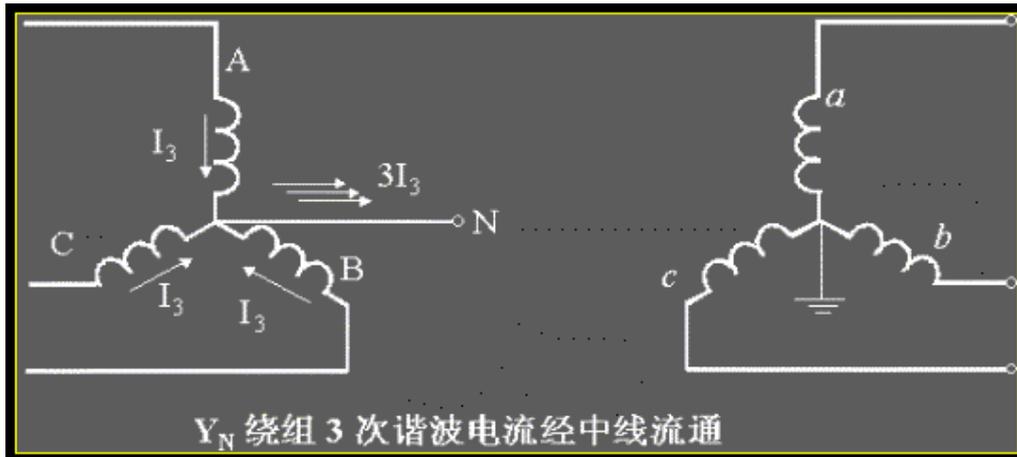


结论:

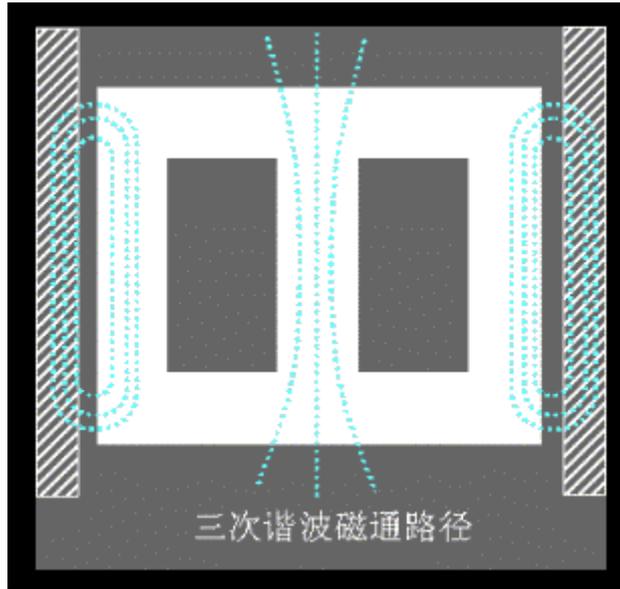
- 正弦波的磁通产生正弦波感应电势；平顶波的磁通产生尖顶波的感应电势。

(3) 不同联结组电势波形分析

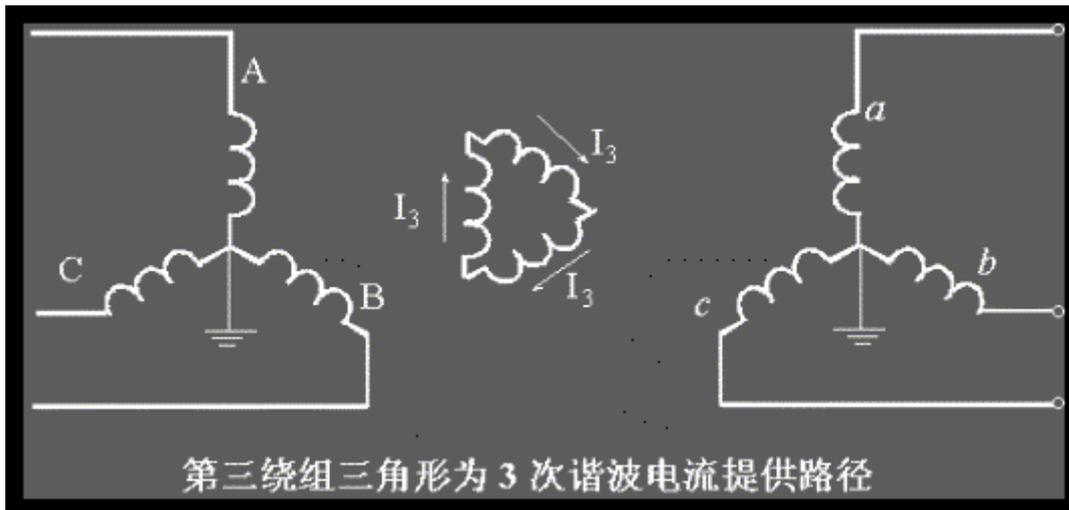
- 为了保证磁通和感应电势为正弦，励磁电流必须为尖顶波，即必须含有 3 次谐波分量。可见联接组的接线应当提供 3 次谐波的流通路径。否则，励磁电流中不会有 3 次谐波。
- 单相变压器的 3 次谐波电路是通的，所以单相变压器的励磁电流中含有 3 次谐波(为尖顶波)，其磁通和感应电势均为正弦波。
- YN, Y, D, y, Y, d 联结的三相变压器：3 次谐波电流可以通过中线或者在三角形回路中流通，所以这类联结组的励磁电流中含有 3 次谐波，其磁通和电势均为正弦波。



- Y, y 联结组：一、二次侧均无中线，3 次谐波电流没有通路，励磁电流是正弦波，产生的磁通理论上为平顶波，平顶波磁通中含有较大的 3 次谐波分量，如不能有效抑制，导致感应电势为尖顶波。三相组式变压器：各相磁路独立，3 次谐波磁通畅通无阻，也就是说，磁路结构对磁通中的 3 次谐波没有抑制，所以这种形式的变压器磁通为平顶波，相电势为尖顶波。相电势的幅值比基波幅值大(45-60) %，将危及变压器的绝缘，故电力系统中不能采用这种 Y, y 组式变压器。三相芯式变压器：三相磁路关联，由于三相的 3 次谐波磁通同相位，在主磁路上将相互抵销；只有漏磁路上较小的 3 次谐波磁通留了下来，也就是说，这种磁路结构对 3 次谐波磁通有较好的抑制作用，所以磁通近似为正弦波。可见中小型三相心式 Y, y 变压器是可以用的。



第三绕组：超高压、大容量电力变压器，常加一个三角形的第三绕组提供 3 次谐波励磁电流的通路。以改善电势波形。



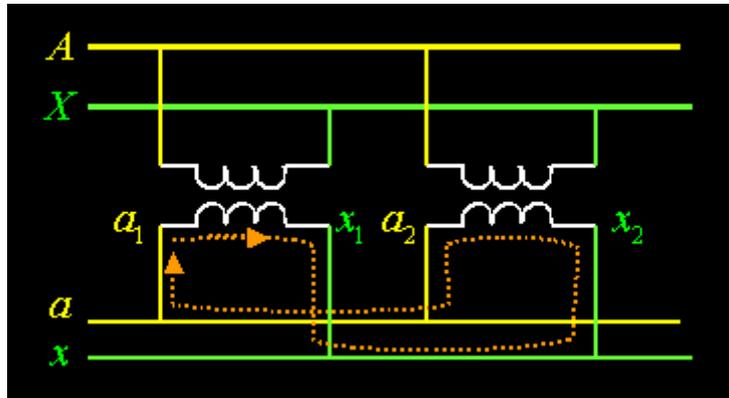
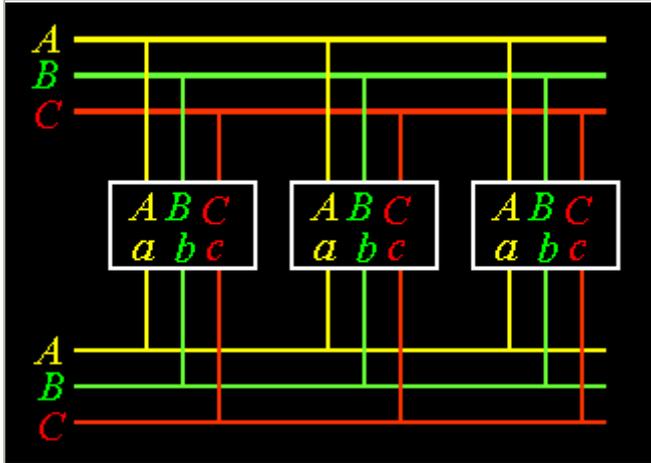
7-4 变压器的并联运行

一、并联运行优点

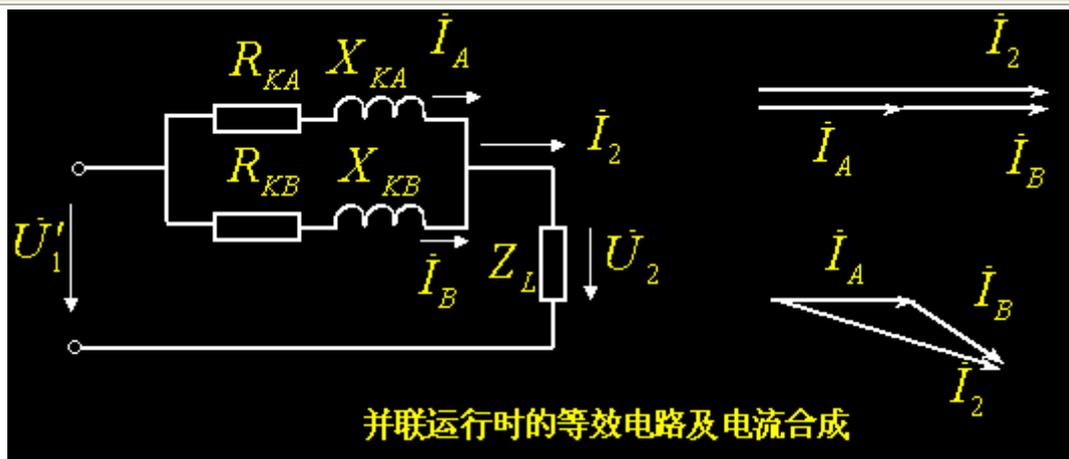
- 将两台或者两台以上的变压器一、二次侧分别接在各自的公共母线上，同时对负载供电。优点：(1)提高运行效率；(2)提高供电可靠性；(3)便于扩容。

二、并联运行的理想条件

- (1)变比相同；(2)联结组的组号相同；(3)各变压器输出电流同相位；(4)各台变压器的阻抗电压相等。



- 两台并联运行的变压器的二次侧构成了回路。
- 若联结组别和变比均完全相等，则可以保证这一回路中没有环流。
- 二次侧很小的电压差也会在还路中引起很大的环流，所以变比只容许极小的偏差(0.5~1)%
- 联结组别不同的两台变压器的二次侧电压不同相位，必然存在相量差，这是不容许的。
- 并联运行的每台变压器的输出电流都同相位时，整个并联组的输出电流才能最大化，各台变压器的装机容量才能充分利用。



- 阻抗电压等于短路阻抗的标幺值，在电流相位相同的情况下，各台变压器电流的分配与其阻抗成反比。

$$I_A / I_B = Z_{KB} / Z_{KA} (S_A/S_{AN}) = (U_N I_A) / (U_N I_{AN}) = I_A / I_{AN}$$

$$(S_B/S_{BN}) = (U_N I_B) / (U_N I_{BN}) = I_B / I_{BN}$$

$$(S_A/S_{AN}) : (S_B/S_{BN}) = (I_A I_{BN} / I_B I_{AN})$$

$$= (Z_{KB} I_{BN} / Z_{KA} I_{AN}) = (u_{KB} * U_N) / (u_{KA} * U_N)$$

$$= (1/u_{KA}) : (1/u_{KB})$$

$$\text{故得: } (S_A/S_{AN}) : (S_B/S_{BN}) = (1/u_{KA}) : (1/u_{KB})$$

- 如果 $u_{KA} \neq u_{KB}$ ，则阻抗电压较小的一台变压器先达到满载，这就限制了整个并联组的总容量。
- 一般规定并联运行的变压器阻抗电压值相差不超过 10%。

7-5 三相变压器的不对称运行

- 三相变压器实际运行时，可能出现各种不对称运行的情况。例如：单相负载或某一相断开检修等
- 对 Y, yn 联结组，不对称负载会引起中点偏移，导致二次侧相电压发生较大的变化
- 分析不对称运行采用的方法是“对称分量法”

一、对称分量法原理

- 一组不对称三相电流（或电压）可以看成是三组对称的电流（或电压）的叠加，后者称为前者的对称分量。

- 正序分量 I_{A+}, I_{B+}, I_{C+} ;

- 负序分量 I_{A-}, I_{B-}, I_{C-} ;

- 零序分量 I_{A0}, I_{B0}, I_{C0}

- 合成: $I_A = I_{A+} + I_{A-} + I_{A0}$

$$I_B = I_{B+} + I_{B-} + I_{B0}$$

$$I_C = I_{C+} + I_{C-} + I_{C0}$$

$$I_{B+} = a^2 I_{A+}, \quad I_{C+} = a I_{A+}$$

$$I_{B-} = a I_{A-}, \quad I_{C-} = a^2 I_{A-}$$

$$I_{B0} = I_{C0} = I_{A0}$$

$$a=1\angle 120^\circ = -1/2 + j \sqrt{3}/2$$

$$a^2=1\angle 240^\circ = -1/2 - j\sqrt{3}/2$$

$$a^3=1, \quad 1+a+a^2=0$$

$$I_A = I_{A+} + I_{A-} + I_{A0}$$

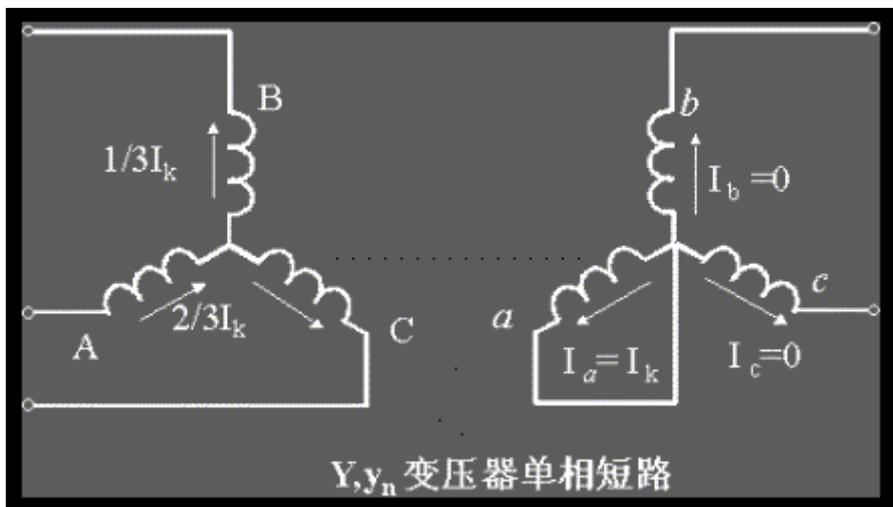
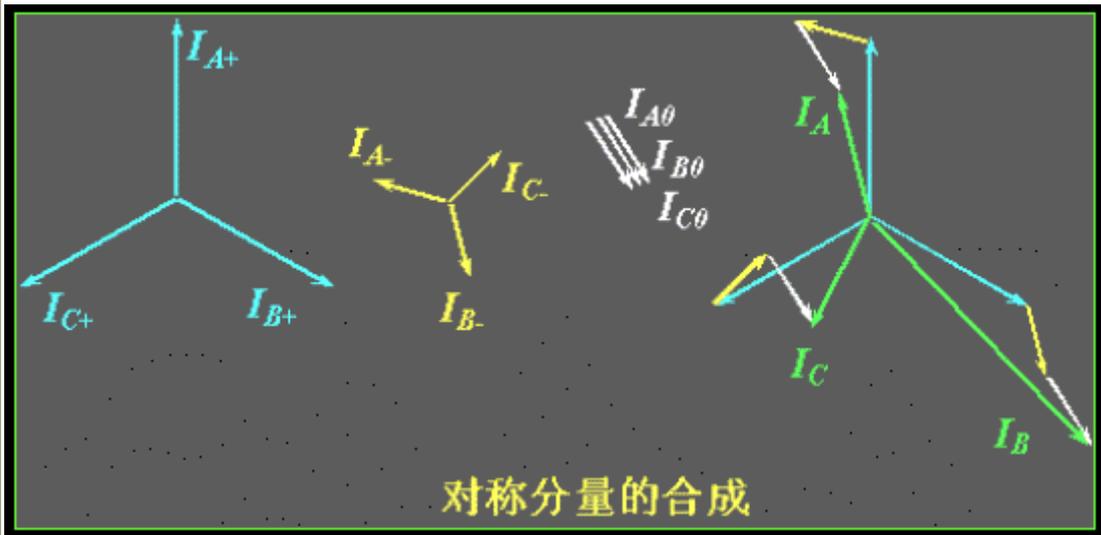
$$I_B = a^2 I_{A+} + a I_{A-} + I_{A0}$$

$$I_C = a I_{A+} + a^2 I_{A-} + I_{A0}$$

$$I_{A+} = 1/3 (I_A + a I_B + a^2 I_C)$$

$$I_{A-} = 1/3 (I_A + a^2 I_B + a I_C)$$

$$I_{A0} = 1/3 (I_A + I_B + I_C)$$



二、Y, y_n联结组的单相短路

1、确定边界条件

- $I_a = I_k, \quad I_b = I_c = 0$

2、利用对称分量法分析

$$I_{a0} = 1/3 I_k, \quad I_{a+} = 1/3 I_k, \quad I_{a-} = 1/3 I_k, \quad I_{b0} = 1/3 I_k, \quad I_{b+} = 1/3 a^2 I_k,$$

$$I_{b-} = 1/3 a I_k, \quad I_{c0} = 1/3 I_k, \quad I_{c+} = 1/3 a I_k, \quad I_{c-} = 1/3 a^2 I_k$$

- 忽略励磁电流时，据磁势平衡，一次侧也将产生 3 个电流系统与二次侧的三个电流系统平衡，归算后

$$I_{A+} = -1/3I_k, \quad I_{A-} = -1/3I_k, \quad I_{A0} = 0$$

$$I_{B+} = 1/3a^2I_k, \quad I_{B-} = 1/3aI_k, \quad I_{B0} = 0$$

$$I_{C+} = 1/3aI_k, \quad I_{C-} = 1/3a^2I_k, \quad I_{C0} = 0$$

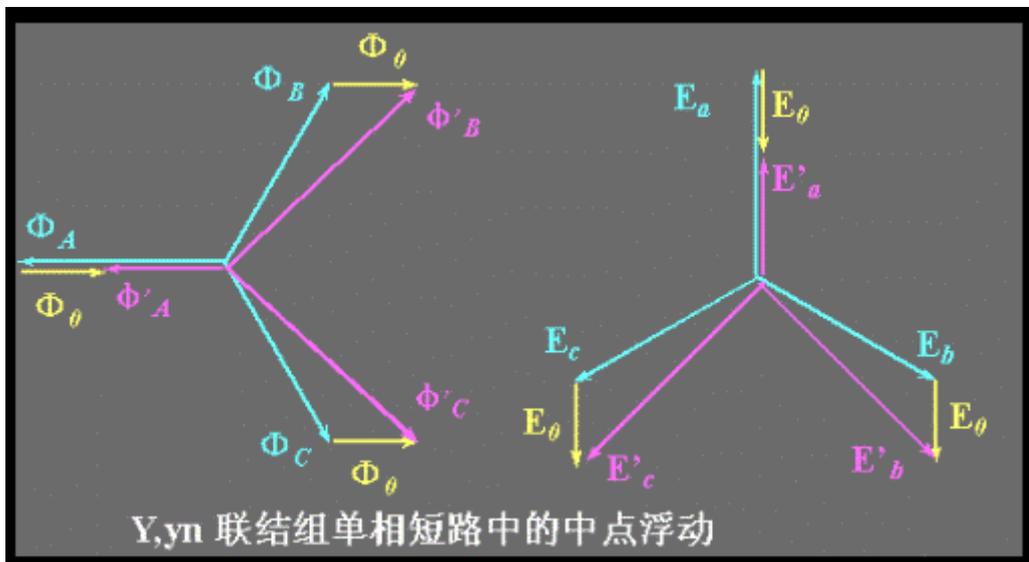
3、将三序合成后得出结论

$$I_A = I_{A+} + I_{A-} + I_{A0} = -2/3I_k$$

$$I_B = I_{B+} + I_{B-} + I_{B0} = 1/3I_k$$

$$I_C = I_{C+} + I_{C-} + I_{C0} = 1/3I_k$$

- 在短路前，三相磁通 Φ_A 、 Φ_B 、 Φ_C 和二次侧的三相电势 E_a 、 E_b 、 E_c 均为三相对称电势。
- 短路后一、二次侧的正、负序电流系统相互平衡，不会影响原来的对称磁通和电势。
- 但二次侧的零序电流得不到平衡，将在铁心中激励一个零序磁通 Φ_{a0} 、 Φ_{b0} 、 Φ_{c0} 叠加在原来的三相对称磁通上，得到一组不对称三相磁通 Φ'_A 、 Φ'_B 、 Φ'_C 。
- 对应的感应电势将不对称。二次电势相量图的中心将下移，b、c 相电势升高，a 相电势下降。中点浮动的幅度依零序磁通大小而定。
- 组式变压器的零序磁通畅通无阻，所以 Y, yn 接法的组式变压器单相短路时会发生严重的中点浮动，使得 b、c 相电压达到危险的高值。
- 芯式变压器中零序磁通被大大抑制，所以中点浮动不会严重，在容量不大的配电变压器可以使用心式 Y, yn 接法。



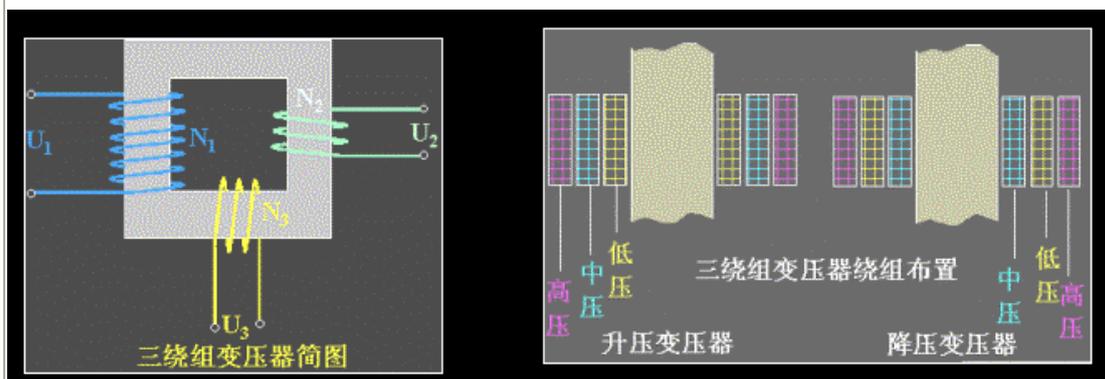
第 8 章 三绕组变压器、自耦变压器、互感器

8-1 三绕组变压器

一、结构和用途

- 三绕组变压器的每相有 3 个绕组，当一次绕组接到交流电源后，另外 2 个绕组就感应出不同的电势，这种变压器用于需要 2 种不同电压等级的负载。

- 发电厂和变电所通常出现三种不同等级的电压，所以三绕组变压器在电力系统中应用比较广泛。
- 每相的高中低压绕组均套于同一铁心柱上。为了绝缘使用合理，通常把高压绕组放在最外层，中压和低压绕组放在内层。
- 额定容量是指容量最大的那个绕组的容量，一般容量的百分比按高中低压绕组有三种形式 100/100/50、100/50/100、100/100/100。



二、特性

- 3 个变比:

$$k_{12} = N_1/N_2 \approx U_1 / U_2$$

$$k_{13} = N_1/N_3 \approx U_1 / U_3$$

$$k_{23} = N_2/N_3 \approx U_2 / U_3$$

- 负载运行时若不计空载电流 I_0 ，则变压器的磁势平衡方程为

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 + I_3 N_3 = 0$$

$$I_1 + I_2/k_{12} + I_3/k_{13} = 0$$

$$I_1 + I_2' + I_3' = 0$$

- 简化等效电路中的 $Z_1 = R_1 + jX_1$ 为一次侧的阻抗， $Z_2' = R_2' + jX_2'$ 为二次侧折算到一次侧的阻抗； $Z_3' = R_3' + jX_3'$ 为三次侧折算到一次侧的阻抗，六个参数可以根据稳态短路试验求得。

$$Z_{k12} = R_{k12} + jX_{k12} = (R_1 + R_2') + j(X_1 + X_2')$$

$$Z_{k13} = R_{k13} + jX_{k13} = (R_1 + R_3') + j(X_1 + X_3')$$

$$Z_{k23}' = R_{k23}' + jX_{k23}' = (R_2' + R_3') + j(X_2' + X_3')$$

$$R_1 = 1/2 (R_{k12} + R_{k13} - R_{k23}')$$

$$X_1 = 1/2 (X_{k12} + X_{k13} - X_{k23}')$$

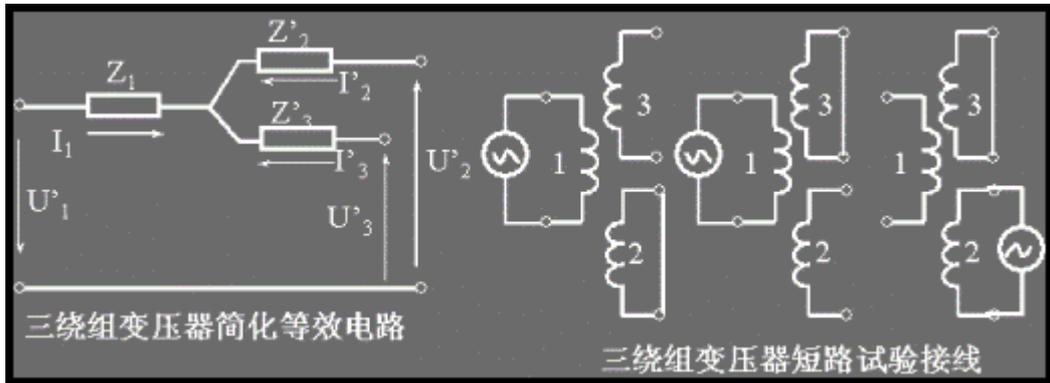
$$R_2' = 1/2 (R_{k12} + R_{k23}' - R_{k13})$$

$$X_2' = 1/2 (X_{k12} + X_{k23}' - X_{k13})$$

$$R_3' = 1/2 (R_{k13} + R_{k23}' - R_{k12})$$

$$X_3' = 1/2 (X_{k13} + X_{k23}' - X_{k12})$$

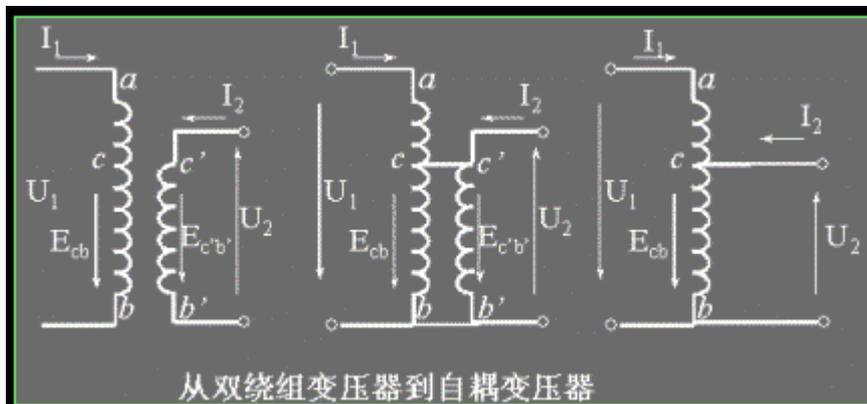
- 知道参数后就可以根据等效电路计算特性了。



8-2 自耦变压器 (Autoformer)

一、定义

原、副方绕组有共同部分的变压器称为自耦变压器。



二、特点

1、变比 $k_a = U_1/U_2 = N_{ab}/N_{bc}$

2、磁势平衡：

$$I_1 N_{ac} + (I_1 + I_2) N_{bc} = I_0 N_{ab}$$

$$I_1 (N_{ab} - N_{bc}) + (I_1 + I_2) N_{bc} = I_0 N_{ab}$$

$$I_1 N_{ac} + I_{cb} N_{bc} = 0$$

$$I_{ac} N_{ac} = -I_{cb} N_{bc}$$

$$I_1 N_{ab} + I_2 N_{bc} = 0$$

$$I_1/I_2 = -N_{ab} / N_{ac} = -1 / k_a$$

也就是在忽略激磁电流后一个绕组本身的两段存在着磁势平衡。

3、易制成调压器

三、传导容量和电磁容量

$$S_{ac} = U_{ac} I_{ac} = (U_1 - U_2) I_1 = U_1 I_1 (1 - 1/k_a) = S_{ab} (1 - 1/k_a)$$

$$S_{cb} = U_{cb} I_{cb} = (I_1 + I_2) U_2 = U_2 I_2 (1 - 1/k_a) = S_{ab} (1 - 1/k_a)$$

可见两段绕组的容量均只有变压器容量 $(1 - 1/k_a)$ 倍。

自耦变压器不仅可以省去一个绕组，而且其绕组容量要比相应的双绕组变压器小，这样就减少铁、铜等材料，缩小尺寸。

$(1 - 1/k_a)$ 越小则省材越多，所以适合于 k_a 接近于 1 的情况。

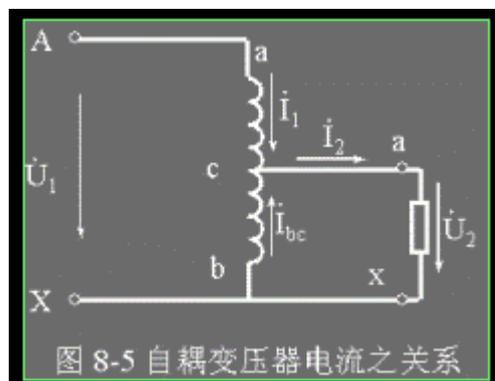


图 8-5 自耦变压器电流之关系

$I_2=I_1+I_{bc}$ 此式由相量式转换为代数式是成立的

$S_2=U_2I_2=U_2I_1$ (传导容量) + U_2I_{bc} (电磁容量) 各占百分比: $S_{cd}/S_2 = I_1/I_2 = 1/k_a$

$S_{dc}/S_2=1-S_{cd}/S_2=1-1/k_a$

8-3 互感器

概述

- 互感器属测量装置, 按变压器原理工作。
- 电力系统中的大电流、高电压有时无法直接用普通的电流表和电压表来测量, 必须通过互感器将待测电量按比例减小后测量。
- 互感器具有 2 种作用: 将高电量转换为能用普通标准仪表测量的电量 1A/5A/100V/500V; 将仪表与高压电路隔离, 保证仪表及人身安全。

一、电流互感器

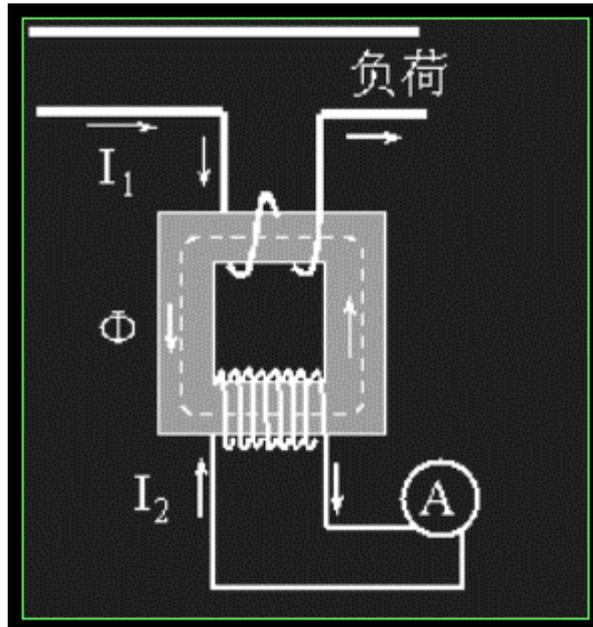
- 一次侧只有 1 到几匝, 导线截面积大, 串入被测电路。二次侧匝数多, 导线细, 与阻抗较小的仪表 (电流表、功率表的电流线圈) 构成闭路。
- 电流互感器的运行情况相当于二次侧短路的变压器, 一般选择很低的磁密 (0.08-0.1)T, 并忽略励磁电流, 则

$$I_1/I_2=N_2/N_1=k \quad .$$

- 励磁电流是误差的主要根源。

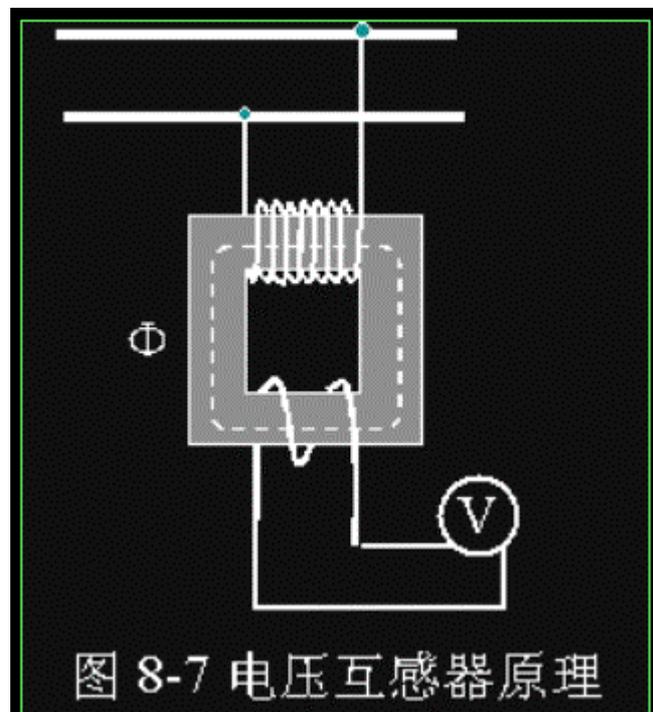
0.2/0.5/1 / 3, 1 表示变比误差不超过 1%。

- 注意事项:
- 副边绕组必须可靠接地, 以防止由于绝缘损坏后, 原边高电压传入危及人身安全。
- 副边绝对不容许开路。开路时互感器成了空载状态, 磁通高出额定值许多 (1.4-1.8T), 除了产生大量铁耗损坏互感器外, 还在副边绕组感应出危险的高压, 危及人身安全。



二、电压互感器

- 电压互感器的运行情况相当于二次侧开路的变压器，其负载为阻抗较大的测量仪表。
- 副边电流产生的压降和励磁电流的存在是电压互感器误差之源。
- 电压互感器副边不能接过多的负载；且要求铁心不饱和(0.6-0.8T)。
- 注意事项：副边绕组连同铁心必须可靠接地。
副边绝对不容许短路。

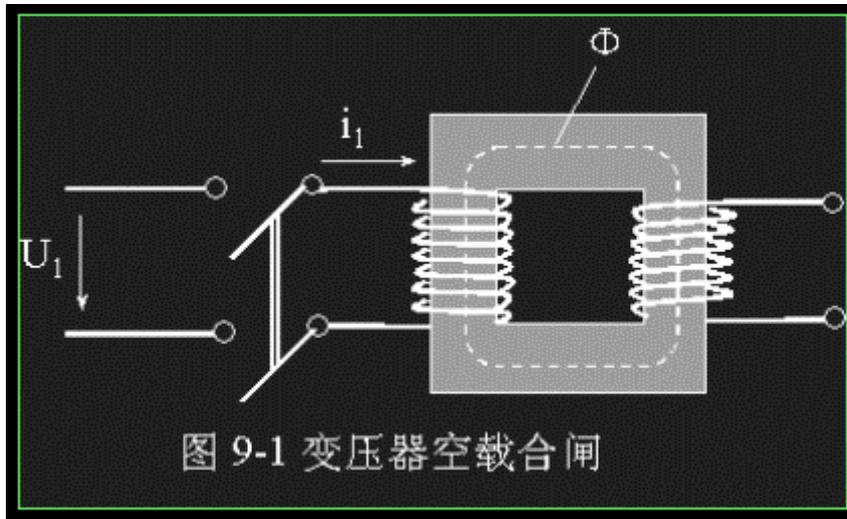


概 述

- 不对称运行属于变压器的一种稳态不正常运行
- 暂态运行是由于变压器运行情况的突变引起，属于另一类不正常运行。
- 引起暂态的例子：负载突变、空载合闸、突然短路、雷击、开关的通断等。
- 暂态时间不长，危害甚大。往往引起过电流或过电压，严重时损坏变压器。

9-1 变压器空载合闸

- 稳态运行时，变压器空载电流 I_0 很小，大型变压器甚至不到 1% I_N ；但变压器在空载突然接入电网时，可能有很大的瞬时冲击电流，可达 I_0 的几十倍到几百倍， I_N 的 6~8 倍。
- 此现象的存在是由于饱和及剩磁引起的。若不采取措施，会导致合闸不成功。



- 设外施电压按正弦规律变化，则

$$u_1 = 1.414 * U_1 \sin(\omega t + \alpha) = R_1 i_1 + N_1 d\Phi / dt$$

- 电阻 R_1 i_1 较小，初始分析时可以略去。但 R_1 的存在是瞬态过程衰减的重要因素。
- 不考虑电阻压降时

$$N_1 d\Phi / dt = 1.414 * U_1 \sin(\omega t + \alpha)$$

$$d\Phi = [1.414 * U_1 / N_1] \sin(\omega t + \alpha) dt$$

$$\Phi = [-1.414 * U_1 / (\omega N_1)] \cos(\omega t + \alpha) + C$$

$$= -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + C$$

- 设无剩磁 $t=0$ ， $\Phi=0$ ，得

$$C = \Phi_m \cos \alpha$$

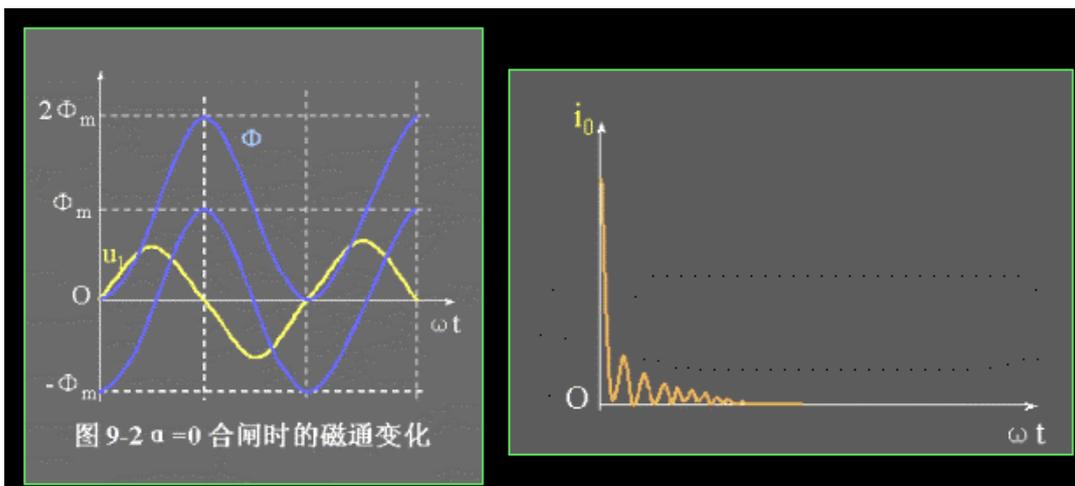
$$\Phi = \Phi_m [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)]$$

• 讨论:

①若在初相角 $\alpha = 0$ 时合闸, 则

$$\Phi = \Phi_m (1 - \cos \omega t)$$

- $\omega t = \pi$ 时, $\Phi = 2\Phi_m$, 再考虑到剩磁, $\Phi = (2.2 \sim 2.3)\Phi_m$, 导致磁路过饱和, 相应的励磁电流急剧增大, 达正常时空载电流的几百倍, 额定电流的 6-8 倍。



②若在初相角 $\alpha = \pi / 2$ 时合闸, 则

$$\Phi = -\Phi_m \sin \omega t$$

- 变压器即进入稳态, 是理想合闸时间。

③电流的衰减

- 由于 R_1 的存在, 电流脉冲将逐渐衰减。衰减的快慢由时间常 L_1/R_1 决定, 一般在 1s 内, 暂态电流就会大大衰减。小型变压器电阻较大, 电抗较小, 衰减较快, 约几个周期可达稳态; 大型变压器, 电阻较小, 电抗较大, 衰减较慢, 可能延续 20s 才达到稳态。

9-2 变压器突然短路

概述

- 正常运行的变压器二次侧突然短路时, 将在一、二次绕组中产生很大的短路电流, 短路电流产生的机械应力及发热将危及变压器的可靠运行, 甚至毁坏变压器。
- 变压器突然短路电流很大, 分析时可以忽略激磁电流, 这时变压器的等效电路可采取简化

等效电路。

(1) 建立微分方程并求解

$$u_1 = 1.414 * U_1 \sin(\omega t + \alpha) = L_k \frac{di_k}{dt} + R_k i_k$$

- 假设突然短路时变压器空载，即初始条件为

$t=0$ 时， $i_k=0$ ，则

$$\begin{aligned} i_k &= i'_k + i''_k = 1.414 * U_1 / Z_k \\ &\times [\sin(\omega t + \alpha - \phi_k) - \sin(\alpha - \phi_k) e^{-R_k t / L_k}] \\ &= -1.414 * I_k [\cos(\omega t + \alpha) - \cos \alpha e^{-R_k t / L_k}] \end{aligned}$$

- 其中： $Z_k = \sqrt{R_k^2 + (\omega L_k)^2}$
- $\phi_k = \arctan(\omega L_k / R_k) \approx 90^\circ$ 为短路阻抗角。
- $I_k = U_1 / Z_k$ 为稳态短路电流的有效值。

(2) 分析 i_{kmax}

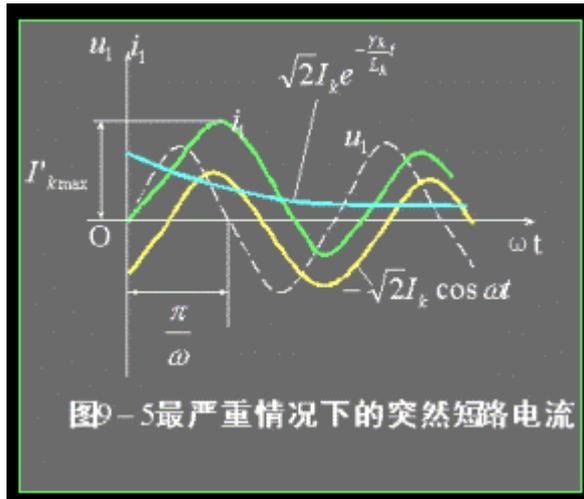
- 若初相角 $\alpha=0$ 时短路，在 $\omega t = \pi$ 时， i_k 会达到最大值，

$$I_{kmax} = 1.414 * I_k [1 + e^{-(R_k \pi) / (\omega L_k)}] = k_k * 1.414 * I_k$$

- k_k 是突然短路电流最大值与稳态短路电流幅值之比。大小 R_k / L_k 有关。一般中小型变压器 $k_k = 1.2 \sim 1.35$ ，大型变压器 $k_k = 1.75 \sim 1.81$

$$I_{kmax} = (1.5 \sim 1.8) * 1.414 * I_{1N} / Z_k^*$$

$$Z_k^* = 0.06 \text{ 时， } I_{kmax} / (1.414 * I_{1N}) = 25 \sim 30$$

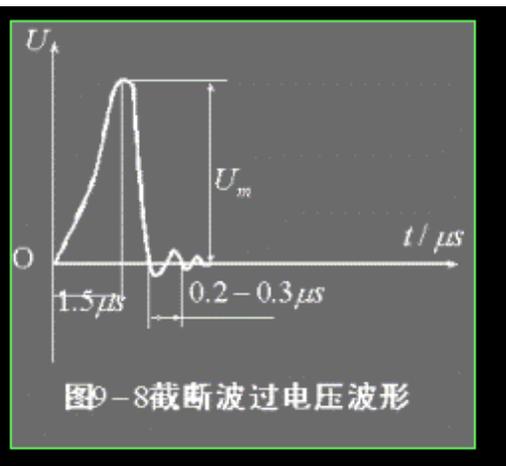
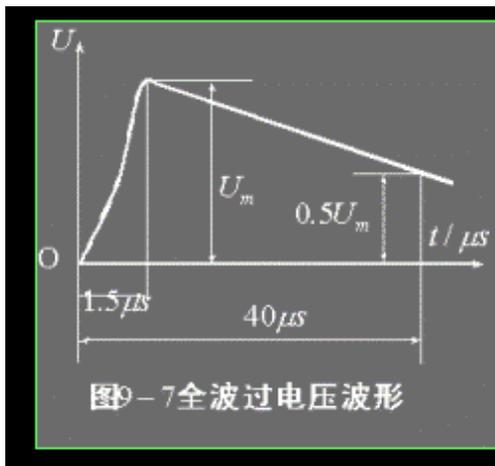


(3) 暂态短路时的机械应力

- 电流与漏磁场相互作用，在绕组各匝中将产生作用力， $F = B_e \cdot I \cdot l$ 。正常运行时，作用力较小。短路时， F 将按电流平方剧增。
- 高低压绕组电流方向相反，径向力将使得低压绕组承受压力，高压绕组承受张力；而轴向力从上下挤压绕组。这些应力会使得绕组可能被拉断或者变形。

9-3 过电压现象

- 变压器运行时，若因某种原因使得电压超过额定电压，即称为过电压。
- 变压器的过电压现象有两种：大气过电压/操作过电压。
- 输电线遭雷击、带电云层与输电线间产生静电感应或者放电，均会形成大气过电压。
- 当变压器或线路的开关合闸或者拉闸时，因系统中产生电磁能量转换而导致的过电压称为操作过电压。过电压时间较短，为几十微秒。



第三篇 异步电机

- 交流旋转电机(AC Rotary machines)主要包括异步电机和同步电机两大类；两类电机在结构上既具有共同之处，又各有其自身特点。

- 共同之处(对于典型的交流电机)在于定子铁心和绕组, 不同之处在于转子结构和绕组。
- 交流旋转电机的共同问题包括:
 - (1) 三相交流绕组的结构;
 - (2) 三相交流绕组产生的电势;
 - (3) 三相交流绕组产生的磁势。
- 本篇的教学内容包括共同问题和异步电机两大块。
- 本篇的教学顺序是:
 - 第 10 章 异步电机结构和交流绕组
 - 第 11 章 交流绕组的感应电势和磁势
 - 第 12 章 异步电机的分析方法
 - 第 13 章 异步电机的起动和调速
 - 第 14 章 单相异步电动机

第 10 章 异步电机的结构及交流绕组

10-1 异步电机的结构和额定值

一、异步电机(Asynchronous Machines)的用途和类型

★用途: 异步电机主要用作电动机, 应用最广泛的一种电动机, 厂矿企业, 交通工具, 娱乐, 科研, 农业生产, 日常生活都离不开异步电动机。

★类型: 异步电机主要分为: 鼠笼式异步电动机, 绕线式异步电动机和各种控制用电动机三大类。
看录像。

二、异步电机的结构(Structure)

(1) 定子

- 定子铁心 (1, 2)
- 叠片结构, 定子冲片 (圆形冲片, 扇形冲片), 径向通风沟 (风道), 槽, 槽型。
- 定子绕组: 成型线圈 (2), 散嵌线圈, 单层, 双层, 绕组联结方法。
- 其他部件: 机座, 端盖, 风罩, 铭牌等。

问题: 定、转子铁心为什么必须用硅钢片叠压而成?

(2) 转子

- 转子铁心 (1, 2): 转子冲片。
- 转子绕组:
 1. 鼠笼式(squirrel cage)绕组, 铸铝转子
 2. 绕线式绕组
- 其他部件: 轴, 风扇等

(3) 气隙

- 定转子之间的间隙, 很小, 0.2-1mm. 对电机的性能影响很大。
- 按结构分类: 鼠笼式异步电动机: 结构简单, 坚固, 成本低, 运行性能不如绕线式。
绕线式异步电动机: 通过外串电阻改善电机的起动, 调速等性能。

三、异步电机的铭牌(Name plate)及额定值(Rating)

- 铭牌: 型号、额定值、绕组联结方式及生产厂家等。
- 型号举例: Y132S-4,
Y--异步电动机;

132--机座中心高度为 132mm;

S--短铁心;

4--极数。

- 额定值:正常运行时的主要数据指标。
- 绕组联结方式: Δ 接法或者 Y 接法。 主要额定值如下 (三相时):
额定电压: U_N (V), 额定运行时, 规定加在定子绕组上的线电压;
额定电流: I_N (A), 额定运行时, 规定加在定子绕组上的线电流;
额定功率: P_N (W; kW), 额定运行时, 电动机的输出功率;
额定转速: n_N (r/min), 额定运行时, 电动机的转子转速;
额定频率: f_N (Hz), 规定的电源频率 (我国用工 频 50Hz);
额定效率 η_N , 额定功率因数: $\cos \phi_N$ 等。 额定电压、额定电流、额定功率的关系
- 无论 Δ 接法或是 Y 接法, 下式均成立:

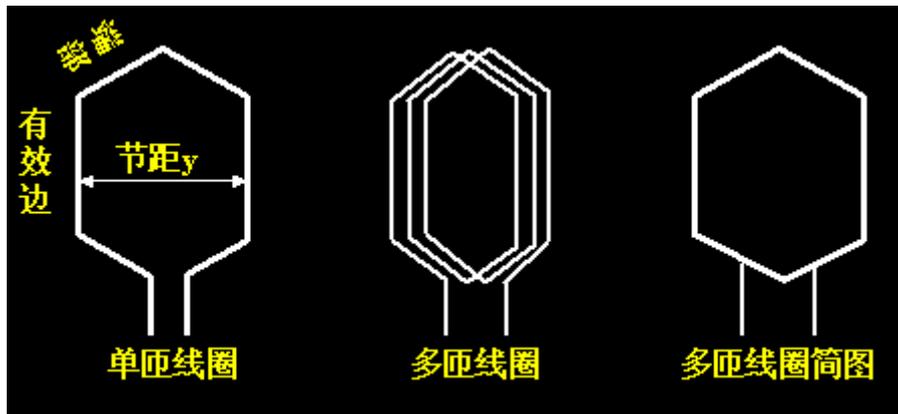
$$P_N = 3 U_{Np} I_{Np} \cos \phi_N \eta_N = P_{1N} \eta_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos \phi_N \eta_N \text{ (W)}$$

10-2 交流绕组

- 有关交流绕组的几个概念
- 交流绕组排列及连线的规律
- 单层绕组、双层绕组

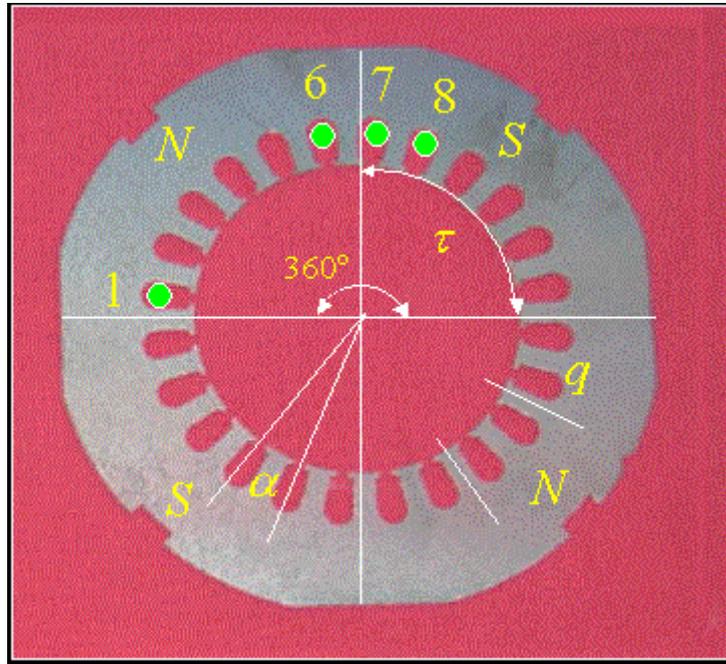
一. 有关交流绕组的常用名词

- 线圈: 是构成绕组的元件。绕组就是将线圈按一定规律进行排列和联结。线圈可以区分为多匝线圈和单匝线圈。与线圈相关的概念包括有效边、端部、线圈节距等 (看图)



- 极距: 沿定子铁心内圆每个磁极所占的范围 用槽数表示: $\tau = Z_1 / (2p)$ (槽)
用长度表示: $\tau = (\pi D) / (2p)$ (看图)
- 电角度
- 转子铁心的横截面是一个圆, 其几何角度为 360 度。
- 从电磁角度看, 一对 N, S 极构成一个磁场周期, 即一对极为 360 电角度
- 电机的极对数为 p 时, 气隙圆周的角度数为
- $(p \cdot 360)$ 电角度。(看图)

- 节距
- 线圈两个有效边之间所跨过的槽数称为线圈的节距，用 y 表示。（看图）
- $y < \tau$ —短距线圈； $y = \tau$ —整距线圈；
- $y > \tau$ —长距线圈（一般不用）。



- 单层绕组和双层绕组
- 单层绕组一个槽中只放一个元件边（看图）
- 双层绕组一个槽中放两个元件边。（看图）

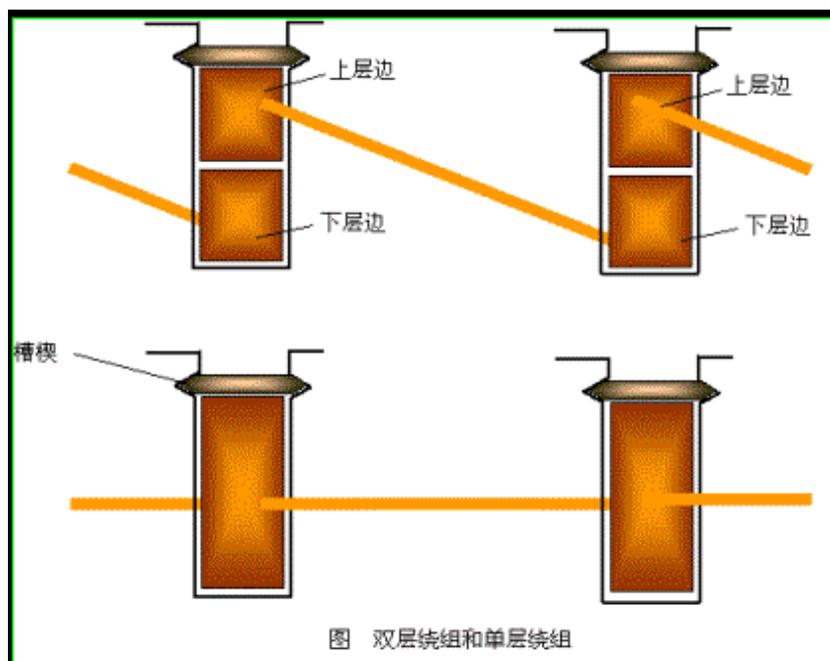


图 双层绕组和单层绕组

- 槽距角 α ，相数 m ，每极每相槽数 q ，线圈组：

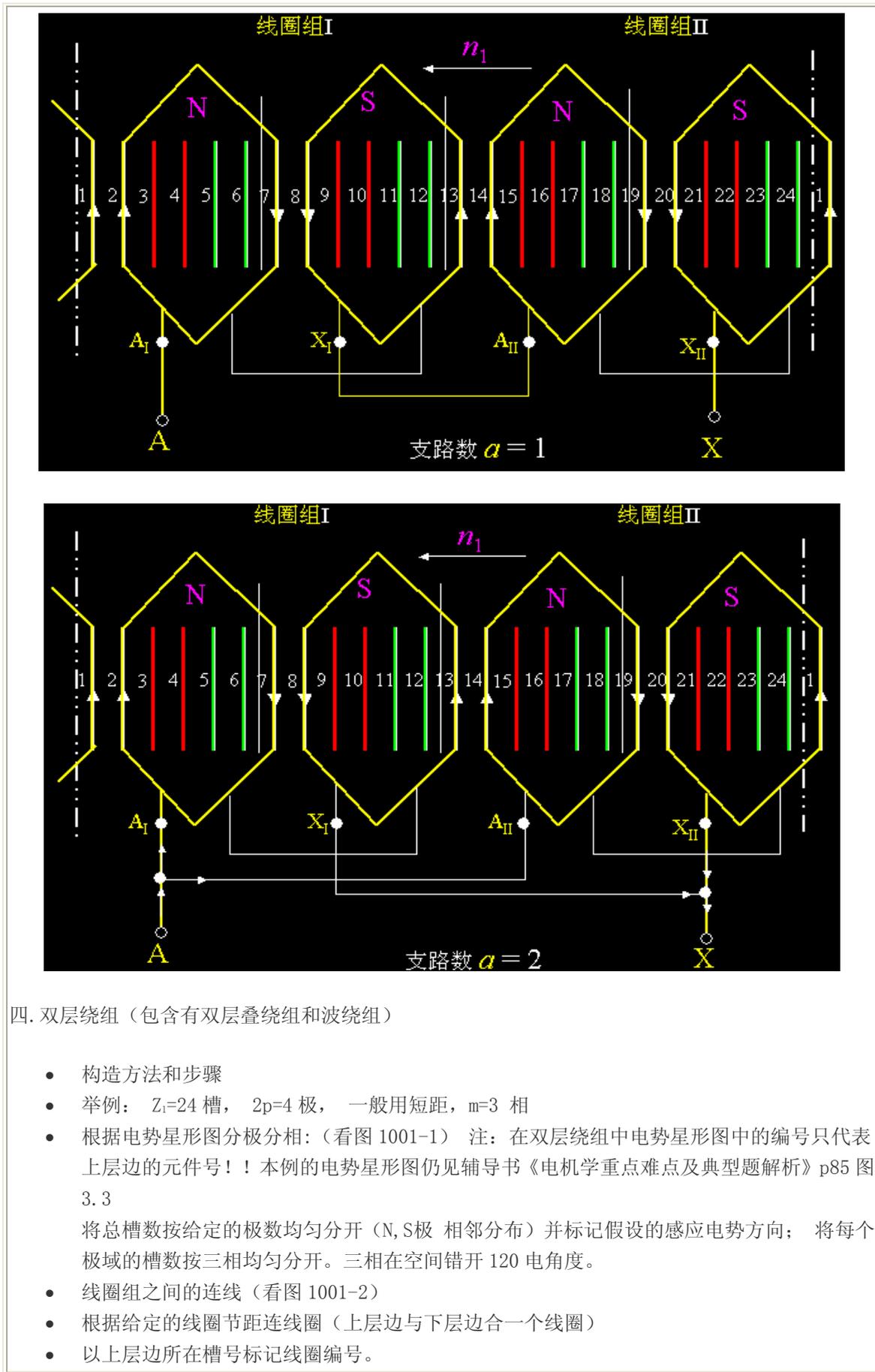
- $\alpha = (p \cdot 360 / z_1)$ (电角度) (看图);
- $m =$ 为相数;
- $q = z_1 / (2pm)$ (槽) (看图);
- 线圈组: q 个线圈就组成了一个线圈组。

二. 交流绕组的构成原则和电势星形图

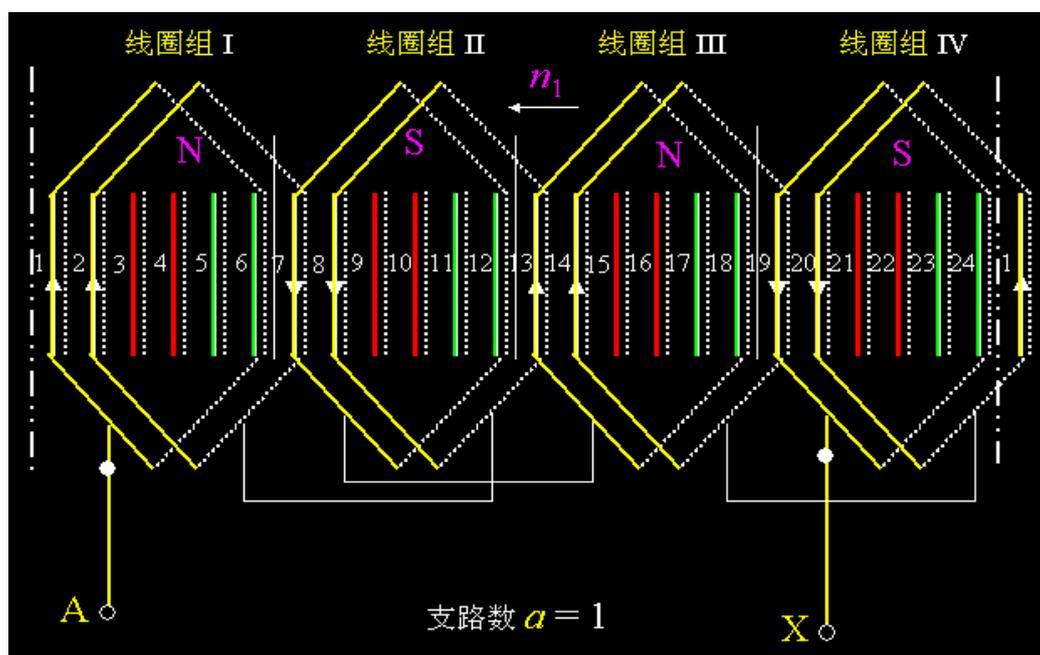
- 均匀原则: 每个极域内的槽数(线圈数)要相等, 各相绕组在每个极域内所占的槽数应相等
- 每极槽数用极距 τ 表示: $\tau = z_1 / 2p$
- 每极每相槽数 $q = z_1 / (2pm)$ (举例)
- 绕组对称原则: 三相绕组在电机的圆周空间互相错开 120 电角度, 三相绕组中各相的匝数、线径和绕组形式均相同。
- 如槽距角为 $\alpha = p \cdot 360^\circ / z_1$
- 电势相加原则: 线圈两个圈边的感应电势应该相加; 线圈与线圈之间的连接也应符合这一原则。
- 如线圈的一个边在 N 极下, 另一个应在 S 极下。(举例)
- 电势星形图: 各槽导体电势相量就构成了一个辐射状的星形图。
- 电势星形图用来寻找各槽导体属于哪一相, 它是分析绕组展开图的有效工具。上例的电势星形图见辅导书《电机学重点难点及典型题解析》p85 图 3.3

三. 单层绕组

- 构造方法和步骤(举例: $Z_1=24, 2p=4$, 整距, $m=3$)
- 画出电势星形图:
- 根据电势星形图分极分相:(看图 1000-1)
将总槽数按给定的极数均匀分开(N, S极相邻分布)并标记假设的感应电势方向。
- 将每个极域的槽数按 3 相均匀分开。3 相在空间错开 120 电角度。
- 连线圈和线圈组:(看图 1000-2)
将 1 对极域内属于同一相的某两个圈边连成一个线圈。(共有 q 个线圈, 为什么?) 将 1 对极域内属于同一相的 q 个线圈连成 1 个线圈组(共有多少个线圈组?)
以上连接应符合电势相加原则
- 连相绕组:(看图 1000-3) 将属于同一相的 p 个线圈组连成 1 相绕组, 并标记首尾端。
串联与并联, 电势相加原则。
按照同样的方法构造其他 2 相。
- 连三相绕组
- 将 3 个构造好的单相绕组连成完整的三相绕组。
- Δ 接法或者 Y 接法。
- 单层绕组分类
- 等元件式整距叠绕组
- 同心式绕组
- 交叉链式绕组
- 单层绕组主要用于小型异步电动机。



- 将同一极域内属于同一相的某两个圈边连成一个线圈，而
- q 个线圈就构成一个线圈组。
- 将同一极域内属于同一相的 q 个线圈连成一个线圈组（共有多少个线圈组？）
- 以上连接应符合电势相加原则
- 连接每相绕组：（看图 1001-3）
将属于同一相的 $2p$ 个线圈组连成一相绕组，并标记首尾端。串联或并联时，要符合电势相加原则。
按照同样的方法连接其他两相。
- 连三相绕组
将三个构造好的单相绕组连成完整的三相绕组 Δ 接法或者 Y 接法
- 10kW 以上的电机一般采用双层绕组



五. 绕组小结

1. 线圈组数 Q 的计算：对于单层绕组 $Q=p$ ；而对于双层绕组 $Q=2p$ 。因为 Q 值决定了最大并联支路数 a 是多少。
2. 线圈组与线圈组之间可以串联也可以并联。例如：某 4 极 24 槽交流电机为三相单层同心式绕组则：在串联时支路数 $a=1$ ；在并联时 $a=2$ 。
3. 对于复杂绕组，如何寻找各槽导体属于哪一相，就借助于电势星形图。
4. 单层绕组仅适用于小型交流电机，例如 Y 系列异步电动机的中心高小于等于 160 毫米者为小型交流电机。
5. 注意绕组与线圈的区别；无论单层绕组的线圈是否短距，绕组都得不到短距的效果，即单层绕组的短距系数 $k_r=1$ 。
6. 作业：P127 题 10-1, 2, 3

第 11 章 旋转电机交流绕组的电势和磁势

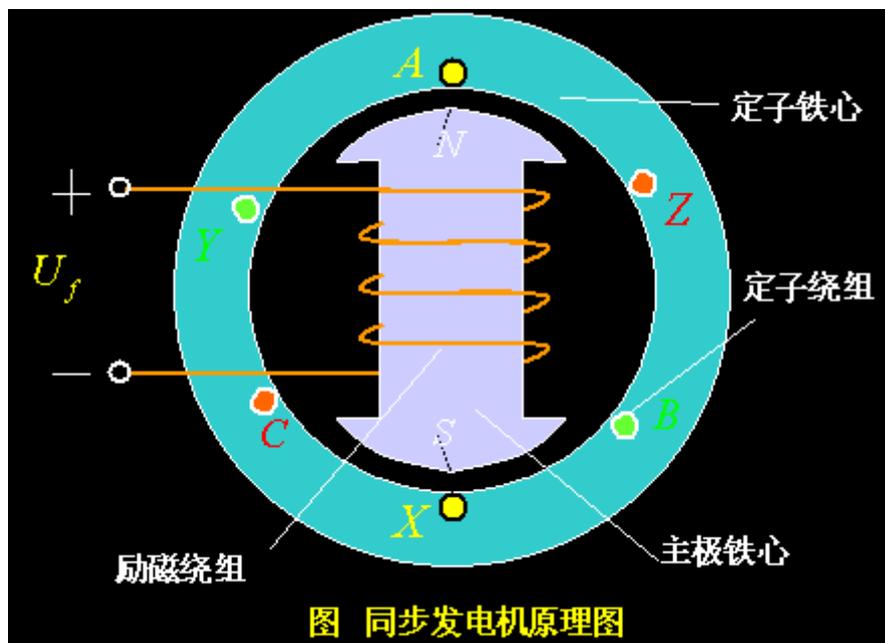
- 旋转磁场是交流电机工作的基础。

- 在交流同步电机理论中有两种旋转磁场：
 - (1) 电气旋转磁场
 - (2) 机械旋转磁场
- 通过原动机拖动磁极旋转可以产生机械旋转磁场。
- 三相对称电流通入三相对称绕组时在电机内部会自动产生一个圆形的电气旋转磁场。
- 交流绕组处于旋转磁场中，并切割这个旋转磁场，便产生感应电势。

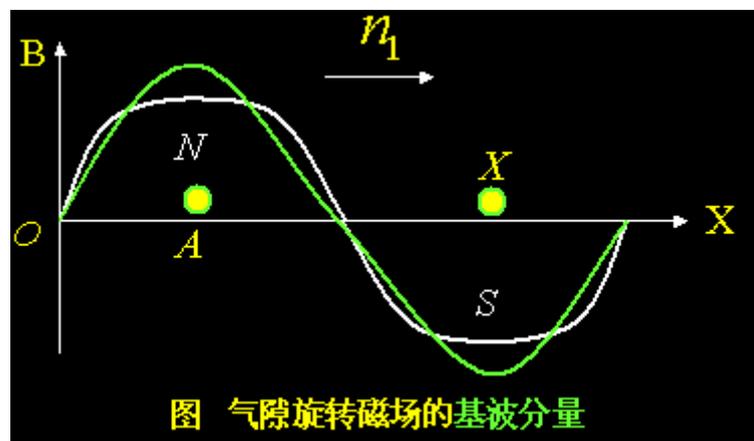
11-1 交流旋转电机定子绕组的感应电势

一、交流同步发电机的结构模型

- 同步发电机的结构模型如图所示：转子上有成对的磁极，定子上有三相对称交流绕组。



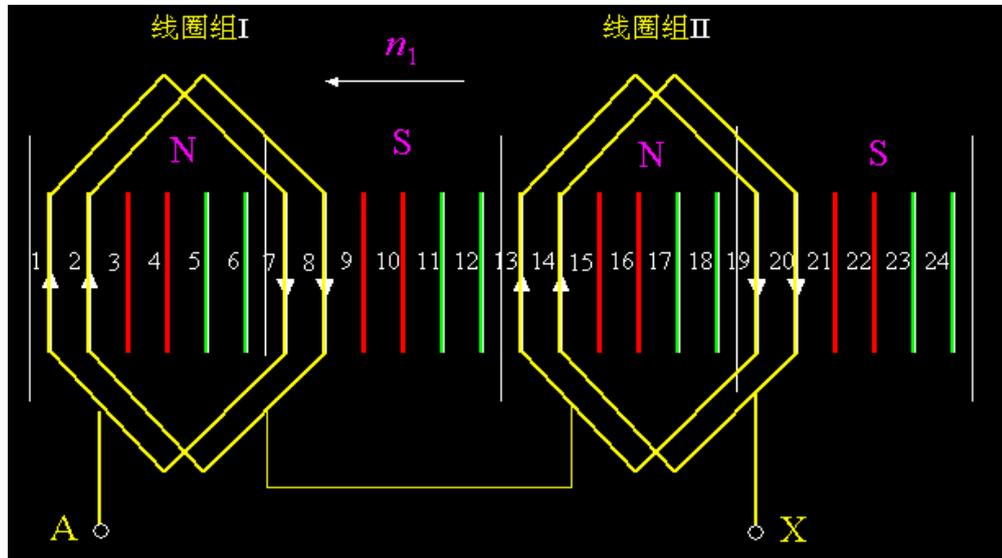
- 原动机带动转子旋转，形成机械旋转磁场。该磁场在气隙空间近似为正弦分布。四极同步发电机的原理演示基波磁场示意图



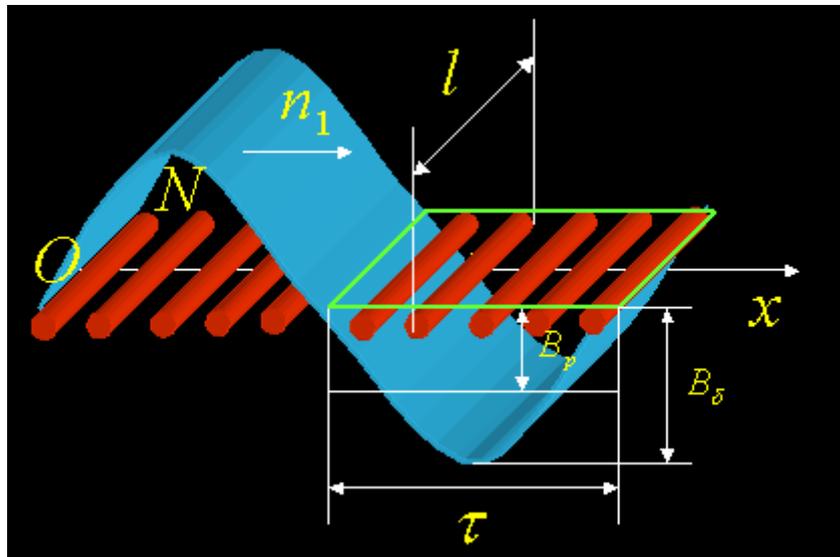
- 定子绕组的有效边被旋转磁场切割，并在其中产生感应电势。

二、交流绕组的感应电势

- 研究电势的次序：导体—线圈—线圈组—每相绕组的电势



1. 导体中的感应电势



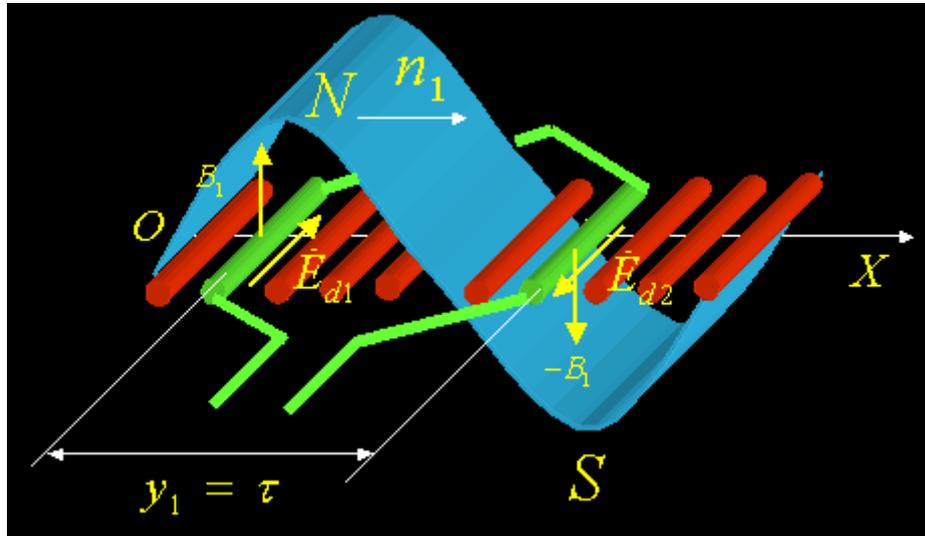
- 感应电势的波形
- $e_c(t) = B_c l v$
- 感应电势随时间变化的波形和磁感应强度在空间的分布波形相一致。
- 只考虑磁场基波时, 感应电势为正弦波。
- 感应电势的频率
- 转速为 n (r/min) 的同步电机, 导体中感应电势的频率 $f = (\text{div } n / 60)$ Hz.

问题 1: 4 极同步电机, 要使得导体中的感应电势为 50Hz, 转速应为多少?

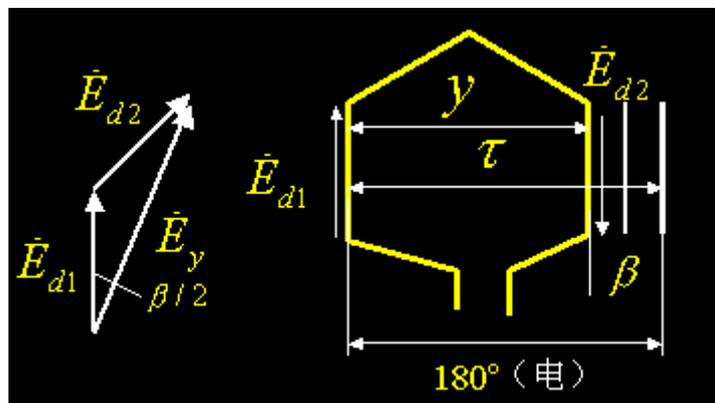
- 感应电势的大小: 看图 1100-4 $E_m = l v B_0$
 $v = 2 f \tau$
 $B_0 = \pi B_{av} / 2 = \pi \Phi_1 / (l \tau 2)$
 $E_m = l \times 2 \tau f \times \pi \Phi_1 / (l \tau 2) = \pi f \Phi_1$
- 导体电势的有效值为 $E_s = 2.22 f \Phi_1$
- 小结: 绕组中均匀分布着许多导体, 这些导体中的感应电势有效值、频率、波形均相同; 但是它们的相位不相同。

2. 线圈中的感应电势

- 整距线圈中的感应电势



- 线圈的两个有效边处于磁场中相反的位置, 其感应电势相位差为 180 电角度。
- $E_y = E_{n1} - E_{n2} = 2E_{n1}$
- 考虑匝数后: $E_y = 4.44 N_y f \Phi_1$
- 短距线圈中的感应电势



- 线圈两有效边在磁场中相距为 y , 其感应电势相位差是 $180 - \beta$ 电角度。

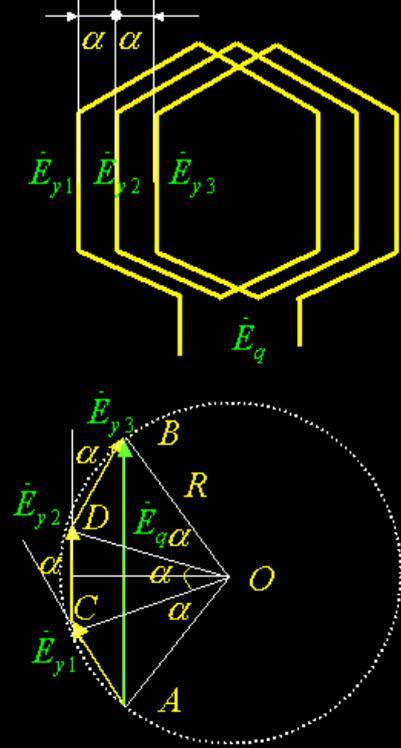
- $\beta = \alpha (\tau - y)$ (电角度)
- $E_y = 2 E_{n1} \cos(\beta/2) = 4.44 N_y f \Phi_1 k_y$
- 短距系数: $k_y = (\text{短距线圈电势}) / (\text{整距线圈电势}) = \cos(\beta/2)$
- 小结: 短距系数 k_y 小于等于 1, 故短距线圈感应电势有所损失; 但短距可以削弱高次谐波(后面要讲)。

3. 线圈组的感应电势

$$\begin{aligned} \dot{E}_q &= \dot{E}_{y1} + \dot{E}_{y2} + \dot{E}_{y3} \\ E_q &= 2R \sin \frac{q\alpha}{2} = 2 \frac{E_{y2}}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \sin \frac{q\alpha}{2} \\ &= qE_y \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = qE_y k_q = 4.44 q N_y f k_q \Phi_1 \end{aligned}$$

分布系数:

$$k_q = \frac{qE_y}{\sum_{i=1}^q \dot{E}_{yi}} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$



注: 分布系数小于 1, 通常 k_q 在 0.93~1.0 之间。

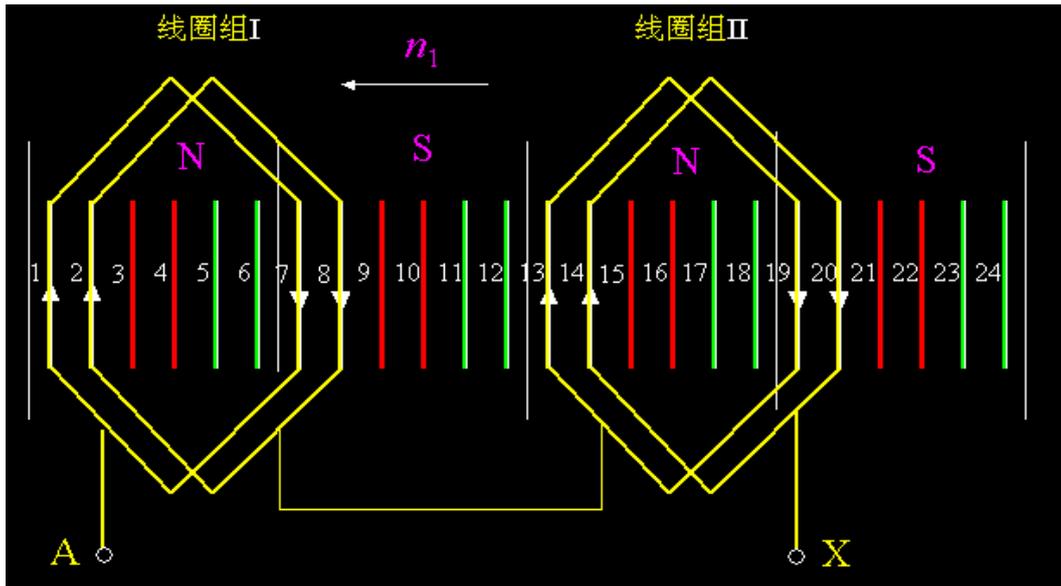
- 属于同一相的 q 个线圈, 构成一个线圈组。本例的图中 $q=3$
- 每个线圈的感应电势由两个圈边的感应电势相量相加而成。
- 整个线圈组的感应电势由所有属于该组的导体电势相量相加。
- 在该例中, 该组的感应电势为 3 个线圈的感应电势相量相加。

$$E_q = E_{y1} + E_{y2} + E_{y3} \quad \text{对应于图1100-8}$$

- 分布系数: $k_q = E_q / (qE_y) = \sin(q\alpha/2) / (q \sin \alpha/2)$
- 线圈组的电势: $E_q = 4.44 f q N_y \Phi_1 k_q k_y$
- 注: 本书中的分布系数小于 1, 而且 k_q 在 0.93~1.0 之间。

4. 每相绕组的电势

- 单层绕组的相电势:



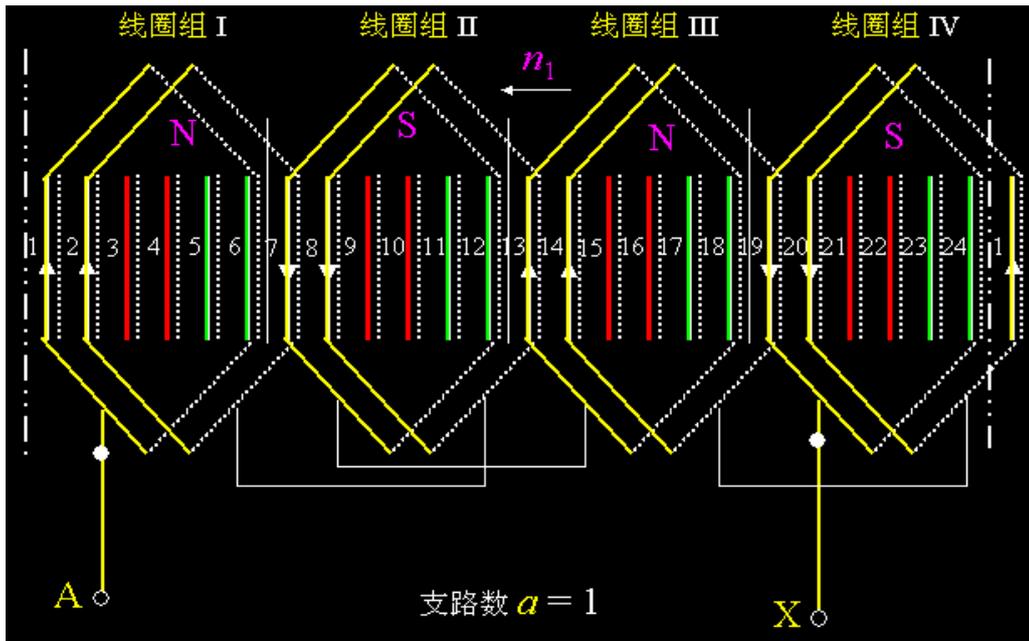
单层绕组每对极每相 q 个线圈，组成一个线圈组，共 p 个线圈组。

若 p 个线圈组全部并联时：相电势=线圈组的电势

若 p 个线圈组全部串联时：相电势= $div \times$ 线圈组电势

实际线圈组可并可串，单层绕组每相每个支路的总(串联)匝数： $N_1 = div \cdot q \cdot N_p / a$

则此时每相电势： $E_{div} = 4.44 f N_1 \Phi_1 k_q$



- 双层绕组的电势

双层绕组每极每相有 q 个线圈，构成一个线圈组，共有 $2p$ 个线圈组

这 $2p$ 个线圈组可并可串，则双层绕组每相每个支路的总（串联）匝数：

- $N_1 = 2 \text{div } q N_r / a$
- 双层绕组要考虑到短距系数，则
- 每相电势： $E_{\text{div}} = 4.44 f N_1 \Phi_1 K_{w1}$
- 其中，绕组系数： $K_{w1} = k_r k_q$

5. 本节小结：

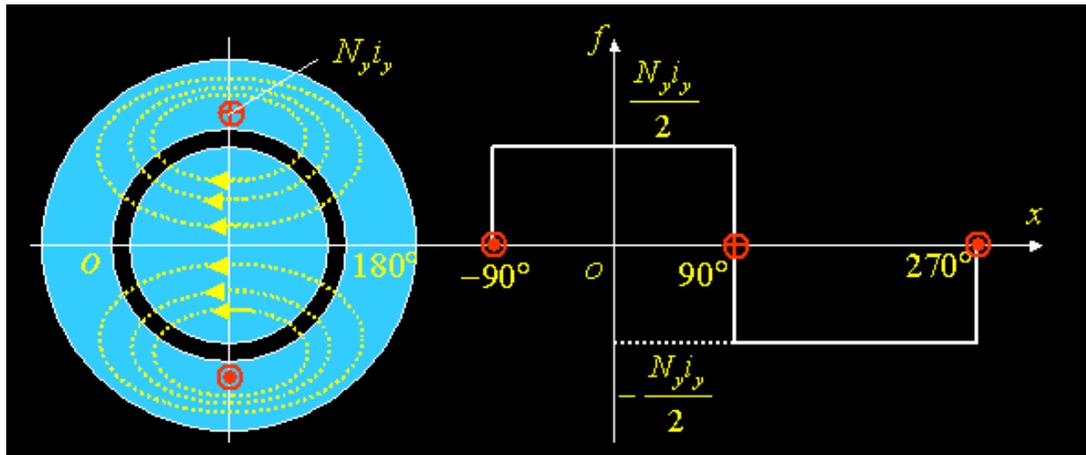
- 正弦分布的以转速 n_1 旋转的旋转磁场，在三相对称交流绕组中会感应出三相对称交流电势。
- 感应电势的波形与磁场分布波形相同，为正弦波。
- 感应电势的频率为 $f = \text{div } n / 60$ (Hz)
- 每相电势的大小为 $E_{p1} = 4.44 f N_1 \Phi_1 K_{w1}$
- 绕组系数： $K_{w1} = k_r k_q$
 $k_q = \sin(q\alpha/2) / (q \sin \alpha/2)$
 $k_r = \cos \beta / 2$

11-2 交流旋转电机单相绕组的磁势

一. 整距集中绕组的磁势

1. 脉振磁势的幅值

- 整距集中绕组(即一个线圈)在交流
- 电机中产生的磁势



- 磁力线穿过转子铁心、定子铁心和两个气隙
- 相对于气隙而言，由于铁心磁导率极大，则气隙中消耗的磁压降可以忽略不计。
- 一个气隙上消耗的磁势为： $f_y = N_y i_y / 2$
- 如果通过线圈的电流为 $i_y = I_{ym} \sin \omega t$

- 则矩形波磁势的大小也将随时间作正弦变化。
- 整距集中绕组产生的磁势是一个位置固定，幅值随时间按正弦变化的矩形波脉振磁势。
- 脉振磁势可以表示为：

$$f_y = [\sqrt{2}/2] N_y I_y \sin \omega t = F_y \sin \omega t$$

- 脉振磁势的幅值：
- $F_y = [\sqrt{2} / 2] N_y I_y$

2. 矩形波脉振磁势的分解

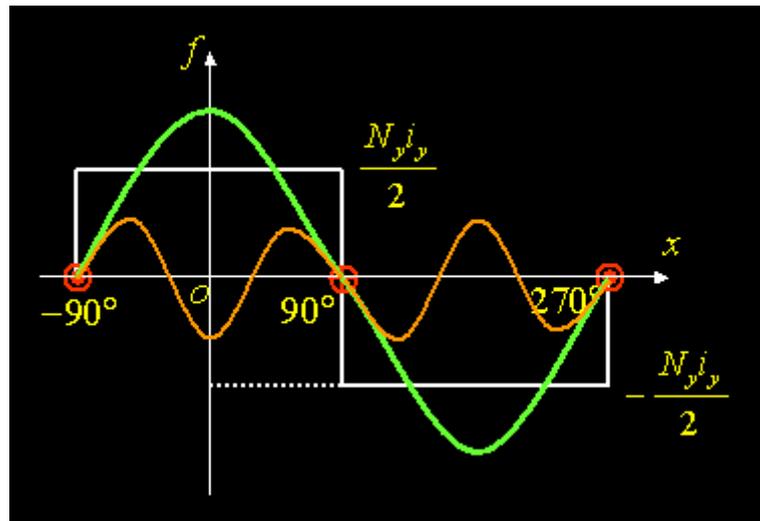
- 按照富立叶级数分解的方法可以把矩形波磁势分解为基波和一系列的谐波之和； $f_y(X,t) = (4/\pi) F_y (\cos X - (1/3) \cos 3X + (1/5) \cos 5X - (1/7) \cos 7X + \dots) \sin \omega t$

- 根据高等数学的理论，基波幅值为：

$$F_{y1} = (4/\pi) (\sqrt{2} / 2) N_y I_y = 0.9 N_y I_y$$

- 高次谐波磁势的幅值为：

$$F_{yn} = F_y / v = 0.9 N_y I_y / v$$

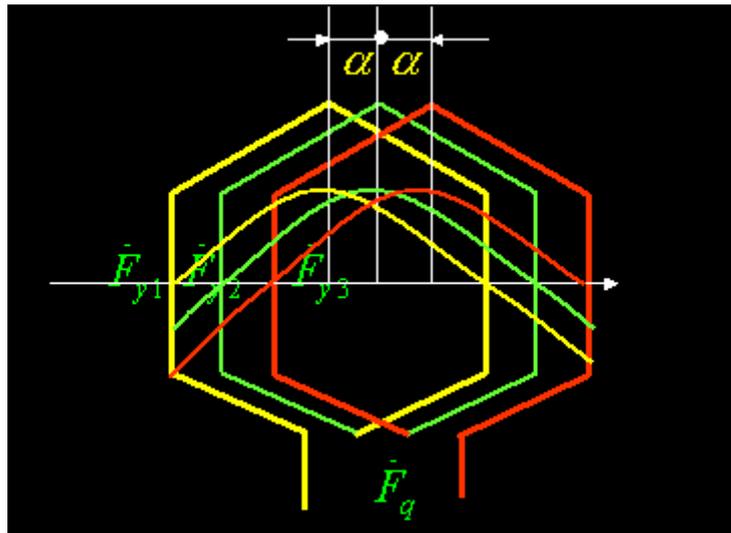


- 因为基波磁势对电机性能影响最大，故本书以后的分析(在没有特殊声明时)只考虑基波!!
- 对某瞬时来说,基波磁势的大小在空间按余(或正)弦分布;对气隙中某一点而言,基波磁势的大小随时间作正(或余)弦变化;基波磁势的幅值位置永远在该相绕组的轴线上。对应公式如下：

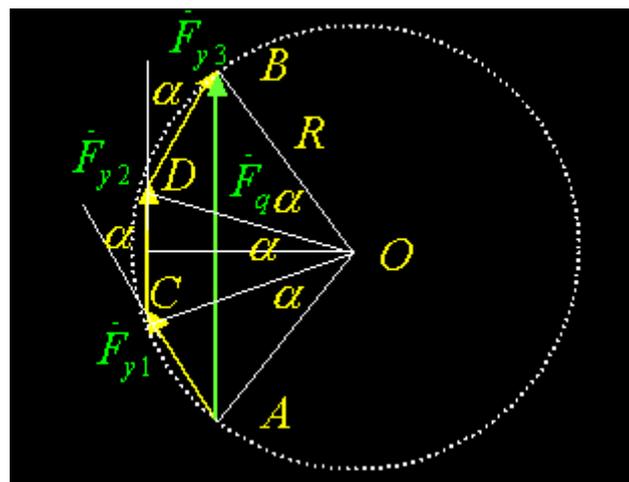
$$f_y = F_{y1} \sin \omega t \cos X$$

二. 整距分布绕组的磁势

- q 个线圈就构成了一个线圈组，相邻的两个线圈之间错开一个槽距角 α ，即达到了分布的效果。



- 单个线圈产生矩形波脉振磁势，取其分解后的基波分量为正弦脉振磁势；
- q 个正弦波脉振磁势在空间依次错开一个槽距角 α 。
- 线圈组的磁势等于 q 个线圈磁势在空间的叠加，其叠加方法类似于感应电势的叠加。



- 结论：线圈组的磁势为：

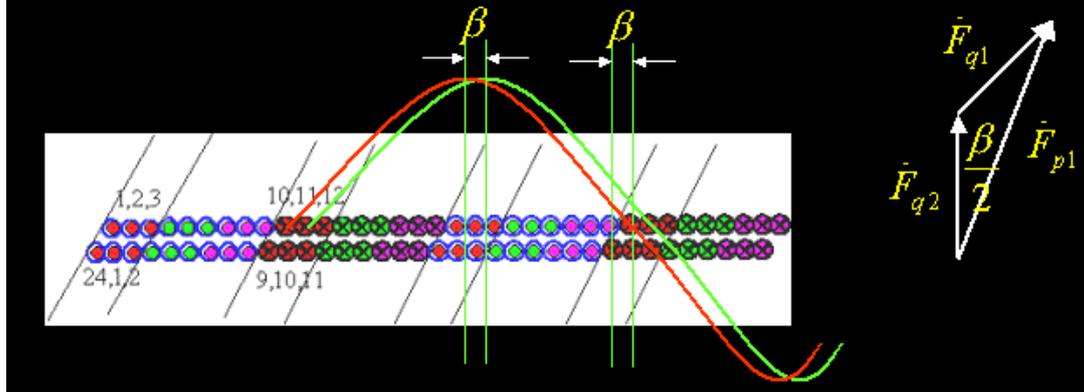
$$F_{q1} = q F_{y1} k_q = 0.9 q N_y I_y k_q$$

- 绕组的分布系数： $k_q = \sin(q\alpha/2) / (q \sin \alpha/2)$

三. 双层短距绕组的磁势

- 在分析磁场分布情况时，双层整距绕组可以等效为两个整距单层绕组。

❖ 绕组的短距系数: $k_y = c \cos \frac{\beta}{2}$



- 两个等效单层绕组在空间分布上错开一个短距角 β 。
- 双层短距绕组的磁势等于两个等效单层绕组的磁势在空间叠加。（看图 1100-14）
- 双层短距绕组的磁势为：

$$F_{p1} = 2F_{q1} \cos \beta / 2 = 0.9 I_y 2qN_y k_q k_y$$
- 绕组的短距系数: $k_y = \cos (\beta / 2)$

四. 单相基波脉振磁势的统一表达式

- 为了统一表示每相绕组的磁势，引入每相电流 I_l ，每相串联匝数 N_l 等概念。
- $I_y = I_l / a$
 (对于单层绕组) $M_l = pqN_y / a$
- (对于双层绕组) $M_l = 2pqN_y / a$
- 统一公式：
- $F_{p1} = (0.9 I_l M_l / p) K_{w1}$
- 单相绕组产生的基波磁势仍然是脉振磁势。其物理意义为：
- 对某瞬时来说，基波磁势的大小在空间按余（或正）弦分布；对气隙中某一点而言，基波磁势的大小随时间作正（或余）弦变化；基波磁势的幅值位置永远在该相绕组的轴线上。

单相绕组基波磁势(瞬时值)表达式：

$$f_{p1} = F_{p1} \sin \omega t \cos X$$

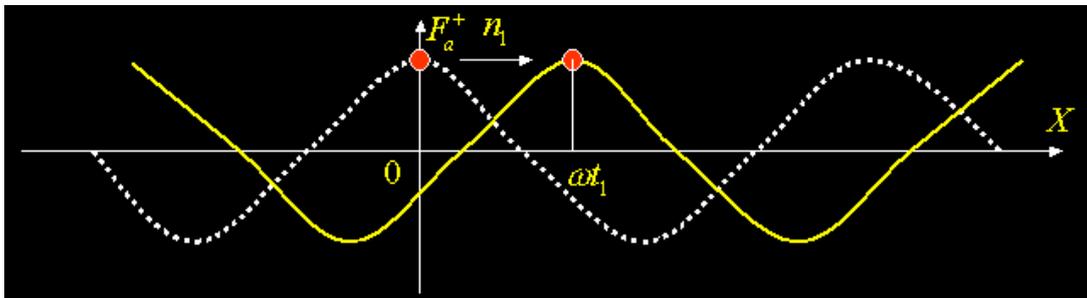
五. 单相脉振磁势的分解

- 设相绕组通过电流: $i_l = \sqrt{2} I_l \sin \omega t$
- 其基波磁势为: $f_{div1} = F_{div1} \sin \omega t \cos X$
- 根据三角公式将上式变换为：

$$f_{div1} = (1/2) F_{div1} \sin(\omega t - X) + (1/2) F_{div1} \sin(\omega t + X) = f_- + f_+$$

$$F_+ = (1/2) F_{div1} \sin(\omega t - X)$$
 最高点的运行轨迹为 $X = \omega t$ ，即最高点的位置随时间以角速度 ω 运动。
- 注: $X = x\pi / \tau$ 本式各量的单位：

- X — 电角度; x — 长度
- 曲线上其他点的轨迹具有类似的结论。(看图 1100-15) (看正弦行波动画)



- 该波是一个旋转磁势波，在气隙空间以角速度 ω 旋转，转速为：

$$n_1 = 60 * [\omega / (2 \pi p)] = 60 f / \text{div}$$
- 结论：单相脉振磁势可以分解为两个幅值
- 相等、转速相同、转向相反的旋转磁势。
- 即 $f_{div} = F_{div} \sin \omega t \cos X = (1/2) F_{div} \sin(\omega t - X) + (1/2) F_{div} \sin(\omega t + X) = f_+ + f_-$ (看动画)

11-3 三相基波合成磁势——旋转磁势

一. 图解法证明

1. 三相对称电流通入三相对称绕组

三相对称电流: $I_{am} = I_{bm} = I_{cm} = I_m$, I_a 、 I_b 、 I_c 在时间上依差 120°

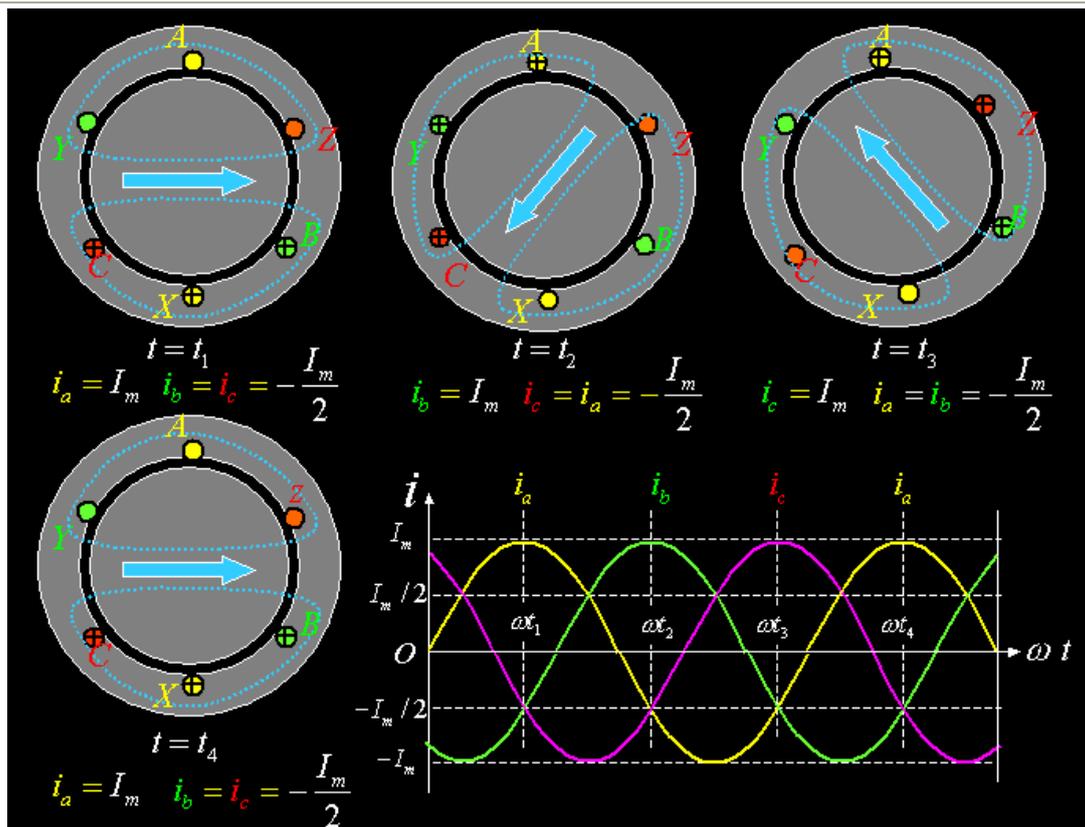
三相对称绕组: 匝数、绕型、线径三相均相等; 三相在空间上依差 120° 电角度

2. 图中绕组首末端、电流正负 的表示

绕组的首、末端: $A B C$ 、 $X Y Z$

电流的正、负: 头出尾进、尾出头进

3. 分析各瞬间磁场分布的情况



4. 结论:

1. 三相对称电流通入三相对称绕组时, 在电机内部可自动产生一个圆形旋转磁势
用动画演示 (动画 2) (动画 1), 关于圆形——椭圆形——脉振磁势的说明 2. 旋转磁势的
转向永远是由带有超前电流的相转向带有滞后电流的相。改变旋转磁场转向的方法: 调换
接在电源上的任意两根线 (即改变相序) 即可。

3. 旋转磁势的幅值为:

$$F_1 = (m/2) F_{p1} = (m/2) 0.9 (I_l N_l / p) K_{wl}, \text{ 本例子中: } m = 3 (\text{相})$$

4. 旋转磁势的转速 (即同步转速) 为:

$$n_1 = 60f / p$$

5. 当某相电流达到最大值时, 旋转磁势的幅值位置恰好转到该相绕组的轴线上。

二. 公式法证明 (基波三相合成磁势为旋转磁势):

1. 三相对称电流通入三相对称绕组

三相对称电流: $I_{am} = I_{bm} = I_{cm} = I_m$, I_a, I_b, I_c 在时间上依差 120°

三相对称绕组: 匝数、绕型、线径三相均相等; 三相在空间上依差 120° 电角度

2. 三相对称电流的瞬时式

$$i_a = I_m \sin \omega t$$

$$i_b = I_m \sin (\omega t - 120^\circ)$$

$$i_c = I_m \sin (\omega t - 240^\circ)$$

3. 各相产生的脉振磁势, 并作数学变换:

$$f_a = F_{p1} \sin \omega t \cos X$$

$$f_b = F_{p1} \sin (\omega t - 120^\circ) \cos (X - 120^\circ)$$

$$f_c = F_{p1} \sin (\omega t - 240^\circ) \cos (X - 240^\circ)$$

$$f_a = (1/2) F_{p1} \sin (\omega t - X) + (1/2) F_{p1} \sin (\omega t + X)$$

$$f_b = (1/2) F_{p1} \sin(\omega t - X) + (1/2) F_{p1} \sin(\omega t + X - 240^\circ)$$

$$f_c = (1/2) F_{p1} \sin(\omega t - X) + (1/2) F_{p1} \sin(\omega t + X - 120^\circ)$$

4. 以上三式相加后即得到合成磁势为：

$$f_1 = f_a + f_b + f_c = (3/2) F_{p1} \sin(\omega t - X)$$

上式说明了三个反向旋转的磁势在空间错开 120 电角度而相互抵消，三个正向旋转的磁势在空间同相位可相加。（看动画）

结论：三相对称电流通入三相对称绕组在电机内部可以自动产生一个圆形旋转磁势。

旋转磁势 瞬时式 $f_1 = (m/2) F_{p1} \sin(\omega t - X)$

旋转磁势 幅值式 $F_1 = (m/2) 0.9 (I_1 N_1 / p) K_w$

本例子中： $m = 3$ （相）

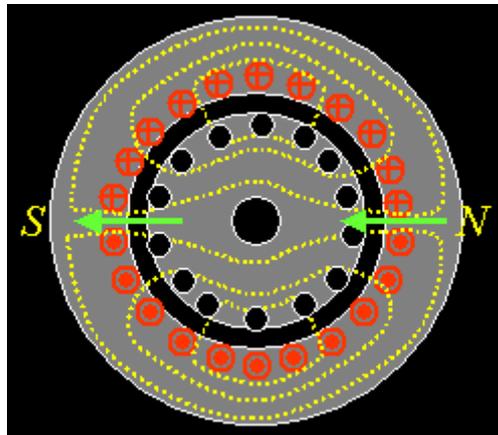
作业： P127，题 1、3； P146，题 1、3、6、7

11-4 异步电机中的主磁通和漏磁通

- 旋转磁势在电机内会产生旋转磁通，根据磁通的性质和流通路径将其分为主磁通和漏磁通。

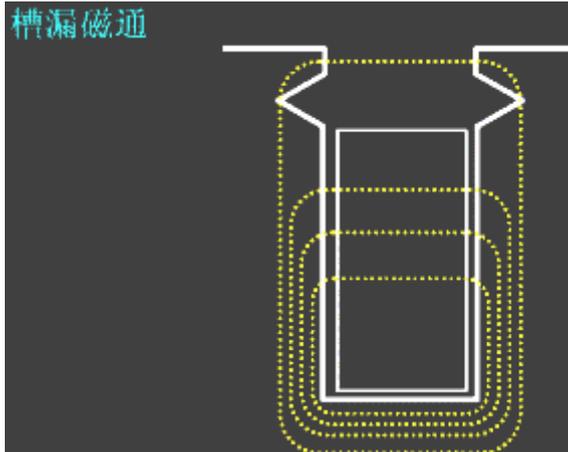
一. 主磁通

- 基波旋转磁场产生的磁通经过定、转子铁心和两段小气隙，它属于工作磁通，可同时匝链和切割定子和转子绕组的磁通叫主磁通。
- 转子导体切割主磁通并在其中感生电流；
- 导体感生电流在磁场中受到电磁力的作用而形成驱动转矩，使电机旋转。

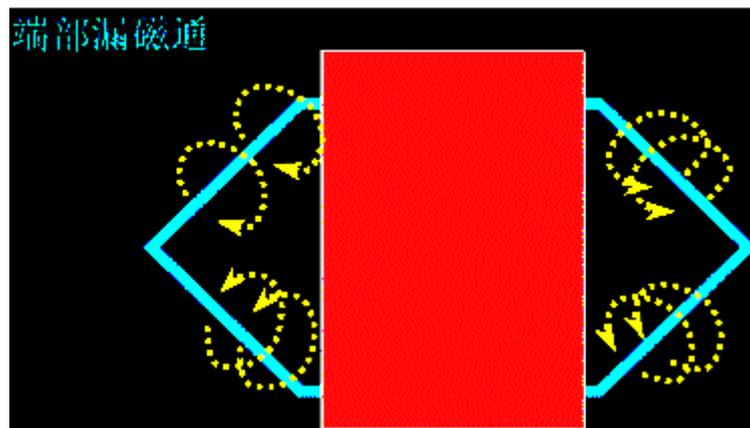


二. 漏磁通

- 定子绕组的漏磁通，它属于非工作磁通，异步电动机的漏磁通有：
- 槽漏磁通：由槽的一壁横越至槽的另一壁的漏磁通。



- 端部漏磁通：匝联绕组端部的漏磁通。



- 谐波漏磁通：谐波磁势会产生谐波磁通。电机正常运转时，谐波磁通不会产生有用的转矩。尽管谐波磁通也能同时匝链定子和转子绕组，也将其归入漏磁通。
- 漏电抗：漏磁通在定子绕组中感应漏磁电势，用漏抗压降表示：

$$E_{1\sigma} = -j I_1 X_{1\sigma}$$
- 转子绕组通过电流时，也会有漏磁通。对应的漏抗电势： $E_{2\sigma} = -j I_2 X_{2\sigma}$

三、影响漏电抗大小的因素

- 漏电抗对电机的性能有很大的影响。
- 电抗公式： $X = 2\pi fL = 2\pi f(N\Phi/i) = 2\pi f(N^2/R_{\sigma}/i)$
- 则 $X = 2\pi f N^2/R_{\sigma}$
- 即 电流频率、绕阻匝数、漏磁路的磁阻是决定漏磁通大小的主要因素。
- 比如，槽口宽则槽口漏磁通小；匝数多时，则端部漏磁通增大较多。

第 12 章 异步电机的基本理论

- 工作原理、等效电路、功率平衡
- 转矩平衡、机械特性、工作特性

12-1 异步电动机的结构和工作原理

异步电机 (Asynchronous Machines) 的主要运行方式是电动机 (Motor) 运行。

一. 异步电动机 (Asynchronous Motor) 的结构

1. 定子

- 定子铁心 (1, 2)
- 定子冲片 (圆形冲片, 扇形冲片), 径向通风沟 (风道), 槽, 槽型。
- 定子绕组: 成型线圈 (2), 散嵌线圈, 单层, 双层, 绕组联结方法。
- 其他部件: 机座, 端盖, 风罩, 铭牌等。 问题: 定、转子铁心为什么必须用硅钢片叠压而成?

2. 转子

- 转子铁心 (1, 2): 转子冲片。
- 转子绕组:
 1. 鼠笼式 (squirrel cage) 绕组) 铸铝转子
 2. 绕线式绕组
- 其他部件: 轴, 风扇等

3. 气隙

- 定转子之间的间隙, 很小, 0.2-1mm. 对电机的性能影响很大。
- 按结构分类:
 - 鼠笼式异步电动机: 结构简单, 坚固耐用, 制造容易, 成本低廉;
 - 启动、运行性能不如以下的绕线式。
 - 绕线式异步电动机: 通过外串电阻改善电机的启动、调速等性能。

二. 异步电动机的工作原理

1. 异步电动机的物理模型演示

- 模型图演示现象: 一旦摇动手柄使磁铁以 n_1 旋转, 则鼠笼会跟着以转速 n 旋转, 而且 $n < n_1$ 。
- 异步电动机定子上有 m (一般 $m=3$ 或 2) 相对称的交流绕组。

2. 异步电动机的工作原理

- (1) m 相电流通入 m 相绕组在电机内部可自动产生一个以 n_1 为转速的旋转磁场;
- (2) 转子导体在旋转磁场中 (照片, 鼠笼转子 照片, 示意图) 被磁力线切割将感应电势 $e=Blv$ (e 方向用右手定则判断)。
- (3) 自成闭路的转子导体在磁场中将有电流流过, 载流的转子导体在旋转磁场中受到电磁力 $f=Bli$ 的作用 (f 的方向用左手定则判断)。
- (4) 电磁力作用于转子将产生电磁转矩 T , T 驱动转子以转速 n 旋转。
- 注:
 - i. 根据以上电磁感应原理, 异步电动机也叫感应电动机 (英文为: Induction Motor);
 - ii. n 不等于 n_1 , $n < n_1$, n 接近 n_1

三. 异步电机的铭牌 (Name plate) 及额定值 (Rating)

铭牌: 型号、额定值、绕组联结方式及生产厂家等。 型号举例: Y132S-4,

Y—异步电动机；

132—机座中心高度为 132mm；

S—短铁心；

4—极数。

额定值：正常运行时的主要数据指标。

绕组联结方式： Δ 接法或者 Y 接法。

主要额定值如下（三相时）：

额定电压： U_N (V)，额定运行时，规定加在定子绕组上的线电压；

额定电流： I_N (A)，额定运行时，规定加在定子绕组上的线电流；

额定功率： P_N (W；kW)，额定运行时，电动机的输出功率；

额定转速： n_N (r/min)，额定运行时，电动机的转子转速；

额定频率： f_N (Hz)，规定的电源频率（我国用工频 50Hz）；

额定效率 η_N ，额定功率因数： $\cos \phi_N$ 等。

额定功率：

无论 Δ 接法或是 Y 接法，下式均成立： $P_N = 3 U_N I_N \cos \phi_N \eta_N = P_{IN} \eta_N \sqrt{3} U_N I_N \cos \phi_N \eta_N$ (W)

四. 转差、转差率

切割磁力线是产生转子感生电流和电磁转矩的必要条件。

转子必须与旋转磁场保持一定的速度差，才可能切割磁力线。

旋转磁场的转速 n_1 为同步转速；转子的实际转速 n 简称转子转速。两者在电机运行时有所差别，即

转差 $\Delta n = n_1 - n$

转差率： $s = (n_1 - n) / n_1$

注： s 是异步电机的一个基本变量，在分析异步电动机运行时有着重要的地位。

启动瞬间即堵转时： $n = 0$ ， $s = 1$

理想空载时： $n = n_1$ ， $s = 0$

电动机运行时， s 在 0-1 之间。

转差率一般很小：

$$s_N = 0.015 \sim 0.06$$

制动运行时，电磁转矩方向与转速方向相反，即 n_1 与 n 反向， $s > 1$

发电机运行时， n 高于同步转速 n_1 ， $s < 0$ 。

根据转差率可以区分异步电机的属何种运行状态：（看图1200-1）

五. 电势平衡方程式

1. 定子绕组电势平衡方程式

定子绕组接到交流电源上，与电源电压相平衡的电势（压降）包括：

主电势（感应电势）：

定子绕组通入三相交流电流时，将会产生旋转的主磁通，同时被定子绕组和转子绕组切割，并在其中产生感应电势。有效值为：

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi_1 k_{w1}$$

漏磁电势（漏抗压降）

定子漏磁通：仅与定子绕组相匝链。

漏抗压降： $E_{1\sigma} = -j I_1 X_{1\sigma}$ 。

电阻压降： $R_1 I_1$

定子边方程式： $U_1 = -E_1 + I_1 (R_1 + j X_{1\sigma})$

$$= -E_1 + I_1 Z_1$$

2. 转子绕组的电势及电流

转子绕组的感应电势

转子绕组切割主磁通的转速

主磁通以同步速度 n_1 旋转

转子以转速 n 旋转

转子绕组导体切割主磁通的相对转速为 $(n_1-n)=sn_1$

频率公式： $f_2=p'sn_1/60=f_1s$ (Hz)

结论：由于 s 很小，转子感应电势频率很低。一般 1-3 Hz

有效值

公式： $E_{2s}=4.44sf_1N_2\Phi_1k_{w2}=E_2s$

感应电势与转差率成正比。

对绕线式三相异步电动机：转子绕组每相串联匝数的计算方法同定子绕组的计算，相数也等于3。

对笼型转子来说，由于每个导条中电流相位均不一样，所以，1根导条即为1相，可见相数=导条数=转子槽数*；每相串联匝数为半匝即1/2匝。

注意转子不动 ($s=1$)时的感应电势与转子旋转时感应电势的关系。

转子绕组的阻抗

闭合的转子绕组中有电流流过。同样会产生漏磁电抗压降。

漏抗公式：

$$X_{2\sigma s}=2\pi f_2L_{2\sigma}=2\pi sf_1L_{2\sigma}=sX_{2\sigma}$$

漏抗也与转差率成正比。转速越高，漏抗越小。

计入转子电阻后： $Z_{2\sigma s}=R_2+jX_{2\sigma s}$

转子绕组中的电流

转子绕组短路，转子电压为0，感应电势全部加在转子阻抗上

转子回路方程： $E_{2s}=I_2Z_{2\sigma s}$

转子电流：

$$I_2=E_{2s}/Z_{2\sigma s}=sE_2/(R_2+jsX_{2\sigma s})$$

$$I_2=sE_2/\sqrt{R_2^2+(sX_{2\sigma})^2}$$

讨论：转子电流随 s 的变化。(1200-2)

六. 异步电动机的磁势平衡

1. 定子绕组的磁势

幅值： $F_1=(m_1/2)\cdot(0.9\cdot I_1N_1/p)k_{w1}$

转速： $n_1=60f_1/p$

2. 转子绕组磁势

有效值： $F_2=(m_2/2)\cdot(0.9\cdot I_2N_2/p)k_{w2}$

转速：

转子电流的频率 $f_2=sf_1$

转子磁势 F_2 相对于转子的转速：

$$n_2=60f_2/p=60sf_1/p=sn_1=n_1-n$$

转子磁势 F_2 相对于空间的转速为

$$n_2+n=(n_1-n)+n=n_1$$

结论：定、转子磁势在空间相对静止，均以同步速 n_1 旋转。

3. 磁势平衡方程式

激磁电流 I_m 产生激磁磁势 F_m

建立主磁通 Φ_1 所需要的电流为励磁电流 I_m 。励磁磁势的幅值为：

$$F_m = (m_1/2) \cdot (0.9 \cdot I_m N_1 / p) k_{w1}$$

励磁磁势近似不变

由电势方程式：

$$U_1 = -E_1 + I_1 (R_1 + jX_{1\sigma}) = -E_1 + I_1 Z_1$$

电源电压不变，阻抗压降很小，电势近似不变；

由公式： $U_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi_1 k_{w1}$ ， Φ_1 近似不变；

可见，励磁磁势和励磁电流几乎不变。

空载运行时，励磁磁势全部由定子磁势 F_0 提供，即： $F_0 = F_m$

负载运行时，转子绕组中有电流 I_2 流过，产生一个同步旋转磁势 F_2 ，为了保持原 F_m 不变，定子磁势 F_1 除了提供励磁磁势 F_m 外，还必须抵消转子磁势 F_m 的影响，即：

$$F_1 = F_{1f} + F_m = (-F_2 + F_m)$$

异步电动机的磁势平衡方程：

$$F_1 + F_2 = F_m; \quad \text{即}$$

$$(m_1/2) (0.9 \cdot I_1 N_1 / p) k_{w1} + (m_2/2) (0.9 \cdot I_2 N_2 / p) k_{w2} \\ = (m_1/2) (0.9 \cdot I_m N_1 / p) k_{w1}$$

$$I_1 + [(m_2 N_2 k_{w2}) / (m_1 N_1 k_{w1})] I_2 = I_1 + I_2 / k_i = I_m$$

结论：空载运行时，转子电流近似为 0，定子电流等于励磁电流；负载时，定子电流随负载增大而增大。

12.2 异步电动机的等效电路

- 等效电路 (Equivalent circuit) 法是分析异步电动机的重要手段。在异步电动机中，作出等效电路需要进行两个折算：(1) 转子电路的频率折算；(2) 与定子方面具有同样相数、匝数、绕组系数的转子绕组折算。

一. 频率折算

1. 在什么情况下转子电路频率等于定子电路频率？

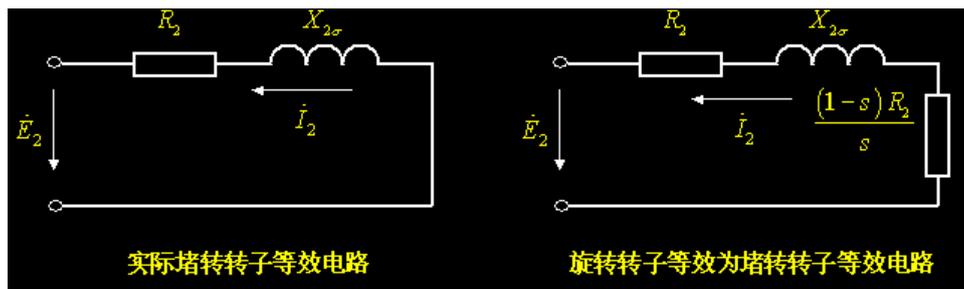
- 转子旋转时，转差率为 s ，转子电路频率： $f_2 = s f_1$
- 转子堵转时 $s=1$ ， $f_2 = s f_1 = f_1$ ， $E_{2s} = E_2$ ， $X_{2\sigma s} = X_{2\sigma}$ 。故：转子堵转时 $f_2 = f_1$

2. 如何使转子电路的频率等于定子电路的频率？

- 频率折算后，希望磁势平衡不变，即转子电流不变： $I_2 = s E_2 / (R_2 + j s X_{2\sigma})$ 不变。
- 将上式略作变化： $I_2 = E_2 / (R_2 / s + j X_{2\sigma})$ ，此式就相当于转子堵转时的情况，而转子电阻为

$$R_2 / s = (1-s) R_2 / s + R_2$$

结论：用一个堵转着的等效转子来代替一个以 s 为转差率实际旋转着的转子，这时只需要将异步电动机的转子电阻增加到 R_2 / s 即可，这就是频率折算的过程。



- 堵转的转子中多了一个附加电阻，而电流确没有变化，相当于多了一个电阻功率。

- 分析证明：附加电阻上消耗的电功率等于电机的总机械功率 P_{Ω} 。

二. 绕组折算

1. 定义：用一个与定子方面具有同样相数 m_1 、匝数 N_1 和绕组系数 k_{w1} 的等效转子绕组来替代实际的转子绕组 (m_2 、 N_2 、 k_{w2})。

折算条件是：磁势幅值不变；功率大小不变。

- 电流折算：根据磁势不变：

$$(m_1/2) (0.9 \cdot I_2' N_1 / p) k_{w1} = (m_2/2) (0.9 \cdot I_2 N_2 / p) k_{w2} \quad I_2' = I_2 \cdot (m_2 N_2 k_{w2}) / (m_1 N_1 k_{w1}) = I_2 / k_i$$

- 电势折算：磁通应不变：

$$E_2' = 4.44 f_1 N_1 \Phi_1 k_{w1}$$

$$E_2 = 4.44 f_1 N_2 \Phi_1 k_{w2}$$

$$E_2' = E_2 \cdot (N_1 k_{w1}) / (N_2 k_{w2}) = E_2 k_e$$

- 阻抗折算：功率不变：

$$m_1 I_2'^2 R_2' = m_2 I_2^2 R_2$$

$$R_2' = R_2 \cdot m_2 / m_1 \cdot (I_2 / I_2')^2 = R_2 \cdot m_2 / m_1 \cdot (m_2 N_2 k_{w2} / m_1 N_1 k_{w1})^2 = R_2 \cdot k_e k_i = R_2 k_z$$

- 漏电抗折算： $X_{2\sigma}' = X_{2\sigma} k_z$

- 折算后转子电路方程式：

$$E_2' / k_e = k_i I_2' [R_2' / (s k_e k_i) + j X_{2\sigma}' / (k_e k_i)] \rightarrow$$

$$E_2' = I_2' [R_2' / s + j X_{2\sigma}']$$

三. 等效电路 (Equivalent circuit)

- 激磁回路： $Z_m = R_m + jX_m$

- 折算后的磁势方程式：

$$I_1 + (m_2 N_2 k_{w2} / m_1 N_1 k_{w1}) I_2' = I_1 + I_2' / k_i = I_m \rightarrow$$

$$I_1 + I_2' = I_m$$

- 经过频率折算和绕组折算后异步电动机的方程式：

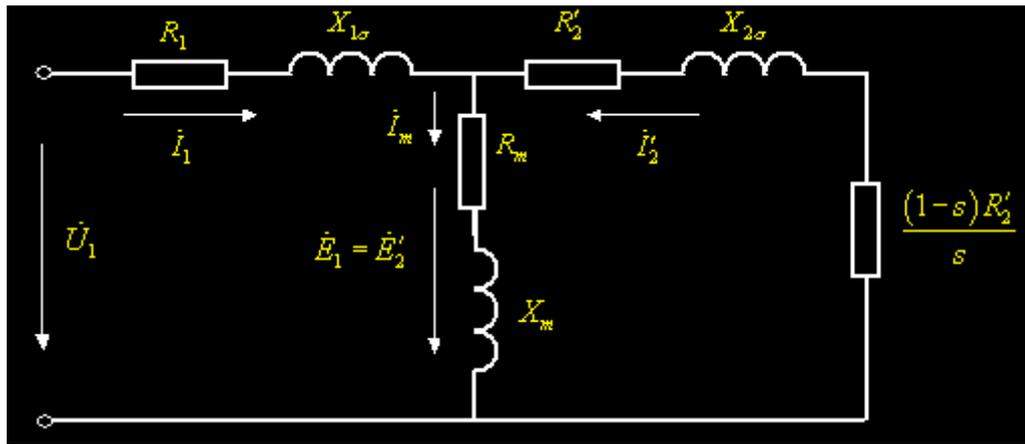
$$U_1 = -E_1 + I_1 (R_1 + jX_{1\sigma})$$

$$E_2' = E_1 = I_2' (R_2' / s + jX_{2\sigma}') \rightarrow$$

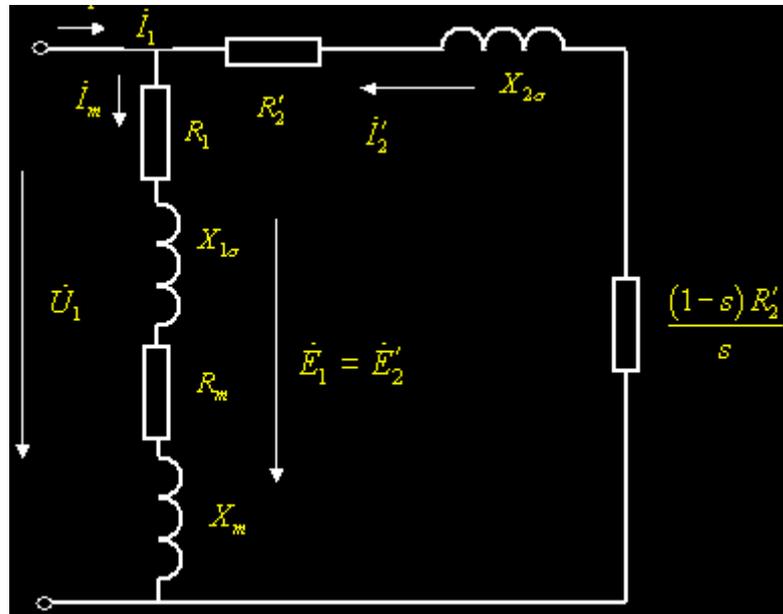
$$I_m = I_1 + I_2'$$

$$-E_1 = I_m (R_m + jX_m)$$

- 对应的等效电路：



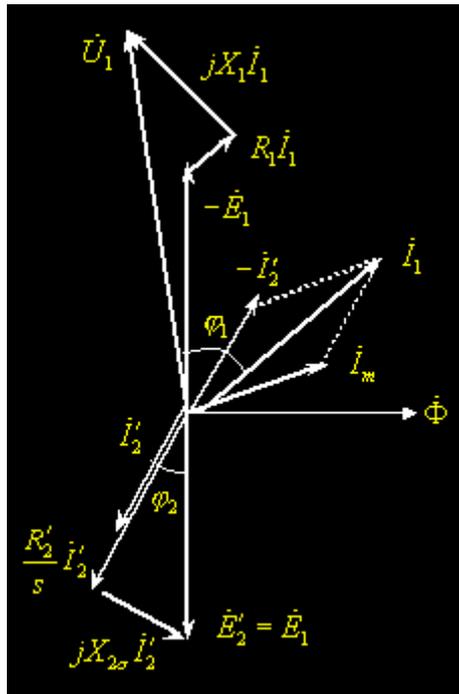
- 简化等效电路:



四. 相量图(Phasor diagram)

- 类似于绘制变压器相量图的方法
- 假设电动机的参数(1200-4)和感应电势 $\dot{E}_2 = E_1$ 为已知, 从转子电路方程出发可以一步一步作出异步电动机相量图。(看动画)
- 参考相量: 水平方向为 Φ_1 , 垂直方向为 $\dot{E}' (=E_1)$ 。
- 步骤:
- 在垂直方向做出 \dot{E}_2 相量
- 滞后 $\arctan(s X_{2\sigma}'/R_2')$ 角度做出 \dot{I}_2' 相量
- 根据 $\dot{E}_2' = \dot{I}_2' R_2'/s + jX_{2\sigma}' \dot{I}_2'$ 做出电阻压降和漏抗压降相量
- 在水平方向做出主磁通 Φ_1 相量
- 超前某一角度做出激磁电流 \dot{I}_m 相量
- 根据 $\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2')$ 做出 \dot{I}_1 相量
- 做出 $-\dot{E}_1 = -\dot{E}_2'$ 相量

- 根据 $U_1 = -E_1 + I_1(R_1 + jX_1)$ 做出 U_1 相量，并标出功率因数角。



12-3 功率平衡和转矩平衡

一. 功率平衡方程及效率

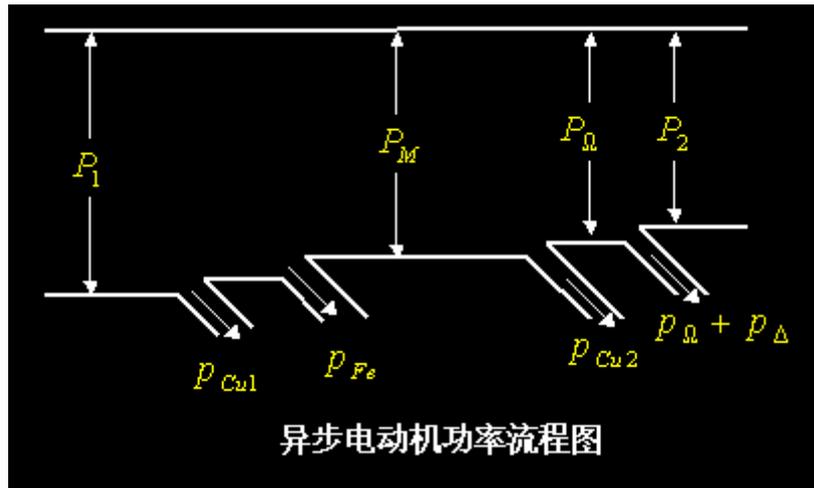
- 功率流程图。（等效电路：1200-4）
- 输入功率： $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \phi_1$
- 定子铜耗： $p_{Cu1} = m_1 I_1^2 R_1$
- 铁耗：定子铁心与旋转磁场相对转速为 n_1 较大，故铁耗主要为定子铁耗：

$$p_{Fe} = m_1 I_m^2 R_m$$

- 转子铁心与旋转磁场相对转速为 sn_1 较小，故转子铁耗可以忽略不计。
- 电磁功率： $P_M = P_1 - p_{Cu1} - p_{Fe} = m_1 E_2' I_2' \cos \phi_2$
- 转子铜耗： $p_{Cu2} = m_1 I_2'^2 R_2'$
- 总机械功率： $P_\Omega = m_1 I_2'^2 R_2' (1-s) / s$
- 机械损耗和附加损耗： $p_\Omega + p_\Delta$ 式中： $p_\Delta = (0.5-3)\% P_N$
- 输出功率： $P_2 = P_\Omega - p_\Omega - p_\Delta$
- 故异步电动机的功率平衡方程式为：

$$P_2 = P_1 - p_{Cu1} - p_{Fe} - p_{Cu2} - p_\Omega - p_\Delta = P_1 - \sum p$$

- 功率流程图 (Power-flow diagram):



- 几个常用的关系式:

$$P_M = m_1 I_2'^2 R_2' / s = p_{Cu2} / s \quad \text{故:}$$

$$p_{Cu2} = s P_M$$

$$P_\Omega = (1-s) P_M$$

- 电机效率 (efficiency): $\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - \Sigma p) / P_1$ (100%)

二. 稳态时转矩平衡方程

- 电磁转矩由机械功率产生:

$$P_\Omega = P_2 + p_\Omega + p_\Delta$$

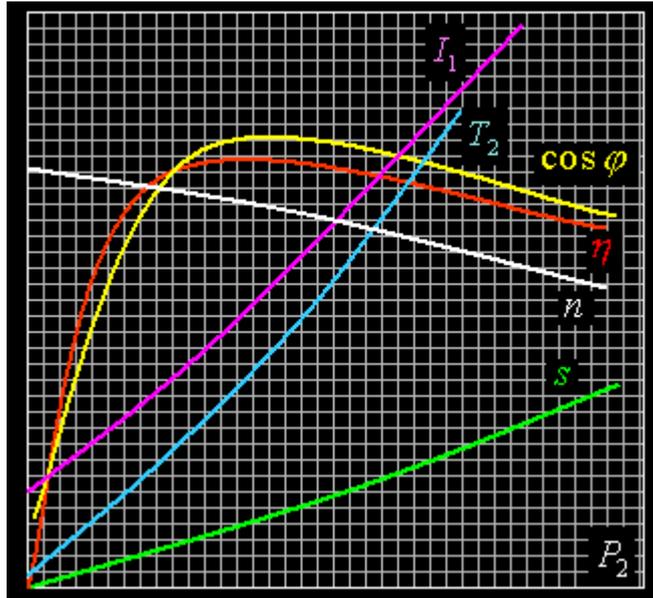
转矩平衡方程为:

$$P_\Omega / \Omega = P_2 / \Omega + (p_\Omega + p_\Delta) / \Omega$$

$$T = T_2 + p_0 / \Omega = T_2 + T_0$$

12-5 异步电动机的工作特性分析

- 异步电动机的工作特性是指在额定电压及额定频率下, 电动机的主要物理量转差率、转矩、电流、效率、功率因数分别随输出功率变化的关系曲线。



一. 转差率特性 $s=f(P_2)$

$$s = p_{cu2}/P_M = (m_1 R_2' I_2'^2) / (\Omega_1 T)$$

$$= (m_1 R_2' I_2'^2) / (\Omega_1 C_M \Phi_1 I_1' \cos \phi_2)$$

$$= (m_1 R_2' I_2') / (\Omega_1 C_M \Phi_1 \cos \phi_2)$$

- 随着负载功率的增加，转子电流增大，故转差率随输出功率增大而增大。

二. 转矩特性 $T_2=f(P_2)$

- 异步电动机的输出转矩：

$$T_2 = P_2 / \Omega$$

- 转速的变换范围很小，从空载到满载，转速略有下降。因为
- $s_N = 0.015 - 0.06$
- 转矩曲线为一个微微上翘的曲线。

三. 电流特性 $I_1 = f(P_2)$

$$I_1 = - I_2' + I_m$$

空载时电流很小，随着负载电流增大，电机的输入电流增大（微微上翘）。

四. 效率特性 $\eta = f(P_2)$

- $\eta = P_2 / (P_2 + p_{cu1} + p_{Fe} + p_{cu2} + p_\Omega + p_\Delta)$
其中铜耗随着负载的变化而变化（与负载电流的平方成正比）；铁耗和机械损耗近似不变；
- 效率曲线有最大值，可变损耗等于不变损耗时，电机达到最大效率。
- 异步电动机额定效率在（74-94）%之间；最大效率发生在（0.7-1.0）倍额定效率处。

五. 功率因数特性 $\cos \phi_1 = f(P_2)$

- 空载时，定子电流基本上用来产生主磁通，有功功率很小，功率因数也很低；
- 随着负载电流增大，输入电流中的有功分量也增大，功率因数逐渐升高；
- 在额定功率附近，功率因数达到最大值。
- 如果负载继续增大，则导致转子漏电抗增大（漏电抗与频率成正比），从而引起功率因数下降。

第 13 章 三相异步电动机的启动及调速

13-1 三相异步电动机的启动

一. 对异步电动机启动的要求

- 启动过程是指电动机从静止到达正常工作转速的过程。
- 启动过程中电流一般较大，为了避免电机在启动过程中损坏和降低启动电流对电网的影响，一般希望启动过程越快越好。
- 三相异步电动机的转子电流公式

$$I_2' = U_1 / \sqrt{(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_{1s} + X_{2s}')^2}$$

- 额定运行时， $s = s_N = 0.015 \sim 0.06$ ，若取 $s = 0.05$ ，则 $R_2' / s = 20R_2'$ ；启动时， $s = 1$ ， $R_2' / s = R_2'$ ，可见最初启动时，电动机的阻抗显著很小，电流当然较大。

$$I_{st} = I_2' = U_1 / \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{1s} + X_{2s}')^2}$$

- 最初启动电流 I_{st} 约为额定电流的 4~7 倍。
- 尽管启动电流很大，但启动转矩并不大。

据： $T = C_T F_1 I_2' \cos j_2$

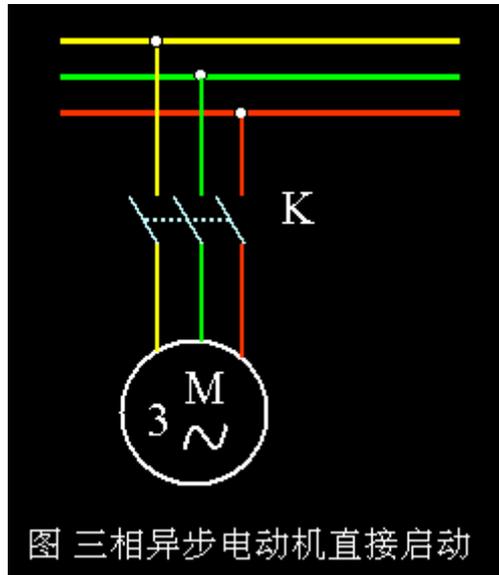
- 最初启动转矩 T_{st} 不大的原因：(1) 启动电流大，阻抗压降大，感应电势小，磁通 F_1 也小；(2) $s = 1$ 时： $\cos j_2 = R_2' / \sqrt{R_2'^2 + X_{2s}'^2}$ ，很低。 $T_{st} = (1 \sim 2) T_N$
- 系统对启动的要求：(1) T_{st} 足够大；(2) I_{st} 不能太大。
- 不同的启动方法就是在保证一定转矩的情况下，采取不同的措施限制启动电流。

二、决定异步电动机启动方法的原则

- 具体情况具体分析。供电变压器容量和电机容量以及具体应用场合。
- 电动机容量相对于电网容量很小时，可以直接启动；如果生产机械对转矩要求不大，则只考虑限制电流；如生产机械对转矩要求较高，则既要限制电流，又要保证需要的转矩。
- 启动方法有：笼形异步电动机的直接启动、笼形异步电动机的降压启动；绕线式异步电动机的 BP 启动。

13-2 鼠笼式异步电动机直接启动

- 利用闸刀或者接触器把电动机直接接到具有额定电压的电源上。

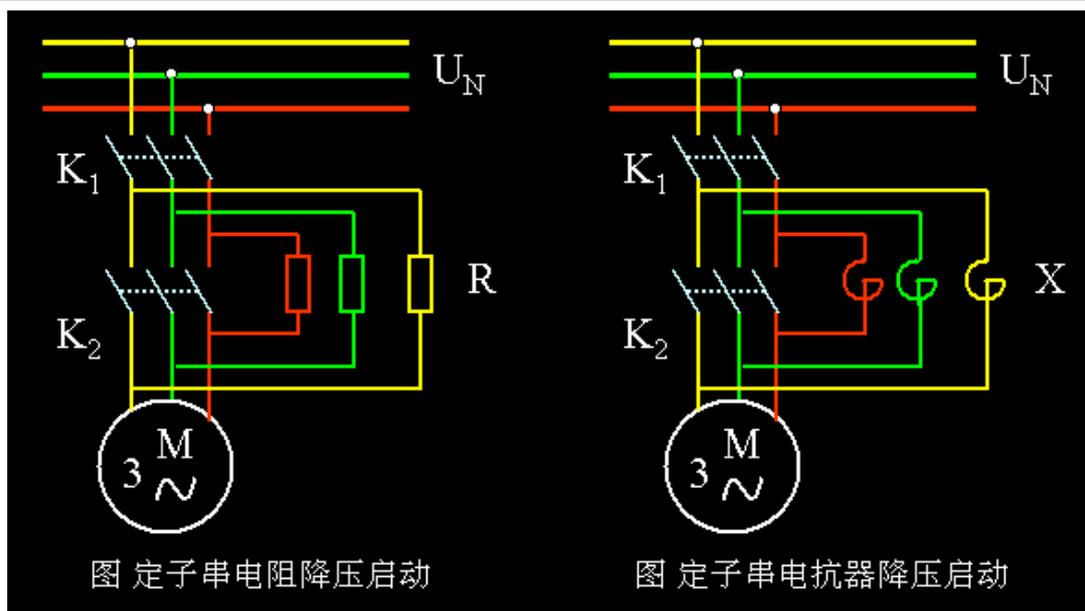


- 设备简单、操作方便，在供电变压器容量相对较大的情况下采用。
- 频繁启动电动机：电动机容量/供电变压器容量 $<20\%$ 时，允许直接启动；
- 不频繁启动电动机：电动机容量/供电变压器容量 $<30\%$ 允许直接启动；
- 如果没有独立的供电变压器时，则限制电网电压降不能超过 5%。

13-3 鼠笼式异步电动机降压启动

- 若电源供电变压器的容量不够大时，就采取降压启动。由于转矩是按照电压平方的规律而下降的，所以这种方法适合于对转矩要求不高的场合。

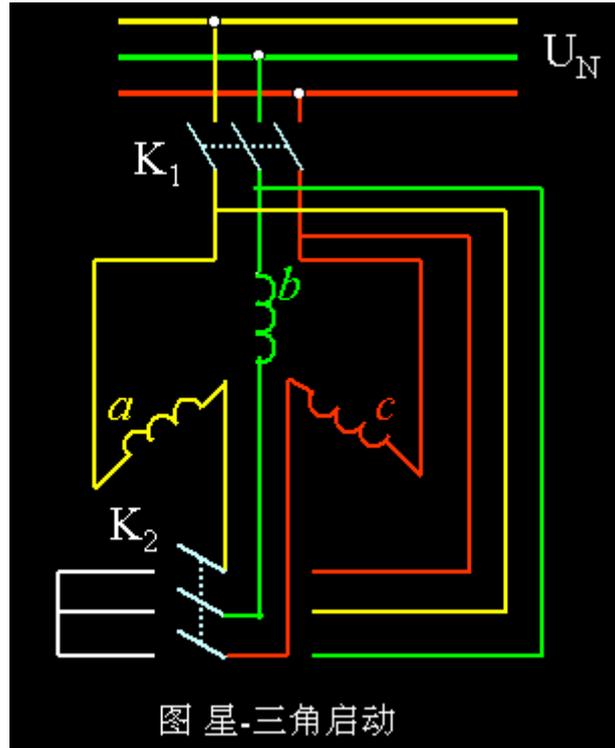
一. 定子绕组串电阻或者电抗器启动



- 在定子绕组的电路中串入一个三相电阻器或者电抗器来产生一定的电压降，使得达到降低启动电流的目的。
- 串电阻器启动时，要消耗较大的功率；串电抗器启动时，当 K_2 短接启动电抗器时还会产生较大的短路电流，所以串电抗器适合于启动转矩要求不大且启动不频繁的场所。

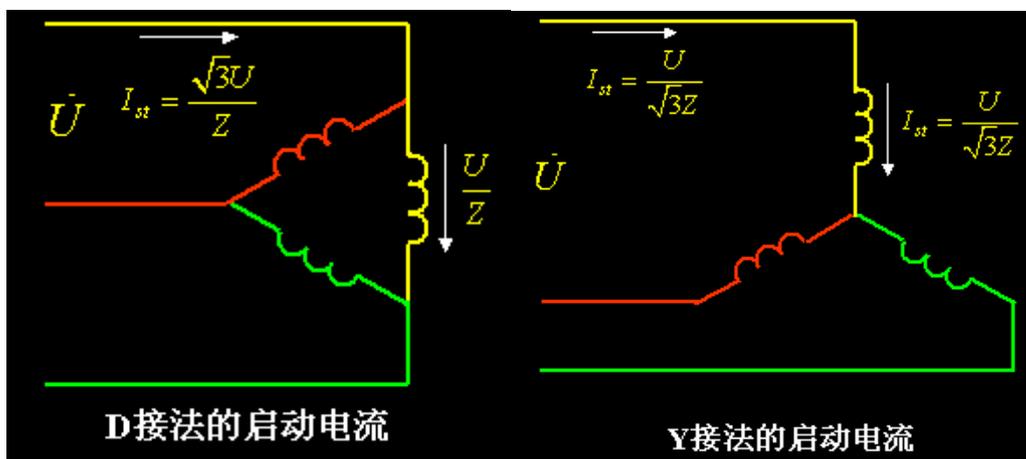
- $U_{st}' = U_N/k; \quad I_{st}'/I_{st} = 1/k;$
- $T_{st}'/T_{st} = 1/k^2$

二. 星-三角 (Y/D) 启动

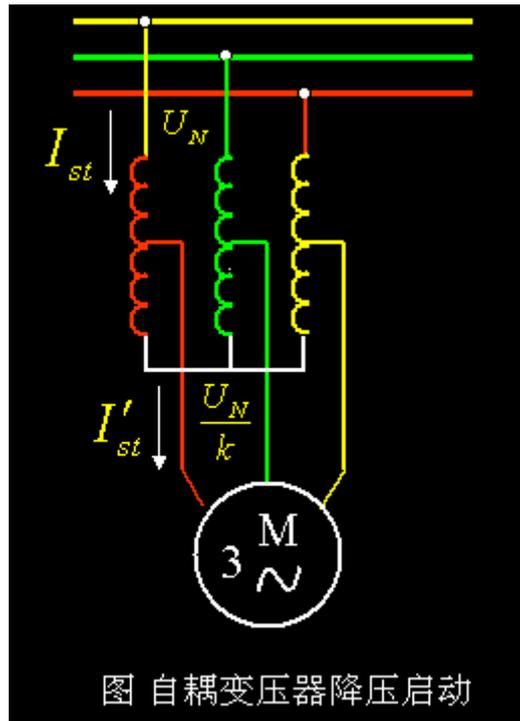


- 适合于正常运行时为 D 接法的电动机。

$$k=U_N/U_{st}=\sqrt{3}; \quad I_{st}'/I_{st}=1/3; \quad T_{st}'/T_{st}=1/3$$



三. 应用自耦变压器(启动补偿器)启动

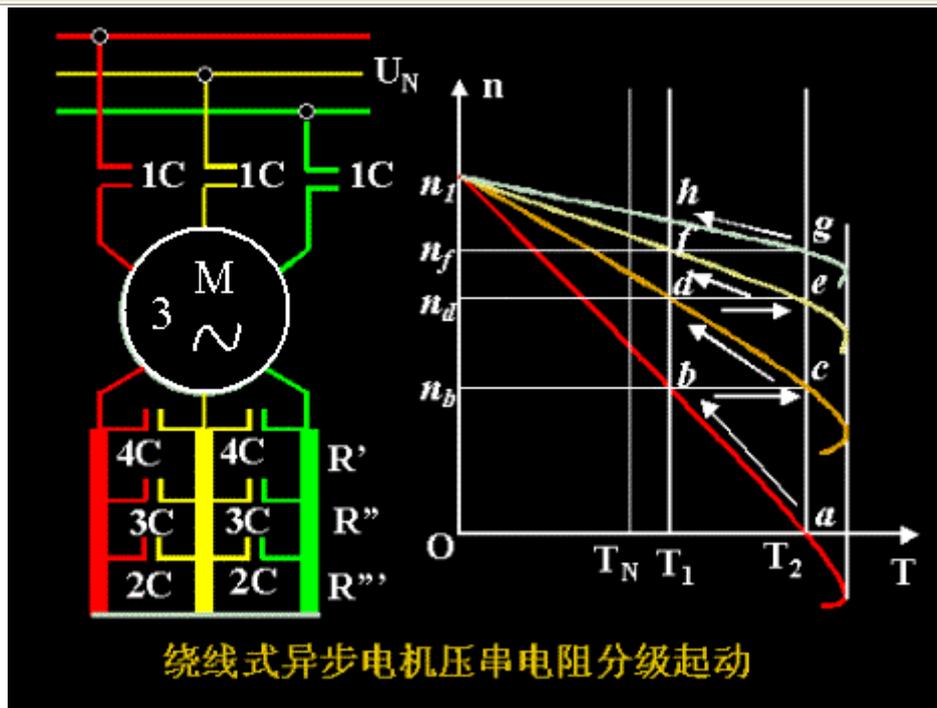


- $U_{st} = U_N/k_a$; $I'_{st}/I_{st} = 1/k_a^2$; $T'_{st}/T_{st} = 1/k_a^2$
- QJ2 型自耦变压器有不同的降压抽头，
- $1/k = 0.73, 0.64, 0.55$ 以备选择。

13-4 绕线式异步电动机的启动

- 降压启动在限制启动电流的同时，大大降低了启动转矩。在需要较大启动转矩的应用场合，人们不得不选择价格昂贵的绕线式异步电动机。
- 绕线式异步电动机的特点是在可以在转子回路中接入附加电阻，以改善其启动和调速性能。
- 如果 $R_2' + R_{st}' = \sqrt{R_1^2 + (X_{1s} + X_{2s}')^2}$ ，则获得最大启动转矩。

一、串电阻分级启动



(1) 2C, 3C, 4C 断开, 1C 闭合, 定子绕组加额定电压, 串入电阻 ($R' + R'' + R'''$), 启动点在曲线的 a 点, 启动转矩 $T_2 < T_N$, 电动机开始旋转

(2) 转速上升到 b 时, $T = T_1$, 闭合 2C, 切除电阻 R''' , 则工作点从 b 点跳到 2 的 c, $T = T_2$

(3) 转速上升到 d 时, $T = T_1$, 闭合 3C, 切除电阻 R'' , 则工作点从 d 点跳到 1 的 e, $T = T_2$

(4) 转速上升到 f 时, $T = T_1$, 闭合 4C, 切除电阻 R' , 则工作点从 f 点跳到 0 的 g, $T = T_2$

(5) 转速继续上升经 h 到达稳定运行点 j。

- 启动电阻器有金属丝电阻器、铸铁电阻器、水电阻器等, 但都按短时方式设计。

二、转子绕组外串频敏变阻器启动

- 频敏变阻器 (BP 为其代号) 原理

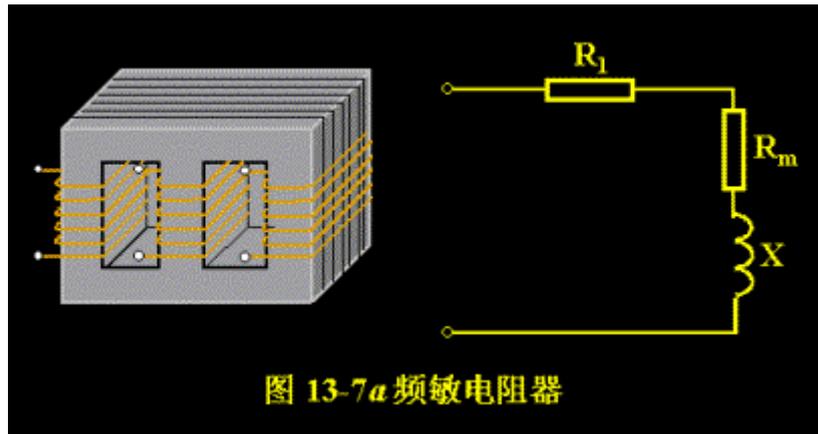


图 13-7a 频敏电阻器

- BP 实质上是一台只有初级绕组而且铁心损耗较大的三相变压器。BP 的铁耗大就相当于 R_m 大。而铁耗与磁通的频率（等于转子频率 $f_2 = sf_1$ ）的 1.3 次方成正比。开始启动时， s 较大，故 f_2 较大， R_m 也较大，相当于转子电阻自动增加，则 I_{st} 减小、 T_{st} 增大；随着启动过程的进行， n 逐渐变大、 s 逐渐变小，则 f_2 变小，也就是铁耗减小，所以 R_m 变小，相当于转子电阻自动变小。
- 启动完毕后，将转子回路短路。
- 频敏变阻器相当于一种无触点变阻器，结构简单，成本低，所以应用较为广泛。

13-5 异步电动机的调速方法

- 异步电动机结构简单、坚固耐用、维修方便、制造容易，大量被用来拖动转速基本不变的生产机械。
- 在实际应用中，许多机械需要调速，如车床、电力机车、风机、水泵等。常用闸阀控制。
- 为了节能，则要求设法从电机本身出发进行电气调速。
- 异步电动机过去被认为调速性能不好。随着电力电子技术的发展，异步电动机的调速问题已经基本解决。异步电动机的调速性能甚至可以做到优于直流电动机。
- 剩余的问题是降低成本、实际应用。
- 异步电动机的速度公式

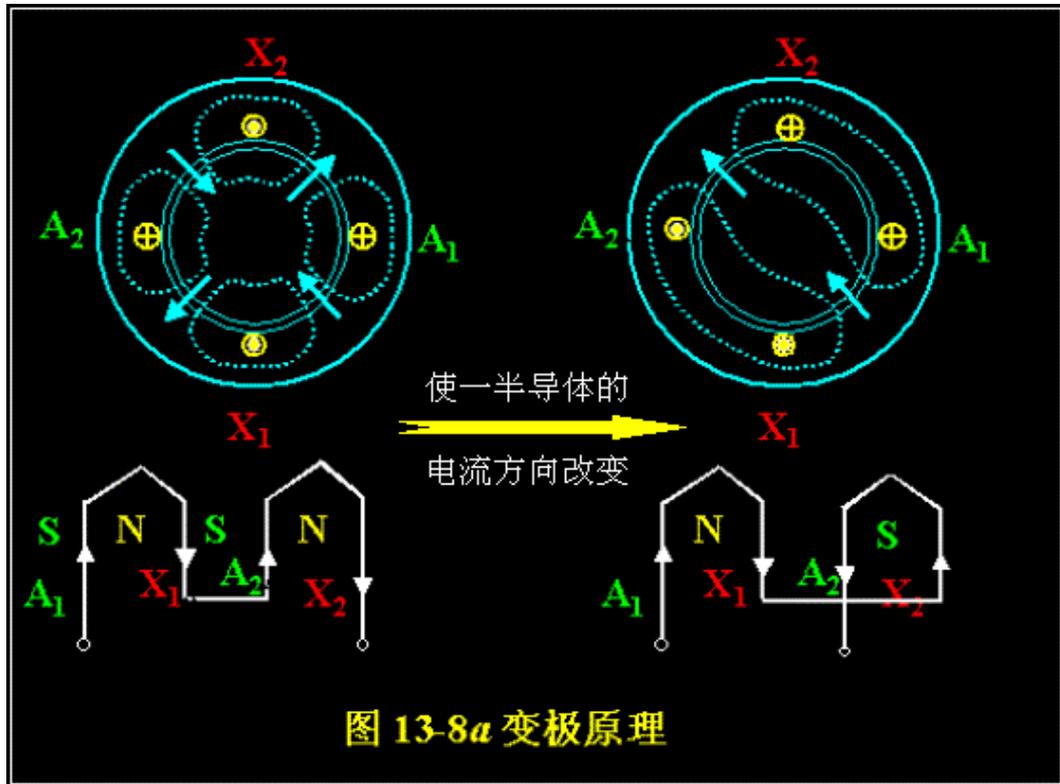
$$n = n_1(1-s) = (1-s)60f_1/p$$

- 异步电动机调速方法有：
 - (1) 变极调速；
 - (2) 变频调速；
 - (3) 改变机械特性曲线形状调速（即改变电压、改变转子电阻、串级调速）。

(1)和(2)适合于鼠笼式异步电动机，(3)中后两种用于绕线式异步电动机。

13-6 异步电动机的变极调速

一. (每相)变极调速 (单绕组)



注：使一半导体的电流方向改变即可实现变极目的

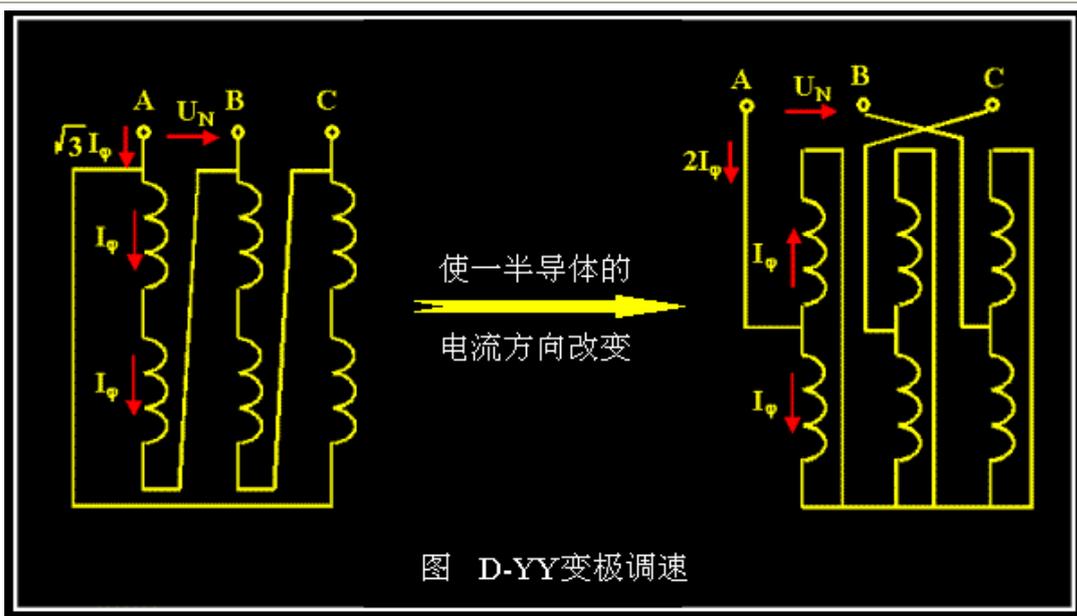
二. (每相)双(多)绕组变极

- 定子槽中放置两套以上的绕组，每套绕组极数不一样，通过换接工作绕组达到调速的目的。4/6/24 极。
- 每套绕组本身又可以采用变极开关，所以可以得到较多的调速等级。

三. 不同改接方法时，电动机功率及转矩的变化

(1)D-YY 变极调速

- 1. 低速倍极数 D 接法，高速少极数 YY 接法
- 不同接法时保持电源电压 U_1 和每个绕组中的电流 I_j 不变。



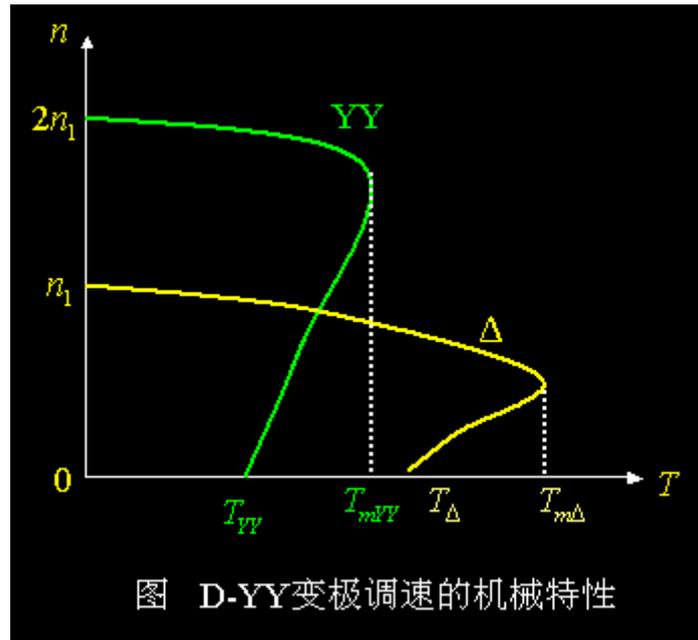
- 2. 输出功率关系
- 低速 D 接法时（倍极数时） $P_{2(2p)} = 3 U_1 I_j \cos j_{(2p)} h_{(2p)}$
- 高速 YY 接法时（少极数时）

$$P_{2(p)} = 3 [U_1 / \sqrt{3}] 2I_j \cos j_{(p)} h_{(p)}$$

- 假定不考虑 $\cos j$ 和 h 的变化时

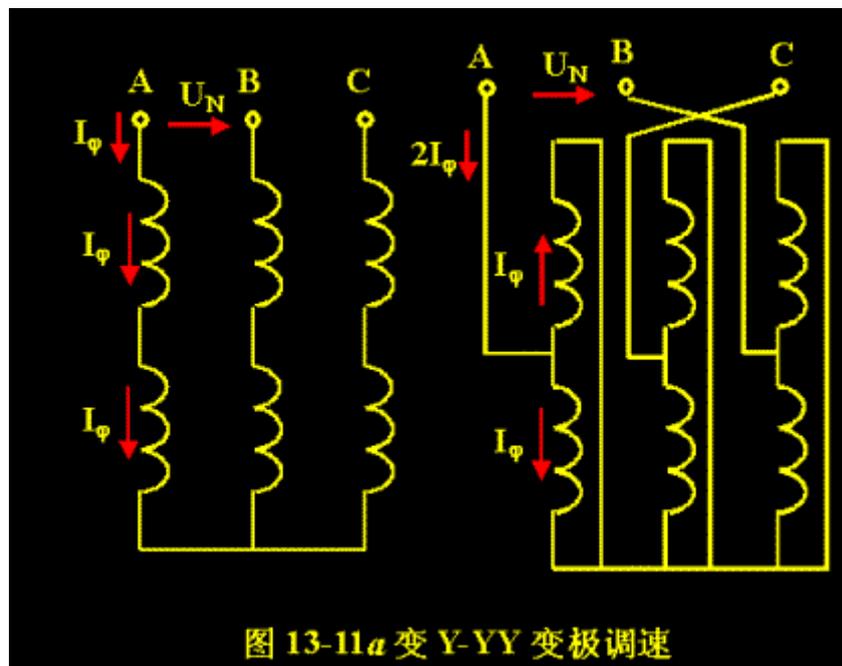
$$P_{2(p)} / P_{2(2p)} = 2 / \sqrt{3} = 1.1547$$

- 3. 输出转矩关系
- 倍极数时的 $T_{2(2p)} = P_{2(2p)} / W_{(2p)}$
- 少极数时的 $T_{2(p)} = P_{2(p)} / W_{(p)}$
- $T_{2(2p)} / T_{2(p)} = P_{2(2p)} W_{(p)} / (W_{(2p)} P_{2(p)}) = (\sqrt{3} / 2) * 2 / 1 = 1.732$
- 结论：D-YY 接法转速变化一倍时，功率只变化了 15.47%，接近恒功率调速；低速时的转矩比高速时转矩大到 1.732 倍。



(2) Y-YY 变极调速

- 1. 低速倍极数 Y 接法，高速少极数 YY 接法



- 2. 输出功率关系
- 低速 Y 接法（即倍极数）时：

$$P_{2(2p)} = 3 (U_1 / \sqrt{3}) I_j h_{(2p)} \cos j_{(2p)}$$

$$=\sqrt{3}U_1I_j \cos j_{(2p)} h_{(2p)}$$

- 高速 YY 接法（即少极数）时：

$$P_{2(p)}=3 (U_1/\sqrt{3}) (2I_j) \cos j_{(p)} h_{(p)}$$

$$=2\sqrt{3}U_1I_j \cos j_{(p)} h_{(p)}$$

- 不考虑 $\cos j$ 和 h 的变化时
- 则 $P_{2(p)}/P_{2(2p)}=2$

3. 输出转矩关系

- 倍极数时的 $T_{2(2p)}=P_{2(2p)}/W_{(2p)}$
- 少极数时的 $T_{2(p)}=P_{2(p)}/W_{(p)}$
- $T_{2(2p)}/T_{2(p)}= P_{2(2p)}W_{(p)}/(P_{2(p)}W_{(2p)}) = (1/2) * 2/1=1$
- 结论：Y-YY 接法若转速增加一倍时，功率也增加了一倍；Y-YY 调速的方法属于恒转矩调速。

五、变极电机切换时注意事项

- 一般异步电动机在断开电源后，转子电流不会立即降为零，而是按一定的时间常数衰减。这个电流产生的磁通随转子一起旋转，并在定子绕组中产生感应电势。
- 如果转子电流没有衰减到零以前再次合上定子电源，则电源电压和感应电势（残留电压）叠加可能产生比启动电流还大的冲击电流，影响电网和电机寿命。
- 残留电压的衰减常数为

$$T_e=(X_m+X_{2s}')/(2pfR_2') \approx X_m/(2pfR_2')=L_m/R_2'$$

- 变极电机在极数切换时，应该等到转子电流充分衰减后再进行。
- 应该按照铭牌规定的接线方式接线，否则会导致严重后果。
- 变极后异步电动机转速改变了，转向也将改变，这是由于“相带”改变的原因。

13-7 异步电动机的变频调速

一、从基频向下变频调速 — 使用于恒转矩负载

(1) 保持 E_1/f_1 不变：

$$T=P_M/W_1=m_1I_2'^2R_2'/s/(2pn_1/60)$$

$$=m_1p/(2pf_1) (E_1'/\sqrt{(R_2'/s)^2+X_{2s}'^2}) R_2'/s$$

$$=m_1 p f_1 / (2p) (E_2' / f_1)^2 R_2' / s / [(R_2' / s)^2 + X_{2s}'^2]$$

$$=m_1 p f_1 / (2p) (E_2' / f_1)^2 / [(R_2' / s) + s X_{2s}'^2 / R_2']$$

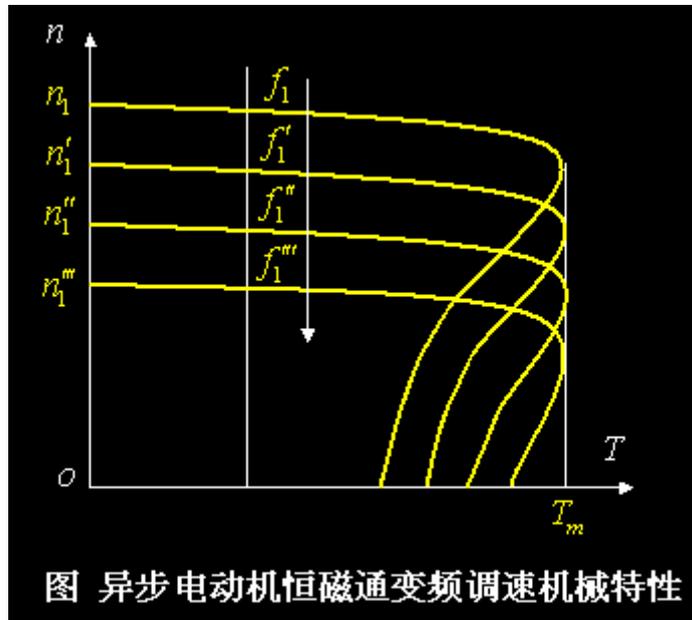
$$R_2' / s = s X_{2s}'^2 / R_2'$$

$$s_m = R_2' / X_{2s}' = R_2' / (2p f_1 L_{2s}')^2$$

$$T_{max} = m_1 p f_1 / (4p) (E_2' / f_1)^2 / (2p L_{2s}') = \text{常数}$$

$$Dn_m = s_m n_1 = \text{常数}$$

- T_{max} , Dn_m 与频率无关, 机械特性平行, 硬度相同, 类似于直流电动机的降压调速, 属于恒转矩调速。



(2) 保持 U_1/f_1 不变, 即保持 $F_1 \approx$ 常数

$$T = P_m / \omega_1 =$$

$$m_1 p U_1^2 R_2' / s / \{2p f_1 [(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_{1s} + X_{2s}')^2]\}$$

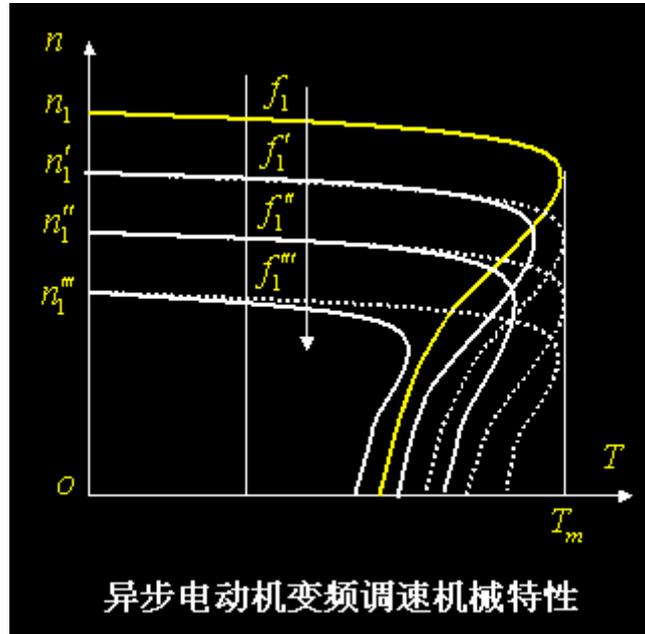
$$= m_1 p / (2p) (U_1 / f_1)^2 \{f_1 R_2' / s / [(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_{1s} + X_{2s}')^2]\}$$

- 当 U_1/f_1 不变时,

$$s_m = R_2' / \sqrt{R_1^2 + (X_{1s} + X_{2s}')^2}$$

$$T_{max} = (1/2) m_1 p / (2p) (U_1 / f_1)^2 f_1 / \{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1s} + X_{2s}')^2}\}$$

- 降低电源频率时， T_{max} 不为常数。 f_1 接近额定频率时， $X_{1s}+X_{2s}' \gg R_1$ ，这时， T_{max} 变化不大。当 f_1 较低时 $X_{1s}+X_{2s}'$ 较小，随着 f_1 的降低， T_{max} 变化较大。在低速时甚至拖不动负载。



二、从基频向上变频调速 — 使用于恒功率负载

- 升高电源电压时不允许的，在频率上调时，只能保持电压不变。
- 频率越大，磁通就越小，类似于直流电动机的弱磁增速。

$$\begin{aligned}
 T &= P_M / \omega_1 = \\
 &= \frac{m_1 p U_1^2 R_2' / s}{2 p f_1 [(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_{1s} + X_{2s}')^2]} \\
 &= \frac{m_1 p^2 U_1 R_2' / s}{(2 p f_1) [(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_{1s} + X_{2s}')^2]}
 \end{aligned}$$

- 频率较高时 R_1 可以忽略，

$$\begin{aligned}
 s_m &= R_2' / \sqrt{R_1^2 + (X_{1s} + X_{2s}')^2} \\
 &\approx R_2' / (X_{1s} + X_{2s}') \propto 1 / f_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{max} &= \\
 &= \frac{1}{2} \frac{m_1 p U_1^2}{(2 p f_1)} / \{R_1 + \sqrt{R_1^2 +}
 \end{aligned}$$

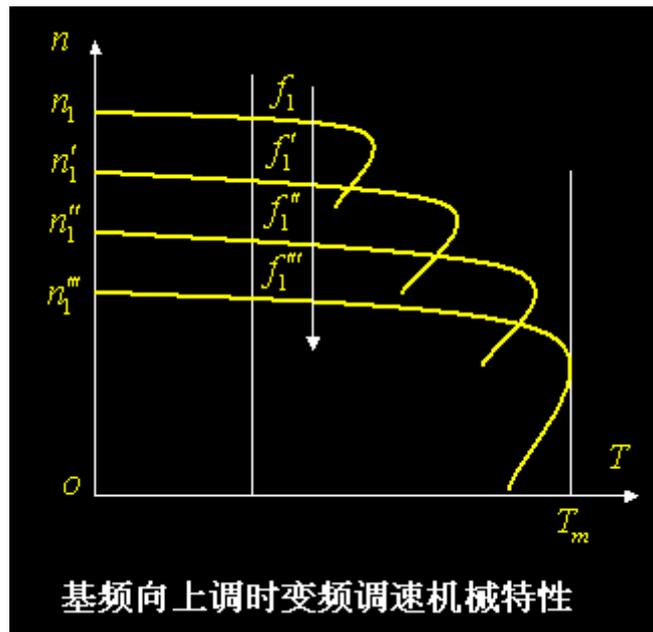
$$(X_{1s} + X_{2s}')^2$$

$$\approx 1/2m_1 p U_1^2 / (2p f_1) / (X_{1s} + X_{2s}') \propto 1/f_1^2$$

- 频率越高时， T_{max} 越小；最大转矩时的转差

$$Dn_m = s_m n_1 = C / f_1 60 f_1 / p = \text{常数}$$

- 机械特性运行段近似平行。



- 变频调速的特点：

(1) 从基频向下调时，为恒转矩调速方式；从基频向上调时，为近似恒功率调速方式。

(2) 调速范围大。

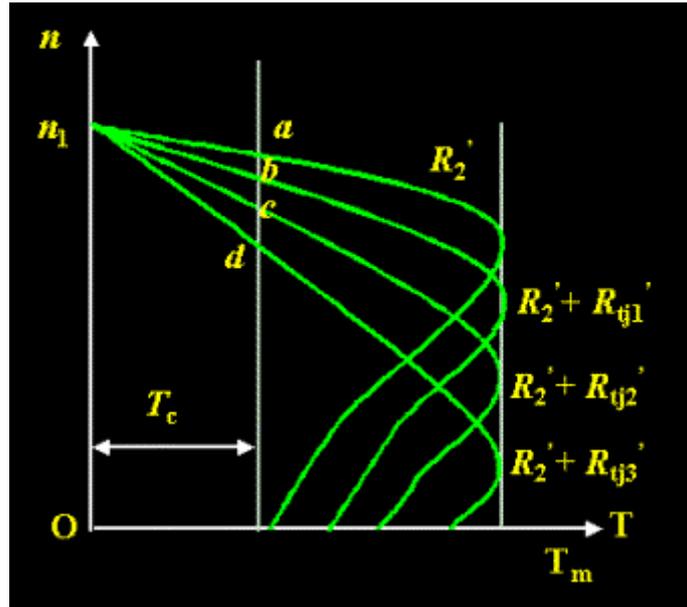
(3) 调速稳定性好。

(4) 无级调速。

13-8 绕线异步电动机的调速

一、转子回路串电阻调速

- 给绕线式异步电动机的转子回路串入调节电阻 R_{tj} ，其机械特性曲线 $T=f(s)$ 形状将发生变化。最大转矩的位置随所串电阻的增大而下移。



- 若电动机驱动恒转矩负载，本来工作于 a 点，串入调节电阻 R_{tj} 后，工作点会移动到 b 点。由于 ab 点的电磁转矩相等，所以

$$R_2'/s_a = (R_2' + R_{tj}') / s_b$$

$$R_2/s_a = (R_2 + R_{tj}) / s_b$$

- 串入电阻前后的两个稳态，电动机的阻抗没有发生变化，所以电流不变，转矩也不变。由于 $P_M = TW_1$ ，所以电磁功率也保持不变。而总的机械功率 $P_w = TW$ 随着转速下降而减小。所减少的功率消耗在了调节电阻上。

一、转子回路接入附加电势调速(串级调速)

(1) 原理

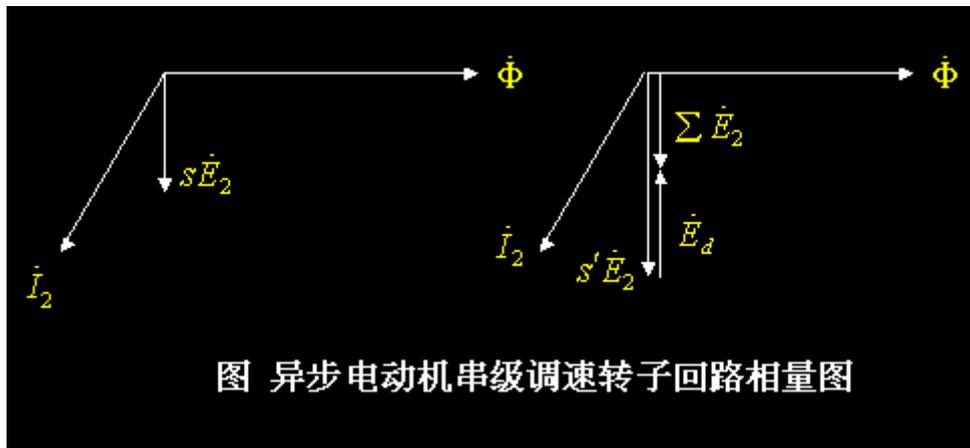


图 异步电动机串级调速转子回路相量图

- 串电阻调速时，调节电阻中消耗较大的能量。串附加电势可以克服这一缺憾。

$$I_2 = (sE_2 + E_d) / (R_2 + jsX_{2s})$$

- 若 E_d 与 sE_2 相位相反, 则串入 E_d 后, I_2 下降, 电磁转矩 T 也下降, 如果负载转矩 T_2 不变, 则电动机将减速, s 增大, 电流 I_2 和电磁转矩 T 回升, 直到 $T=T_2$ 。电动机则在新的转差率 s' 下稳定运行。
- 由于转子电势的频率变化的, 所以要获得与转子电势频率相同的附加电势, 装置比较复杂。

(2) 可控硅串级调速系统 (略)

(3) 串级调速特点:

效率高、机械特性硬, 调速范围宽、平滑性好, 但功率因数较低。

第 14 章 单相异步电动机

14-1 单相异步电动机的原理、性能和分类

- 单相异步电动机由单相电源供电, 使用方便, 广泛应用于家电、电动工具、医疗器械中。
- 单相异步电动机的结构
- 单相电机只做成小容量的。
- 单相异步电动机的定子上有主、副绕组, 其中主绕组为单相工作绕组, 副绕组为辅助启动绕组。转子是普通的鼠笼转子。
- 根据两个定子绕组的分布及供电情况的不同, 可以产生不同的启动和运行性能。
- 单相异步电动机类型有:
- (1) 单相电阻分相(启动)异步电动机; (2) 单相电容分相(启动)异步电动机; (3) 单相电容运转异步电动机;
- (4) 单相电容启动兼运转异步电动机; (5) 单相罩极式异步电动机。

一. 单相异步电动机的结构

- 单相异步电动机一般只做成小容量的。
- 定子铁心的槽内嵌有主、副绕组, 其中
- 主绕组为单相工作绕组;
- 副绕组为辅助启动绕组。副绕组在电机运行时可以存在也可以取消(借助于离心开关)。
- 子是普通的鼠笼转子。

二. 单相异步电动机的原理

1. 一相定子绕组(又叫单绕组)通电时的机械特性

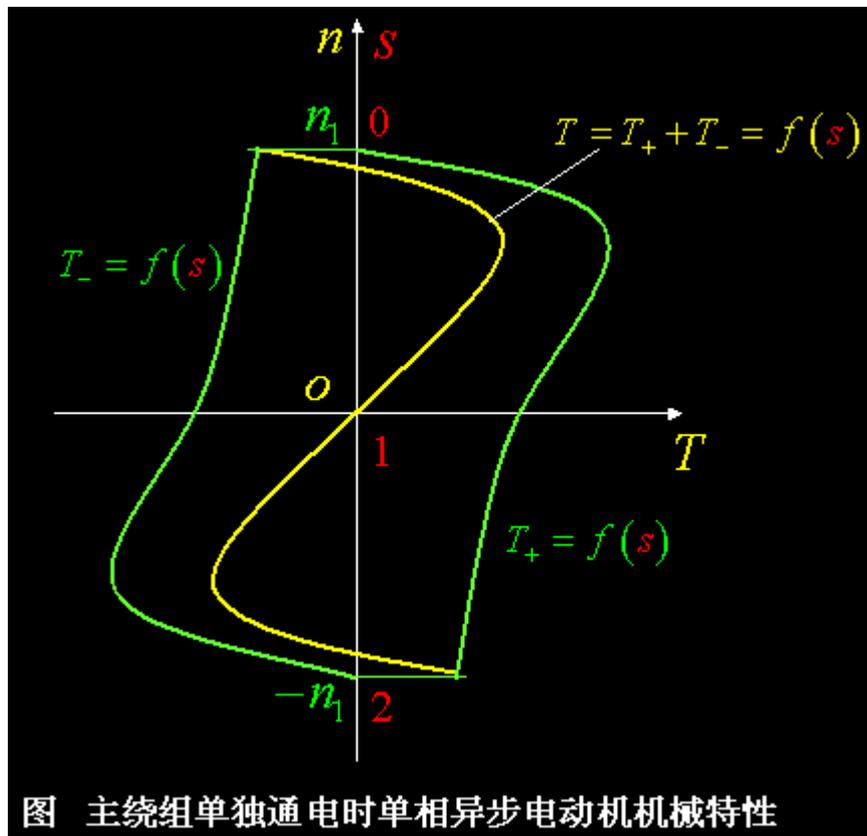
- 单相异步电动机定子绕组上有两个交流分布绕组(一般相差 90° 电角度), 主绕组 m 和副绕组 a 。
- 当主绕组 m 相通入单相正弦交流电流时, 将会产生正弦分布的基波脉振磁势。

$$f_j(x, t) = F_j \sin \omega t \cos X$$

$$= (1/2)F_j \sin(\omega t - x) + (1/2)F_j \sin(\omega t + x)$$

$$= F_+ + F_-$$

- 这是两个圆形旋转磁势，他们可以分别在异步电动机中产生电磁转矩。所以主绕组通电时电机中的电磁转矩为这两个旋转磁势产生的电磁转矩的叠加。



- F_+ 产生 $T_+ = f(s)$, F_- 产生 $T_- = f(s)$, 电动机机械特性为 $T = T_+ + T_-$ 。
- 一相通电时, F_+ 和 F_- 幅值相等, 转向相反, 对应 T_+ 和 T_- 也相对于原点对称。
- 由合成的 $T = f(s)$ 曲线可知, 即单绕组异步电动机的
- 结论:
 - (1) 最初启动转矩为零;
 - (2) 没有固定转向;
 - (3) 由于负序转矩的存在, 其性能较普通的三相异步电动机的性能差;
 - (4) 理想空载状态也达不到同步速。

2. 两相定子绕组通电时的机械特性

- 当单相异步电动机的主 (m) 绕组和副 (a) 绕组流过不同相位的两相电流时, 可产生旋转磁势 F_1 。
- F_1 可以分解为两个圆形旋转磁势 F_+ 和 F_- , 但运行时 $F_+ > F_-$, 对应的 $T_+ = f(s)$ 和 $T_- = f(s)$ 不再对称, 合成转矩 $T = f(s)$ 不通过原点。

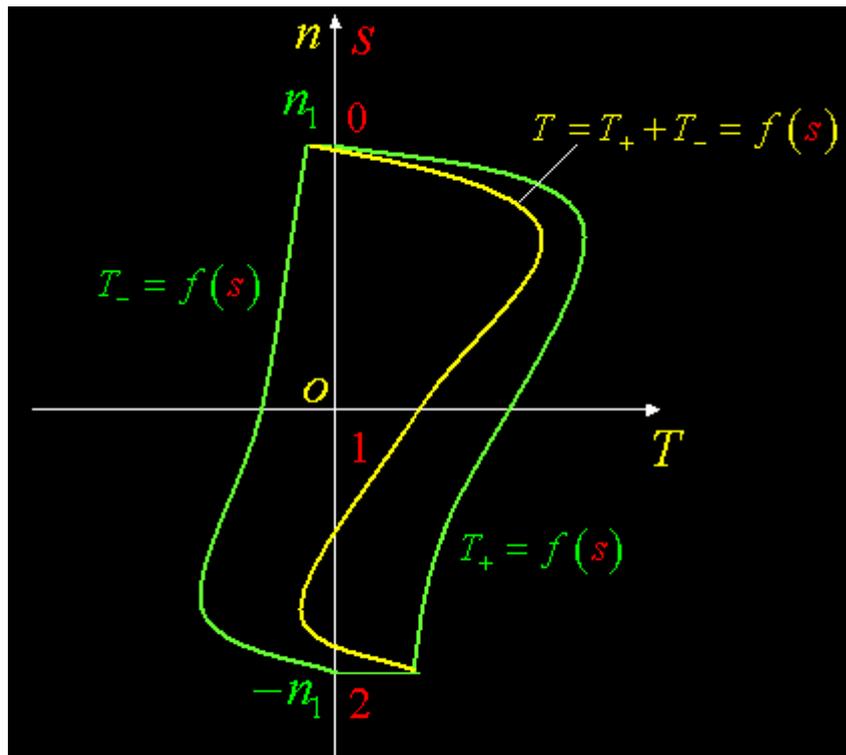


图 椭圆形旋转磁势时单相异步电动机机械特性

- 在 $n=0$ 时, $T>0$, 电动机具有正向启动转矩, 启动后, $n>0, T>0$, 电动机可以继续运行。
- 如果 m 相绕组和 a 相绕组空间错开 90° 电角度, 通入的两相电流相位差为 90° 且幅值相等, 则产生圆形旋转磁势, 此时 $F=F_+$, $F=F_-$; $T=T_+$, $T=T_-$, 机械特性与三相异步电动机的情况相同, 启动转矩也较大。
- 结论: 启动的必要条件

(1) 定子具有空间不同位置的两套绕组;

(2) 两相绕组通入不同相位的电流。

- 必须采取措施将 m 相和 a 相电流的相位进行“分相”, 不同的分相方法对应于不同的单相异步电动机。广义上说, 接在单相电源上工作的电动机叫单相异步电动机。为了启动须要使两个绕组通过两相电流。

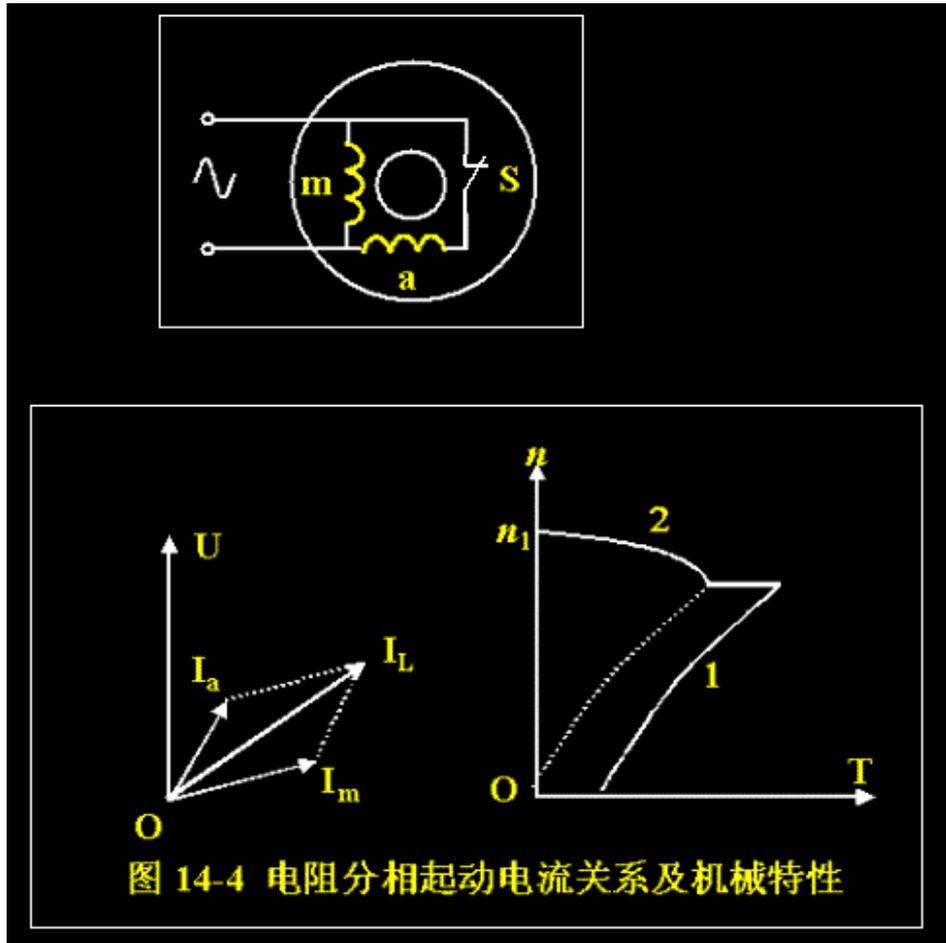
三. 单相异步电动机的类型

(1) 单相电阻分相异步电动机 (YU, BO₂, JZ 系列)

二极: 90-1100 W, 四极: 60--750 W

- 将 m 绕组和 a 绕组设计成不一样。 m 相匝数多、导线粗; a 相匝数少而导线细。 m 相电抗大而电阻小; a 相电抗小而电阻大。
- 启动时 S 合上, m 和 a 通入被“分相”的电流, 电动机启动, 当转速达到 75-80% 同步转速

时，S 自动断开。电动机在 m 绕组单独驱动下运行。



- 曲线 1 为两绕组都通电的机械特性，曲线 2 为只有 m 绕组工作时的机械特性。
- 这种单相异步电动机两相电流相位相差不大，启动转矩较小
- $T_{st}=(1.1-1.8)T_N$ 。
- 改变转向的方法：单独改变 m（或者 a）绕组的通电极性。

(2)单相电容分相启动电动机(YC, CO₂, JY 系列)

二极：180-3700W； 四极：120-3700W； 六极：250-2200W

- 给 a 绕组中串接一个启动电容 C，使得 2 绕组的阻抗不同，达到分相的目的。

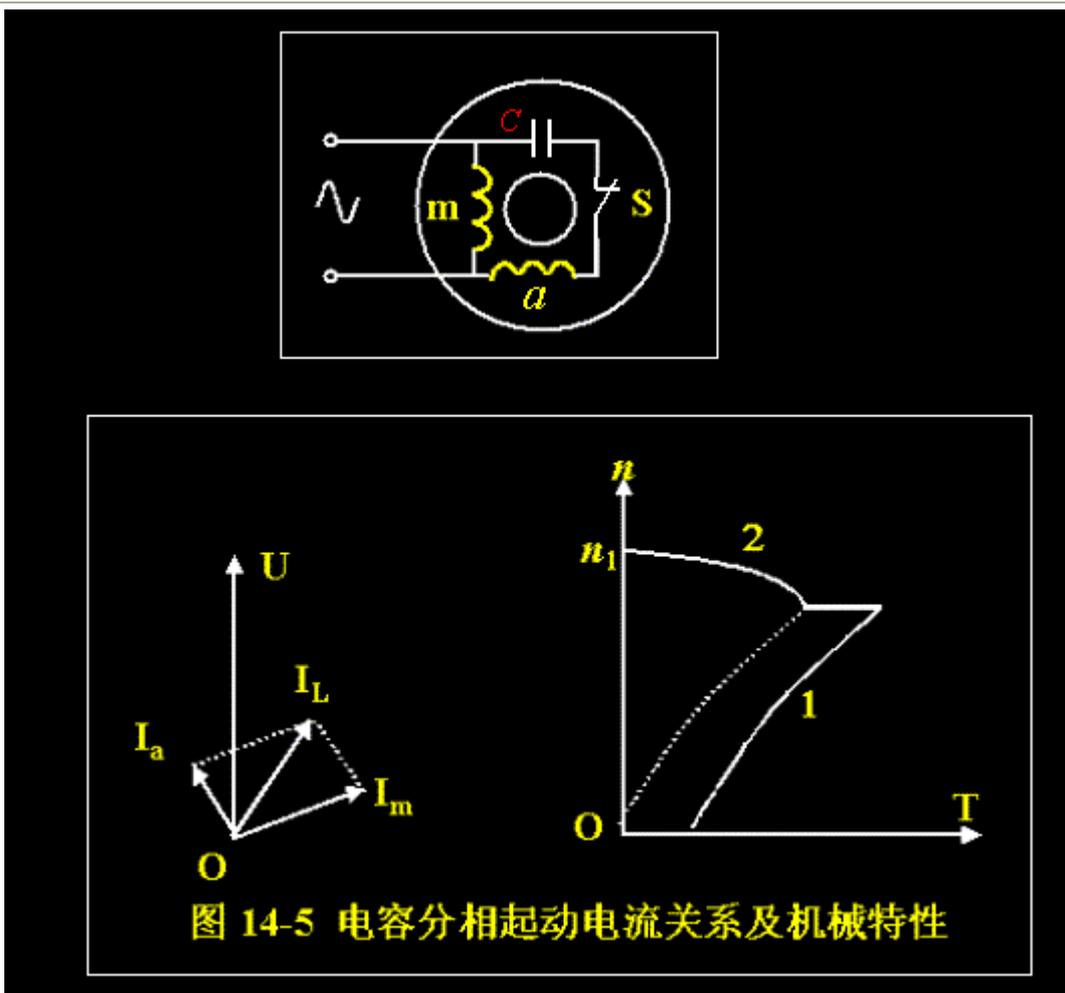


图 14-5 电容分相起动电流关系及机械特性

- 优点：(1) 配备合适的电容器可以使得 m 相和 a 相绕组的电流相位差接近 90 度。(2) 这种电机的 a 绕组匝数不受限制，可以做成与 m 绕组一样，从而在起动时得到较为接近圆形的旋转磁势，提高启动转矩。(3) 合成电流较小，即启动电流较小，而启动转矩较大，适合于对启动转矩要求较高的负载。

(3) 单相电容运转异步电动机 (YY, D0₂, JX 系列)

二极：40-2000 W， 四极：25--1500 W

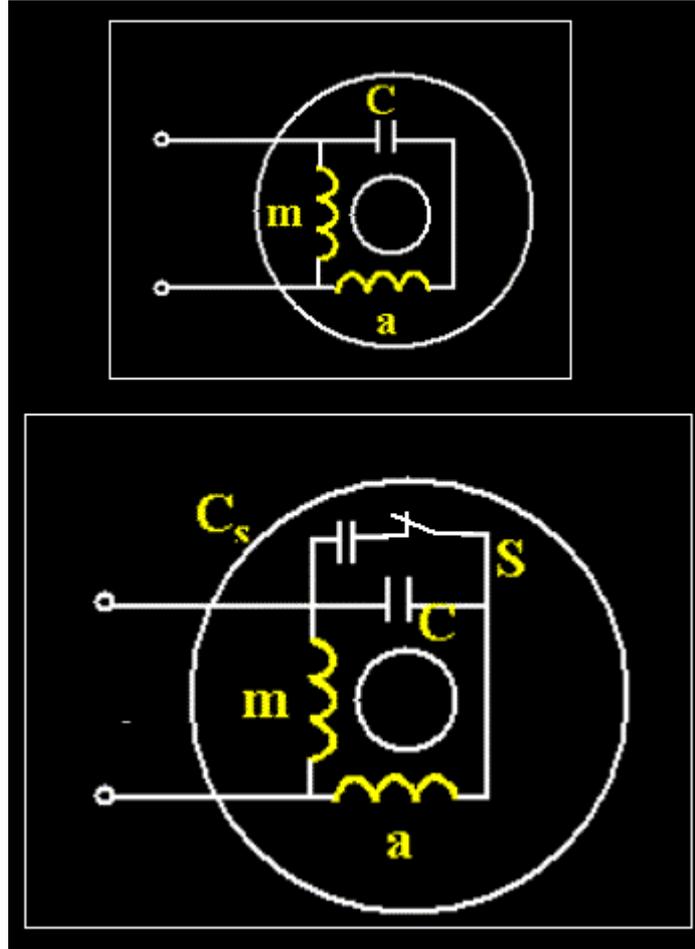
- 没有开关，a 绕组不仅参与启动，而且参与运行。
- 实际上是两相运行电机。运行时气隙磁势接近圆形。电机的运行性能较好，功率因数、效率、过载能力都比电阻分相或者电容分相启动的单相电动机好。
- 副绕组要按照长期运行的设计标准设计。另外，由于阻抗随着转速变化，圆形启动和圆形运行难以兼顾，所以该类电动机启动性能不如电容分相启动单相异步电动机。

(4) 单相电容启动兼运转 (双值电容) 异步电动机 (YL 系列)

二极：370-3000 W， 四极：250--3000 W

- 为了克服电容运转电动机不能兼顾圆形启动和圆形运转的缺憾，在 a 绕组中采用两个并联

的电容器。C 为长期运行电容器， C_s 为启动电容器。



- 启动时，串联在 a 绕组的总电容为 $C+C_s$ ，较大，可以产生较圆形的旋转磁势；转速达到约 $75\%n_N$ 后， C_s 被离心开关断开，运行时的磁势也接近圆形。
- 该类单相电动机中最理想的一类。启动转矩、最大转矩、功率因数、效率都提高了；电机噪声较小。
- 小功率三相电动机（可接成单相电动机 YS, JW 系列）

二极：40-2200 W， 四极：25-1500 W， 六极：250-3000W

四. 罩极电动机

1. 罩极电动机的特点

结构上最简单，制造方便；

只能用在轻载启动及单方向运转的设备上；

效率、功率因数较低，过载能力小。

2. 罩极电动机的原理

(1) 分布绕组的罩极电动机

主绕组：匝数多，为单相工作绕组；

副绕组：匝数少，2-8匝，线径1-3毫米，闭合线圈或铜环短路。

(2) 集中绕组的罩极电动机（属典型的）

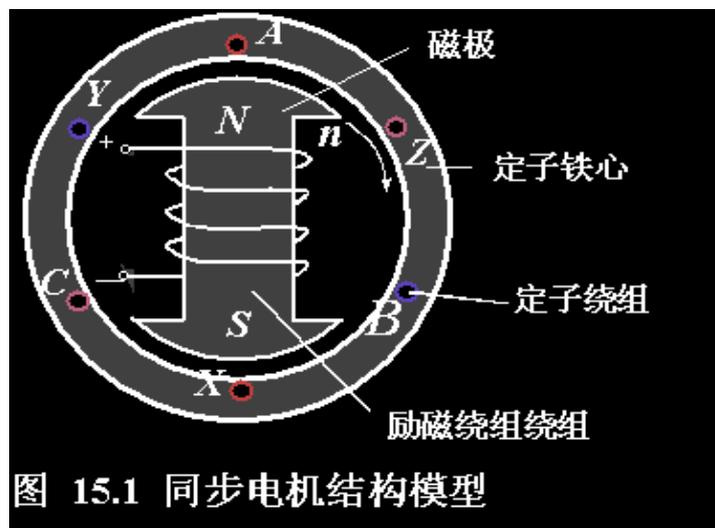
第15章 同步电机原理和结构

本章概述：

- 同步电机是又一类非常重要的交流电机。与异步电机不同，同步电机主要用作发电机，用来生产交流电能。现代电网中的巨大的电能几乎全部由同步发电机提供。
- 同步电机有三种运行方式：发电机、电动机、补偿机
- 同步发电机与配套的原动机一起构成发电机组。

15-1 同步电机原理简述

一、结构模型



- 定子上有三相对称交流绕组（电枢绕组）
- 转子上有成对磁极、励磁绕组。通以直流电流时，将会在电机的气隙中形成极性相间的分布磁场，称为励磁磁场（也称主磁场、转子磁场）。
- 定转子之间的气隙层的厚度和形状对电机内部磁场的分布和同步电机的性能有重大影响。
- 除了转场式同步电机外，还有转枢式同步电机。

二、工作原理（动画 15021）

- 原动机拖动转子以 n (r/min) 旋转（即给电机输入机械能）；

- 建立主磁场（励磁绕组通以直流励磁电流，建立极性相间励磁磁场；或用永久磁钢产生主磁场。
- 切割磁力线：主磁场随轴旋转并顺次被电枢各相绕组切割。
- 交变电势的产生：电枢绕组中将会感应出大小和方向按周期性变化的三相对称交变电势。通过引出线，即可提供交流电源。
- 感应电势有效值：

$$E_0 = 4.44 f N \Phi_f k_w \quad (15.1)$$

- 注意到：（1）感应电势频率：

$$f = pn/60 \quad (15.2)$$

- （2）交变性与对称性

三、同步电机的特点

- 我国电网的频率为 50Hz，则转子的转速为：

$$n_1 = 60 f / p = 60pn/60p = n \quad (15.3)$$

- 要使得发电机供给电网 50Hz 的电，发电机的转速必须为某些固定值，这些固定值称为同步转速，即与定子旋转磁场的转速 n_1 相同。

四、运行方式

发电机、电动机、补偿机

15-2 同步电机型式和结构

一、转子型式

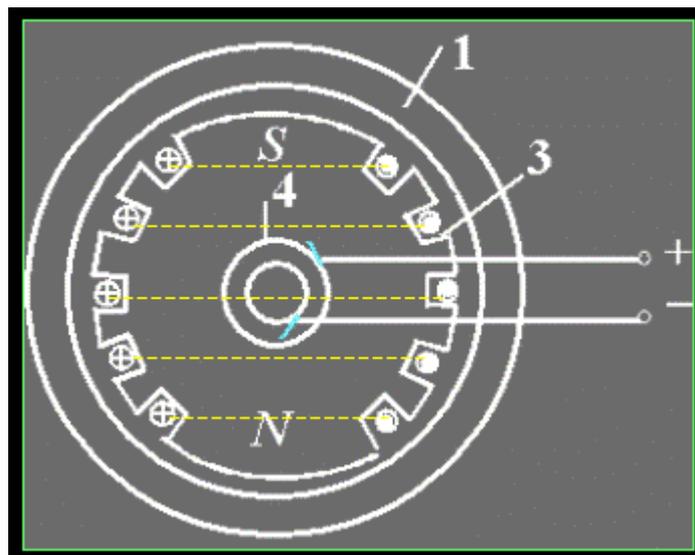
- 同步电机的定子结构与异步电机相似。而转子结构有着自己的特点。
- 根据原动机的特点（汽轮机、水轮机），同步电机的转子也制成两种型式与之配套。

（1）凸极式（Salient-pole）



- 凸极式转子上有明显凸出的成对磁极和集中励磁绕组。多极电机做成凸极结构，工艺较为简单，所以凸极电机与转速较低的水轮机相配套。

(2) 隐极式 (Cylindrical-Rotor)



- 隐极式转子上没有凸出的磁极。转子本体表面开有槽，槽中嵌放励磁绕组。隐极转子适合于 2 极高速电机，常与大容量高转速汽轮机 (线速度可达 170 米/秒) 配套。考虑到转子冷却和强度方面的要求，隐极式转子的结构和加工工艺较为复杂。

二、结构特点

- 汽轮发电机 (Turbogenerator)

定子铁心：叠片结构：圆形或扇形冲片。

机座：由钢板焊接而成-能满足强度-刚度-通风-散热的需要。

定子绕组：要有足够的绝缘强度 (高压)，一般采用 B 级或 F 级绝缘。

转子：采用隐极式。细长-铣槽-槽型-同心式励磁绕组-不导磁槽楔。

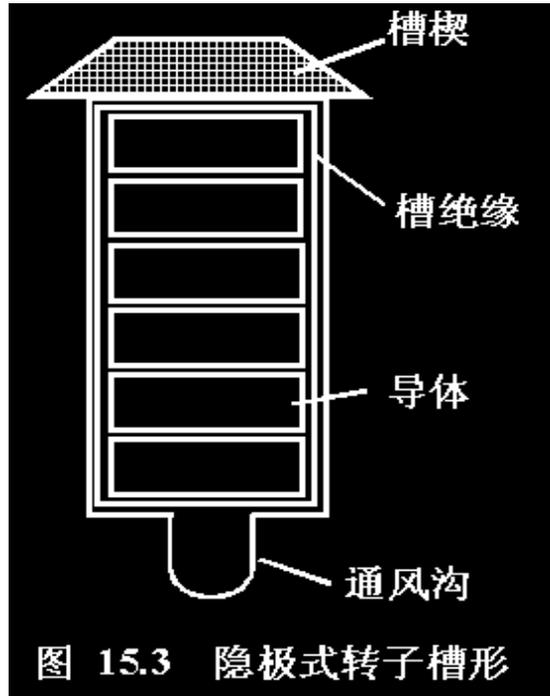


图 15.3 隐极式转子槽形

- 水轮发电机 (Hydraulic turbine generator)

极数多-直径大-轴向长度短-立式。

定子铁心由扇形电工钢片拼叠。有径向通风沟。

转子采用凸极式，磁极由厚度为 1~2mm 的钢片叠成，阻尼绕组(起动绕组)抑制短路电流和减弱电机振荡，磁极与磁极轭部采用 T 形或鸽尾形连接。

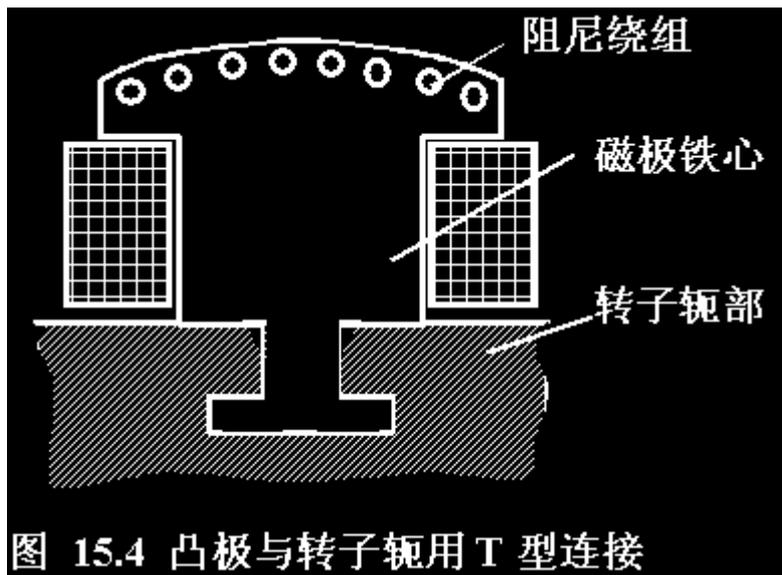


图 15.4 凸极与转子轭用 T 型连接

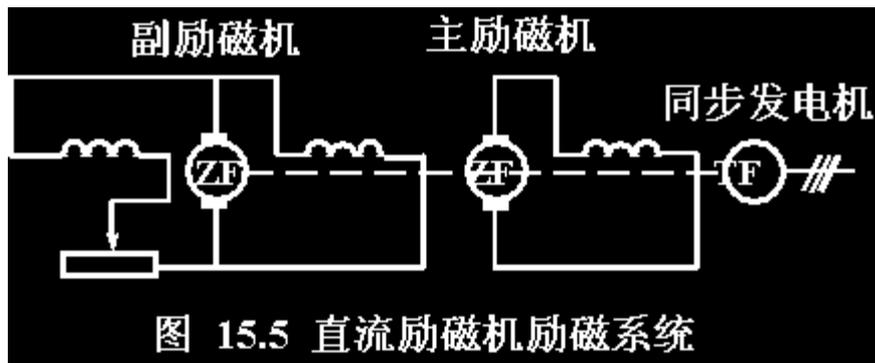
其他形式:核电, 潮汐, 柴油机, 风力, 地热, 太阳能.....

三、励磁方式简介

- 获得励磁电流的方法称为励磁方式。
- 目前采用的励磁方式分为两大类：一类是用直流发电机作为励磁电源的直流励磁机励磁系统；另一类是用硅整流装置将交流转化成直流后供给励磁的整流器励磁系统。

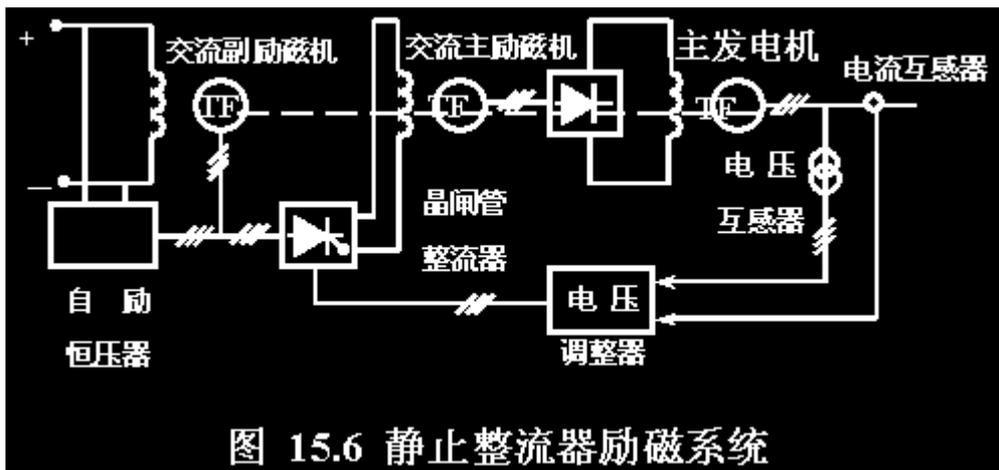
(1) 直流励磁机励磁

- 直流励磁机通常与同步发电机同轴，采用并励或者他励接法。采用他励接法时，励磁机的励磁电流由另一台被称为副励磁机的同轴的直流发电机供给。



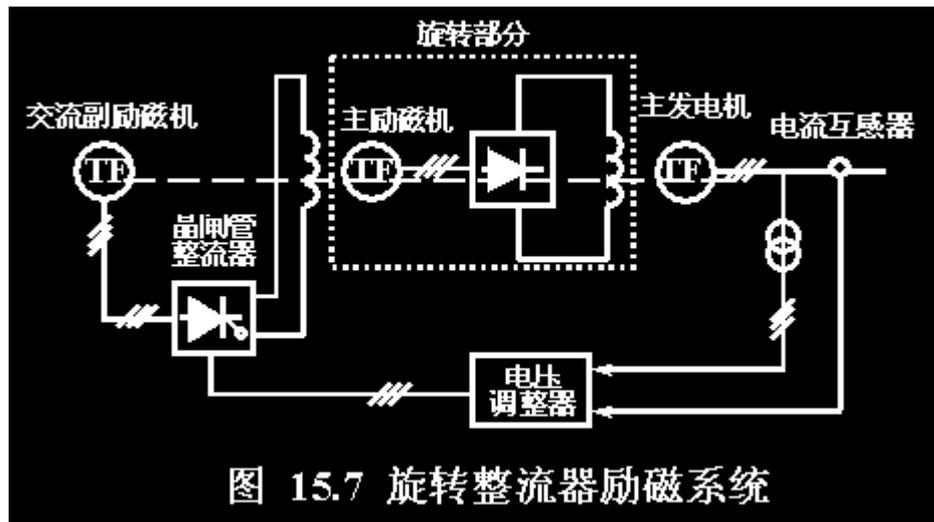
(2) 静止整流器励磁

- 同一轴上有三台交流发电机，即主发电机、交流主励磁机和交流副励磁机。副励磁机的励磁电流开始时由外部直流电源提供，待电压建立起来后再转为自励（有时采用永磁发电机）。副励磁机的输出电流经过静止晶闸管整流器整流后供给主励磁机，而主励磁机的交流输出电流经过静止的三相桥式硅整流器整流后供给主发电机的励磁绕组。



(3) 旋转整流器励磁

- 静止整流器的直流输出必须经过电刷和集电环才能输送到旋转的励磁绕组，对于大容量的同步发电机，其励磁电流达到数千安培，使得集电环严重过热。因此，在大容量的同步发电机中，常采用不需要电刷和集电环的旋转整流器励磁系统。
- 主励磁机是旋转电枢式三相同步发电机，旋转电枢的交流电流经与主轴一起旋转的硅整流器整流后，直接送到主发电机的转子励磁绕组。交流主励磁机的励磁电流由同轴的交流副励磁机经静止的晶闸管整流器整流后供给。由于这种励磁系统取消了集电环和电刷装置，故又称为无刷励磁系统。



15-3 三相同步电机的额定值和型号

一、额定值 (Rating)

- 额定容量 S_N (VA, kVA, MVA 等) 或额定功率 P_N (W, kW, MW 等)：指电机输出功率的保证值。发电机通过额定容量值可以确定电枢电流，通过额定功率可以确定配套原动机的容量。电动机的额定容量一般用 kW 数表示，补偿机则用 kVAR 表示。
- 额定电压 U_N (V, kV 等)：指额定运行时定子输出端的线电压。
- 额定电流 I_N (A)：指额定运行时定子的线电流。
- 额定功率因数 $\cos \varphi_N$ ：额定运行时电机的功率因数。
- 额定频率 f_N (Hz)：额定运行时电机电枢端电能的频率，我国标准工业频率规定为 50Hz。
- 额定转速 n_N ：额定运行时电机的转速，即同步转速。
- 除上述额定值外，同步电机铭牌上还常列出一些其它的运行数据，例如额定负载时的温升 t_N 、励磁容量 P_{FN} 和励磁电压 U_{FN} 等。

二、国产同步电机型号

- 汽轮发电机有 QFQ、QFN、QFS 等系列，前两个字母表示汽轮发电机；第三个字母表示冷却方式，Q 表示氢外冷，N 表示氢内冷，S 表示双水内冷。

- 大型水轮发电机为 TS 系列，T 表示同步，S 表示水轮。
- 举例：
 1. QFS-300-2
表示容量为 300MW、双水内冷、2 极汽轮发电机。
 2. TSS1264/160-48
表示双水内冷水轮发电机，定子外径为 1264 厘米，铁心长为 160 厘米，极数为 48。
- 同步电动机系列有 TD、TDL 等，TD 表示同步电动机，后面的字母指出其主要用途。如 TDG 表示高速同步电动机；TDL 表示立式同步电动机。
- 同步调相机为 TT

第 16 章 同步发电机对称运行分析

16-1 空载运行分析

电枢绕组不带任何负载时的运行情况，称为空载运行。空载运行是同步发电机最简单的运行方式，其气隙磁场由转子磁势单独建立，分析较为简单。

一、空载气隙磁场

- 凸极电机：气隙不均、径向磁密分布近似于平顶的波形、中线上磁密为 0、磁密分解出空间基波和谐波。偏心气隙可以使气隙磁密分布接近正弦。

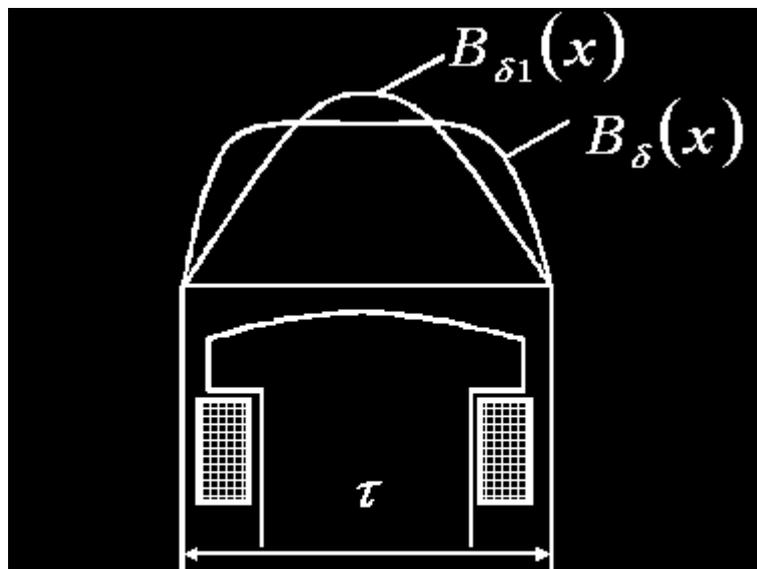
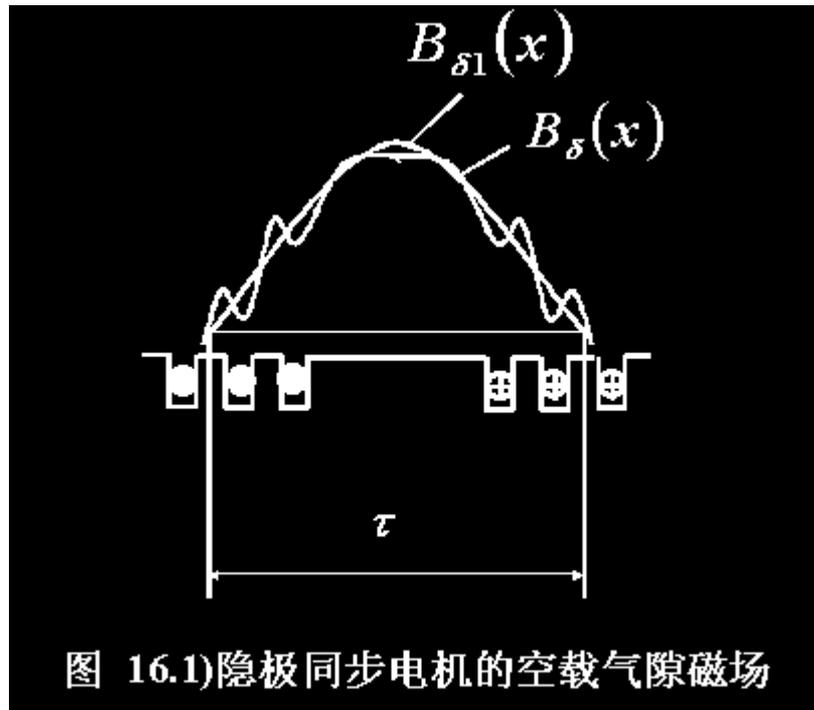


图 16.1 凸极同步电机的空载气隙磁场

- 隐极电机：气隙视为均匀、励磁磁势分布为阶梯形、齿槽影响与磁密波动。合理地选择大

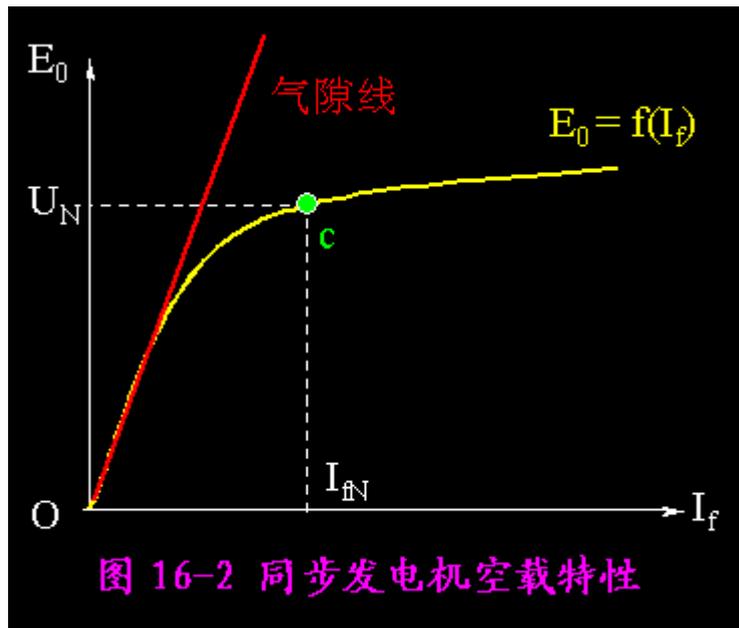
齿的宽度可以使气隙磁密分布接近正弦。



- 感应电势的波形和大小与气隙磁密的分布形状及幅值大小紧密相关，在设计和制造电机时，应采取适当的措施，以获得尽可能接近正弦分布的气隙磁密，从而得到品质较高的感应电势。

二、空载特性

- 空载特性： $n=n_1$, $I_a=0$ 时, $E_0=f(I_f)$, $E_0 \propto F_f$, $I_f \propto F_f$
- 空载特性 $E_0=f(I_f)$ 与电机磁路的磁化曲线 $F_f=f(F_f)$ 具有类似的变化规律。

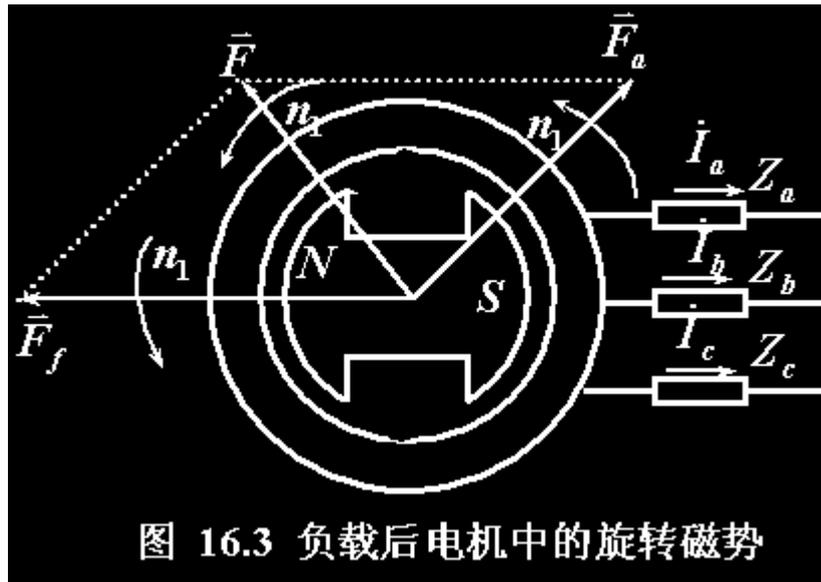


- 当 I_f 较小时, F_f 较小, 磁路不饱和, $E_0=f(I_f)$ 呈直线 (将其延长后的射线称为气隙线)。
- I_f 增大时, 磁路逐渐饱和, 磁化曲线开始进入饱和段。
- 为了合理地利用材料, 空载额定电压 U_N 一般设计在空载特性的弯曲处。
- 空载特性可以通过计算或试验得到。试验测定的方法与直流发电机类似。
- 同步电机的空载特性也常用标么值表示, 空载电势以额定电压 U_N 为基值, 取 $E_0=U_N$ 时的励磁电流 I_{fN} (称为额定励磁电流) 为励磁电流的基值。
- 用标么值表示的空载特性具有典型性, 不论电机容量的大小, 电压的高低, 其空载特性彼此非常接近。
- 空载特性在同步发电机理论中有着重要作用:
 - ① 判断电机设计是否合理。
 - ② 空载特性结合短路特性 (在后面介绍) 可以求取同步电抗的不饱和值。
 - ③ 通过测取空载特性来判断三相绕组的对称性以及励磁系统的故障。

16-2 负载运行和电枢反应

一、负载后磁势分析

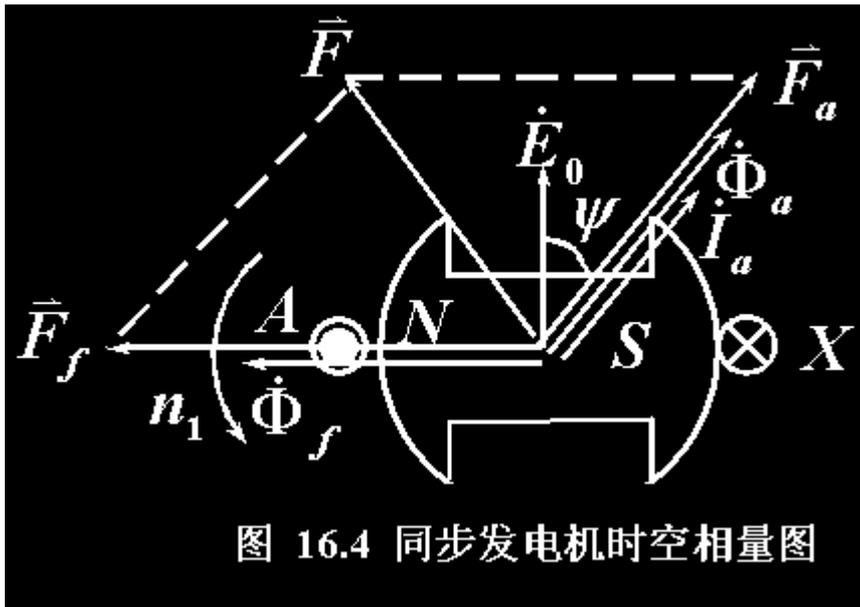
- 空载时, $I_f \rightarrow F_f$ (机械旋转磁势) $\rightarrow F_f \rightarrow E_0$
- 负载后, $I_a \rightarrow F_a$ (电气旋转磁势)。



- F_f/F_a 转速均为 n_1 , 转向一致, $F_f+F_a=F$ (合成磁势)。(动画)
- 气隙磁场 B_0 可以看成是由 F 所建立。 B_0 也是转速为 n_1 的旋转磁场。
- 负载后, 磁势和磁场将发生显著变化, 这一变化主要由电枢磁势的出现所致。

二、电枢反应的概念与内功率因数角

- F_a 的存在, 将使气隙磁场的大小和位置发生变化, 这一现象称为电枢反应。电枢反应会对电机性能产生重大影响。
- 简单地说, 电枢反应就是 F_a 对 F_f 的影响, 这种影响分为增磁、去磁或交磁。
- F_a 和 F_f 之相角差决定了电枢反应的性质。
- F_f 为励磁绕组产生的/与A相绕组匝链的磁通, F_f 在A相绕组中产生的感应电势 E_0 滞后于 F_f 90度。在图示的瞬间, F_f 过零点而 E_0 达到最大值。
- 当 F_f 与A相轴线重合时, F_f 产生的磁通全部与A相绕组匝链, 所以 F_f 也达到其最大值。在图示的瞬间, F_f 与A相轴线正交, 所以 F_f 达到零点。可见 F_f 和A相轴线的夹角与 F_f 同时变化。
- 若以直轴 d 同时作为时间相位和空间相位的0点, 在图示瞬间, F_f 和 F_f 相位角均为0, E_0 的相位角永远滞后 F_f 90度。
- 如果 I_a 与 E_0 的相位差(由负载性质决定)为0, 则 I_a 的相位角也是滞后90度, 达到其最大值。
- 当 I_a 达到最大值时, F_a 将处于A相绕组的轴线(交轴)上, F_a 的相位角也是滞后90度。
- 如果 I_a 与 E_0 的相位差不为0, 而是滞后于 E_0 一个 γ 角, 则 F_a 也将滞后于A相轴线一个 γ 角。
- 可见 I_a 在时间相位上滞后于 E_0 的角度 γ 就等于 F_a 在空间相位上滞后于A相轴线的角度。在图示的瞬间 F_a 滞后于 F_f ($90+\gamma$)度。
- 由于 F_a 和 F_f 在空间相对静止, 所以在任意瞬间, F_a 均滞后于 F_f ($90+\gamma$)度。
- 可见 γ 角决定了 F_a 与 F_f 之间的相位差。 γ 角称为内功率因数角。



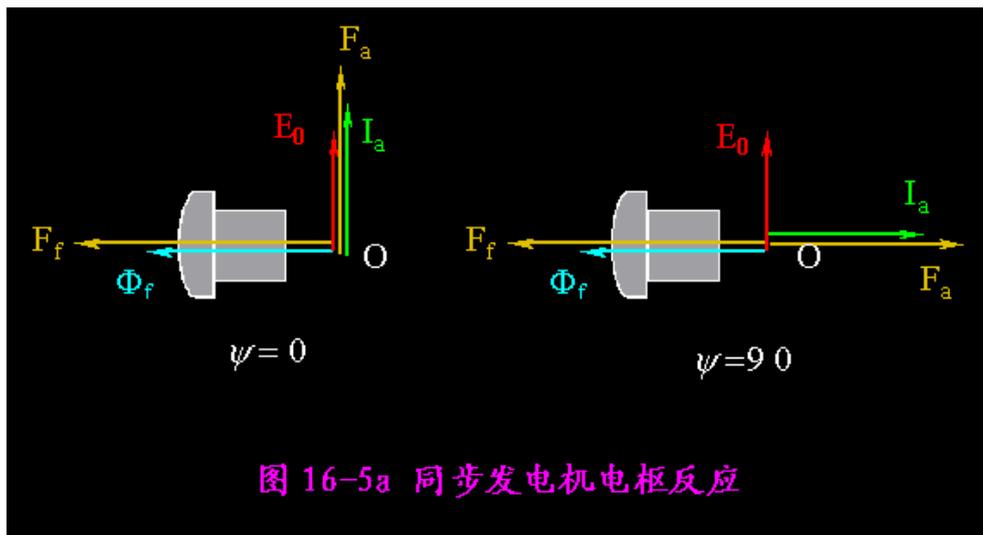
三、不同负载时电枢反应分析

(1) $\gamma = 0$ 或者 180°

- 此时 F_a 和 F_f 之夹角为 $90/270^\circ$ ， F_a 作用在 q 轴上，使合成磁势 F 的轴线位置产生一定的偏移，幅值发生一定的变化。这种作用在交轴上的电枢反应称为交轴电枢反应，简称交磁作用。

(2) $\gamma = 90^\circ$

- 此时 F_a 和 F_f 之夹角为 180° ，电枢反应为直轴去磁电枢反应。



(3) $\gamma = -90^\circ$

- 此时 F_a 和 F_f 之夹角为 0° ，电枢反应为直轴增磁电枢反应。

(4) 一般情况下的电枢反应

- 将 I_a 分解为 I_d/I_q ，分别产生 F_{ad}/F_{aq} 。

$$I_a = I_d + I_q$$

$$I_d = I_a \sin \gamma$$

$$I_q = I_a \cos \gamma$$

$$F_a = F_{ad} + F_{aq}$$

$$F_{ad} = F_a \sin \gamma$$

$$F_{aq} = F_a \cos \gamma$$

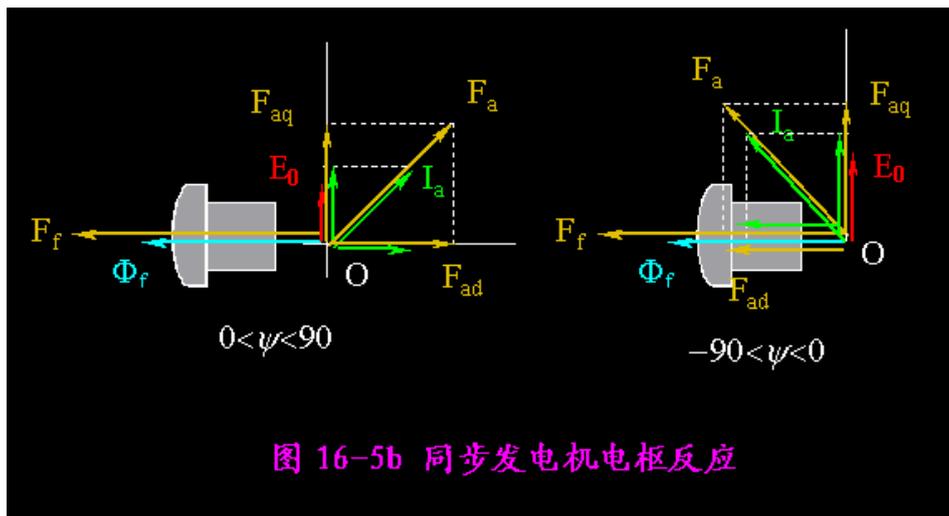


图 16-5b 同步发电机电枢反应

- F_{ad}/F_{aq} 分别产生 d 轴和 q 轴电枢反应。
- 说明：（1）绕组的感应电势 永远落后于它所匝链的磁通 90° ；

（2）时-空统一相量图：因为空间向量（主要指 F_f 、 F_a 、 F_R 、 F ）与时间相量（主要指 F 、 U 、 E 、 I_a ）均以同步速旋转，电机运行过程中此关系不变；因为 I_a 达最大值时，电枢合成磁势幅值位置也恰在 A 相绕组的轴线上，故 I_a 与 F_a 规定重合在一起；只要是随正弦规律变化的基波量均可统一为相量图来表示。

- 在时空相量图中 F_f 和 F_f 处于 d 轴， E_0 滞后于 d 轴 90° ，处于 q 轴， I_a 和 E_0 之间的相位差 γ 由负载性质决定， F_a 和 F_f 重合。
- 利用时空相量图分析不同负载情况时同步发电机电枢反应的情况甚为方便。

四、电枢反应电抗和同步电抗 (Synchronous Reactance)

- 负载后, F_a 将在电机内部产生跨气隙的电枢反应磁通 F_{ad} 和不通过气隙的漏磁通 F_s , 分别在电枢各相绕组中感应出电枢反应电势 E_a 和漏磁电势 E_s 。
- 不计饱和时, E_a 与电枢电流 I_a 成正比, 比例常数称 X_a 为电枢反应电抗。考虑到相位关系后, 每相电枢反应电势为:

$$\dot{E}_a = -jX_a I_a \quad E_a = -jX_a I_a$$

- X_a 和 F_a 所经过磁路的磁阻成反比。对于凸极电机而言, 当 F_a 和 F_f 重合时, F_a 经过直轴气隙和铁心而闭合 (直轴磁路); 该路径磁阻较小, 对应的 X_a 就较大。
- 当 F_a 和 F_f 正交时, F_a 经过交轴磁路而闭合。磁阻较大, 所以 X_a 较小。

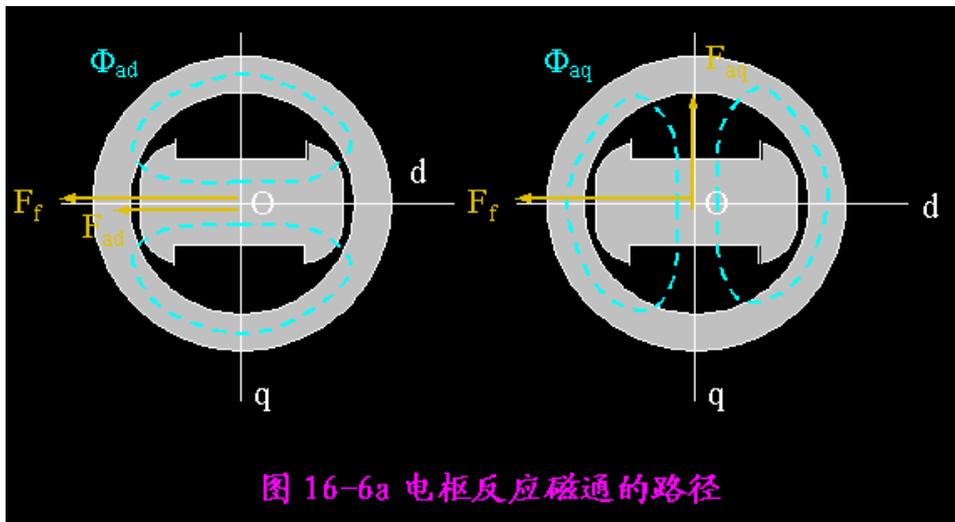


图 16-6a 电枢反应磁通的路径

- 一般情况下, F_a 和 F_f 之间的夹角由负载的性质决定, 为 $90^\circ + \gamma$, F_a 的流径介于直轴磁路和交轴磁路之间, X_a 的大小也就介于最大和最小之间。
- 不同负载对应的 X_a 也不同, 这给分析问题带来了诸多不便。为了解决这一问题, 人们采用了正交分解法和叠加原理, 将 F_a 看成是其直轴分量 F_{ad} 和交轴分量 F_{aq} 的叠加, 并认为单独激励直轴电枢反应磁通 F_{ad} , 对应有一个固定的直轴电枢反应电抗 X_{ad} , 并在定子每相绕组中产生直轴电枢反应电势 E_{ad} ; F_{aq} 单独激励交轴电枢反应磁通 F_{aq} , 对应交轴电枢反应电抗 X_{aq} , 产生交轴电枢反应电势 E_{aq} 。

$$E_a = E_{ad} + E_{aq} = -jX_{ad} I_d - jX_{aq} I_q \quad (16-4)$$

- 考虑到 F_s 引起的漏抗电势 $E_s = -jX_s I_a$ 后, 电枢绕组中由 I_a 引起的总的感应电势为

$$\begin{aligned} E_a + E_s &= -jX_{ad} I_d - jX_{aq} I_q - jX_s I_a \\ &= -jX_{ad} I_d - jX_{aq} I_q - jX_s (I_d + I_q) \\ &= -j(X_{ad} + X_s) I_d - j(X_{aq} + X_s) I_q \\ &= -jX_d I_d - jX_q I_q \end{aligned}$$

- 其中 $X_d = X_{ad} + X_s$ 定义为直轴同步电抗, $X_q = X_{aq} + X_s$ 定义为交轴同步电抗。
- 对于隐极电机来说, 由于电枢为圆柱体, 可以认为直轴磁路和交轴磁路的磁阻相等, 则 $X_{ad} = X_{aq} = X_a$:

$$\begin{aligned}
 E_a + E_s &= -jX_a I_d - jX_a I_q - jX_s I_a \\
 &= -jX_a I_a - jX_s I_a \\
 &= -j(X_a + X_s) I_a \\
 &= -jX_s I_a \quad (16-6)
 \end{aligned}$$

- 式中 $X_s = X_a + X_s$ 定义为隐极电机的同步电抗。
- 由定义可知，同步电抗包括两部分：电枢绕组的漏电抗和电枢反应电抗，又称为主电抗和漏电抗。 X_s 、 X_a 随着饱和程度的增加而减小； X_s 不随饱和程度的变化而改变， X_s 比 X_a 小得多。

16-3 同步电机的电势方程式和相量图

一、电势方程式

- 负载后, 发电机电枢绕组中存的电势:

- ① 由 F_f 产生的 E_0 ;
- ② 由 F_a 产生的 E_a ;
- ③ 由 F_s 产生的 E_s 。

电枢电阻很小，其压降可以忽略。发电机每相的电势方程为： $E_0 + E_a + E_s = U$

- 对凸极电机来说,

$$E_a + E_s = -jX_d I_d - jX_q I_q$$

$$E_0 = U + jX_d I_d + jX_q I_q$$

- 对隐极电机来说, $E_a + E_s = -jX_s I_a$

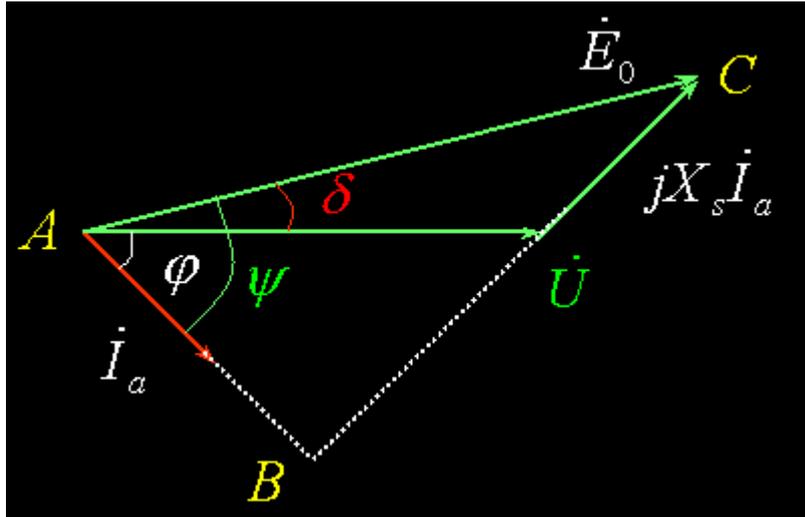
$$E_0 = U + jX_s I_a \quad (\text{注: 用相量相加!})$$

二、电势相量图

- 同步电机理论中，用电势相量图来进行分析是十分重要和方便的方法。
- 作相量图时， U 与 I_a 的夹角为负载功率因数角 φ ， X_s 为已知量，根据方程式求得 E_0 。

(1) 隐极电机相量图画法(动画)

- ① 在水平方向作出相量 U ;
- ② 根据 φ 角作出相量 I_a ;
- ③ 在 U 的尾端, 加上相量 $jX_s I_a$, 它超前 I_a 90° 。
- ④ 作出由 U 的首端指向 $jX_s I_a$ 尾端的相量, 该相量便是 E_0 。



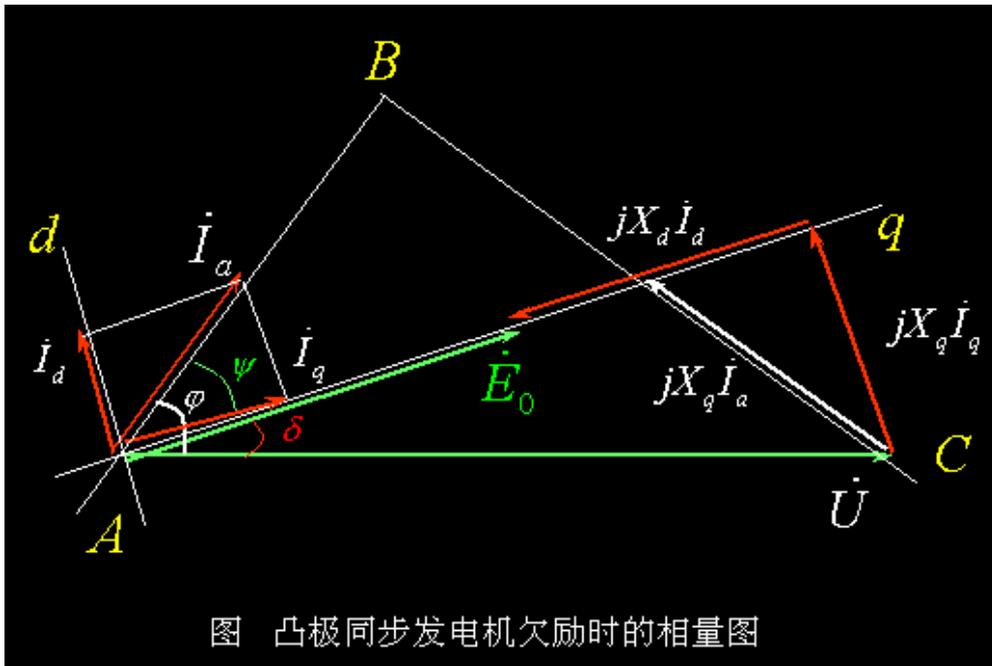
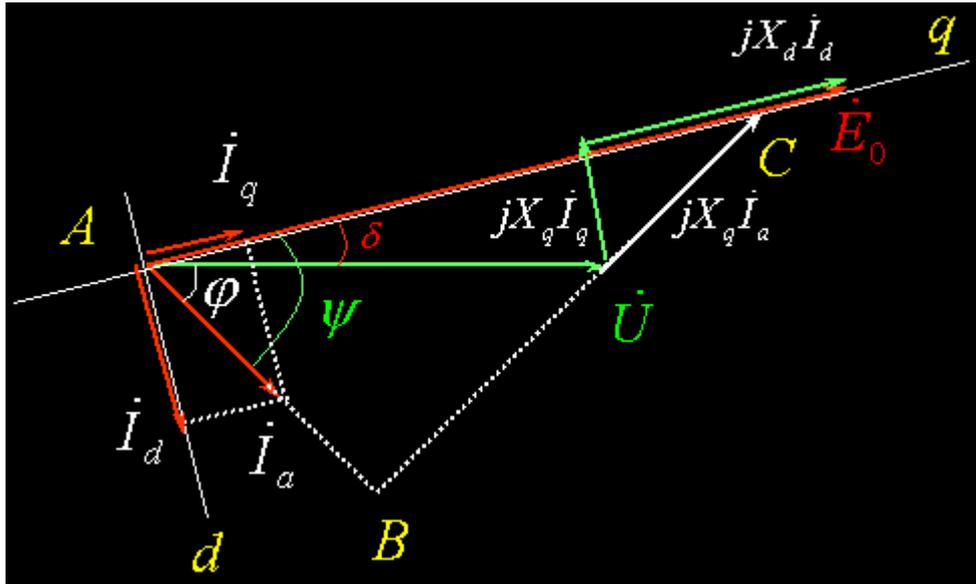
(2) 凸极电机相量图画法(动画)

- 凸极电机首先必须将 I_a 分解为 I_d 和 I_q ，然后才能根据方程式作出其电势相量图。
- 由于 I_q 与 E_0 同方位， I_d 与 E_0 正交，找出 E_0 方位即可。
- 电势方程式 $E_0 = U + jX_d I_d + jX_q I_q$ 两边同时加上 $-j(X_d - X_q) I_d$ ，

$$E_0 - j(X_d - X_q) I_d = U + jX_d I_d + jX_q I_q - j(X_d - X_q) I_d$$

$$\begin{aligned} E_0 - j(X_d - X_q) I_d &= U + jX_q I_q + jX_d I_d \\ &= U + jX_q I_a \end{aligned}$$

- 左边相量 $E_0 - j(X_d - X_q) I_d$ 显然与 E_0 处于同一方位，右边的相量 $U + jX_q I_a$ 可以很方便地求得，这样就可找到 E_0 的方位。
- 凸极电机的相量图画法：
 - ① 在水平方位作出相量 U / 错开 j 角作 I_a ；
 - ② 在 U 的尾端加上相量 $jX_q I_a$ ，超前于 I_a 90° 经过 U 首端和 $jX_q I_a$ 尾端的直线为的 E_0 方位 (q 轴)
 - ③ 将 I_a 分解为 I_d 和 I_q ；
 - ④ 根据方程 $E_0 = U + jX_q I_q + jX_d I_d$ 作出 E_0 。



- 相量图很直观地显示了同步电机各个相量之间的数值关系和相位关系，对于分析和计算同步电机的许多问题有较大的帮助作用。

三、计算内功率因数角 γ 的公式

对于隐极式同步发电机： $\gamma = \arctan[(I_a X_s + U \sin \delta) / (U \cos \delta)]$

对于凸极式同步发电机： $\gamma = \arctan [(I_a X_d + U \sin \delta) / (U \cos \delta)]$

一、短路特性

- $n=n_1$ /电枢绕组三相持续短路/然后加励磁电流，称为稳态短路运行。
- 这时 $U=0$ ，如果改变 I_f ，则短路电枢电流 I_k 也改变。 $I_k=f(I_f)$ 就是短路特性。
- 短路运行时， I_k 和 E_0 之间的相位差 γ 仅由 X_s 和绕组电阻决定，忽略电阻时， I_k 将滞后于 E_0 90° 电角度，其电枢反应表现为直轴纯去磁作用。

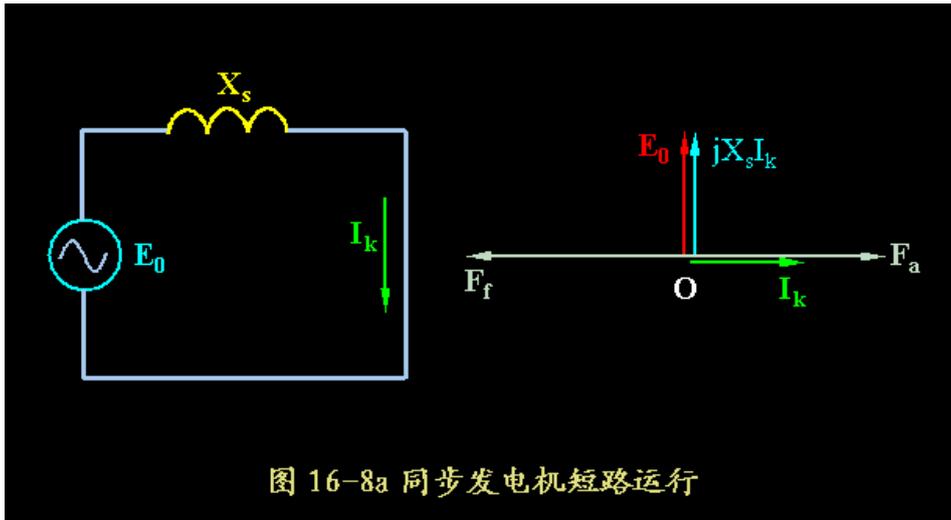


图 16-8a 同步发电机短路运行

- 去磁作用减少了电机中的磁通，磁路不饱和 $E_0=f(I_f)$ 呈线性。由于短路电流 $I_k=-jE_0/X_s$ 所以 $I_k=f(I_f)$ 也呈线性，是一条通过原点的直线。
- 稳态短路时，电机中的电枢反应为直轴纯去磁作用，电机的磁通和感应电势较小，短路电流也不会过大，所以三相稳态短路运行没有危险。
- 对凸极电机来说，短路时交轴电枢磁势 $F_q=0$ 分析时只需将 X_s 用 X_d 、将 I_a 用 I_d 代替即可。

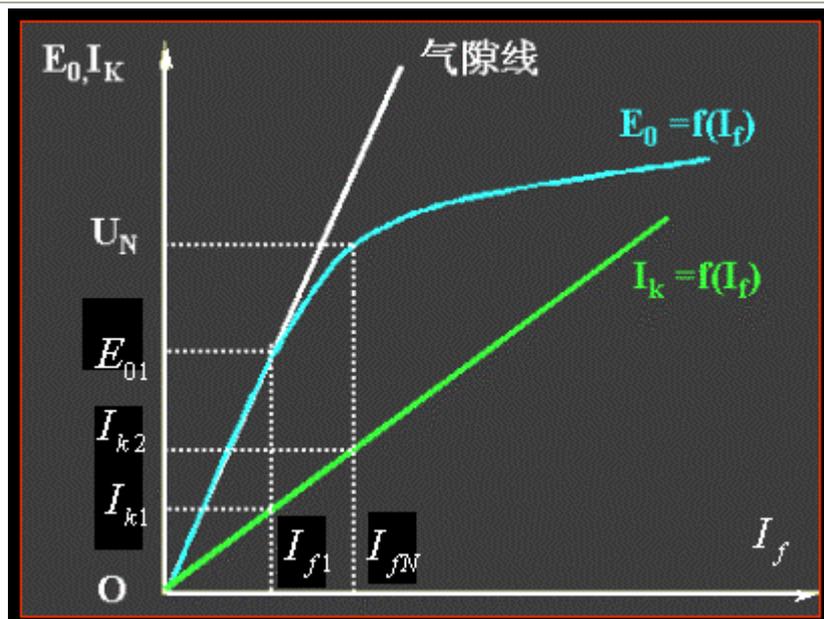
二、利用 $I_k=f(I_f)$ 和 $E_0=f(I_f)$ 求 X_s/X_d

- 短路且略去电阻压降时，

$$E_0 = -jX_s I_k$$

$$X_s = E_0(I_f) / I_k(I_f)$$
- 测定同步电抗的简单方法：
 - ① 用原动机带动同步发电机在同步转速下运转，测取 $E_0=f(I_f)$ 和 $I_k=f(I_f)$ 特性。
 - ② $E_0=f(I_f)$ 和 $I_k=f(I_f)$ 绘成曲线，并在 $E_0=f(I_f)$ 上作出气隙线。
 - ③ 选取某一 I_f ，求得对应的短路电流 I_{k1} 和对应于气隙线上的电势 E_{01} ，则
 不饱和 $X_s(X_d) = E_{01} / I_{k1}$
- 在 $E_0=f(I_f)$ 求得对应于额定电压 U_N 的励磁电流 I_{fN} ，再从 $I_k=f(I_f)$ 上求得对应于 I_{fN} 的短路电流 I_{k2} ，则
 饱和 $X_s(X_d) = U_N / I_{k2}$
- 凸极电机的 X_q 可以利用经验公式求得

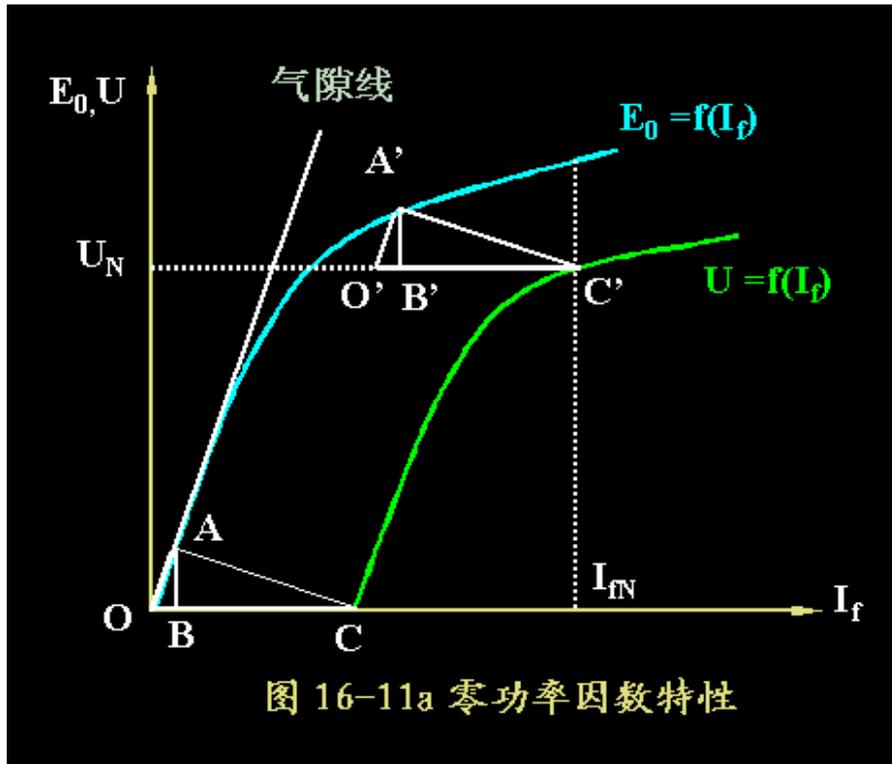
$$X_q \approx 0.65X_d$$



三、零功率因数负载特性

- 负载特性是指当负载电流 $I_a = \text{常数}$ ，功率因数 $\cos \varphi = \text{常数}$ 的条件下，端电压 U 与励磁电流 I_f 的关系。
- 对应于 $\cos \varphi = 0$ & $I_a = I_N$ 时一条负载特性称为零功率因数特性。
- $\cos \varphi = 0$ 的负载为纯电感负载，即 $\varphi = 90^\circ$ ， $I_d = I_a$ ， $I_q = 0$ ，且

$$U = E_0 - X_d I_d = E_0(I_f) - X_d I_d = E_0(I_f) - X_d I_N$$
- 已知空载特性 $E_0(I_f)$ 和同步电抗 X_d (或 X_s) 的情况下，就可以作出同步电机的零功率因数特性曲线。反过来通过测取空载特性和零功率因数特性就可以求得同步电抗，经过进一步的处理，还可以求得定子漏抗。



四、同步电抗和定子漏抗

- 同步电抗

在零功率因数特性曲线上取出对应于 $U=U_N$ 的 I_{fN} ，再在空载特性曲线上取出对应于 I_{fN} 的空载电势 E_{0N} ，则 $X_d = (E_{0N} - U_N) / I_{fN}$

- 定子漏抗

$U=0$ 时，对应于零功率因数特性上的励磁电流 $I_f = OC = OB + BC$ ， OB 段用来产生漏抗电势 $E_s = AB = X_s I_d$ 。 BC 段用来产生电枢电势 $E_{ad} = X_{ad} I_d$ ，可见 $\triangle ABC$ 的 BC 边代表纯去磁的电枢反应电势， AB 边代表定子漏抗。由于 BC 和 AB 的长度均和电枢电流 I_d 成正比。所以当 I_d 一定时， $\triangle ABC$ 是固定的，此三角形称为同步电机的特性三角形。

只要求得特性三角形，我们就可以很方便地求得定子漏抗，即

$$X_s = AB / I_d$$

- 特性三角形的作法：(动画)

I_d 一定时， $\triangle ABC$ 是固定的，在空载特性曲线上移动 $\triangle ABC$ 的顶点 A 时， C 的轨迹即为零功率因数特性。如果我们在零功率因数特性曲线上向上平移 $\triangle ABC$ 的顶点 C 到额定电压 U_N 时，将得到 $\triangle A' B' C'$ ，并且 $O' C' = OC$ ， $O' A' \parallel OA$ ，由此可得到特性三角形的作法：

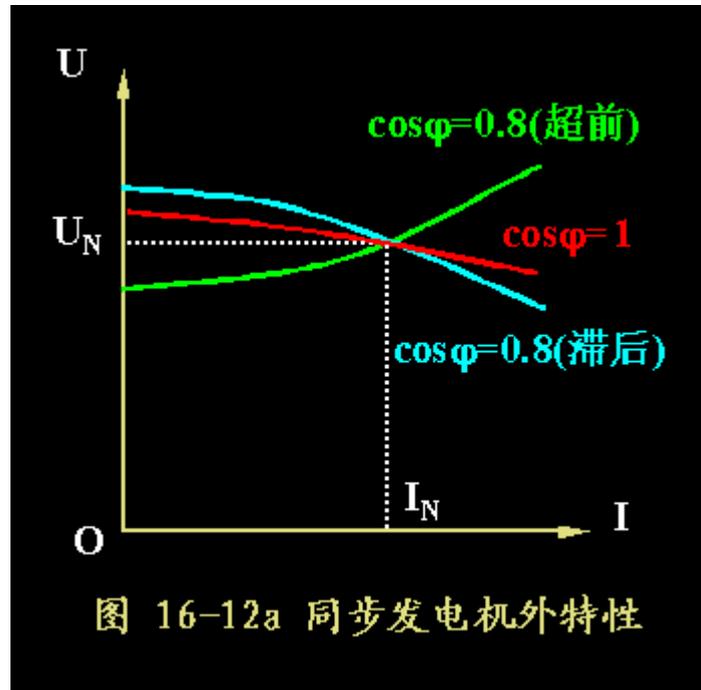
- ① 在额定电压 U_N 处作一水平线交零功率因数曲线于 C' ，截取 $O' C' = OC$ ；
- ② 过 O' 作 OA 的平行线交空载特性曲线于 A' ；
- ③ 过 A' 作 $A' B' \perp O' C'$ 于 B' ，则 $\triangle A' B' C'$ 即为特性三角形

五、外特性和电压调整率

- 外特性是指： $n=n_1$ ， $I_f = \text{常数}$ ， $\cos \phi = \text{常数}$ 的条件下，同步发电机作单机运行时，端电压 U 随负

载电流 I_a 而变化的关系, 即 $U=f(I_a)$ 曲线

- 外特性曲线的走向和负载的性质有关。对于感性负载 ($j>0$), 在励磁电流不变的情况下, 随着 I_a 增大, 有两个因素导致 U 下降, 其一是电枢反应的去磁作用的增强, 其二是漏抗压降的增大, 所以感性负载时, 同步电机的外特性是下降的曲线。



- 对于 $j<0$ 的容性负载, 电枢反应可能表现为增磁作用, 随着 I_a 增大, U 可能会上升
- 保持额定励磁电流 I_{FN} 和转速 n_1 不变, 将发电机的完全卸载, 发电机的端电压将由 U_N 变化为空载电势 E_0 , 电压变化的幅度可以用电压调整率来表示

$$DU = (E_0 - U_N) / U_N$$

- DU 是发电机的性能指标之一, 按国家标准规定不能大于 40% 。

第 17 章 同步发电机的并网运行

本章概述:

- 单机供电的缺点:
 - ①不能保证供电质量(电压和频率的稳定性)和可靠性(发生故障就得停电);
 - ②无法实现供电的灵活性和经济性。这些缺点可以通过多机并联来改善。
- 通过并联可将几台电机或几个电站并成一个电网。现代发电厂中都是把几台同步发电机并联起来接在共同的汇流排上, 一个地区总是有好几个发电厂并联起来组成一个强大的电力系统(电网)。

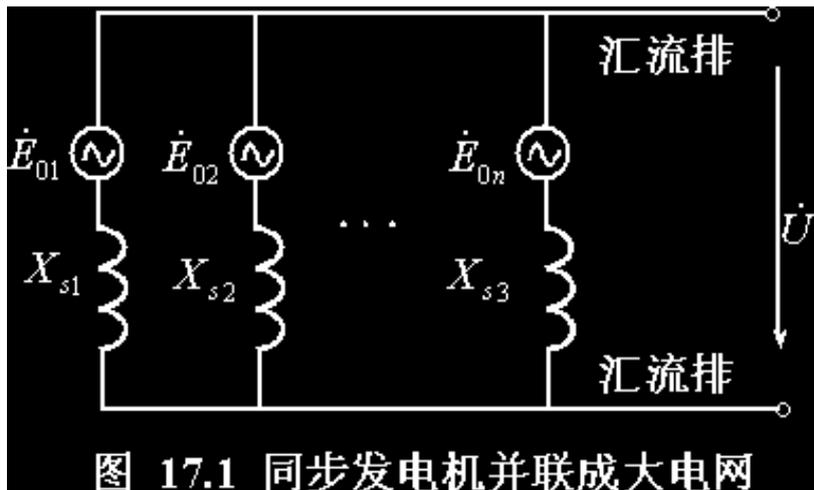


图 17.1 同步发电机并联成大电网

- 并网运行 (Parallel Operation) 优点：
 - ①提高了供电的可靠性，一台电机发生故障或定期检修不会引起停电事故。
 - ②提高了供电的经济性和灵活性。
 - ③提高了供电质量，同步发电机并联到电网后，它的运行情况要受到电网的制约，也就是说它的电压、频率要和电网一致而不能单独变化。

17-1 并联条件及其方法

一、并网条件

- 把同步发电机并联至电网的过程称为投入并联，或称为并列、并车、整步。
- 在并车时必须避免产生巨大的冲击电流，以防止同步发电机受到损坏、电网遭受干扰。
- 并网条件：
 - ① 电压有效值应相等即 $U=U_1$;
 - ② 频率和相位应相等 $f=f_1$ 、 $j = j_1$;
 - ③ 双方应有一致的相序。

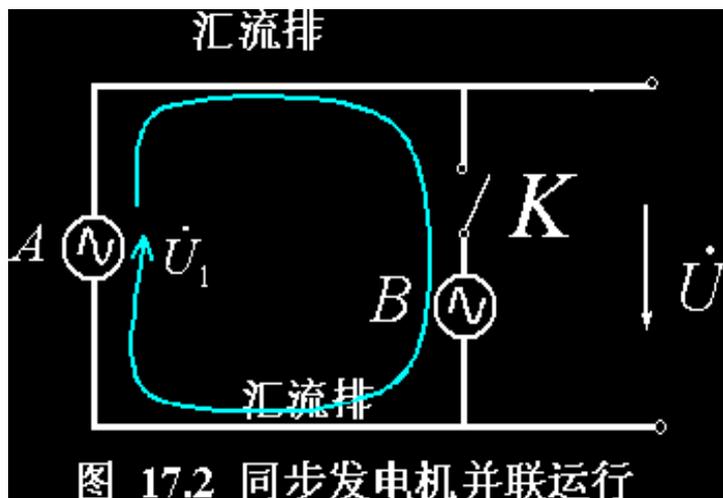


图 17.2 同步发电机并联运行

- 若以上条件中的任何一个不满足则在开关 K 的两端，会出现差额电压，如果闭合 K，在发

电机和电网组成的回路中必然会出现瞬态冲击电流。

- 上述条件中，除相序一致是绝对条件外，其它条件都是相对的，因为通常电机可以承受一些小的冲击电流。

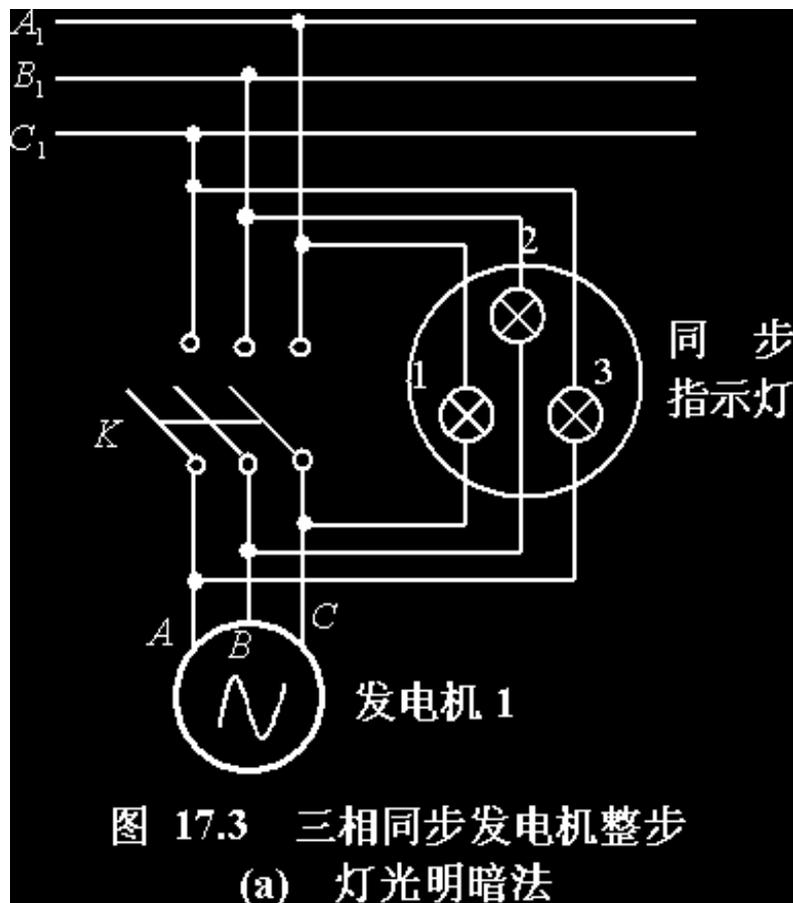
二、并联方法

- 并车的准备工作是检查并车条件和确定合闸时刻。通常用电压表测量电网电压，并调节发电机的励磁电流使得发电机的输出电压 $U=U_1$ 。再借助同步指示器检查并调整频率和以确定合闸时刻。

- 同步指示器法

(1) 灯光明暗法(看动画)

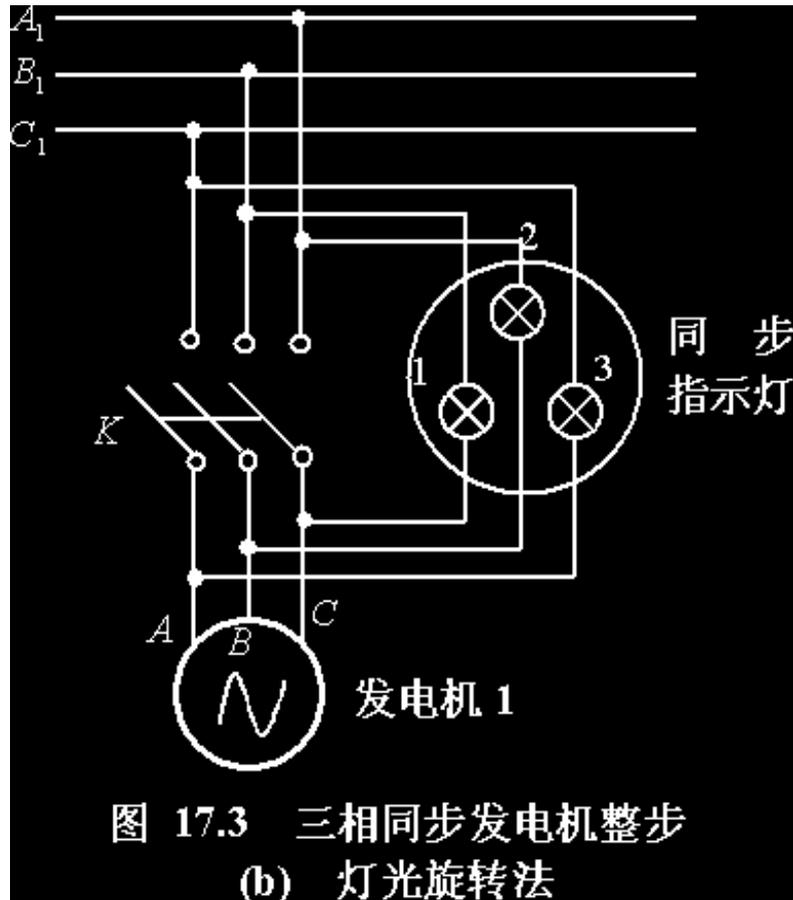
将三只灯泡直接跨接于电网与发电机的对应相之间。



- 并车方法为：
 - ①通过调节发电机励磁电流使得发电机的端电压等于电网电压；
 - ②电压调整后，如果相序一致，灯光应表现为明暗交替，如果灯光不是明暗交替，则说明相序不一致，这时应调整发电机的出线相序或电网的引线相序，严格保证相序一致；
 - ③通过调节发电机的转速改变其频率，直到灯光明暗交替十分缓慢时，说明和电网频率已十分接近，等待灯光完全变暗的瞬间到来，即可合闸并车。

- (2) 灯光旋转法(看动画)

- 灯 1 跨接于 A_1B , 灯 2 跨接于 B_1A , 灯 3 跨接于 C_1C 。



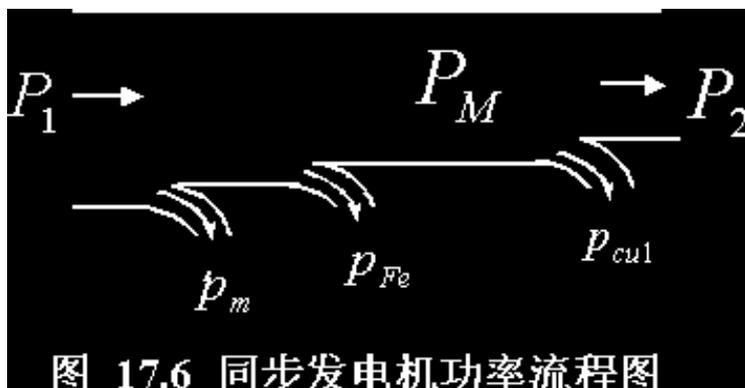
- 旋转法并车方法为：
 - ①通过调节发电机励磁电流的大小使得发电机的端电压等于电网电压；
 - ②电压调整后，如果相序一致，则灯光旋转，否则说明相序不一致，这时应调整发电机的出线相序或电网的引线相序，严格保证相序一致；
 - ③通过调节发电机的转速改变其频率，直到灯光旋转十分缓慢时，说明与电网频率已十分接近，这时等待灯 3 完全熄灭的瞬间到来，即可合闸并车。
- 灯光法又称为理想整步法。由于它对并车条件逐一检查和调整，所以费时较多。

(3) 自整步法：

- 在相序一致的情况下将励磁绕组通过适当的电阻短接；
- 用原动机把发电机拖动到接近同步速(相差 2~5%)；
- 在没有接通励磁电流的情况下将发电机接入电网；
- 再接通励磁并调节励磁强弱，依靠定子磁场和转子磁场之间的电磁转矩将转子拉入同步转速，并车过程即告结束。
- 需要注意的是，励磁绕组必须通过一限流电阻短接，因为直接开路，将在其中感应出危险的高压；直接短路，将在定、转子绕组间产生很大的冲击电流。自同步法的优点是：操作简单，方便快捷；缺点是：合闸时有冲击电流。

17-2 功角特性及有功功率调节

一、功率流程和功率平衡



- P_1 为自原动机向发电机的输入的机械功率，其中一部分提供机械损耗，另一部分供给定子铁心损耗 p_{Fe} ， P_M 为通过电磁感应作用由转子边传递到定子边的电功率，称为电磁功率。如果是负载运行，定子绕组中还存在定子铜耗 p_{cu1} ， $P_2 = P_M - p_{cu1}$ 就是发电机的输出功率。

- 同步发电机的功率平衡方程式为

$$P_1 = P_M + p_{Fe} + p_m$$

$$P_M = P_2 + p_{cu1}$$

- 定子绕组的电阻一般较小，其铜耗可以忽略不计，则有

$$P_M = P_2 = mUI \cos \psi = mUI \cos (\psi - \delta)$$

二、功角特性

- 定义： $P_M = f(\delta)$

(1) 凸极电机

$$\begin{aligned} P_M &= mUI_a \cos(\psi - \delta) \\ &= mUI_a \cos \psi \cos \delta + mUI_a \sin \psi \sin \delta \\ &= mUI_q \cos \delta + mUI_d \sin \delta \end{aligned}$$

由相量图知：

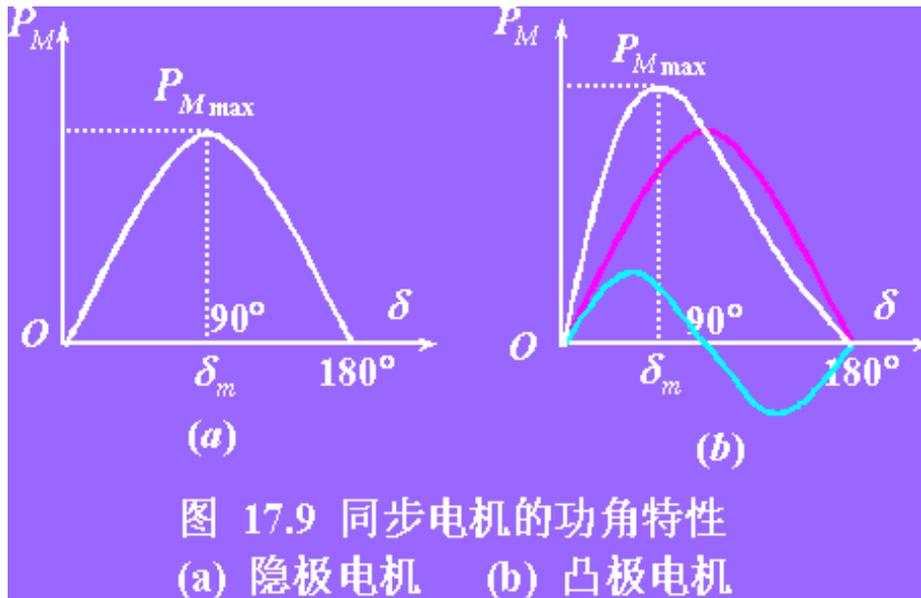
$$I_q X_q = U \sin \delta \Rightarrow I_q = \frac{U \sin \delta}{X_q}$$

$$I_d X_d = E_0 - U \cos \delta \Rightarrow I_d = \frac{E_0 - U \cos \delta}{X_d}$$

将以上两式代入电磁功率式 后得:

$$\begin{aligned} P_M &= mU \frac{U \sin \delta}{X_q} \cos \delta + mU \frac{E_0 - U \cos \delta}{X_d} \sin \delta \\ &= m \frac{UE_0}{X_d} \sin \delta + m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \\ &= P'_M + P''_M \end{aligned}$$

- 主电磁功率与附加电磁功率
- 令 $(dP_M/d\delta)=0$ 可以求出对应于最大电磁功率 P_{Mmax} 的功角 δ_m , 一般来说凸极电机的 δ_m 在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 之间。



(2) 隐极电机

- $X_d = X_q = X_s$

$$P_M = m \frac{UE_0}{X_s} \sin \delta$$

(3) 过载能力

- 最大功率与额定功率的比值定义为同步发电机的过载能力。

$$K_M = P_{Mmax} / P_N$$

- 对隐极电机来说

$$K_M = P_{Mmax} / P_N = 1 / \sin \delta_N$$

三、有功功率的调节

- 稳态时，同步发电机的转速由电网的频率决定，恒等于同步转速，电磁转矩 T_M 和电磁功率 P_M 之间成正比关系：

$$T_M = P_M / \omega_1$$

- 原动机提供的动力转矩 T_1 与电磁转矩 T_M 以及空载阻力转矩 T_0 相平衡

$$T_1 = T_M + T_0$$

- 要改变发电机输送给电网的有功功率 P_M ，就必须改变原动机提供的动力转矩 T_1 ，这一改变可以通过调节水轮机的进水量即水门或汽轮机的汽门来达到。
- 当 d 处于 $0-d_m$ 范围时，随着 d 的增大， P_M 亦增大，发电机在这一区间能够稳定运行。而当 $d > d_m$ 时，随着 d 的增大， P_M 反而减小，电磁功率无法与输入的机械功率相平衡，发电机转速越来越大，发电机将失去同步，故在这一区间发电机不能稳定运行。
- 重要结论：在增加有功功率的同时也伴随着无功功率的减少。解释如下：
- 无功功率的功角特性 $Q = f(d)$
- 以隐极电机为例，画出相量图并作辅助线，由相量图
- 知： $E_0 \cos d - U = I X_s \sin j$
- $Q = m U I \sin j$
- $Q = (m U E_0 \cos d - m U^2) / X_s$
- 同步发电机失去同步后，必须立即减小原动机输入的机械功率，否则将使转子达到极高转速，以致离心力过大而损坏转子。另外，失步后，发电机的频率和电网频率不一致，定子绕组中将出现一个很大的电流而烧坏定子绕组。因此，保持同步是十分重要的。
- 综上所述：并联于电网的发电机所承担的有功功率可以通过调节原动机输入的机械功率来改变的。而且电机承担的有功功率的极限是 P_{Mmax} 。当 $0 < d < d_m$ 时发电机可以稳定运行； $d > d_m$ 发电机不能稳定运行。
- 应当注意，当发电机的励磁电流 I_f 不变时， d 的变化也将无功功率的变化。无功功率随着有功功率的增加而减少，甚至可能导致无功功率改变符号，这是应当避免的。因此如果只要求改变发电机所承担的有功功率。

四、功角的物理意义

- γ 为内功率因数角， $d = \gamma - j$ 定义为功角。
- 它表示发电机的励磁电势 E_0 和端电压 U 之间相角差。
- 功角 d 对于研究同步电机的功率变化和运行的稳定性有重要意义。
- 功角 d 的空间含义

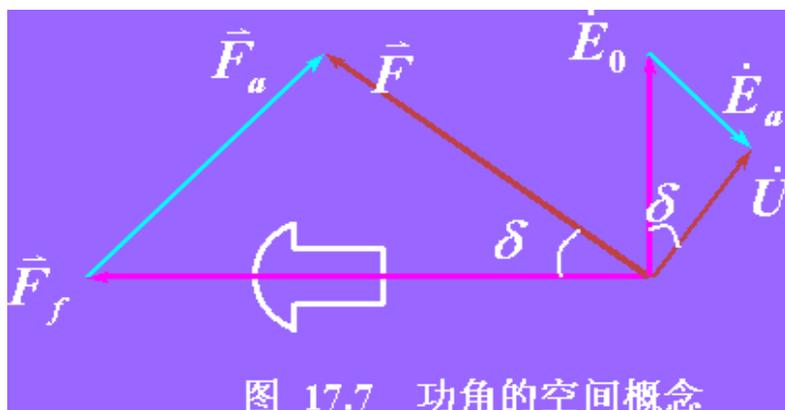


图 17.7 功角的空间概念

- 忽略定子漏磁电势，认为 $U \approx E_0 + E_a$ ， E_0 对应于转子磁势 F_f ， E_a 对应于电枢磁势 F_a ，可近似认为端电压 U 由合成磁势 $F = F_f + E_a$ 所感应。 F_f 和 E_a 之间的空间相角差即为 E_0 和 U 之间的时间相角差 d 。
- 1. 从相量图上看，功角 d 在时间上表示励磁电势 E_0 和端电压 U 之间的相位差，在空间上表现为合成磁场 F 轴线与转子磁场 F_f 轴线之间的夹角。
- 2. 在发电机内部，转子磁极轴线总是超前合成磁场轴线；磁力线是斜着通过空气隙，磁拉力的结果是在转子上产生了制动转矩。
- 3. 发电机并网运行后，定子合成磁场的转速永远不会改变，永远是以同步速旋转的。如何增加功率，就是增大原动机的动力因素。
 - 4. 同步发电机稳定运行范围分析情况..... d 的范围...

有功功率的同时适当调节发电机的无功功率。

17-3 并网运行时无功功率的调节

一、无功功率的调节

- 负载类型，多数负载除了消耗有功功率外，还要消耗电感性无功功率，如异步电机/变压器/电抗器等。电网除了供应有功功率外，还要供应大量滞后性的无功功率。
- 电网所供给的全部无功功率一般由并网的所有发电机分担。
- 本节将讨论发电机所承担的无功功率的调节方法。
- 分析过程中，认为发电机的电压和频率将维持常数。
- 如果保持原动机的拖动转矩不变(即不调节原动机的汽门、油门或水门)，那么发电机输出的有功功率亦将保持不变。

$$P_2 = mUI_a \cos j = mUE_0 \sin d / X_s = \text{常数}$$

$$I_a \cos j = \text{常数}$$

$$E_0 \sin d = \text{常数}$$

- 在有功功率不变时，调节发电机的励磁电流，则空载电势也随之变化。

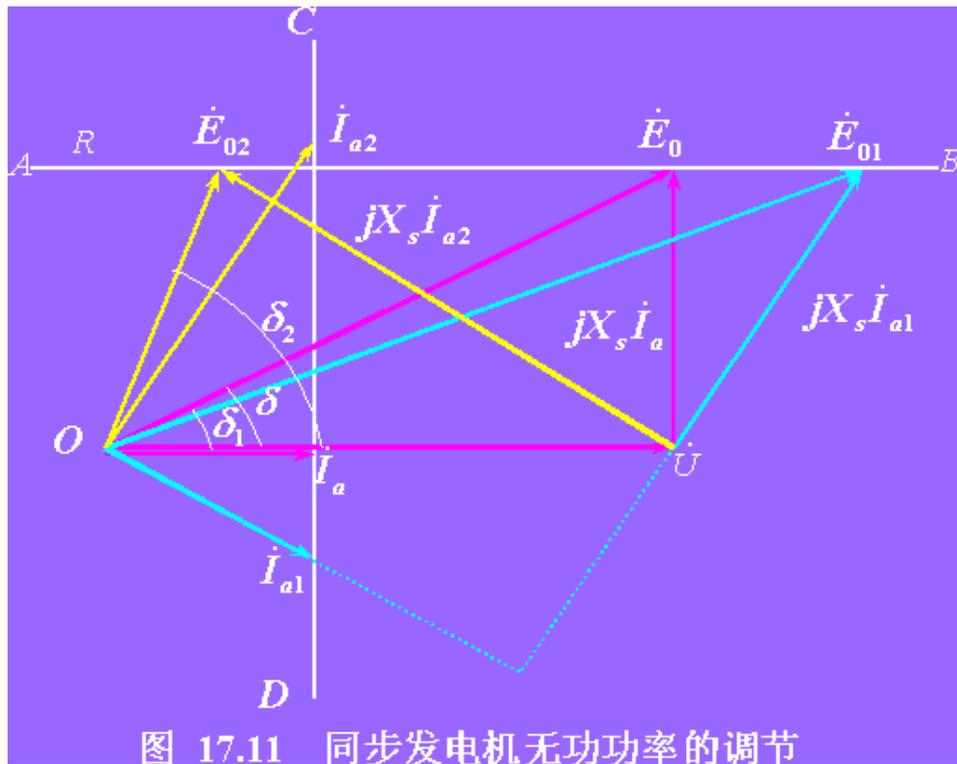
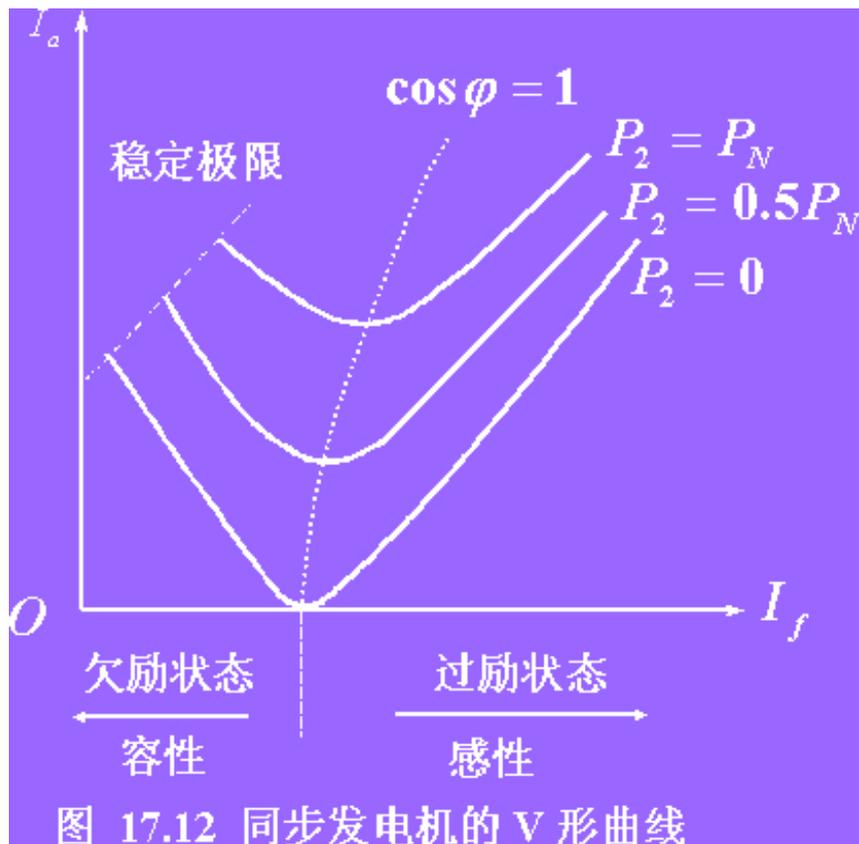


图 17.11 同步发电机无功功率的调节

- 隐极发电机的电势相量图中， I_a 和 E_0 的矢端必须落在直线 AB 和 CD 上。
- ①如果在某一励磁电流 I_{f0} 时， I_a 正好与 U 平行，此时无功功率为 0，发电机输出的全部是有功功率，我们说发电机处于正常励磁状态。
- ②如果增加励磁电流到 I_{f1} ，则 E_0 的矢端沿直线 AB 右移到 E_{01} ， I_a 的矢端将沿直线 CD 下移至 I_{a1} ， I_{a1} 滞后于 U ，我们说发电机处于过励状态，输出功率中除了有功功率外，还有滞后性的无功功率；
- ③如将励磁电流减少到 I_{f2} ，则 E_0 的矢端沿 BA 左移到 E_{02} ， I_a 的矢端将沿 DC 上移到 I_{a2} ， I_{a2} 超前于 U ，我们说发电机处于欠励状态，发电机输出功率中除了有功功率外，还有超前性的无功功率。

二、V 形曲线

- 通过调节励磁电流可以调节同步发电机无功功率。
 - 励磁电流变化时，发电机的电枢电流也会发生相应的变化。
- 在有功功率不变时，将励磁电流 I_f 从欠励调节到过励， $I_a=f(I_f)$ 的曲线是一个 V 形。



- V 形曲线是一簇曲线，每条曲线对应一定的有功功率。V 形曲线上都有一个最低点，对应 $\cos\varphi=0$ 的情况。
- 将所有的最低点连接起来，将得到与 $\cos\varphi=0$ 对应的曲线，该线左边为欠励状态，功率因数超前，右边为过励状态，功率因数滞后。
- V 形曲线可以利用电势相量图及发电机参数大小来计算求得，亦可直接通过负载试验求得。

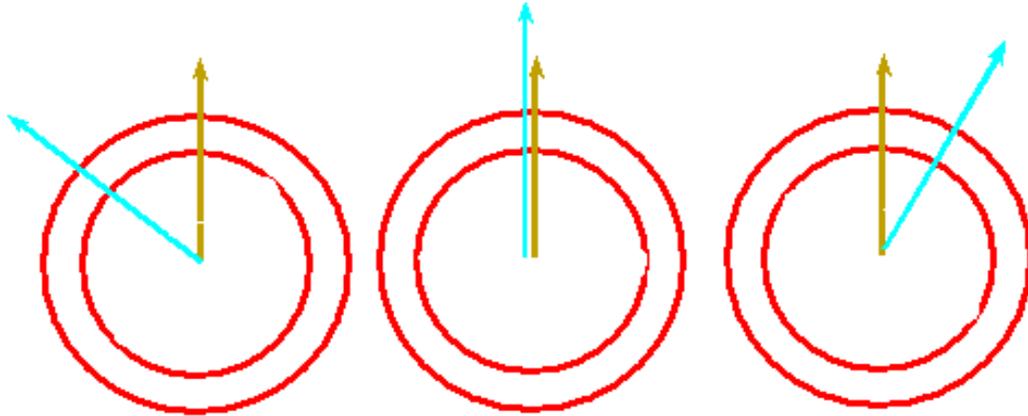
第 18 章 同步电动机

本章概述：

- 作为电动机运行是同步电机又一种重要的运行方式。
- 同步电机转速恒定、功率因数可调。在需要改变功率因数和不需要调速的场合，例如大型空气压缩机、粉碎机、离心泵等常常优先采用同步电动机。

18-1 同步电动机工作原理

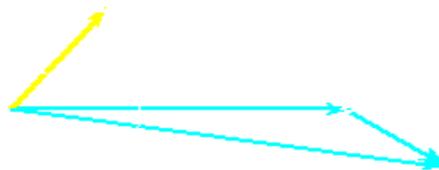
- 先从一台并联在无穷大电网上的同步发电机着手分析。同步电机的气隙中同时存在着对应于电网电压 U 的合成磁势 F 和对应于励磁电势 E_0 的转子磁势 F_r ， F 的转速由电网频率决定，是固定不变的。



- 在发电运行状态时， F_r 超前于 F 一个 d 角，或者说， F_r 拖着 F 一起旋转，二者之间的电磁力矩对转子来说是阻力矩。转子在原动机的带动下克服阻力矩，将转子边的机械能转化为定子边的电能。
- 如果减少原动机输出给转子的机械功率，则 d 角逐渐缩小，在不计空载损耗时，当 d 缩小到 0 时，电机处于理想空载状态，既不向电网提供有功功率，也不吸收电网有功功率。
- 如果把原动机撤掉并在转子上加上机械负载，则 F_r 将落后于 F ，或者说， F 拖着 F_r 一起旋转，二者之间的电磁力矩对转子来说是动力矩，带动转子上的机械负载作机械功，从而将电网提供的电能转化为转子边的机械能。此时同步电机运行于电动机状态。
- 由以上分析可知，同步电机可以从发电机运行方式过渡为电动机运行方式。产生这一过程的本质在于转子旋转磁势 F_r （由原动机拖动）和合成旋转磁势 F （由交流电网决定）之间主从关系的改变。当 F_r 超前于 F 时，同步电机处于发电状态，功角 $d > 0$ ，有功功率从电机流向电网；当 F 超前于 F_r 时，同步电机处于电动状态，功角 $d < 0$ ，有功功率从电网流向电机。可以用与分析发电机类似的方法分析同步电动机，以下对同步电动机运行作简单介绍。

18-2 同步电动机电势方程式和相量图

- 研究同步电动机的方法和研究同步发电机的方法相似。可以采用发电机惯例或者电动机惯例，我们以电动机惯例进行分析。



- 根据等效电路，写出其电势方程式：

$$U = E_0 + j X_s I_a$$

- 对于凸极同步电动机，用电动机观点直接写出其电压平衡方程式：

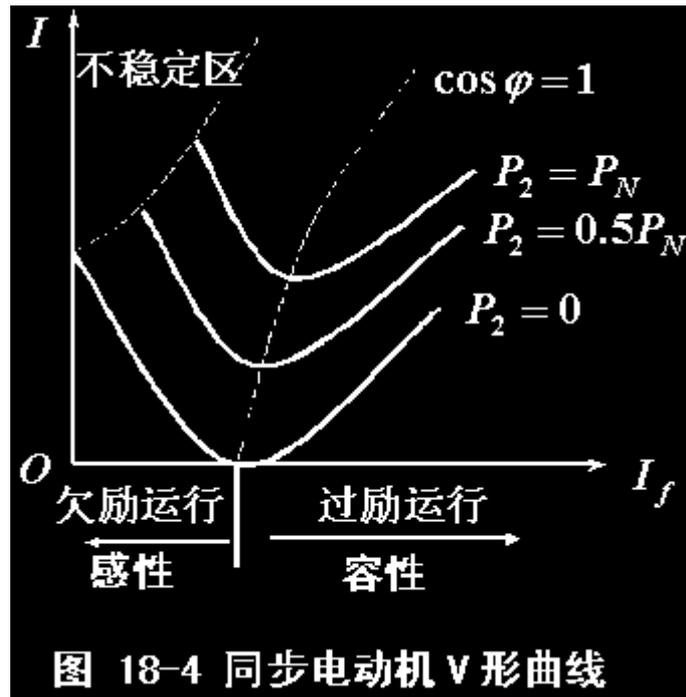
$$U = E_0 + j X_d I_d + j X_q I_q$$

- 采用与凸极发电机类似的方法和步骤可以作出凸极式同步电动机的相量图，具体过程读者自行分析。



18-3 同步电动机的优缺点

- 接在电网上的负载绝大部分都是感性负载(如异步电机、电抗器等)，都需要从电网吸收大量滞后性电流，使得电网及其输电线路可供的有功功率减小、损耗增加、压降增大。
- 发电厂要求用户的功率因数限制在一定的数值以内，以使电网能得到合理、经济地利用。那么用户怎样提高功率因数呢？
- 方法有二：(1)是在线路上并联电容器来补偿电网的落后性功率因数；(2)是用同步电动机代替部分异步电动机，因为同步电动机能吸收超前性电流，可以改善电网的功率因数。
- 与发电机类似，同步电动机的功率因数可以通过改变励磁电流的大小来调节。如果增大励磁电流使电动机处于过励状态，则励磁磁势 F_f 增大，而合成磁势 F 的大小是不变的。
- 按照磁势平衡原理，电网将输出给电动机一超前电流 I_a ，该电流在电动机内部将产生去磁性的电枢反应，使得磁势得到平衡。电网输出给电动机超前电流相当于电网从电动机处吸取了滞后电流，正好满足了附近电感性负载的需要，使得电网的功率因数得到补偿。
- 如果减小励磁电流使电动机处于欠励状态，则励磁磁势 F_f 也减小，电网必须输出给电动机一滞后电流来产生增磁电枢反应，以保持合成磁势 F 不变。这种情况和异步电机的情况类似，所以同步电动机一般不采用欠励运行。
- 如果保持机械负载不变（相当于有功功率不变），调节励磁电流 I_f ，对应的电枢电流 I_a 随之而变，和发电机一样可画出同步电动机的 V 形曲线。



- 但是同步电动机亦有一些缺点，如起动性能较差，结构上较异步电动机复杂，还要有直流电源来励磁，价格比较贵，维护又较为复杂，所以一般在小容量设备中还是采用异步电动机。在中大容量的设备中，尤其是在低速、恒速的拖动设备中，应优先考虑选用同步电动机，如拖动恒速轧钢机、电动发电机组、压缩机、离心泵、球磨机、粉碎机、通风机等。
- 利用同步电动机能够改变电网功率因数这一优点，亦有制造专门用作改变电网功率因数的电动机，不带任何机械负载，这种不带机械负载的同步电动机称之为同步补偿机或同步调相机。同步调相机是在过励情况下空载运行的同步电动机。

18-4 同步电动机的功角特性

- 同步电动机以凸极转子结构比较多，因此以凸极电机的功角特性为例来研究。
- 同步电动机的功角特性公式和发电机的一样都可以从相量图中导出来。电动机的功角 δ 是 U 超前 E_0 的角度，如将发电机功角特性中的 δ 用 $-\delta$ 来替代，这样电磁功率就变成了负值，电动机状态下是电网向电动机提供有功功率，所以写电动机公式时，将负号去掉，于是功角特性就和发电机的功角特性和矩角特性具有相同的形式：

$$\begin{aligned}
 P_M &= mU \frac{U \sin \delta}{X_q} \cos \delta + mU \frac{E_0 - U \cos \delta}{X_d} \sin \delta \\
 &= m \frac{UE_0}{X_d} \sin \delta + m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \\
 &= P'_M + P''_M
 \end{aligned}$$

$$T_M = \frac{P_M}{\Omega} = \frac{P'_M + P''_M}{\Omega} = T'_M + T''_M$$

- 同步电动机的电磁转矩包括基本电磁转矩和附加电磁转矩两部分，当励磁电流为零时，即 $E_0=0$ 时，仍具有附加电磁转矩。利用此原理，可以制成所谓的磁阻同步电动机。这种电机的转子上没有励磁绕组，是凸极式的，靠它的直轴与交轴磁阻不相等而产生电磁转矩。它的容量一般很小，常常做成 10 千瓦以下的电动机，能在变频、变压的电源下运行，而且速度比较均匀，常在转速需要均匀的情况下被采用，如精密机床工业、人造纤维工业、电子计算机等方面。

18-5 同步电动机的异步启动

- 当定子绕组接到电源后，按照同步电机的原理同步电动机是不能产生启动转矩的。目前工矿企业中看到的同步电动机都能够启动，这是利用异步电动机的原理来产生启动转矩，使得电机转动起来的。
- 下面我们分析同步电动机没有启动转矩的原因及启动问题的解决方法。
- 假设在合闸瞬间，转子(已经加励磁)处于图 18.5a 所示的位置，此时，电磁转矩 T 倾向于使转子逆时针转动；在另一个瞬间(图 18.5b 所示)，定子磁场已转过 180 度，而转子由于机械惯性尚未启动，电磁转矩 T 倾向于使转子顺时针转动。由于定子磁场以同步速旋转，作用于转子上的力矩随时间以 $f = 50\text{Hz}$ 作交变，那么转子上受到的平均转矩为 0。因此同步电动机是不能自行起动的。概括一下同步电动机没有启动转矩的原因是：(1) 定、转子磁场之间相对运动速度很快；(2) 转子本身转动惯量的存在。

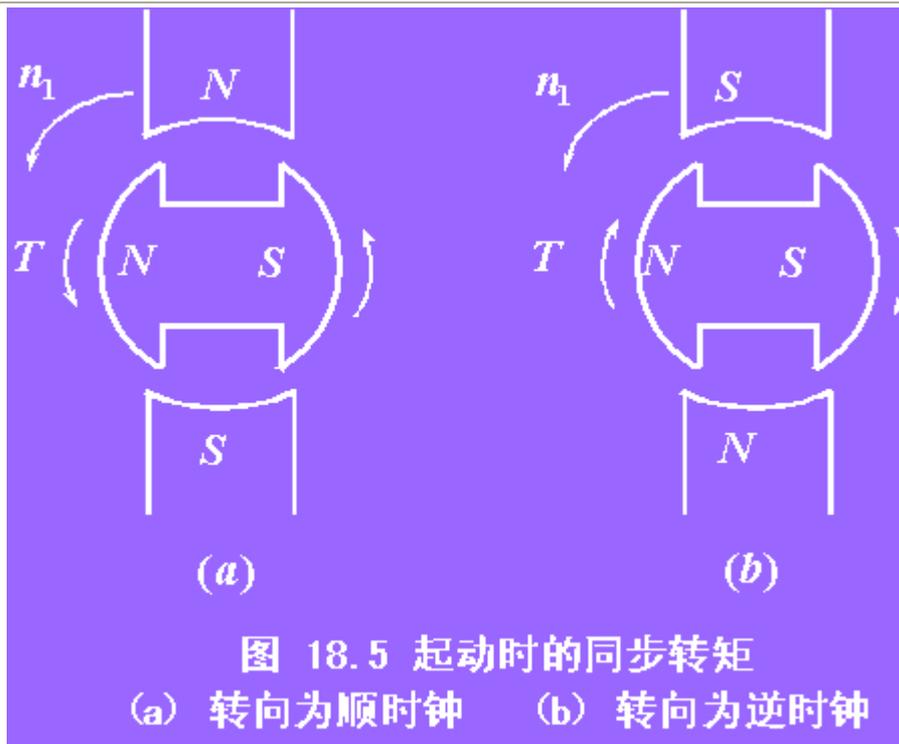


图 18.5 起动时的同步转矩
(a) 转向为顺时针 (b) 转向为逆时针

- 同步电动机的启动方法，目前几乎都采用异步启动法。要实现同步电动机的异步启动，就需要在转子磁极表面装有类似异步电动机鼠笼转子的短路绕组，称之为启动绕组。它的结构型式和同步发电机的阻尼绕组一样。为了得到较大的启动转矩，启动绕组常用电阻较大的黄铜条做成。启动时交流电压施于定子绕组后，在空气隙中产生旋转磁场，同异步电动机的工作原理一样，这个旋转磁场将在转子启动绕组中感应电流，此电流和旋转磁场相互作用产生异步转矩，这样同步电动机就按照异步电动机的原理转动起来。在转速上升到接近同步转速时，再给励磁绕组中通入直流励磁电流，使得转子产生磁极磁场，此时它和气隙磁场的转速已经十分接近，依靠这两个磁场间的相互吸引力产生转矩（称为同步转矩），将转子磁极拉入同步，这个过程称为拉入同步过程。
- 拉入同步是一个很复杂的过程，如果条件不合适，不一定能够成功。一般说，在加入直流励磁使得转子拉入同步的瞬间，同步电动机的转差愈小、惯量愈小，负载愈轻，拉入同步就愈容易。
- 综上，同步电动机的启动过程分为两个阶段：①首先是异步启动，使得转子转速接近于同步速；②加入直流励磁，使得转子拉入同步。由于磁阻转矩的作用，凸极式同步电动机较容易拉入同步。甚至在未加励磁电流的情况下，有时转子也能拉入同步。因此为了改善启动性能，同步电动机大多采用凸极转子结构。
- 同步电动机异步启动时，励磁绕组不能开路，因为励磁绕组的匝数较多，旋转磁场切割励磁绕组而在其中感应一危险的高电压，容易使得励磁绕组绝缘击穿或引起人身事故。在启动时，励磁绕组必须短路。为了避免在励磁绕组中产生过大的短路电流，励磁绕组短路时必须串入比本身电阻大（5-10）倍的外加电阻。

18-6 磁阻同步电动机

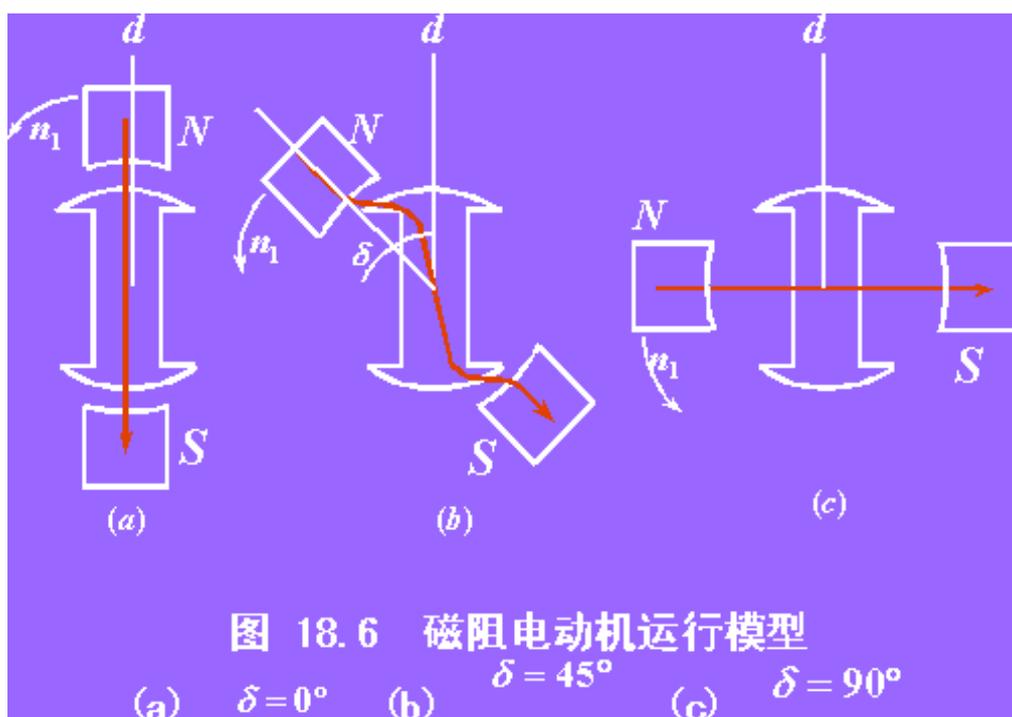
- 磁阻电动机是一种转子上没有装设励磁绕组的凸极同步电动机，它依靠直轴和交轴两条磁路上磁阻不等而产生电磁转矩，所以称为磁阻同步电动机。

- 对凸极转子，且当 $X_d \neq X_q$ 时，即使转子上不装设励磁绕组，也会存在电磁功率和对应的电磁转矩，其大小为

$$P_M = m \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

$$T_M = m \frac{U^2}{2\Omega} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

- 由上式可见，电磁转矩与功角 δ 的关系是按 $(\sin 2\delta)$ 规律变化的。当 $\delta = 90$ 度时，转矩等于零； $\delta = 45$ 度时，转矩最大； $\delta = 45$ 度时，转矩又会变为零，这种情况可由图 18.6 来说明。



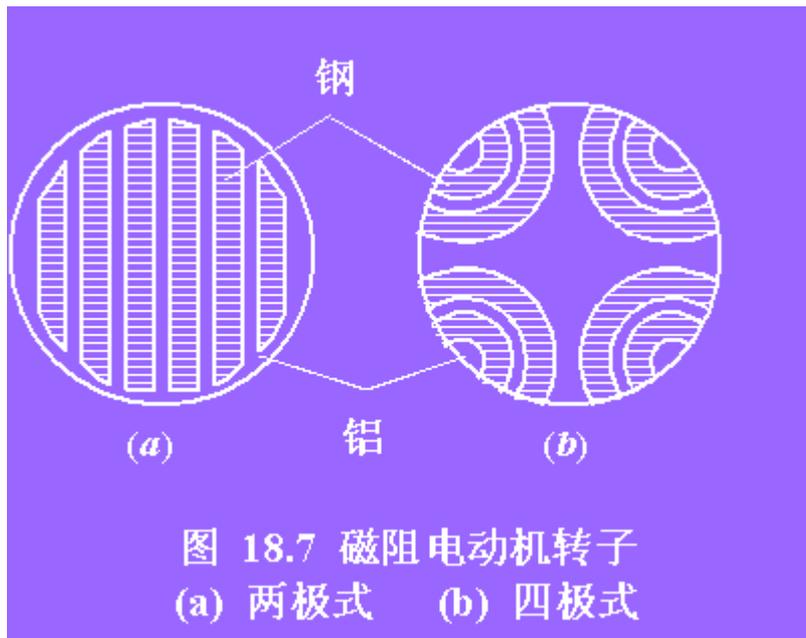
- 图 18.6a 是磁阻电动机的空载情况，不计机械损耗时，电机产生的电磁转矩 $T_M \approx 0$ ，故定子磁场轴线与磁极轴线重合（即 $\delta = 0$ ），磁力线不发生扭弯。
- 当电动机加上负载时，转子直轴将落后于定子旋转磁场轴线 δ 角，如图 18.6b 所示（图中 $\delta = 45$ ），由图可见，这个磁场被扭歪了。由于磁通具有使其所经路径的磁阻为最小的性质，从而力图使转子直轴方向与定子磁场轴线取得一致，因此产生与定子旋转磁场同转向的磁阻转矩 T_M ，和负载转矩相平衡。
- 当 δ 角增大到 90 时，由图 18.6c 可见，气隙磁场又对称分布，其合成转矩又变成零。

- 磁阻同步电动机只存在电枢反应磁场，故又称为反应式同步电动机。
- 电磁功率和电磁转矩的最大值为：

$$P_{M \max} = \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) = \frac{mU^2}{2X_d} \left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right)$$

$$T_{M \max} = \frac{mU^2}{2\Omega} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) = \frac{mU^2}{2\Omega X_d} \left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right)$$

- 可以看出，电机 X_d 、 X_q 的数值愈大，则 $T_{M \max}$ 的数值也愈大。为了增大 X_d 、 X_q ，转子常采用如图 18.7 所示的钢片和非磁性材料（如铝、铜）相间镶嵌的结构，其中铝或铜部分可起到笼型绕组的作用使电机起动。在电机正常运行时，由于交轴磁路多次跨过非磁性区域，遇到的磁阻很大，对应的 X_q 很小。



- 磁阻电动机一般靠实心转子的感应涡流并借助于铝或铜所起笼型绕组的作用起动。当转子接近同步速时，借助凸极效应产生的磁阻转矩，转子会自动拉入同步。磁阻电动机转子上既无励磁绕组也没有集电环而使得结构简单，工作可靠，在控制系统、自动记录装置、电钟等需要保持恒速的场合获得了广泛的应用。

18-7 开关磁阻电动机

- 开关磁阻电动机（SR 电动机）系双凸极可变磁阻电动机。其定、转子的凸极均由普通的硅

钢片叠压而成。转子既非永磁体也无励磁绕组，定子上装设集中绕组，径向相对的两个绕组串联构成一对磁极，称为“一相”。图 18.8 给出了三相（6/4 极）SR 电动机的结构原理图。为简单计，图中只画出了 A 相及其供电线路。

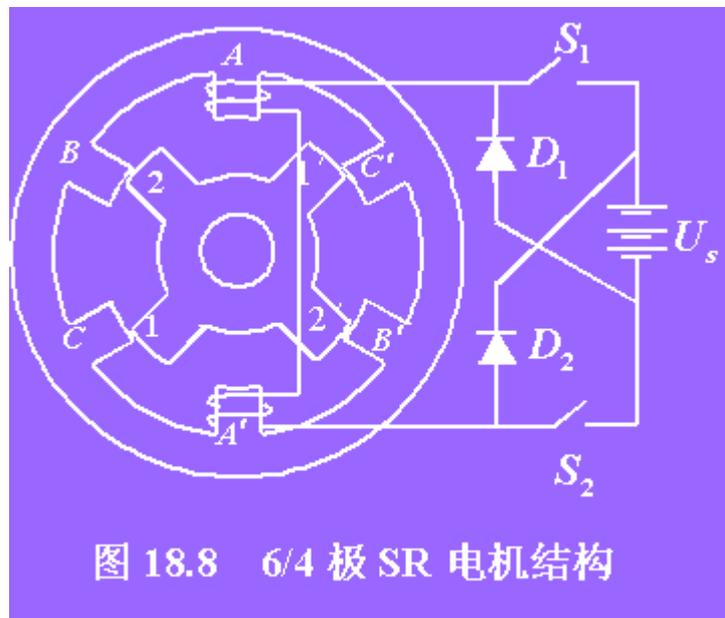


图 18.8 6/4 极 SR 电机结构

- SR 电动机的运行原理遵循“磁阻最小原理”，即磁通总要沿着磁阻最小的路径闭合，而具有一定形状的铁心在移动到最小磁阻位置时，必须使自己的主轴线与磁极的轴线重合。
- 当定子 C-C' 相励磁时，所产生的磁力使转子旋转到转子极轴线 1-1' 与定子极轴线 C-C' 重合的位置，并使 C-C' 相励磁绕组的电感最大。
- 若以图中定、转子所处的相对位置为起始位置，则依次给 C-C' → A-A' → B-B' 相绕组通电，转子即会逆着励磁顺序以顺时针方向连续旋转；反之若依次给 B-B' → A-A' → C-C' 相通电，则电动机会沿逆时针方向旋转。可见 SR 电动机的转向与相绕组的电流方向无关，而仅取决于相绕组通电的顺序。
- 另外，当开关器件 S_1/S_2 导通时，A-A' 相绕组从直流电源 U_s 吸收电能，而当 S_1/S_2 关断时，绕组电流经续流二极管 D_1/D_2 继续流通，并回馈给电源 U_s 。因此 SR 电动机具有再生作用，系统效率高。
- SR 电动机结构简单、坚固，工作可靠，效率高。特别是由 SR 电动机构成的开关磁阻电动机调速系统 (SRD) 运行性能和经济指标比普通的交流调速系统，甚至比晶闸管一直流电动机系统都好，具有很大的应用潜力。

本章小结

- 作为电动机运行是同步电机又一种重要的运行方式。同步电机接于频率一定的电网上运行，其转速恒定，不会随负载变动而变动；另外，同步电动机的功率因数可以调节，在需要改变功率因数和不需要调速的场合，常优先采用同步电动机。
- 通过调节励磁电流可以方便地改变同步电动机的无功功率。过励时，同步电动机从电网吸取超前电流；欠励则吸取滞后电流。能够改善电网的功率因数是同步电动机的最大优势。
- 从同步电动机的原理来看，它不能自行启动；在同步电动机的转子上装设启动绕组，借助

异步电动机的原理来完成其启动过程。

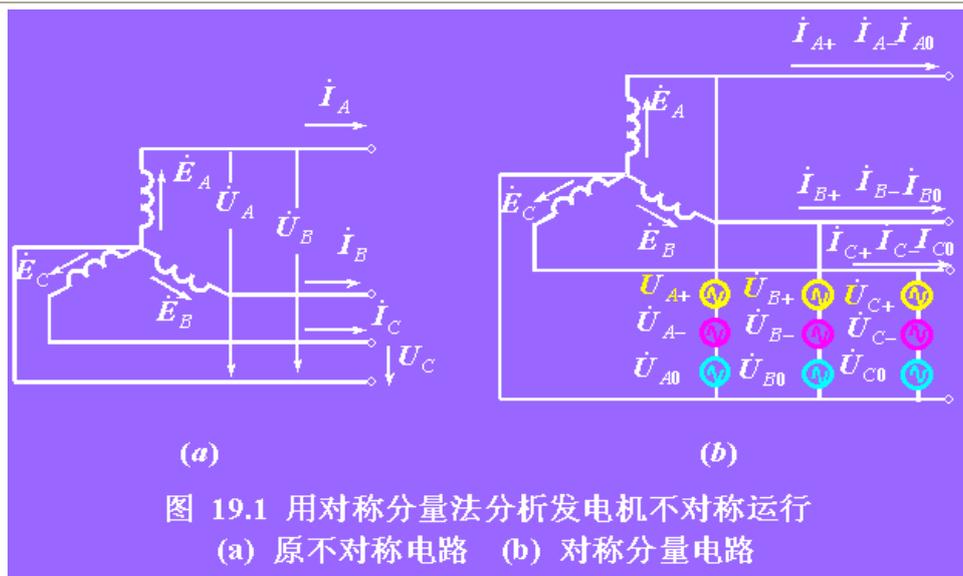
第 19 章 同步发电机不对称运行和动态问题

本章概述:

- 通常的三相电力负载都是对称负载,即使有少许的不对称一般仍可以按照对称运行来分析。
- 随着工业的发展,出现了大容量的单相负载,如冶金用的单相电炉,单相电气铁道干线;它们作为三相电网的负载就会使同步发电机处于不对称运行状态。此外输电线中出现一相断线等不对称故障时,也会使同步电机处于不对称运行状态。
- 稳态对称运行时,电机的输入功率总与输出功率相平衡,电机端电压 U 和励磁电势 E_0 之间有着固定的相角差 δ 。但实际工作着的电机常常会由于某些原因而使运行状态受到干扰或改变。从一个稳定运行状态突变至另一稳定运行状态所经历的过程成为瞬变过程。研究同步发电机不对称运行和瞬变过程具有重大的实际意义。

19-1 不对称运行的分析方法

- 当负载不对称时,发电机的三相端电压及电流都将不对称。由于流过电枢各相的电流有效值各不相同,它们所产生的合成电枢磁势不再是一个幅值不变的圆形旋转磁势,其电枢反应情况较对称运行时复杂得多,所以不能直接用分析对称运行的简单方法来分析不对称运行的情况。
- 分析不对称运行的最简单方法是对称分量法(有关对称分量法的原理,请参看变压器篇的有关内容),即把一组不对称的三相电流(或电压)分解成三组对称的电流(或电压)分量:即正序分量、负序分量和零序分量。各个对称分量可视为相互独立,分别研究它们独立作用的效果,然后叠加起来得到最后结果。用这个方法时假设电路是线性的,忽略了磁路饱和现象。
- 励磁电势 E_A 、 E_B 、 E_C 只与励磁磁势的转向有关,不受负载的影响,所以只有正序分量。
- 在具体计算不对称运行时,常把实际负载端的不对称三相电压和电流分解成三组对称的分量,每组对称分量对各相绕组均对称,故可以按一相的情况来分析。



- 按叠加原理, 每相都可以列出三个相序的电势平衡方程及画出它们的等值电路。应该注意到, 励磁电势只在正序的电势平衡方程中出现。
- 各相序电流流过电枢绕组时的电枢反应情况, 反映在等值电路和方程式中是各相序电流遇到不同的阻抗。
- 设各相序电流遇到的阻抗分别为: 正序阻抗为 Z_+ , 负序阻抗为 Z_- , 零序阻抗为 Z_0 。以 A 相为例, 各相序的电势平衡方程式为:

$$\begin{aligned} E_A &= U_{A+} + Z_+ I_{A+} \\ 0 &= U_{A-} + Z_- I_{A-} \\ 0 &= U_{A0} + Z_0 I_{A0} \end{aligned}$$

- 以上方程适合于任何不对称负载或短路情况。根据这三个方程式, 对于给定参数的电机, 若知道不对称的电流情况就能解出不对称的电压。反之亦然。
- 下面对各相序电流遇到的阻抗加以说明

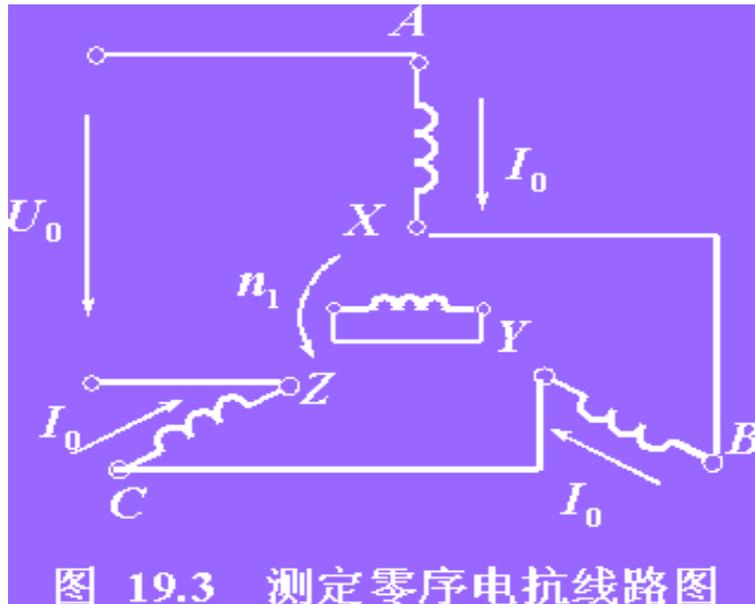
(1) 正序电抗 X_+

- 同步发电机定子绕组的相序与 E_0 一致时, 定为正序电流 I_+ 流过定子绕组即引起正序电抗 $X_+ = X_s$ 。
- 对于隐极同步电机, 正序电抗 $X_+ = X_s$; 对于凸极同步电机, 正序电抗 $X_+ = X_d$ 。

(2) 负序电抗 X_-

负序电流 I_- 流过定子电枢绕组所对应的电抗就是负序电抗 X_- , $I_- \rightarrow X_-$

- 负序电流流过定子电枢绕组时产生反转的基波旋转磁场—这一磁场以两倍同步速度切割转子绕组(包括励磁绕组和阻尼绕组), 并在其中感应出两倍频率的电势和电流。对于负序磁场而言, 转子绕组的作用与一个短路绕组的作用相当。

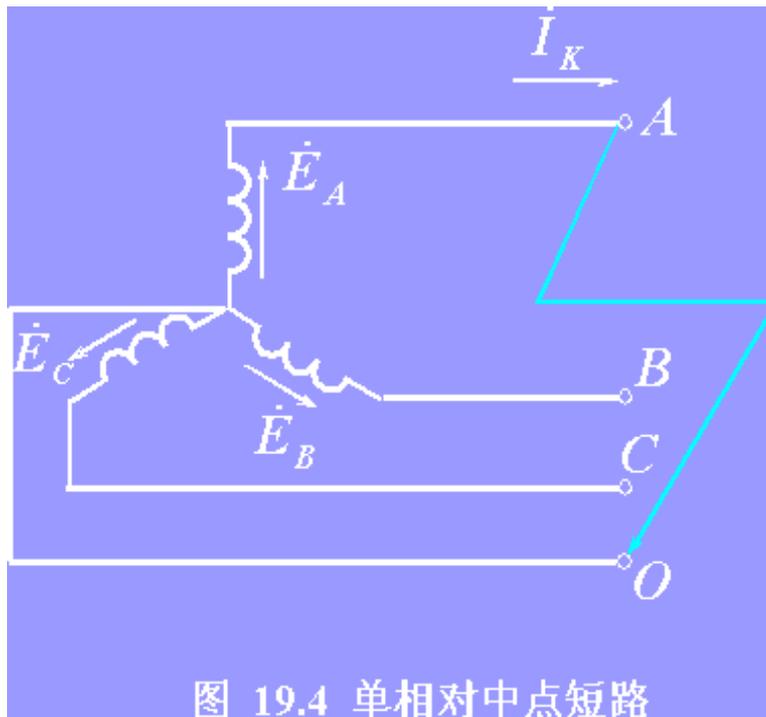


- 把三相绕组首尾串联起来接到单相电源上, 绕组中通过的便是零序电流。测定零序电抗时, 可采用如图 19.3 所示的电路。在端点上外施适当大小的、具有额定频率的电压, 使得流入的零序电流数值等于额定电流。电机转子由原动机带动以同步速旋转, 转子励磁绕组应被短接, 如果忽略电枢电阻, 则

$$X_0 = U_0 / (3I_0)$$

19-2 发电机不对称短路分析

- 用对称分量法分析同步发电机不对称短路是很方便的。不对称短路是不对称运行的特殊情况。电力系统遇到的故障短路通常是不对称短路, 例如线对线短路或线对中性点短路。
- 故障短路将会出现很大的冲击电流, 不过冲击电流的持续时间是很短暂的, 这一过程属于瞬变过程。瞬变过程完毕后就进入稳态短路。本节只讨论稳态不对称短路问题。
- 同步电机不对称短路的情况有多种。本节以两个典型的例子说明分析该类问题的方法。在下面所举的例子中假设短路发生在发电机机端, 而且短路前发电机为空载运行。



一、单线对中性点短路

- 设 A 相对中性点短路。其端点方程式为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_K \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_C = 0 \\ \dot{U}_A &= 0 \end{aligned} \right\}$$

- 对 A 相实施对称分量法得：

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{A+} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{3}\dot{I}_K \\ \dot{I}_{A-} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{3}\dot{I}_K \\ \dot{I}_{A0} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = \frac{1}{3}\dot{I}_K \end{aligned} \right\}$$

- 根据各相的电流, 求出各相序的电压为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{A+} &= \dot{E}_0 - jX_+\dot{I}_{A+} = \dot{E}_0 - \frac{1}{3}jX_+\dot{I}_K \\ \dot{U}_{A-} &= 0 - jX_-\dot{I}_{A-} = -\frac{1}{3}jX_-\dot{I}_K \\ \dot{U}_{A0} &= 0 - jX_0\dot{I}_{A0} = -\frac{1}{3}jX_0\dot{I}_K \end{aligned} \right\}$$

- 由于 A 相对中点短路, 故有

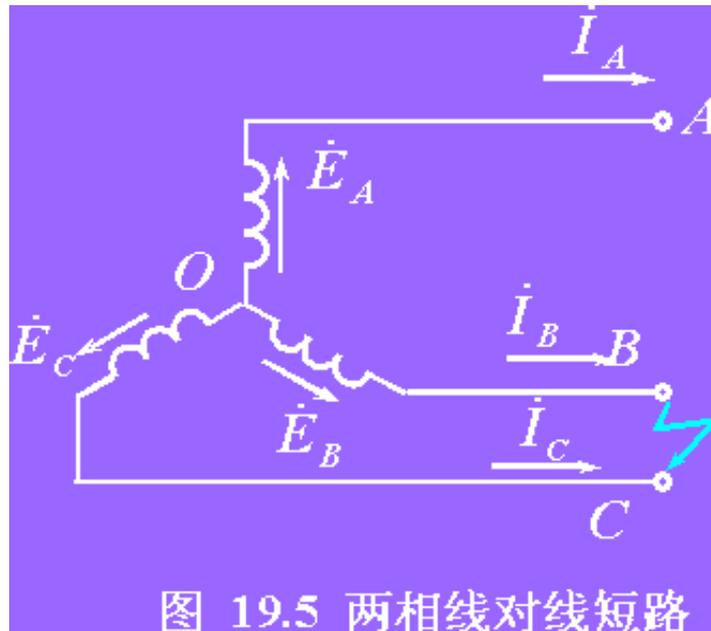
$$\dot{U}_{A+} + \dot{U}_{A-} + \dot{U}_{A0} = \dot{E}_0 - \frac{1}{3}j(X_+ + X_- + X_0)\dot{I}_K$$

即

$$\dot{I}_K = -j \frac{3\dot{E}_0}{X_+ + X_- + X_0}$$

- 由于负序电抗和零序电抗比正序电抗小得多, 故单相短路电流比三相稳态短路电流大, 其比值接近 3。

二、两相线对线短路



- 如图 19.5 所示, 设 A、B 两相短路, 其端点方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= 0 \\ \dot{I}_B &= -\dot{I}_C \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_C \end{aligned} \right\}$$

- 对 A 相实施对称分量法得

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{A+} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{3}(a\dot{I}_B - a^2\dot{I}_B) = \frac{\sqrt{3}}{3}j\dot{I}_B \\ \dot{I}_{A-} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{3}(a^2\dot{I}_B - a\dot{I}_B) = -\frac{\sqrt{3}}{3}j\dot{I}_B \\ \dot{I}_{A0} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = 0 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{A1} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C) = \frac{1}{3}(\dot{U}_A - \dot{U}_B) = \dot{E}_0 - jX_+ \dot{I}_{A+} = \dot{E}_0 + \frac{\sqrt{3}}{3} X_+ \dot{I}_B \\ \dot{U}_{A-} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C) = \frac{1}{3}(\dot{U}_A - \dot{U}_B) = 0 - jX_- \dot{I}_{A-} = -\frac{\sqrt{3}}{3} X_- \dot{I}_B \\ \dot{U}_{A0} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = \frac{1}{3}(\dot{U}_A - \dot{U}_B) = 0 - jX_0 I_{A0} = 0 \end{aligned} \right\}$$

- 由于 $U_{A+}=U_{A-}$ 故

$$\dot{E}_0 + \frac{\sqrt{3}}{3} X_+ \dot{I}_B = -\frac{\sqrt{3}}{3} X_- \dot{I}_B \Rightarrow \dot{I}_B = -\frac{\sqrt{3}\dot{E}_0}{X_+ + X_-}$$

- 两相线对线短路电流大约为三相短路电流的 1.5 倍。

19-3 三相突然短路的分析

- 电力系统发生突然短路故障时, 虽然从突然短路到进入稳态短路的过程所持续的时间很短, 但突然短路时产生的冲击电流可高达额定电流的 10~20 倍, 会在电机内产生极大的电磁力, 这种电磁力可能会扯断电机绕组的端部或将转轴扭弯, 对电机造成不良后果。

一、 分析的基本方法

- 超导回路磁链不变原则
- 由电路定律可知, 对于任何一个链着磁通的自行闭合的线圈, 都可以写出下面的方程式: $Ri + dy / dt = 0$
- y 为闭合线圈的磁链, 包括自链和互链。如果略去电阻 R , 则上式可得出 $y = \text{常数}$ 。可见, 在没有电阻的闭合回路中(又称为超导回路)磁链将保持不变。如果外界磁通进入线圈, 则线圈中必然立即产生一个电流, 这一电流产生的磁通与外加磁通的大小相同, 方向相反, 以此保持线圈匝链的总磁通仍然不变。这就是超导闭合回路磁链不变原则。
- 在实际的闭合回路中, 由于电阻的影响, 磁链会发生变化。但是在最初瞬间仍然遵循超导回路磁链不变原则, 因此可以认为磁链是不会改变的, 分析突然短路的基本方法是先由磁链不变原则求出突然短路瞬间的电流, 然后把电阻的作用考虑进去。在绕组电阻的作用下, 瞬变时出现的电流最终将衰减为稳态短路电流。

二、 三相突然短路的物理过程

- 应用超导回路磁链不变的原理, 我们来分析同步发电机在发生三相突然短路时的物理现象。假定突然短路之前, 电机处于空载状态, 气隙磁场只由励磁磁势 F_f 产生, F_f 随转子以同步速旋转, A 相电枢绕组匝链的磁链 y_{A0} 随 F_f 与 A 相绕组轴线的夹角 α 作余弦变化。设 $\alpha = \alpha_0$ 的瞬间定子绕组突然短路, 此瞬间, A 相绕组的磁链为:

$$y_{A0} = y_m \cos \alpha_0$$

- y_m 为 F_r 与 A 相轴线重合时 A 相绕组磁链。
另外, 转子继续旋转, 转子磁通与 A 相绕组匝链, 其磁链值为:

$$y_A = y_m \cos(\alpha_0 + \omega t)$$

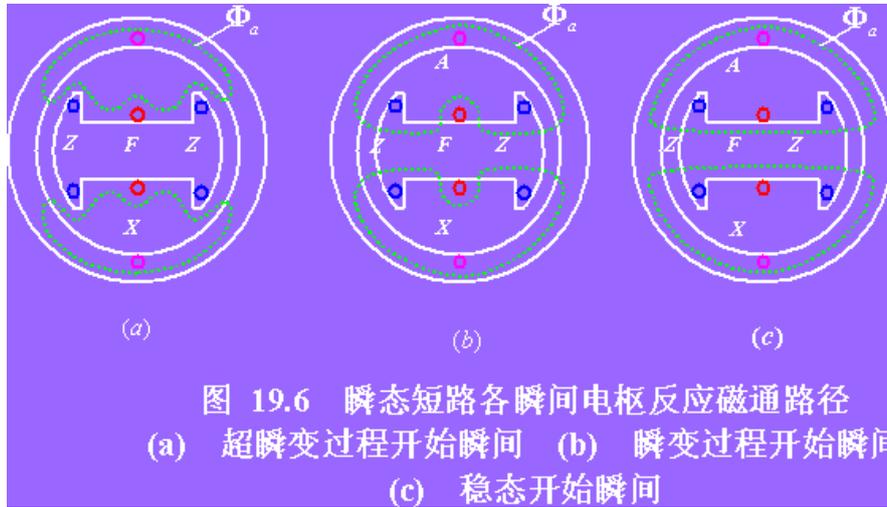


图 19.6 瞬态短路各瞬间电枢反应磁通路径
(a) 超瞬变过程开始瞬间 (b) 瞬变过程开始瞬间
(c) 稳态开始瞬间

- 根据磁链不变原则, 突然短路后, 电枢绕组对此将立即作出如下反应:
 - ①电枢绕组各相都产生一个非周期性的直流电流, 共同产生不转的稳定磁势, 使各相绕组分别产生一不变的磁链以维持其在短路瞬间的磁链(包括漏磁链)。如 A 相出现 y_{A0} , B 相和 C 相分别出现 y_{B0} 和 y_{C0} 。
 - ②电枢绕组产生一组对称三相周期性交变电流, 并在气隙中产生一个合成旋转磁势 F_a , 它始终和 F_r 大小相等, 方向相反(作用在直轴上), 以抵消 F_r 对电枢绕组各相的磁链。
- 转子上的励磁绕组 F 和阻尼绕组 Z 也是闭合绕组, 同样遵循磁链不变原则。突然短路后, 由于电枢绕组的磁势 F_a 和 F_a 的介入, 转子绕组对此将立即作出反应
 - ①对 F_a 的反应: 由于 F_a 和转子相对静止, 它所产生的电枢反应磁通 F_a 作用在直轴上, F_a 要通过转子磁路, 去匝链转子上的励磁绕组 F 和阻尼绕组 Z, F 和 Z 的反应是: 分别产生非周期性直流电流 I_{F-} 和 I_{Z-} , 这些电流将产生恒定磁通以抵消 F_a , 使得 F_a 只能绕道而行(通过 F 绕组和 Z 绕组的漏磁路闭合), 如图 19.6(a) 所示。这条磁路的磁阻很大, 要产生一定的电枢反应磁通 F_a , 就需要很大的电枢电流, 所以突然短路电流要比稳态短路电流大得多。
 - ②对 F_a 的反应: 虽然 F_a 在空间静止, 但与转子绕组之间有相对运动。它将在励磁绕组 F 和阻尼绕组 Z 中感应出交变电流 I_{F-} 和 I_{Z-} 以抵消 F_a 在转子绕组中产生的磁链。
- 以上结论是基于各绕组中没有电阻而得出的。事实上, 发电机各个绕组中均有电阻存在, 短路电流会逐渐衰减, 最终达到稳态短路。 I_{F-} 和 I_{Z-} 的存在是导致电枢短路电流增大的原因, 所以 I_{F-} 和 I_{Z-} 的衰减直接影响到电枢电流的衰减。由于阻尼绕组的时间常数比励磁绕组小得多, 为了分析方便, 可以认为短路以后, I_{Z-} 首先衰减完毕, I_{F-} 还未来得及衰减, 通常把短路瞬间到 I_{Z-} 衰减完毕这一阶段称为超瞬变过程; 超瞬变过程结束后, I_{F-} 开始衰减, 并逐渐达到稳态, 这一过程称为瞬变过程。
- 超瞬变、瞬变和稳态三个过程开始的瞬间 F_a 经过的路径不同, 分别如图 19.6(a) (b) (c) 所

示。

三、瞬态短路时的电抗

- 从电路的角度来看,短路电流的大小决定于回路的参数,即决定于同步电机的电抗的大小。对于感性回路有

$$X = \omega L = \omega N^2 / R = \omega N^2 L$$

- 式中 N 为绕组串联匝数, R 为磁路的磁阻, L 为磁路的磁导。
- 稳态情况下,电枢电流产生电枢反应磁通 F_a 和电枢漏磁通 F_{as} ,对应的磁路见图 19.6(c),略去铁心部分的磁阻, F_a 对应的就是气隙磁导 L_{ad} , F_{as} 对应的是漏磁导 L_s ,所以稳态短路电流产生的总磁通对应的总磁导为

$$L_d = L_{ad} + L_s$$

- 对应的电抗为

$$X_d = X_{ad} + X_s$$

- 它就是直轴同步电抗。
- 突然短路时(超瞬变瞬间), F_a 对应的磁路见图 19.6(a),它遇到了气隙磁阻、阻尼绕组漏磁阻和励磁绕组漏磁阻,再考虑到电枢绕组的漏磁通 F_{as} 后,电枢磁通的总磁导为

$$\Lambda_d'' = \Lambda_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{ad}} + \frac{1}{\Lambda_{F\sigma}} + \frac{1}{\Lambda_{Z\sigma}}}$$

- 对应的电抗为

$$X_d'' = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{F\sigma}} + \frac{1}{X_{Z\sigma}}}$$

- 称为直轴超瞬态电抗, $X_{Z\sigma}$ 和 $X_{F\sigma}$ 为阻尼绕组和励磁绕组的漏磁电抗。
- 当瞬态短路进入瞬变过程时,阻尼绕组中的电流已衰减完毕,此时 F_a 对应的磁路见图 19.6(b),它遇到了气隙磁阻和励磁绕组漏磁阻,再考虑到电枢绕组的漏磁通后,电枢磁通的总磁导为

$$\Lambda'_d = \Lambda_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{ad}} + \frac{1}{\Lambda_{F\sigma}}}$$

- 对应的电抗为

$$X'_d = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{F\sigma}}}$$

- 称为直轴瞬态电抗。

19-4 突然短路电流

- 在了解了超瞬态电抗和瞬态电抗后,便可以分析突然短路后的电枢电流。以 A 相为例,电枢电流的交变分量 $i_{A\sim}$ 为

$$\begin{aligned} i_{A\sim} &= \frac{\omega \psi_{A\sim}}{\omega L_d''} = \frac{-\omega \psi_m \cos(\alpha_0 + \omega t)}{X_d''} \\ &= \frac{-\sqrt{2} E_0 \cos(\alpha_0 + \omega t)}{X_d''} = -\sqrt{2} I'' \cos(\alpha_0 + \omega t) \end{aligned}$$

- 其中, $\tilde{I} = E_0 / X_d'$, E_0 为短路前励磁电势有效值, \tilde{I} 称为电枢绕组的超瞬态电流。若无阻尼绕组, 则 $\tilde{I} = E_0 / X_d'$, \tilde{I} 称瞬态电流。

同样, 电枢电流非周期性分量为

$$I_{A\sim} = \frac{\psi_{A0}}{L_d''} = \frac{\psi_m \cos \alpha_0}{X_d''} = \frac{\sqrt{2} E_0 \cos \alpha_0}{X_d''} = \sqrt{2} I'' \cos \alpha_0$$

- 由于实际绕组都有电阻, 都要消耗能量, 各绕组中的电流最终将衰减至稳态短路时的数值。
- 下面分析电枢电流衰减的规律。可以认为, 电枢电流周期性分量的衰减分为两个阶段:
 - ①从超瞬态电流 \tilde{I} 衰减到瞬态电流, \tilde{I} 这一阶段的衰减量 ($\tilde{I} - \tilde{I}$) 由阻尼绕组中对应电流的衰减而引起, 其时间常数为 $T_d' = L_d' / R$ (L_d' 为对应于阻尼绕组的等效电感, R 为阻尼绕组的电阻)。
 - ②从瞬态电流 \tilde{I} 到稳态电流 I , 这一阶段的衰减量 ($\tilde{I} - I$) 由励磁绕组中对应电流的衰减而引起

起,其时间常数为 $T_d' = L_d' / R_f$ (L_d' 为对应于励磁绕组的等效电感, R_f 为阻尼绕组的电阻)。

- 电枢电流的非周期性分量 I_{A-} 的衰减由定子绕组本身的电阻引起,其时间常数为 $T_d'' = L_{d\sigma} / R_s$ ($L_{d\sigma}$ 为对应于定子绕组的等效电感, R_s 为定子绕组的电阻)。
- 以上衰减过程结束后,发电机进入稳态短路,电流变为 $I = E_0 / X_d$ 。
- 根据以上分析,突然短路后电枢电流可以写为

$$i_a = \sqrt{2} I'' \cos \alpha_0 e^{-\frac{t}{T_d''}} - \sqrt{2} \left[(I'' - I') e^{-\frac{t}{T_d'}} + (I' - I) e^{-\frac{t}{T_d}} + I \right] \cos(\omega t + \alpha_0)$$

- 图 19.7 画出了当 $\alpha_0=0$ 电枢短路电流的情况。在这种情况下,经过半个周期电流达到最大值,通常认为它是超瞬态电流幅值的 1.8 倍左右。

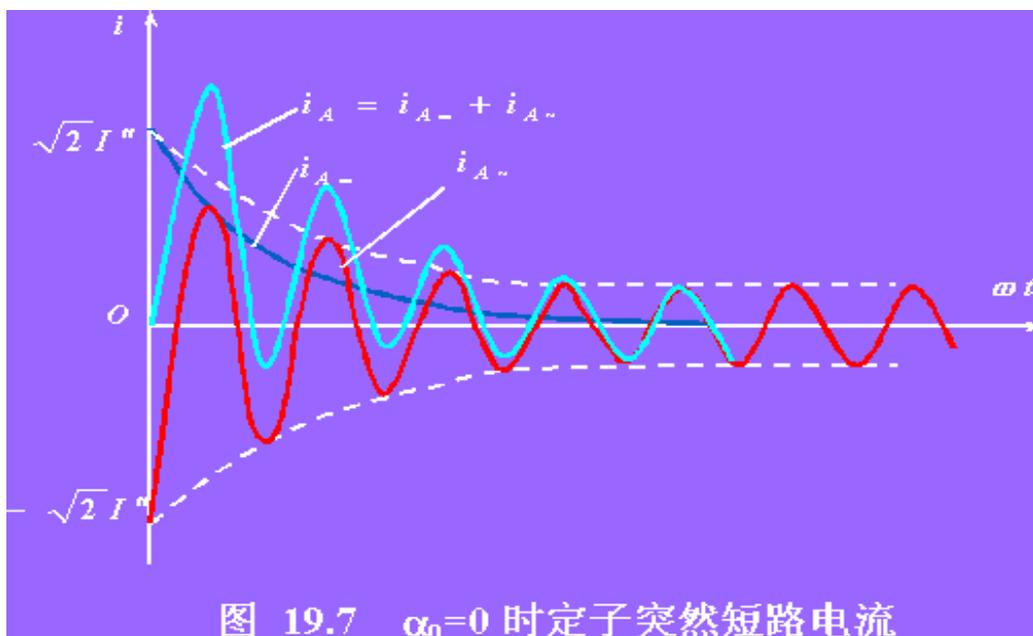


图 19.7 $\alpha_0=0$ 时定子突然短路电流

19-5 同步电机的振荡

- 同步电机在实际运行中,有多种原因可能导致振荡。比如原动机输入转矩的突然变化、电网参数的改变、励磁调节器发生故障、外部负载不稳定或突然变化等因素都能引起电机转速、电流、电压、功率以及转矩的振荡;用自同步法使同步发电机与电网并联以及同步电动机合闸时牵入同步过程也可能引起振荡。
- 电机振荡对于电机本身及相关联的电力系统和其它电气设备都是不利的,严重时可能造成电机与电力系统失去同步、中断供电或使与电网相关联的电气设备受到损坏。因此,了解和研究同步电机振荡的本质有重要的实际意义。
- 在振荡过程中电机的转速不再是恒速,同步电机的方程式呈非线性,振荡问题的分析十分复杂。
- 本文仅对同步电机的小值振荡进行定性分析。所谓小值振荡是指同步电机的功角 δ_0 围绕一个恒定值 δ_0 作小幅度周期性变化(变化幅度一般为 10 度以下),电机转速也围绕着同步速作周期性变化。

- 小值振荡是比较常见的, 同步发电机的有功功率的调节过程、同步电动机的拉入同步过程等都伴随有小值振荡。
- 举例来说, 同步发电机与电网并联以后, 气隙合成磁势 F 受电网频率的制约, 以同步转速 n_1 旋转, 功角的大小仅决定于转子的转速及位置。参看图 19.8, 设发电机起初稳定运行于 a 点, 此时原动机的输入功率与发电机的电磁功率相平衡, 即 $P_a = P_{Ma}$, 原动机的转矩也和发电机的电磁转矩相平衡, 即 $T_a = T_{Ma}$ 。由于电网供电的需要, 要求把发电机的电磁功率增大到 P_b , 整个调节过程为:

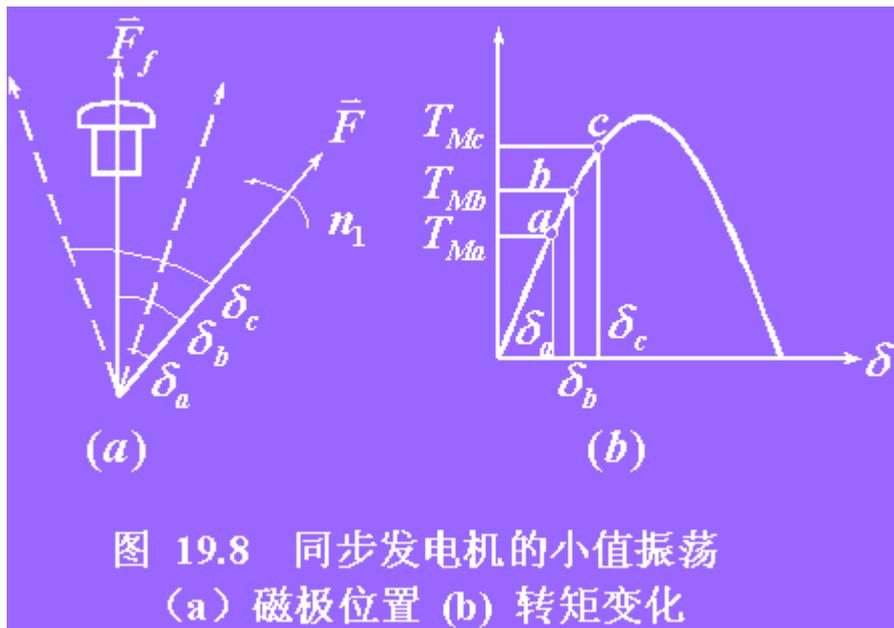


图 19.8 同步发电机的小值振荡
(a) 磁极位置 (b) 转矩变化

- ①增大原动机的输出功率到 P_b , 原动机的转矩也增大到 T_b ;
- ②由于 $D T = (T_b - T_{Ma}) > 0$, 发电机转子在 $D T$ 的作用下加速, 功角由 d_a 开始增大, 达到 d_b 时, 发电机的电磁功率也达到 P_b , 电磁转矩达到 T_{Mb} , 并与原动机的转矩 T_b 相平衡, 发电机转子的加速度变为零, 但速度达到最大值;
- ③由于惯性作用, 转子以大于同步速继续前进, 功角由 d_b 继续增大到 d_c , 发电机的电磁功率也增大到 P_{Mc} , 电磁转矩增大到 T_{Mc} ④由于 $D T = (T_b - T_{Mc}) < 0$, 发电机的转子在 $D T$ 的作用下开始减速, 功角由 d_c 开始减小, 达到 d_b 时, 发电机的电磁功率也达到 P_b , 电磁转矩达到 T_{Mb} , 并与原动机的转矩 T_b 相平衡, 发电机转子的加速度又变为零, 但速度又达到最小值;
- ⑤由于惯性作用, 转子以小于同步速前进, 功角由 d_b 继续缩小到 d_a , 发电机的电磁功率也减小到 P_{Ma} , 电磁转矩减小到 T_{Ma} 。至此, 完成了一个振荡周期, 如果没有阻尼作用, 这一过程会持续下去。

- 事实上, 同步发电机均装设阻尼绕组。在振荡过程中, 阻尼绕组中将出现感应电势和电流, 并形成感应转矩。当转子转速高于同步速时, 感应转矩起制动作用; 而当转子转速低于同步转速时, 感应转矩又具有驱动作用。采用阻尼绕组能大大抑制同步电机的振荡。

一、 不对称运行影响

- 不对称运行时, 负序电流产生的负序旋转磁场相对于转子以两倍同步速旋转, 并在转子绕组 (包括励磁绕组和阻尼绕组) 中感应出两倍频率的电流以及在转子表面感应出涡流, 这些电流将在绕组中和铁心表面引起额外损耗并产生热量, 使得转子温升增高。特别是汽轮发电机, 涡流在转子表面轴向流动, 在转子端部沿圆周方向流动而形成环流, 这些电流不仅流过转子本体, 还流过护环; 它们流经转子的槽楔与齿、护环与转子之间的许多接触面, 这些地方具有接触电阻, 发热尤为严重, 可能产生局部高温、破坏转子部件与励磁绕组绝缘。水轮机散热条件较好, 负序磁场引起的转子过热的的影响相对小些。
- 由于负序旋转磁场与转子磁场之间有两倍速的相对运动, 因而它们之间将产生以两倍频率 (100Hz) 脉动的转矩, 这个附加转矩同时作用在转子轴和定子机座上, 并引起 100Hz 的振动和噪声。水轮发电机中大量的焊接机座结构容易被振动损坏, 因此水轮发电机中必须采用阻尼绕组以削弱负序磁场。
- 为此, 对不对称负载运行要给予必要的限制。对于同步发电机, 常从转子发热的角度出发限制负序电流与额定电流之比。

不对称运行除了对发电机本身的影响外, 对电网其他设备及附近的通讯设施也产生不良影响。发电机的不对称运行导致电网电压的不对称, 不对称的电压加于用户的设备上会产生不良影响。如使得异步电动机的电磁转矩、输出功率和效率降低, 并引起转子过热等。另外, 发电机绕组中因有负序电流而出现更高次的谐波电流, 这些高频电流会对输电线附近的通讯线路产生音频干扰。
- 为了减少负序电流的影响, 通常在转子上装置阻尼绕组。阻尼绕组对负序磁场有很好的去磁作用, 能降低负序磁场对转子造成的过热以及减小脉动转矩。

二、突然短路的影响

- 同步电机突然短路后不仅破坏了电机电磁方面的平衡, 而且破坏了电机机械方面和热方面的平衡。一般由于电磁瞬变过程持续时间很短, 可以认为在这个短小时内只有电磁方面的影响。经验证明, 突然短路后, 最受威胁是绕组端部。由于冲击电流很大、它所产生的强大的电磁力作用与绕组端部会造成严重的后果, 所以同步电机绕组端部的可靠固定是电机设计制造者必须考虑的问题。
- 突然短路后, 由于电压的降低引起发电机输出功率的突然下降, 而原动机输给发电机的转矩又不能及时调节, 故转矩平衡被破坏, 造成同步发电机失步, 使得系统的稳定受到影响。不对称短路时还会在没有短路的绕组内产生过电压, 以致造成电力系统过电压。

本章小结

- 分析不对称运行采用的是对称分量法。把一组不对称电量(电压、电流)按对称分量法分解成正序、负序和零序三组对称分量, 然后将三组对称分量分别作用于电机, 再将结果叠加。
- 正序系统所产生的作用和三相稳态运行情况一样, 对应的正序电抗就是发电机的同步电抗。负序系统产生的磁场相对转子以两倍同步速反转, 并掠过转子上的各绕组, 在其中产生感应电流, 由于转子绕组的作用使得负序电抗大大减小。零序系统在气隙中产生的基波磁场相互抵消, 零序电抗和定子漏抗相等。
- 分析突然短路的物理过程, 采用的超导回路磁链不变原则来解释。通过此原则, 可以说明发生突然短路时, 电机内部各绕组对磁场的作用以及磁场的变化情况, 从而可以计算绕组电抗

和电流的大小。

- 由于绕组的电阻相对于电抗很小, 计算短路电流时可以忽略不计。但电阻的存在是短路电流衰减的根源, 所以考虑电流衰减时应予计入。
- 为了分析方便, 一般可以把突然短路电流的衰减过程分为两个阶段, 即超瞬变过程和瞬变过程。在超瞬变过程中, 由于阻尼绕组中电流的衰减, 使得电枢电抗从超瞬变电抗变化到瞬变电抗, 电枢电流也从超瞬态电流变化到瞬态电流。在瞬变过程中, 由于励磁绕组中电流的衰减, 使得电枢电抗从瞬变电抗变化到同步电抗, 电流也从瞬态电流变化到稳态短路电流。
- 不对称运行和突然短路会对电机本身、电力系统以及附近的通讯线路产生不良的影响。因此要尽量避免不对称运行和故障短路的发生。