



## 第3篇 同步电机



### 第3篇 同步电机

## 第7章 同步电机的用途、分类、基本结构和额定值

### ▼ 学习目标

- 了解同步电机的用途和主要分类
- 熟练掌握同步电机的基本工作原理
- 熟悉同步电机的基本结构，熟练掌握隐极和凸极电机的结构特点
- 熟练掌握同步电机的额定值
- 熟练掌握同步发电机标幺值系统

2



### 第7章 同步电机的用途、分类、基本结构和额定值

## 7.1 同步电机的用途和分类

### 1. 同步电机的用途

- 主要用作发电机，产生交流电能  
(用于水电站、火电厂、核电厂、风电场等)
- 用作电动机  
(可与电力电子装置结合，构成调速系统)
- 用作同步调相机(同步补偿机)  
(接于交流电网空转的同步电动机，用于补偿电网的无功功率)

3



### 7.1 同步电机的用途和分类

## 2. 同步电机的分类

### 主要分类方法

#### ■ 按用途分类

同步发电机、同步电动机、同步调相机(补偿机)

#### ■ 按转子结构分类

##### ● 隐极同步电机

- ◆ 无明显突出的磁极
- ◆ 气隙均匀

##### ● 凸极同步电机

- ◆ 有突出的磁极
- ◆ 气隙不均匀

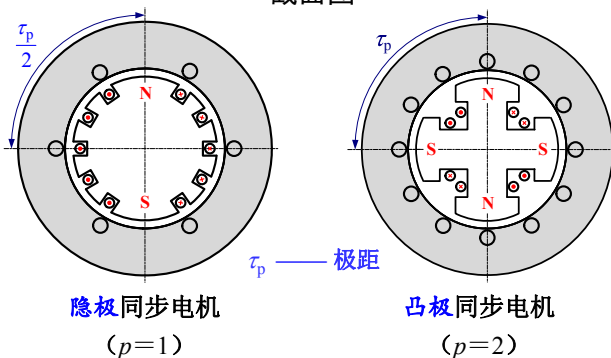
☞ 还可按用途进一步分为发电机或电动机。

4



### 2. 同步电机的分类

#### 截面图



5



### 2. 同步电机的分类

#### ■ 按冷却方式分类

同步电机 { 空气冷却  
氢气冷却  
水冷却  
混合冷却  
蒸发冷却

#### ■ 按通风方式分类

同步电机 { 开启式  
防护式  
封闭式

6

2. 同步电机的分类

■ 同步发电机按**原动机**分类

**汽轮发电机** (用于火电厂、核电厂)

原动机为 **汽轮机**  $\Rightarrow$  卧式, 转速高  $\Rightarrow$  转子隐极结构

转子细长形; 一般为2极

**水轮发电机** (用于水电站)

原动机为 **水轮机**  $\Rightarrow$  立式, 转速低  $\Rightarrow$  转子凸极结构

转子扁圆形; 多极

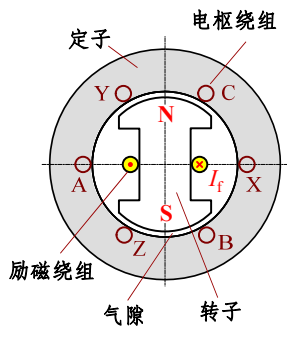
其他原动机 (如风力机、柴油机) 拖动的同步发电机

第7章 同步电机的用途、分类、基本结构和额定值

## 7.2 同步电机的基本结构

### 1. 同步电机的基本原理

- 通常, 定子上布置三相交流绕组 (电枢绕组);
- 转子上安装磁极, 磁极上布置励磁绕组。
- 励磁绕组通入**直流**电流  $I_f$ 。



该图展示了同步电机的基本结构。定子（外圈）上布置有三相交流绕组，分别标记为A、B、C和X、Y、Z。转子（内圈）上安装有两个磁极，分别标记为N（北）和S（南）。励磁绕组（I<sub>f</sub>）安装在转子上。气隙（Air Gap）位于定子和转子之间。电枢绕组（Armature Winding）位于定子上。

### 1. 同步电机的基本原理

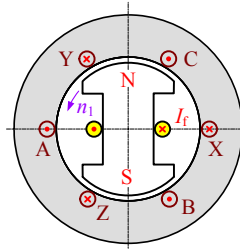
不论是发电机还是电动机, **稳态**运行时, 转子转速  $n_1$  都和电枢绕组频率  $f_1$  (基波) 保持严格的“正比”关系。

$n_1$  为**同步转速**。

$$f_1 = \frac{p n_1}{60} \text{ (Hz)}$$

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \text{ (r/min)}$$

$p$  —— 电机的极对数



该图展示了同步电机的基本原理。定子（外圈）上布置有三相交流绕组，分别标记为A、B、C和X、Y、Z。转子（内圈）上安装有两个磁极，分别标记为N（北）和S（南）。励磁绕组（I<sub>f</sub>）安装在转子上。气隙（Air Gap）位于定子和转子之间。电枢绕组（Armature Winding）位于定子上。

## 7.2 同步电机的基本结构

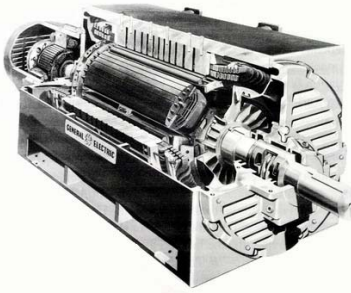
### 2. 同步电机的基本结构

通常在定子上布置交流绕组, 故定子也称**电枢**

**定子**  
定子铁心, 定子绕组, 机座

**气隙**

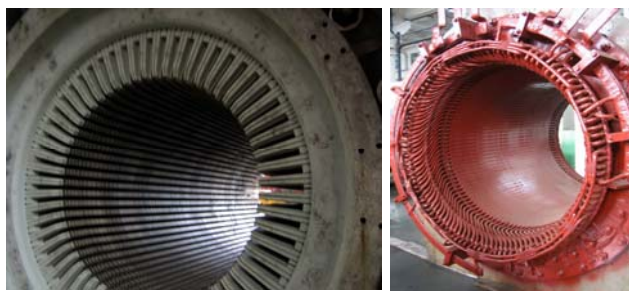
**转子**  
转子铁心, 励磁绕组, 集电环 (→ 电刷) 阻尼绕组, 转轴



该图展示了同步电机的基本结构。定子（外圈）上布置有三相交流绕组，分别标记为A、B、C和X、Y、Z。转子（内圈）上安装有两个磁极，分别标记为N（北）和S（南）。励磁绕组（I<sub>f</sub>）安装在转子上。气隙（Air Gap）位于定子和转子之间。电枢绕组（Armature Winding）位于定子上。

## 2. 同步电机的基本结构

### 同步发电机定子



定子铁心

定子铁心+定子绕组

## 2. 同步电机的基本结构

### 大型水轮发电机的分瓣定子



2. 同步电机的基本结构

汽轮发电机(隐极)转子



转子铁心由合金钢整体锻件加工而成

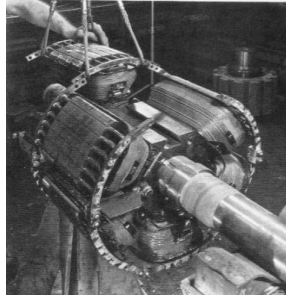
每个磁极的槽中嵌放同心式集中绕组



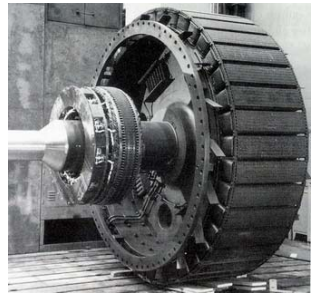
13

2. 同步电机的基本结构

凸极同步电机转子



6极凸极同步电机转子  
(一个磁极正待安装)

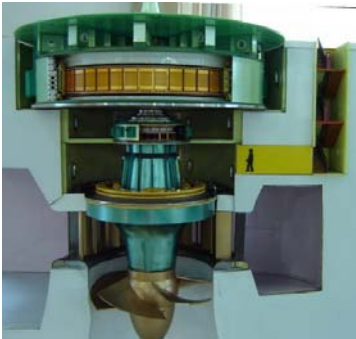
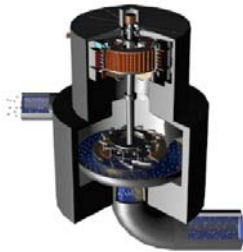


水轮发电机(凸极)转子  
(无刷励磁)

14

2. 同步电机的基本结构

水轮发电机组模型

15

第7章 同步电机的用途、分类、基本结构和额定值

7.3 同步电机的额定值

1. 主要额定值

额定容量 $S_N$ (kV · A, MV · A)	额定转速 $n_N$ (r/min)
额定功率 $P_N$ (kW, MW)	额定功率因数 $\cos \varphi_N$
额定电压 $U_N$ (V, kV)	额定效率 $\eta_N$
额定电流 $I_N$ (A)	额定励磁电压 $U_{fN}$ (V)
额定频率 $f_N$ (Hz)	额定励磁电流 $I_{fN}$ (A)

16

7.3 同步电机的额定值

- 额定容量  $S_N$   
电机额定运行时, 电枢出线端的视在功率。  
(一般用于发电机)
- 额定功率  $P_N$   
电机额定运行时的**输出**功率。
  - 发电机 —— 电枢出线端输出的有功功率 (电功率)。
  - 电动机 —— 转轴上输出的**机械功率**。

17

7.3 同步电机的额定值

- 额定电压  $U_N$   
电机额定运行时, 电枢出线端的**线**电压。
- 额定电流  $I_N$   
电机额定运行时, 电枢出线端的**线**电流。
- 额定频率  $f_N$   
电机额定运行时电枢绕组电气量的频率。
- 额定转速  $n_N$   
电机额定运行时的转速 (即同步转速  $n_1$ )。
- 额定功率因数  $\cos \varphi_N$   
电机额定运行时电枢绕组侧的功率因数。

18



## 1. 主要额定值

## ■ 额定功率、额定电压、额定电流间的关系

## ● 发电机 (三相)

$$P_N = S_N \cos \varphi_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N$$

## ● 电动机 (三相)

$$P_N = P_{IN} \eta_N = (\sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N) \eta_N$$

( $P_{IN}$  —— 额定输入功率)

19



## 1. 主要额定值

## 例：三峡左岸电站水轮发电机的额定值

$$S_N = 777.8 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$P_N = 700 \text{ MW}$$

$$U_N = 20 \text{ kV (Y联结)}$$

$$I_N = 22453 \text{ A}$$

$$f_N = 50 \text{ Hz}$$

$$n_N = 75 \text{ r/min}$$

$$\cos \varphi_N = 0.9 \text{ (滞后)}$$

$$\eta_N = 98.77\%$$

$$P_N = S_N \cos \varphi_N = 777.8 \times 0.9 = 700 \text{ MW}$$

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_N} = \frac{777.8 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 20 \times 10^3} = 22453 \text{ A}$$

$$p = \frac{60 f_N}{n_N} = \frac{60 \times 50}{75} = 40$$

定子机座 (5瓣)

φ22028 × 6035

定子铁心 φ19720/φ18800  
× 2950.4

整体转子 φ18738 × 3600

发电机总重 3333.5t

20



## 7.3 同步电机的额定值

## 2. 同步电机标么值的基值

## ■ 电枢绕组电气量的基值

通常取为额定值。

## ● 电压基值

线电压:  $U_N$ ; 相电压:  $U_{N\phi}$  (额定相电压)。

## ● 电流基值

线电流:  $I_N$ ; 相电流:  $I_{N\phi}$  (额定相电流)。● 阻抗基值:  $Z_N = U_{N\phi} / I_{N\phi}$ 

下标φ表示“相”

## ■ 励磁电流基值

空载运行时产生  $U_N$  的励磁电流  $I_{f0}$  ( $\neq I_{fN}$ )。

21



## 第7章 同步电机的用途、分类、基本结构和额定值

## 小 结

## ✓ 同步电机的基本工作原理

$$\text{稳态运行时, } f_1 = \frac{pn_1}{60} \text{ 或 } n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

## ✓ 同步电机的用途, 主要分类 (按转子结构、发电机按原动机)。

## ✓ 同步电机的基本结构, 隐极、凸极电机的结构和磁路特点。

## ✓ 同步电机 (发电机、电动机) 的额定值。

## ✓ 同步电机标么值系统的基值。

22



## 第7章 同步电机的用途、分类、基本结构和额定值

## 小 结 (续)

## ✓ 主要概念

同步, 同步转速

隐极, 凸极

汽轮发电机, 水轮发电机

电枢绕组, 励磁绕组, 阻尼绕组

额定值

标么值, 基值

23



## 第3篇 同步电机

第8章 同步发电机的电磁关系  
和分析方法

## ▼ 学习目标

- 同步发电机空载运行时的电磁关系和空载特性
- 同步发电机对称负载运行时的电枢反应性质, 时空相矢量图的运用
- 隐极同步发电机的电磁关系, 电压方程式、时空相矢量图、电动势相量图
- 凸极同步发电机的电磁关系和双反应理论, 电压方程式和电动势相量图
- 各电抗参数的物理意义及其关系

24





## 第8章 同步发电机的电磁关系和分析方法

## 主要内容

以三相同步发电机 ( $p=1$ ) 为对象

分析对称稳态运行时各电磁量的相互作用关系

—— 电磁关系

## 定性、定量描述电磁关系的方法

- ◆ 相量图、矢量图、时空相矢量图
- ◆ 电压方程式
- ◆ 等效电路

25



## 第8章 同步发电机的电磁关系和分析方法

## 8.1 同步发电机的空载运行

## 1. 概述

## ■ 空载运行的定义

- ◆ 电枢 (定子) 绕组 **开路** (电枢电流  $I=0$ ) ;
- ◆ 发电机由原动机拖动以 **同步转速**  $n_1$  旋转;
- ◆ 转子 **励磁** 绕组中通入直流电流。

## ■ 励磁电流

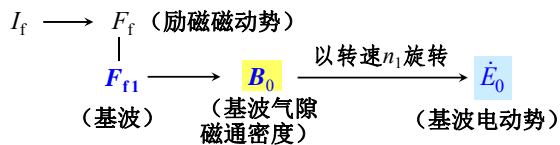
- ◆ 定义: 励磁绕组中的直流电流。
- ◆ 作用: 建立气隙磁场 (空载时, 电枢电流  $I=0$ , 气隙磁场仅由励磁电流  $I_f$  产生)。

26



## 1. 概述

## ■ 空载运行时的基本电磁关系



## ■ 本节讨论的问题

对上述电磁关系进行定性、定量分析。

- ◆ 励磁磁动势  $F_f$ 、气隙磁场的空间分布和表示方法
- ◆ 定性分析:  $F_{f1} \Rightarrow \dot{E}_0$  (相、矢量图)
- ◆ 定量关系:  $E_0 = f(F_f)$  或  $E_0 = f(I_f)$  (空载特性)

27

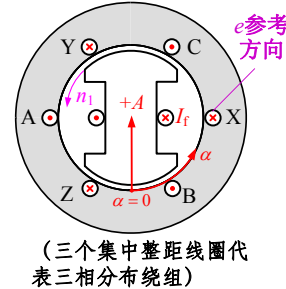


## 8.1 同步发电机的空载运行

## 2. 基波励磁磁动势

## (1) 励磁磁动势

## ► 励磁磁动势的空间分布



(三个集中整距线圈代表三相分布绕组)

描述方法: 建立空间坐标系, 规定磁动势参考方向

空间坐标系置于定子内圆表面上:

- ◆ 坐标原点 —— A相绕组轴线+A处;
- ◆ 横坐标  $\alpha$  —— 沿圆周方向的空间电角度, 逆时针方向为正;
- ◆ 纵坐标 —— 磁动势。

28

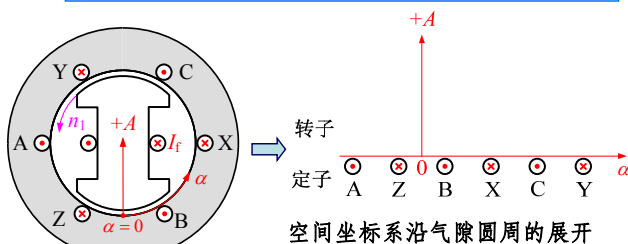


## (1) 励磁磁动势

## ► 励磁磁动势的空间分布 (续)

描述方法: 建立空间坐标系, 规定磁动势参考方向

- ◆ 磁动势的参考方向 —— 出定子、进转子的方向

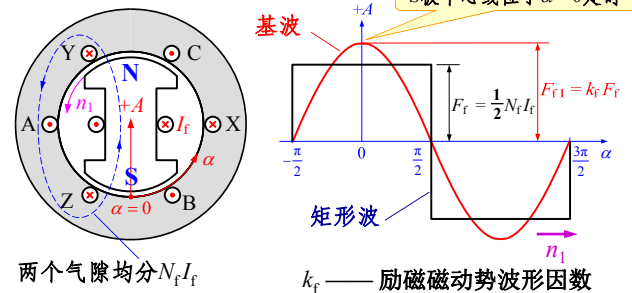


29



## (1) 励磁磁动势

## ► 励磁磁动势的空间分布——凸极发电机

设: 励磁电流为  $I_f$ , 励磁绕组一对极的匝数为  $N_f$ S极中心线位于  $\alpha=0$  处时

30

(1) 励磁磁动势

► 励磁磁动势的空间分布——隐极发电机

设：励磁电流为 $I_f$ ，励磁绕组一对极的匝数为 $N_f$

线圈11'、22'、33'、44'的串联匝数为 $N_f$

基波  $F_f = \frac{1}{2} N_f I_f$   $F_{f1} = k_f F_f$

阶梯波

$k_f = \frac{\text{基波励磁磁动势幅值}}{\text{励磁磁动势最大值}}$

S极中心线位于 $\alpha=0$ 处时

31

2. 基波励磁磁动势

(2) 基波励磁磁动势

► 结论

- 隐极、凸极同步发电机的基波励磁磁动势，在空间按正弦规律分布，随转子以同步转速 $n_1$ 旋转。
- 按规定的参考方向，基波励磁磁动势的正幅值位于转子S极中心线所在的气隙处。
- 基波励磁磁动势幅值 $F_{f1}$ 与励磁磁动势最大值 $F_f$ 的比值均为 $k_f$ ：
  - 凸极： $k_f = 4/\pi$ ；
  - 隐极： $k_f \approx 1$ （与转子槽的分布有关）。

32

(2) 基波励磁磁动势

► 基波励磁磁动势空间矢量

用空间矢量 $F_{f1}$ 表示基波励磁磁动势

用一个等效的集中线圈代替励磁绕组

电角速度  $\omega = p \frac{2\pi n_1}{60}$

33

(2) 基波励磁磁动势

► 基波励磁磁动势空间矢量 (续)

在空间矢量图上，用矢量 $F_{f1}$ 表示基波励磁磁动势。

- 位置在基波磁动势正幅值所在处；
- 长度等于基波磁动势的幅值；
- 随转子以同步转速 $n_1$ 逆时针旋转，相应的电角速度为同步电角速度 $\omega$ 。

空间矢量图

34

(2) 基波励磁磁动势

► 基波励磁磁动势空间矢量 (续)

转子转过90°电角度时

S极中心线位于 $\alpha=90^\circ$ 处时

一个空间矢量图只能表示某一时刻的情况。

35

8.1 同步发电机的空载运行

3. 基波气隙磁通密度

①  $F_{f1}$ 产生怎样的气隙磁场

② 如何描述气隙磁场沿电枢内圆的分布情况

用气隙磁通密度 (径向分量)

- 气隙磁通密度与磁路磁导有关。
- 凸极和隐极同步电机的气隙磁路不同，因此气隙磁通密度分布也不同。

- 在空间正弦分布的基波气隙磁通密度波，也可用空间矢量表示。
- 规定气隙磁通密度的参考方向与磁动势的相同。

36

### 3. 基波气隙磁通密度

(1) 隐极同步电机的基波气隙磁通密度

- 气隙均匀；不计饱和时，正弦分布的基波励磁磁动势  $F_{fl}$  产生正弦分布的基波气隙磁通密度  $B_0$ 。
- 不计磁滞和涡流损耗时，基波气隙磁通密度波与基波励磁磁动势波在空间上相位相同。

基波励磁磁动势  $F_{fl}$

基波气隙磁通密度  $B_0$

用空间矢量表示

37

### 3. 基波气隙磁通密度

(2) 凸极同步电机的基波气隙磁通密度

- 气隙不均匀，因此正弦分布的基波励磁磁动势产生的气隙磁通密度波是非正弦分布的。
- 进行傅氏分解，得到基波气隙磁通密度。
- 不计磁滞和涡流效应时，基波气隙磁通密度波仍然与产生它的基波励磁磁动势在空间上同相。

基波励磁磁动势  $F_{fl}$

基波气隙磁通密度  $B_0$

基波气隙磁通密度  $b_0$

38

### 8.1 同步发电机的空载运行

#### 4. 电枢绕组的磁链、感应电动势

在空间正弦分布的  $B_0$  (以转速  $n_1$  旋转)

↓

一相电枢绕组磁链  $\psi$  随时间  $t$  正弦变化 —— 基波磁链

↓

一相电枢绕组的感应电动势  $e$  随时间正弦变化 —— 基波感应电动势

- 基波磁链、基波感应电动势都可用时间相量表示。
- 规定绕组磁链的参考方向与气隙磁通密度的相同。

39

### 4. 电枢绕组的磁链、感应电动势

■ 定子一相绕组的基波磁链和基波感应电动势

$\omega t = 0$  时，设 S 极中心线在  $\alpha = 0$  处。

以 A 相为例。此时： $\psi_{0A} = +\max$ ， $e_{0A} = 0$ 。

$f_1 = \frac{pn_1}{60}$

空间矢量图

时间相量图 (A相)

空载 (相) 电动势  $\dot{E}_0$

40

### 4. 电枢绕组的磁链、感应电动势

■ 定子一相绕组的基波磁链和基波感应电动势 (续)

$\omega t = 90^\circ$  时，S 极中心线在  $\alpha = 90^\circ$  处。

仍以 A 相为例，此时： $\psi_{0A} = 0$ ， $e_{0A} = +\max$ 。

空间矢量图

时间相量图 (A相)

41

### 8.1 同步发电机的空载运行

#### 5. 空载特性

用相量图和矢量图，可分析定子一相绕组基波感应电动势  $\dot{E}_0$  与基波励磁磁动势  $F_{fl}$  之间的定性关系。

如何描述  $E_0$  与  $F_f$  (或  $I_f$ ) 间的数量关系?

空载特性  $E_0 = f(I_f)$

同步转速  $n_1$  时

定子一相感应电动势的有效值 (基本等于基波有效值)

励磁电流 (实际产生的磁动势是  $F_f$ ，而不是  $F_{fl}$ )

42

### 5. 空载特性

**空载特性的意义**

- 空载特性表达了磁动势产生磁场、在定子绕组中感应电动势的能力。
- $E_0$  与  $I_f$  (或  $F_f$ ) 间是 **非线性** 关系。
- 空载特性与 **电机磁路** 的磁化特性  $\Phi = f(F_f)$  相对应, 与铁心材料的磁化曲线  $B = f(H)$  有内在联系。

**求取空载特性的方法**

- 空载运行时测取
- 设计计算

### 8.1 同步发电机的空载运行

### 6. 时空相矢量图

时间相量和空间矢量虽然物理意义不同, 但有密切联系:

- 不论转子转到何处, 相量  $\dot{\psi}_0$  和矢量  $F_{fl}$ 、 $B_0$  在各自图中的位置 (相对各自的参考轴) 都相同。
- 在相量图中,  $\dot{E}_0$  滞后  $\dot{\psi}_0$   $90^\circ$  电角度。
- 根据  $F_{fl}$ 、 $B_0$  在空间矢量图中的位置, 可在相量图中作出  $\dot{\psi}_0$ 、 $\dot{E}_0$ ; 反之亦然。

为作图方便, 将二者重合在一起, 简称 **时空相矢量图**。

### 6. 时空相矢量图

**时空相矢量图的作法**

$\omega t = 0$ , S极中心线在  $\alpha = 0$  处,  $\psi_{0A} = +\max$ ,  $e_{0A} = 0$ 。

**合二为一**

空间矢量图      时间相量图

### 6. 时空相矢量图

**时空相矢量图的作法 (续)**

- “AA制”**
  - 空间矢量以 **+A 轴** 为参考轴;
  - 时间相量用 **A相** 的量。
- “2合1”** —— +A 与 +j 二轴重合。
- “定位”**
  - 已知某时刻的转子位置时, 转子S极中心线的  $\alpha$  值为  $F_{fl}$  位置。
  - 已知某时间相量的瞬时值时, 以该相量 (例如  $\dot{E}_0$ ) 定位。

时空相矢量图

### 6. 时空相矢量图

**时空相矢量图的特点**

时间相量与空间矢量间 “有了” **相位关系**:

- 相量  $\dot{\psi}_0$  与产生它的矢量  $F_{fl}$  ( $B_0$ ) 重合 (同相);
- 相量  $\dot{E}_0$  滞后产生它的矢量  $F_{fl}$  ( $B_0$ )  $90^\circ$  电角度。

**注意**: 这种相位关系, 是在前面所述条件下人为造成的, 并无明确的物理意义。

### 6. 时空相矢量图

**时空相矢量图的作法 —— 举例**

例如:  $\omega t = 90^\circ$  时, S极中心线在  $\alpha = 90^\circ$  处  
 $\psi_{0A} = 0$ ,  $e_{0A} = +\max$

$\omega t = 90^\circ$  时的时空相矢量图

瞬时值表达式:  $e_{0A} = \sqrt{2}E_0 \sin \omega t = \sqrt{2}E_0 \cos(\omega t - 90^\circ)$





## 第8章 同步发电机的电磁关系和分析方法

## 8.2 同步发电机负载时的电枢反应

## 1. 概述

## ■ 电枢反应的定义

- 对称负载运行时, 三相电枢绕组流过三相对称电流, 产生三相合成磁动势——**电枢磁动势**。
- 电枢磁动势的出现, 改变了空载时由励磁磁动势单独产生气隙磁场的情况, 使气隙磁场发生变化。
- 基波电枢磁动势对基波励磁磁动势的影响, 称为**电枢反应**。

49



## 8.2 同步发电机负载时的电枢反应

## ■ 基波电枢磁动势与基波励磁磁动势的比较

	基波励磁磁动势	基波电枢磁动势
幅值	$F_{f1} = k_f \frac{1}{2} N_f I_f$	$F_a = F_1 = 1.35 \frac{N_1 I}{p} k_{dp1}$
转速	同步转速 $n_1$	$n_1 = 60 f_1 / p$
转向	与转子同向 (逆时针)	顺相序 A、B、C 方向, 与转子同向 (逆时针)
极对数	与转子极对数相同	与绕组节距有关。 转子 $p \Rightarrow \tau_p \Rightarrow y_1 \Rightarrow$ 电枢绕组极对数 $= p$ 。

50



## 8.2 同步发电机负载时的电枢反应

## ■ 磁动势比较的结论

- 基波电枢磁动势  $F_a$  和基波励磁磁动势  $F_{f1}$  同极对数、同转速、同转向, 在空间保持**相对静止**。
- $F_a$  和  $F_{f1}$  的合成磁动势也是一个同极对数、同转速、同转向的基波旋转磁动势。
- 在稳态运行时,  $F_a$  和  $F_{f1}$  的作用关系保持不变, 共同建立稳定的基波气隙旋转磁场。

## ■ 基本电磁关系比较

空载时:  $I_f \rightarrow F_{f1} \rightarrow B_0 \rightarrow \dot{\Psi}_0 \rightarrow \dot{E}_0$ 负载时:  $I_f \rightarrow F_{f1}$   
(三相)  $\dot{i} \rightarrow F_a$  }  $F_\delta \rightarrow B_\delta \rightarrow \dot{E}_\delta$ 

51



## 8.2 同步发电机负载时的电枢反应

## 2. 电枢反应的性质

$$\begin{matrix} F_{f1} \rightarrow \dot{E}_0 \\ \dot{i} \rightarrow F_a \end{matrix} \Rightarrow$$

- 电枢反应性质与**内功率因数角  $\psi$** 有关  
( $\dot{i}$  滞后  $\dot{E}_0$  的角度)
- $\psi$  与发电机的内阻抗及负载性质有关

利用时空相矢量图, 分析  $F_a$  对  $F_{f1}$  的作用

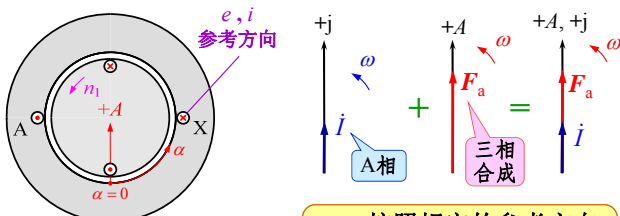
以隐极发电机为例

需要确定  $\dot{i}$  与  $F_a$  的关系 (在相矢量图中)。**理论基础:** 当一相电流为正最大值时, 三相合成基波磁动势  $F_a$  的正幅值位于该相绕组轴线处。

52



## 2. 电枢反应的性质

■ 在时空相矢量图上,  $\dot{i}$  与  $F_a$  的关系

53

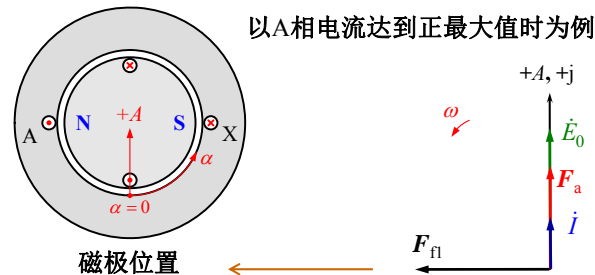


## 2. 电枢反应的性质

(1)  $\psi = 0$  时的电枢反应

## ➤ 第一种作图方法: 由时间相量找空间矢量

以A相电流达到正最大值时为例



54

2. 电枢反应的性质

(1)  $\psi = 0$  时的电枢反应 (续)

➤ 第二种作图方法: 由空间矢量找时间相量

以转子S极中心线转至  $\alpha = 90^\circ$  位置时为例

磁极位置

55

2. 电枢反应的性质

(1)  $\psi = 0$  时的电枢反应 (续)

$q$  轴与  $d$  轴正交 (相差  $90^\circ$  空间电角度)

**直轴 ( $d$  轴):** 转子磁极中心线  
**交轴 ( $q$  轴):** 磁极之间的中心线

- $F_a$  滞后  $F_{fi}$   $90^\circ$  电角度, 位于  $q$  轴, 是 **交轴电枢反应磁动势**。
- 合成气隙磁动势  $F_\delta = F_{fi} + F_a$ 。
- 电枢反应使气隙磁动势  $F_\delta$  从空载时的  $d$  轴位置后移了  $\theta'$  空间电角度, 幅值增加 —— **交磁作用**。

56

2. 电枢反应的性质

(2)  $\psi = 90^\circ$  时的电枢反应

- 基波电枢磁动势  $F_a$  在直轴 ( $d$  轴) 位置, 称为 **直轴电枢反应磁动势**。
- $F_a$  与  $F_{fi}$  方向相反, 起去磁作用, 是 **直轴去磁** 电枢反应磁动势。

57

2. 电枢反应的性质

(3)  $\psi = -90^\circ$  时的电枢反应

- 基波电枢磁动势  $F_a$  在直轴 ( $d$  轴) 位置, 也是 **直轴电枢反应磁动势**, 但作用正好与  $\psi = 90^\circ$  时的相反。
- $F_a$  与  $F_{fi}$  方向相同, 起增磁作用, 是 **直轴增磁** 电枢反应磁动势。

58

2. 电枢反应的性质

(4)  $\psi > 0$  (任意值) 时的电枢反应

一般电感性负载居多, 则  $0 < \psi < 90^\circ$ 。

- 电枢反应磁动势  $F_a$  既不在直轴位置, 也不在交轴位置。

$F_a$  可分解为两个分量: ① 直轴电枢反应磁动势分量  $F_{ad}$ ; ② 交轴电枢反应磁动势分量  $F_{aq}$ 。

59

2. 电枢反应的性质

■ 电枢反应性质小结

- 直轴电枢反应磁动势的作用 —— 增磁 / 去磁
- 交轴电枢反应磁动势的作用 —— 交磁
  - 使合成气隙磁动势  $F_\delta$  偏离直轴一个角度  $\theta'$ ;
  - 使  $F_\delta > F_{fi}$ 。
- 电枢反应的性质取决于内功率因数角  $\psi$

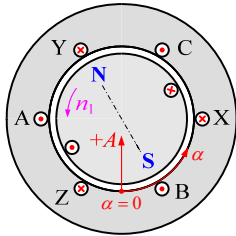
$\psi$	0	$90^\circ$	$-90^\circ$	$0 < \psi < 90^\circ$	$-90^\circ < \psi < 0$
直轴	—	去磁	增磁	去磁	增磁
交轴	交磁	—	—	交磁	交磁

60

## 8.2 同步发电机负载时的电枢反应

## 例题1 (参见教材例8-1)

一台隐极同步发电机, 转子磁极在 $t=0$ 时的位置如图所示。试分析 $\psi=60^\circ$ 时电枢反应的性质, 并写出C相空载电动势 $e_{0C}$ 的瞬时值表达式。



解:

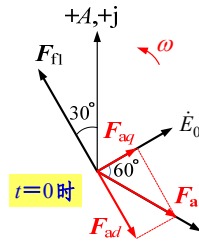
已知转子磁极位置和内功率因数角 $\psi$ , 因此可利用时空相矢量图分析。

① 建立空间坐标系。

② 已知 $t=0$ 时转子S极中心线位于 $\alpha=30^\circ$ 处, 据此作出 $F_{fl}$ 。

## 8.2 同步发电机负载时的电枢反应

解: (续)

③ 作空载电动势相量 $\dot{E}_0$ ; 根据 $\psi=60^\circ$ , 作出相电流相量 $\dot{i}$ 。④ 作电枢磁动势矢量 $F_a$ 。可知 $F_a$ 滞后 $F_{fl}$   $150^\circ$ 电角度。⑤ 将 $F_a$ 分解为 $F_{ad}$ 和 $F_{aq}$ ,  
 $F_{ad}$ : 直轴去磁;  $F_{aq}$ : 交磁。⑥ 根据时空相矢量图中 $\dot{E}_0$ 的位置, 可得

$$e_{0A} = \sqrt{2}E_0 \sin(\omega t + 30^\circ) = \sqrt{2}E_0 \cos(\omega t - 60^\circ)$$

$$\text{则 } e_{0C} = \sqrt{2}E_0 \sin(\omega t + 150^\circ) = \sqrt{2}E_0 \cos(\omega t + 60^\circ)$$

## 第8章 同步发电机的电磁关系和分析方法

## 8.3 隐极同步发电机的时空相矢量图和相量图

## 目的和内容

- 在分析电枢反应的基础上, 分析**对称负载稳态运行时的电磁关系**, 得到电压方程式、相量图和等效电路。
- 分为**考虑饱和**与**不计饱和**两种情况进行分析。
  - 通常, 同步电机铁心磁路都呈饱和状态 (在磁化特性 $\Phi=f(F_f)$ 膝点附近), 因此应考虑饱和的影响。
  - 为了能用等效电路进行分析计算, 需忽略饱和效应, 作线性化处理。

## 8.3 隐极同步发电机的时空相矢量图和相量图

## 1. 考虑饱和时的情况

## (1) 饱和时的电磁关系

- 对称负载运行时, 产生气隙磁场 (主磁通) 的是合成气隙磁动势 $F_\delta = F_{fl} + F_a$ 。
- 电枢三相电流除了参与产生主磁通外, 还产生电枢漏磁通。

电枢漏磁通 { 端部漏磁通 } 仅交链电枢绕组, 不进转子。  
槽漏磁通 }  
差漏磁通 (谐波漏磁通)

## (1) 饱和时的电磁关系

## 关于电枢漏磁通

- 槽漏磁通
- 端部漏磁通
- 差漏磁通 (谐波漏磁通)
  - 是由电枢绕组合成谐波磁动势产生的谐波磁通。
  - 也进入转子, 但与主磁通的作用不同; 在电枢绕组中产生**基波频率**的电动势, 故归入漏磁通中。

思考题6-14

## (1) 饱和时的电磁关系

## 电磁关系总结

- 空载  $I_f \rightarrow F_{fl} \rightarrow B_0 \rightarrow \dot{E}_0 (E_0 = U)$
- 负载  $I_f \rightarrow F_{fl}$  }  $F_\delta \rightarrow B_\delta \rightarrow \dot{E}_\delta$  } **非线性**  
(三相)  $i \rightarrow F_a$  }  $\Phi_\sigma \rightarrow \dot{E}_\sigma$  } **磁化特性 (空载特性)**

电动势平衡关系 (电压方程式)

 $\dot{E}_\delta$ : 一相电枢绕组的气隙电动势 $\Phi_\sigma$ : 定子漏磁通;  $\dot{E}_\sigma$ : 一相电枢绕组的漏磁电动势



## 1. 考虑饱和时的情况

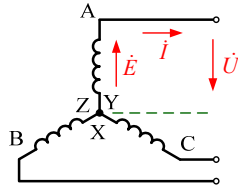
## (2) 饱和时的电压方程式、相量图

## ➤ 参考方向规定

- 电流和它产生的磁动势 —— 右手螺旋定则；
- 磁动势和它产生的磁通密度 —— 参考方向相同；
- 磁通和它产生的电动势 —— 右手螺旋定则；
- 发电机惯例（电路中）。

$\dot{U}$  代表相电压

$\dot{E}$  代表各种相电动势



67



## (2) 饱和时的电压方程式、相量图

## ➤ 电压方程式

- 按照发电机惯例，可得

$$\dot{E}_\delta + \dot{E}_\sigma = \dot{U} + \dot{I}R$$

式中， $R$  为一相电枢绕组的电阻。

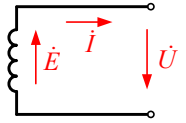
- **注意：**电压方程式中，各物理量均为一相的量。

- 将  $\dot{E}_\sigma$  用相电流在电抗上产生的电压降来表示

$$\dot{E}_\sigma = -j\dot{I}X_\sigma$$

式中， $X_\sigma$  —— 一相电枢绕组的漏电抗。

通常认为漏磁导为常数，则  $X_\sigma$  是常数。



68



## (2) 饱和时的电压方程式、相量图

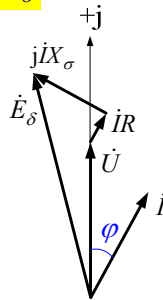
## ➤ 电压方程式 (续)

$$\dot{E}_\delta = \dot{U} + \dot{I}(R + jX_\sigma) = \dot{U} + \dot{I}Z_\sigma$$

式中， $Z_\sigma = R + jX_\sigma$ ，  
为一相电枢绕组的漏阻抗  
( $R$  通常很小，可忽略)。

## ➤ 相量图

设发电机功率因数为  $\cos\varphi$  (滞后)  
(负载为电感性)



69



## 1. 考虑饱和时的情况

## (3) 饱和时的时空相矢量图

## ➤ 作图步骤

已知： $U$ 、 $I$ 、 $\cos\varphi$  (滞后) 和参数

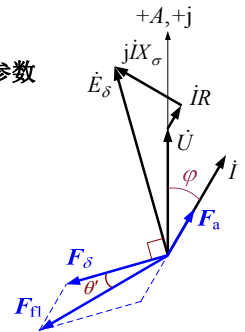
- ① 作时间相量图

$$\dot{E}_\delta = \dot{U} + \dot{I}(R + jX_\sigma)$$

- ② 作空间矢量  $F_a$  和  $F_\delta$

$F_\delta$  超前  $\dot{E}_\delta$   $90^\circ$

- ③ 根据  $F_{f1} = F_\delta - F_a$ ，作出  $F_{f1}$ 。



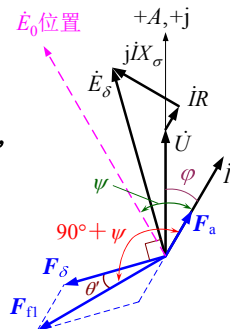
70



## (3) 饱和时的时空相矢量图

## ➤ 说明

- 负载运行时气隙磁场实际产生的电动势为  $\dot{E}_\delta$ ，而没有  $\dot{E}_0$ ，即  $\psi$  角实际并不存在。
- $F_{f1}$  与  $F_a$  的夹角为  $(90^\circ + \psi)$ ，是实际存在的，它决定了电枢反应的性质。
- $E_\delta$  与产生它的  $F_\delta$  的数量关系可由空载特性直接得到，故不必去求  $B_\delta$ 。



71



## (3) 饱和时的时空相矢量图

## ➤ 时空相矢量图的应用

可以分析的问题：

负载运行时的  $U$ 、 $I$ 、 $\cos\varphi$

① ↓ ② ↑

实际励磁磁动势  $F_f$  或励磁电流  $I_f$

前提条件：空载特性和参数  $R$ 、 $X_\sigma$  已知。

72



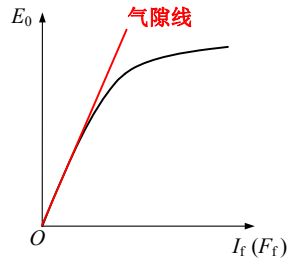
## 8.3 隐极同步发电机的时空相矢量图和相量图

## 2. 不计饱和时的情况

## (1) 不计饱和时的电磁关系

## ➤ 磁路线性化后的空载特性

- 实际空载特性的起始部分有一段基本上是直线，反映了主磁路线性时的磁化特性（主要是气隙磁路的）。
- 这段直线的延长线，称为**气隙线**，是电机主磁路不饱和时的空载特性。



73



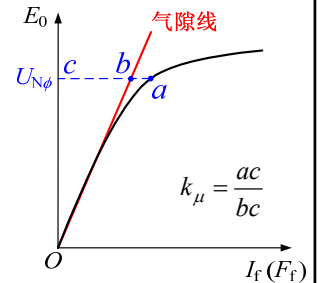
## (1) 不计饱和时的电磁关系

## ➤ 磁路线性化后的空载特性 (续)

关于磁路线性化所引起的误差

- 实际的同步电机，其空载额定电动势都设计在空载特性开始弯曲的部分。
- 主磁路的饱和程度可用饱和因数  $k_\mu$  来表示。  
(通常  $k_\mu = 1.1 \sim 1.2$ )

因此，磁路线性化所产生的计算误差通常是工程问题分析中允许的。



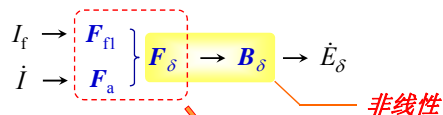
74



## (1) 不计饱和时的电磁关系

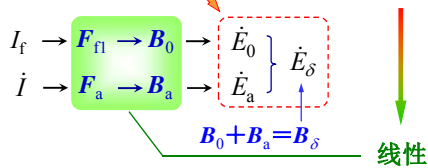
## ➤ 磁路线性化后的电磁关系

饱和时



不饱和时

可以应用叠加定理

 $\dot{E}_a$  : 一相电枢绕组的电枢反应电动势

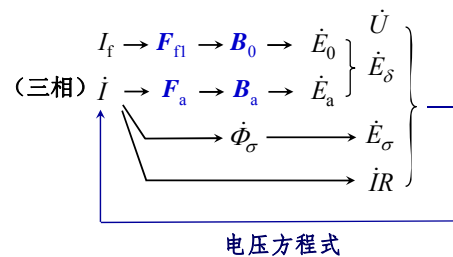
75



## (1) 不计饱和时的电磁关系

## ➤ 磁路线性化后的电磁关系 (续)

电磁关系归纳如下



电压方程式

76



## 2. 不计饱和时的情况

## (2) 不饱和时的电压方程式、相量图、等效电路

## ➤ 电压方程式

- 按发电机惯例，一相电枢绕组的电压方程式

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_\sigma = \dot{U} + \dot{I}R$$

- 将漏磁电动势  $\dot{E}_\sigma$  表示成电流在电抗上产生电压降的形式

$$\dot{E}_\sigma = -j\dot{I}X_\sigma$$

② 对  $\dot{E}_a$  如何处理

—— 也可以表示成电抗电压降的形式吗？

77



## (2) 不饱和时的电压方程式、相量图、等效电路

## ■ 电枢反应电抗的引入

磁路线性时，磁导  $\Lambda = \text{const}$ 

$$\text{(三相)} \quad i \xrightarrow{F_a \propto I} F_a \xrightarrow{B_a \propto F_a} B_a \xrightarrow{E_a \propto \Phi_a \propto B_a} \dot{E}_a$$

用常数  $X_a$  表示  $E_a$  与  $I$  的关系，即  $E_a = X_a I$ ，则

$$\dot{E}_a = -j\dot{I}X_a$$

- 电枢反应电抗  $X_a$  的物理意义

三相对称电枢电流产生的基波气隙磁通在一相电枢绕组中感应的基波电动势  $E_a$  与相电流  $I$  的比值。

78



(2) 不饱和时的电压方程式、相量图、等效电路

■ 影响电枢反应电抗  $X_a$  的因素

不计铁心磁阻 (铁心磁导  $\rightarrow \infty$ )

参见习题8-8

$$X_a = \frac{E_a}{I} = \frac{4.44 f N_1 k_{dp1} \Phi_a}{I} \Rightarrow X_a \propto \frac{f(N_1 k_{dp1})^2}{\delta}$$

结论: 在电机尺寸和极对数  $p$  一定时,  $X_a$

- 与频率  $f$ 、有效匝数的平方  $(N_1 k_{dp1})^2$  成正比;
- 与气隙长度  $\delta$  成反比。

(2) 不饱和时的电压方程式、相量图、等效电路

■ 同步电抗的引入

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_\sigma = \dot{U} + \dot{I}R$$

$$\dot{E}_a = -j\dot{I}X_a \quad \dot{E}_\sigma = -j\dot{I}X_\sigma$$

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}(X_\sigma + X_a) = \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}X_s$$

一相电枢绕组的同步电抗  $X_s = X_\sigma + X_a$

● 同步电抗  $X_s$  的物理意义

三相对称电枢电流产生的全部磁通 (气隙磁通 + 漏磁通) 在一相绕组中感应的基波电动势与相电流的比值。

(2) 不饱和时的电压方程式、相量图、等效电路

➤ 电动势相量图, 等效电路

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}(X_\sigma + X_a)$$

电动势相量图

等效电路

(2) 不饱和时的电压方程式、相量图、等效电路

➤ 电动势相量图, 等效电路 (续)

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}X_s$$

电动势相量图

等效电路

(2) 不饱和时的电压方程式、相量图、等效电路

➤ 电动势相量图, 等效电路 (续)

不计饱和时的电压方程式和相应的相量图、等效电路, 都是对电磁关系的近似, 是有误差的。

关于  $E_0$  的取值

- 用等效电路计算时, 只能用  $E'_0$  而不能用  $E''_0$ 。
- 求实际的空载电动势时, 不能用等效电路计算出的  $E'_0$ , 而要用  $E''_0$ 。

第8章 同步发电机的电磁关系和分析方法

### 8.4 凸极同步发电机的双反应理论和相量图

➤ 目的和内容

凸极同步发电机气隙不均匀, 如何确定对称负载运行时的电枢反应?

⇒ 双反应理论

- 双反应理论基于叠加定理;
- 只能分析磁路线性情况下的电磁关系;
- 采用双反应理论可得到电动势相量图。

## 8.4 凸极同步发电机的双反应理论和相量图

## 1. 凸极同步发电机的双反应理论

## (1) 面临的问题

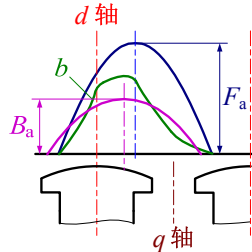
气隙不均匀

- 气隙磁通密度波发生畸变

基波  $B_\delta$  ( $B_a$ ) 会与  $F_\delta$  ( $F_a$ ) 在空间上不同相。

- 同样幅值的基波  $F_\delta$  (或  $F_a$ ) 位置不同  $\downarrow$  不同的气隙磁通密度  $b$  分布  $\downarrow$  不同的基波  $B_\delta$  (或  $B_a$ )

例如:  $F_a$  产生的气隙磁通密度



85

## (1) 面临的问题

- $B_\delta$  ( $B_a$ ) 的幅值和空间相位, 与产生它的  $F_\delta$  ( $F_a$ ) 的幅值和空间相位都有关。
- $F_a$  与负载的大小和性质有关。因此,  $F_\delta$  ( $F_a$ ) 的幅值和空间相位会随负载不同而变化。

因此,

- 无法找到一个适用于任意负载的确定的关系式, 来从  $F_\delta$  求出  $B_\delta$  的大小与相位, 进而求得电动势  $\dot{E}_\delta$ 。
- 不能直接用空载特性由  $F_\delta$  求得  $E_\delta$ 。

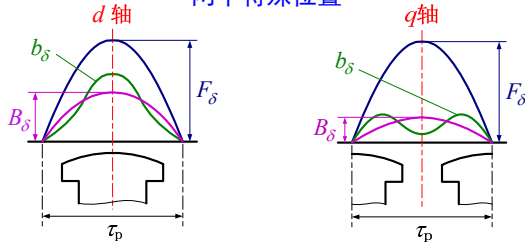
如何解决

86

## 1. 凸极同步发电机的双反应理论

## 启示

两个特殊位置



$d$ 、 $q$ 轴磁路对称  $\Rightarrow B_\delta$  与  $F_\delta$  同相 (基波)

$d$ 、 $q$ 轴磁路的磁导固定  $\Rightarrow B$  与  $F$  间有确定的数量关系

87

## 1. 凸极同步发电机的双反应理论

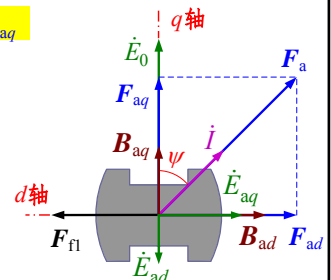
## (2) 凸极同步发电机的双反应理论

将正弦分布的基波电枢反应磁动势  $F_a$  分解成两个磁动势分量: 直轴分量  $F_{ad}$ 、交轴分量  $F_{aq}$ , 即

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

## 目的

- 使  $F_{ad}$ 、 $F_{aq}$  作用的磁路固定;
- 利用磁路对称性, 使基波磁通密度与产生它的基波磁动势同相, 并有确定的数量关系。



88

## 8.4 凸极同步发电机的双反应理论和相量图

## 2. 凸极同步发电机的电动势相量图

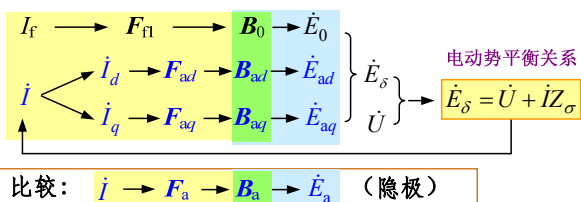
## (1) 基于双反应理论的电磁关系

不计磁路饱和, 应用叠加定理。

直轴分量

交轴分量

$$\dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q$$



比较:  $\dot{I} \rightarrow F_a \rightarrow B_a \rightarrow \dot{E}_a$  (隐极)

89

## 2. 凸极同步发电机的电动势相量图

## (2) 电压方程式

## 一相电枢绕组的电压方程式

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} = \dot{U} + \dot{I}(R + jX_\sigma)$$

- 因磁路线性, 故仍可将电枢反应电动势与电枢电流之间的关系通过电抗参数来表示:

$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d X_{ad}, \quad \dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_q X_{aq}$$

- 将漏电抗压降也分解为直、交轴两个分量, 即

$$j\dot{I}X_\sigma = j(\dot{I}_d + \dot{I}_q)X_\sigma = j\dot{I}_d X_\sigma + j\dot{I}_q X_\sigma$$

90



## (2) 电压方程式

由以上关系, 可得

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q$$

其中:

$$X_d = X_\sigma + X_{ad}, \quad X_q = X_\sigma + X_{aq}$$

$X_{ad}$ 、 $X_{aq}$  —— 一相电枢绕组的直轴、交轴电枢反应电抗。

$X_d$ 、 $X_q$  —— 一相电枢绕组的直轴、交轴同步电抗。

91



## (2) 电压方程式

➤ 电抗参数的物理意义

$X_{ad}$ 、 $X_{aq}$  分别表征三相直、交轴电枢电流 ( $I_d$ 、 $I_q$ ) 产生的基波气隙磁通 (电枢反应磁通) 在一相电枢绕组中感应的基波电动势与一相电枢电流直、交轴分量的比值, 是等效电抗。

电枢反应电抗的大小反映了电枢反应的强弱。

$X_d$ 、 $X_q$  分别表征三相直、交轴电枢电流 ( $I_d$ 、 $I_q$ ) 产生的总磁通 (基波气隙磁通+漏磁通) 在一相电枢绕组中感应的基波电动势与一相电枢电流直、交轴分量的比值, 也是等效电抗。

通常 (励磁时),  $X_{ad} > X_{aq} \Rightarrow X_d > X_q$

92



## 2. 凸极同步发电机的电动势相量图

## (3) 电动势相量图

➤ 相量图

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q$$

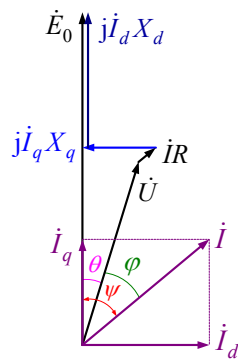
作出对应的电动势相量图。

$$I_d = I \sin \psi$$

$$I_q = I \cos \psi$$

问题:  $\psi$  角未知时, 电流无法分解。

② 如何确定  $\psi$  角



93



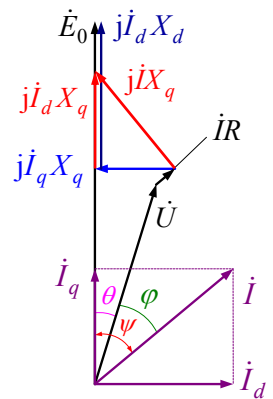
## (3) 电动势相量图

➤ 相量图的作法

已知  $U$ 、 $I$ 、 $\cos \varphi$  和参数

关键是确定  $\dot{E}_0$  的位置:

- $\dot{E}_0$  与  $j\dot{I}_d X_d$  是重合的。
- 将  $j\dot{I}_d X_d$  中的  $X_d$  改为  $X_q$ , 得到  $j\dot{I}_d X_q$  和  $j\dot{I}_q X_q$ ;
- 由  $j\dot{I}_q X_q$  的端点, 可确定  $\dot{E}_0$  的位置。



94



## (3) 电动势相量图

➤ 相量图的作法 (续)

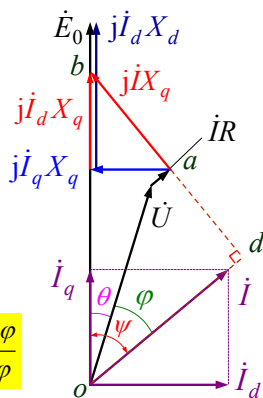
$\psi$  角的计算公式

$$\tan \psi = \frac{bd}{od} = \frac{ab + ad}{od}$$

$$\tan \psi = \frac{IX_q + U \sin \varphi}{IR + U \cos \varphi}$$

或

$$\psi = \varphi + \theta = \arctan \frac{IX_q + U \sin \varphi}{IR + U \cos \varphi}$$



95



## 2. 凸极同步发电机的电动势相量图

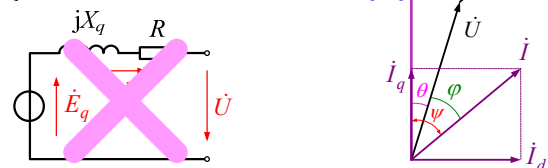
## (4) 凸极同步发电机的近似等效电路

$$\dot{E}_q = \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}_d X_q + j\dot{I}_q X_q = \dot{U} + \dot{I}R + j\dot{I}X_q$$

$$\dot{E}_0 = \dot{E}_q + j\dot{I}_d (X_d - X_q)$$

$\dot{E}_q$  与  $\dot{E}_0$  同相, 数量上接近。

用  $\dot{E}_q$  代替  $\dot{E}_0$ , 得近似等效电路。



96



## 小 结

- ✓ 同步发电机各电磁量的参考方向规定。
- ✓ 空间矢量，时空相矢量图；  
时空相矢量图的作法、特点及应用。
- ✓ 三相同步电机电枢反应及其性质。
- ✓ 三相隐极同步发电机的电磁关系（饱和、不饱和）；电压方程式、相量图（饱和、不饱和）。

97



## 小 结 (续)

- ✓ 三相凸极同步发电机的电磁关系（不饱和）；电压方程式、电动势相量图及其作法（不饱和）。
- ✓ 电枢反应电抗和同步电抗的物理意义，影响同步电抗大小的因素。
- ✓ 同步电机的标幺值，基值的选取。

98



## 小 结 (续)

## ✓ 主要概念

空载运行，空载特性，气隙线  
电枢反应，内功率因数角，增磁、去磁、交磁  
电枢反应磁动势，合成磁动势  
电枢反应电动势，空载电动势，气隙电动势  
电枢反应电抗，同步电抗，漏电抗  
双反应理论  
直、交轴电枢反应电抗，直、交轴同步电抗  
时间相量，空间矢量，时空相矢量图  
电压方程式，电动势相量图

99



## 第9章 同步发电机的运行特性

## ▼ 学习目标

- 了解同步发电机的基本运行特性，能根据电磁关系定性分析这些特性的规律
- 熟练掌握利用空载特性和短路特性求取同步电抗（不饱和值）的方法
- 掌握同步发电机在对称短路和带零功率因数负载稳态运行时的电磁关系
- 了解同步发电机同步电抗、漏电抗的数值大小

100



## 概 述

**运行特性：**在转速恒定、负载功率因数不变的条件下，定子端电压 $U$ 、负载电流 $I$ 和励磁电流 $I_f$ 三者之一保持为常数时，其他两个量之间的函数关系。

- 空载特性： $I=0$ 时， $E_0=f(I_f)$
- 短路特性： $U=0$ 时， $I=f(I_f)$
- 负载特性： $I=\text{const}$ 时， $U=f(I_f)$
- 电压调整特性（外特性）：  
 $I_f=\text{const}$ 时， $U=f(I)$
- 调整特性： $U=\text{const}$ 时， $I_f=f(I)$

101



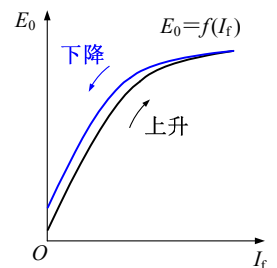
## 9.1 同步发电机的空载特性、短路特性和同步电抗的测定

## 1. 空载特性

## (1) 空载特性的测定

## ➤ 空载试验

- 发电机电枢绕组开路；
- 由原动机拖动，以同步转速（额定转速） $n_1$ 旋转；
- 使励磁电流 $I_f$ 从 $0 \rightarrow \text{max}$ 和从 $\text{max} \rightarrow 0$ ，得到上升、下降两条曲线。  $\Rightarrow$  原因：磁滞效应



102

(1) 空载特性的测定

空载特性的特点

- 上升、下降两条曲线差别不大
  - 线性段斜率相差不多;
  - 饱和段很接近。
- 通常取下降曲线作为空载特性, 最高电压一般取  $E_0 = 1.2 \sim 1.3$ 。
- $E_f$  较大时, 应对曲线进行校正, 使之过原点。
- 空载特性用 **标么值** 表示时, 必过 (1, 1) 点。

$E_{01}$ 、 $E_{02}$ : 剩磁感应电动势

1. 空载特性

(2) 空载特性的用途

- 空载试验是电机出厂时的基本试验之一。
- 能够检验:
  - 励磁系统的工作情况
  - 电枢绕组联结的正确性 (三相对称性、相序)
  - 电机磁路的饱和程度
  - 磁路过于饱和时, 励磁绕组用铜量增加, 电压调节困难。
  - 磁路不饱和时, 铁磁材料用量增加, 负载运行时电压变化较大。

9.1 同步发电机的空载特性、短路特性和同步电抗的测定

2. 短路特性  $I_k = f(I_f)$

(1) 三相稳态短路时的电磁关系

电枢三相绕组出线端短路。

短路电流  $I_k$  随  $I_f$  变化规律

以隐极同步发电机为例。

$$\dot{E}_\delta = \dot{U} + \dot{I}_k(R + jX_\sigma)$$

$$\dot{U} = 0$$

$$\dot{E}_\delta = \dot{I}_k(R + jX_\sigma) = \dot{I}_k Z_\sigma$$

$$I_k |Z_\sigma| \text{ 很小} \Rightarrow E_\delta \text{ 很小} \Rightarrow B_\delta \text{ 很小} \Rightarrow \begin{cases} \text{磁路不饱和} \\ F_\delta \text{ 很小} \end{cases}$$

$I_k$ : 对称稳态短路电流

(1) 三相稳态短路时的电磁关系

用时空相矢量图进行分析

电枢反应性质为 **直轴去磁** (忽略  $R$  时)

不饱和

$$F_\delta \propto E_\delta \propto I_k \quad F_a \propto I_k$$

$$F_\delta = F_{f1} - F_a$$

$$F_{f1} \propto I_k$$

$I_k$  与  $I_f$  是线性关系 ( $I_k \propto I_f$ )

2. 短路特性

(2) 短路特性的测定

通过短路试验测得短路特性。

短路试验也是电机出厂时的基本试验之一。

短路试验

- 将电枢绕组出线端短接;
- 再将发电机转至额定转速 (即同步转速  $n_1$ );
- 改变  $I_f$ , 测得短路特性。

结论: 短路特性  $I_k = f(I_f)$  是一条直线。

9.1 同步发电机的空载特性、短路特性和同步电抗的测定

3. 同步电抗的测定

隐极同步发电机

短路试验时磁路线性,  $U=0$

$$\dot{E}_0 = \dot{I}_k R + j\dot{I}_k X_\sigma + j\dot{I}_k X_a$$

忽略  $R$

$$\dot{E}_0 = j\dot{I}_k X_s$$

$$X_s = \frac{E_0}{I_k} \quad (\text{不饱和值})$$



### 3. 同步电抗的测定

➤ 隐极同步发电机 (续)

通过空载试验和短路试验求取同步电抗的不饱和值。

①  $I_k$  短路特性  $\rightarrow I_{f1}$

②  $I_{f1}$  气隙线  $\rightarrow E_0$

③  $X_s = \frac{E_0}{I_k}$  (不饱和值)

### 3. 同步电抗的测定

➤ 凸极同步发电机

三相稳态短路时, 忽略  $R$ , 有

$$\dot{E}_q = j\dot{I}_k X_q$$

则相电流  $\dot{I}_k$  滞后  $\dot{E}_0$   $90^\circ$ ,

$$\dot{I}_d = \dot{I}_k, \quad \dot{I}_q = 0$$

$$\dot{E}_0 = j\dot{I}_k X_d \Rightarrow X_d = \frac{E_0}{I_k} \text{ (不饱和值)}$$

结论: 由空载试验和短路试验可求取直轴同步电抗的不饱和值。

## 第9章 同步发电机的运行特性

### 9.2 同步发电机的零功率因数负载特性和保梯电抗的测定

#### 1. 零功率因数负载特性

(1) 定义

- 负载特性: 在  $n=n_N$ 、 $\cos\varphi=\text{const}$  和  $I=\text{const}$  的条件下, 发电机端电压  $U$  与励磁电流  $I_f$  的关系。
- 零功率因数负载特性 ——  $\cos\varphi=0$  时的负载特性。

零功率因数负载特性可用来确定:

- 电枢绕组的漏电抗
- 特定负载电流下的电枢反应磁动势

### 1. 零功率因数负载特性

(2) 零功率因数负载特性试验方法

- 将同步发电机拖动至同步转速  $n_1$  空载运行, 再将电枢绕组接至一个可变的三相对称纯电感负载 ( $\cos\varphi\approx 0$ );
- 保持  $n=n_1$ , 同时调节  $I_f$  和负载电抗  $X$  的大小, 使负载电流  $I=\text{const}$  (例如  $I=I_N$ ), 则  $U=IX$  随电抗  $X$  变化;
- 记录各  $I_f$  下的  $U$  值, 可得零功率因数负载特性  $U=f(I_f)$ 。

### 1. 零功率因数负载特性

(3) 零功率因数负载运行时的电磁关系

利用时空相矢量图 (忽略  $R$ ) 进行分析

- 零功率因数 (纯电感) 负载时, 电枢反应性质为直轴去磁, 即  $F_{ad}=F_a$ ,  $F_{aq}=0$ 。
- 电动势和磁动势的相、矢量关系可简化为代数关系:

$$E_\delta = U + IX_\sigma$$

$$F_\delta = F_{f1} - F_a$$

### 1. 零功率因数负载特性

(4) 零功率因数负载特性与空载特性的关系

➤ 利用  $E_0=f(I_f)$  作出  $U=f(I_f)$

$$E_\delta = U + IX_\sigma$$

$$F_\delta = F_{f1} - F_a$$

■ 额定电压点

- 由  $E_\delta = U_{N\phi} + IX_\sigma$ , 得点  $k$ ;  
 $U_{N\phi}$ : 额定相电压
- 作  $km \perp bc$  的延长线, 则  
 $km = IX_\sigma$   
 $bm$  = 产生  $E_\delta$  所需的等效  $I_f$
- 作  $mn$  = 克服  $F_a$  所需的等效  $I_f$ ;  
则  $n$  为  $U=f(I_f)$  上的一点。

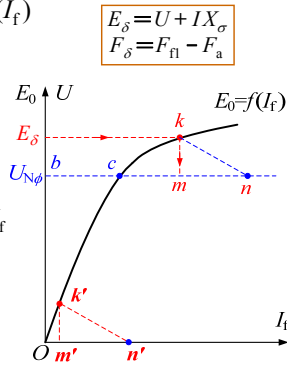


## (4) 零功率因数负载特性与空载特性的关系

► 利用  $E_0 = f(I_f)$  作出  $U = f(I_f)$

■  $U=0$  即短路点 ( $I$  不变)

- 由  $E_\delta = I X_\sigma$ , 得点  $k'$ 。
- 作  $k'm' \perp$  横轴, 则  $k'm' = km = I X_\sigma$   
 $Om' =$  产生  $E_\delta$  所需的等效  $I_f$
- 作  $m'n' = mn$  克服  $F_a$  所需的等效  $I_f$ , 则  $n'$  也是  $U = f(I_f)$  上的一点。



115



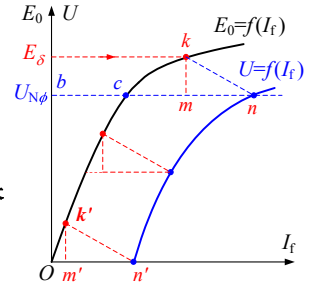
## (4) 零功率因数负载特性与空载特性的关系

■ 其他点

同理可作; 连各点可得  $U = f(I_f)$ 。

► 两个特性的关系

- $U = f(I_f)$  与  $E_0 = f(I_f)$  之间总是相差一个直角三角形  $kmn$ ; 该三角形称为特性三角形。
- 因  $I = \text{const}$ , 故直角边长  $km = I X_\sigma = \text{const}$ ,  
 $mn = \text{const}$ 。



116



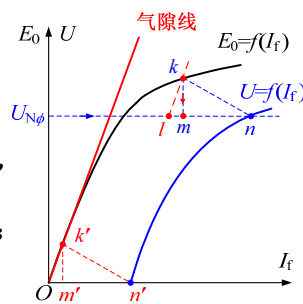
## 1. 零功率因数负载特性

(5) 利用空载特性和零功率因数负载特性求取电枢绕组漏电抗

关键: 如何作出  $\triangle kmn$

- ✓  $\triangle kmn \cong \triangle k'm'n'$
- ✓ 点  $k'$  在气隙线上

- 由点  $n$ , 作  $nl = n'O$ ;
- 从点  $l$  作气隙线的平行线, 交空载特性于点  $k$ ;
- 从点  $k$  作  $kn$  的垂线, 得点  $m$ ;
- $X_\sigma = \frac{km \text{ 代表的相电动势}}{\text{相电流 } I}$ 。



117

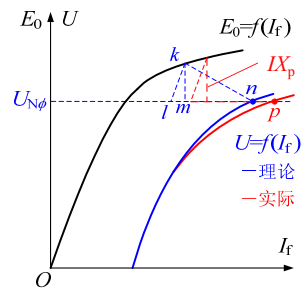


## 9.2 同步发电机的零功率因数负载特性和保梯电抗的测定

## 2. 保梯电抗

- 实测的零功率因数负载特性曲线, 在电压较高时, 比理论上的零功率因数曲线要低。
- 这样测得的稍大的漏电抗, 称为保梯(Potier)电抗, 用  $X_p$  表示。

$$X_p > X_\sigma$$



118

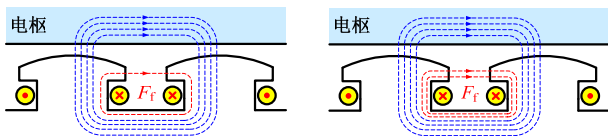


## 2. 保梯电抗

► 实测  $U = f(I_f)$  偏低 ( $X_p > X_\sigma$ ) 的原因

零功率因数负载运行时,  $I_f$  比空载时大得多, 转子漏磁通增加, 使转子磁极饱和程度提高。

因此, 产生同样的气隙磁通, 实际需要的  $I_f$  比其理论值要大。



119



## 第9章 同步发电机的运行特性

附: 三相同步电机的参数 (标么值)

	$X_d$ (不饱和值)	$X_q$	$X_p$
汽轮发电机	0.90~2.5 (1.70)	$\approx 0.9X_d$	0.10~0.26 (0.18)
凸极发电机	0.65~1.6 (1.15)	0.40~1.0 (0.75)	0.17~0.40 (0.32)
凸极电动机	1.5~2.2 (1.8)	0.95~1.4 (1.15)	

注: 括号中数值为多数电机参数的平均值。

120

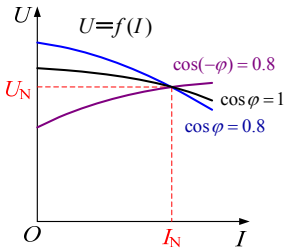


## 第9章 同步发电机的运行特性

## 9.3 同步发电机的电压调整特性和调整特性

## 1. 电压调整特性 (外特性)

- 定义: 同步发电机在  $n = n_N$ ,  $\cos\varphi = \text{const}$ ,  $I_f = \text{const}$  的条件下, 端电压  $U$  和负载电流  $I$  的关系曲线。
- $U=f(I)$  反映在某种性质的负载下, 端电压  $U$  随负载大小变化而变化的情况。
- $\cos\varphi$  不同,  $U$  随  $I$  变化的趋势有所不同。



121

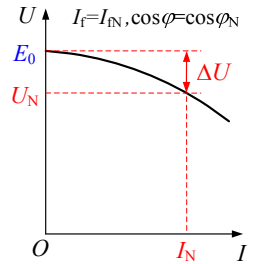


## 1. 电压调整特性 (外特性)

## 电压调整率

- 由电压调整特性, 可直接求出电压调整率  $\Delta U$ 。
- 定义: 保持发电机额定运行时 ( $U_N$ ,  $I_N$ ,  $\cos\varphi_N$ ) 的额定励磁电流  $I_{fN}$  和转速  $n_N$  不变, 去掉全部负载后, 空载电动势为  $E_0$ , 则

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_N}{U_N} \times 100\%$$

(式中  $E_0$  和  $U_N$  同为相值或线值)

④ 为什么  $U$  与  $E_0$  不同  
为什么  $U$  随  $I$  变化

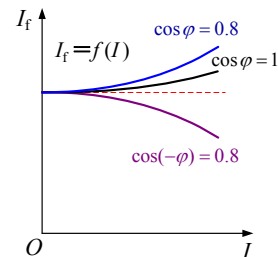
122



## 9.3 同步发电机的电压调整特性和调整特性

## 2. 调整特性

- 同步发电机的负载电流  $I$  变化时, 为保持端电压不变, 须同时调节励磁电流  $I_f$ 。
- 定义: 同步发电机当  $n = n_N$ ,  $\cos\varphi = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$  时, 励磁电流  $I_f$  与负载电流  $I$  的关系曲线  $I_f = f(I)$ 。



④ 调整特性为什么是这样的

123



## 第9章 同步发电机的运行特性

## 小结

- ✓ 三相同步发电机的稳态运行特性
  - 空载特性, 负载特性, 短路特性
  - 电压调整特性 (外特性), 调整特性
- 正常稳态运行时, 主要有两条特性: 电压调整特性、调整特性。
- 电压调整特性说明负载变化而励磁电流不变时端电压的变化情况; 调整特性则说明负载变化时, 为保持端电压恒定, 励磁电流的调节规律。
- 空载特性、短路特性、零功率因数负载特性可用于测定发电机电抗参数。

124



## 第9章 同步发电机的运行特性

## 小结 (续)

- ✓ 三相同步发电机对称短路和零功率因数负载运行时的电磁关系 (电枢反应的性质)。
- ✓ 同步电抗 (不饱和值) 的确定。
- ✓ 电枢绕组漏电抗的测定。
- ✓ 主要概念
  - 空载特性, 短路特性
  - 零功率因数负载特性
  - 电压调整特性 (外特性), 调整特性, 电压调整率

125



## 第3篇 同步电机

## 第10章 同步发电机的并联运行

## 学习目标

- 同步发电机并联运行与独立运行的异同
- 同步发电机并联合闸条件
- 并联运行时有功功率调节的原理, 功率及转矩平衡关系, 功角特性 (隐极、凸极)
- 并联运行时无功功率调节的原理、方法
- 并联运行的定性、定量分析

126



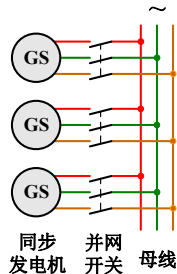
## 第10章 同步发电机的并联运行

## 概述

## 1. 并联运行的优点

发电厂中, 几台同步发电机接在共同的母线上并联运行; 一个电力系统(电网)中, 有许多发电厂并联运行。

- 提高供电的可靠性和品质, 降低备用容量。
- 合理利用能源资源和发电设备, 降低电能生产成本。
- 系统越大, 负载越趋于均匀。
- 使发电厂的布局更合理。



127



## 概述

## 2. 运行条件的差别

- 发电机独立运行(单独供电)时

端电压的频率由 原动机转速 决定;  
大小可通过调节 励磁电流 来控制。  
(按照调整特性)

- 发电机并联运行时

若电网容量远大于一台发电机的容量, 则调节一台发电机的功率, 对电网电压和频率的影响极小, 电网电压的大小、频率都可认为是不可变的, 即

调节 原动机转速 不能改变发电机端电压的大小;  
励磁电流 频率;

128



## 概述

## 3. 本章讨论的问题

- 如何并联到无限大电网上运行;
- 一台同步发电机 并联到无限大电网后, 如何调节其向电网发出的有功、无功功率。

## ■ 无限大电网

电网容量远大于并联其上的一台同步发电机的容量时, 对一台发电机而言, 该电网可视为无限大电网。

**无限大电网对并联运行的一台同步发电机的约束:**

电压  $U = \text{const}$ ;

频率  $f = \text{const} \Rightarrow \text{稳态转速 } n = n_1 = \text{const}。$

129

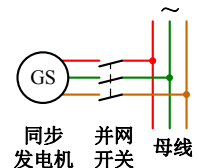


## 第10章 同步发电机的并联运行

## 10.1 同步发电机并联合闸的条件和方法

## 1. 并联合闸条件

- 将一台空载运行的同步发电机投入一个已向用户供电的电网, 即并联合闸。
- 为避免并联合闸时产生电流冲击, 应使发电机空载电动势和电网电压的瞬时值相等。



合闸时, 发电机与电网的电压应满足以下 4 个条件:

- ① 幅值相等, 波形一致;
- ② 频率相等;
- ③ 相位相同;
- ④ 相序一致。

130



## 10.1 同步发电机并联合闸的条件和方法

## 2. 并联合闸方法

## ■ 准确同步法

- 调节到(基本)符合并联合闸条件时才合闸并网。

- 最简单的方法 —— 灯光法
  - 暗灯法
  - 灯光旋转法

## ■ 自同步法

操作和设备简单, 但合闸和投励时有电流冲击;  
通常在要把发电机很快并入电网时采用(如故障时)。

131



## 第10章 同步发电机的并联运行

## 10.2 同步发电机并联运行分析

## ➤ 并联合闸后的状况

- 在并联合闸4个条件都满足时合闸, 发电机空载相电动势与电网相电压的大小、相位都相同, 即

$$\dot{E}_0 = \dot{U}$$

- 合闸后, 发电机电枢电流  $I = 0$ , 仍处于空载运行工况(励磁电流为  $I_{f0}$ )。

## ➤ 并联运行时的可调节量

- ① 励磁电流;
- ② 原动机的拖动转矩

以隐极发电机为例, 分析两种调节后发生的变化。

132

### 10.2 同步发电机并联运行分析

#### 1. 调节励磁电流

用时空相矢量图进行分析 (不计电阻  $R$ )。

$$i = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jX_s} = 0$$

未调节,  
 $I_f = I_{f0}$ 时

$$\begin{cases} \dot{I}_d = \dot{I} \\ \dot{I}_q = 0 \end{cases}$$

调节使  $I_f > I_{f0}$  时

调节使  $I_f < I_{f0}$  时

### 1. 调节励磁电流

#### ■ 结论

- 对于并联在无限大电网运行的同步发电机, **改变励磁电流, 可调节它向电网发出的无功功率。**
- 发电机并联并网后

励磁电流调节	电流相位	发出无功功率性质
$I_f > I_{f0}$ 时	$\dot{I}$ 滞后 $\dot{U}$ $90^\circ$	<b>电感性</b> (滞后)
$I_f < I_{f0}$ 时	$\dot{I}$ 超前 $\dot{U}$ $90^\circ$	<b>电容性</b> (超前)

- 改变励磁电流不能使发电机输出或输入有功功率。**  
( $\varphi = \pm 90^\circ$ , 矢量  $B_\delta$  与  $F_\delta$  的夹角  $\theta' = 0$ )

### 10.2 同步发电机并联运行分析

#### 2. 调节原动机转矩

同步发电机并联于无限大电网运行时, **发电机所需的机械能 (机械功率) 由原动机提供。**

(1) 未调节原动机转矩时的功率平衡关系

在并联并网条件都满足的情况下, 并网后, 发电机输出有功功率  $P_2 = 0$ , 原动机只需提供发电机的功率**损耗**。

$$P_1 = P_0 = P_{Fe} + P_m$$

$P_1$  —— 发电机输入功率, 即原动机输出的机械功率;  
 $P_{Fe}$ 、 $P_m$ 、 $P_0$  —— 发电机的铁耗、机械损耗、空载损耗。

### 2. 调节原动机转矩

(2) 未调节原动机转矩时的转矩平衡关系

与功率平衡关系相对应的是转矩平衡关系:

$$\frac{P_1}{\Omega} = \frac{P_0}{\Omega} \implies T_1 = T_0$$

$\Omega$  为机械角速度,  $\Omega = \Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f_1}{p}$

$T_1$  —— 原动机的拖动转矩, 即发电机的输入转矩;

$T_0$  —— 发电机的**空载转矩**, 即与空载损耗相对应的**制动性转矩** (与旋转方向相反)。

$$T_1 = \frac{P_1}{\Omega}$$

$$T_0 = \frac{P_0}{\Omega}$$

### 2. 调节原动机转矩

(3) 增大原动机的拖动转矩所引起的变化

拖动转矩  $T_1 > T_0$ , 转子原来的转矩平衡状态被破坏, 转子要加速。

$T_1 = T_0$  时  

(忽略  $R$ )  
( $\theta' = 0$ )

$T_1 > T_0$  后  

转子加速,  
使  $F_\delta$  超前  $B_\delta$   
一个角度  $\theta'$

### (3) 增大原动机的拖动转矩所引起的变化

- $\theta'$  角出现后转子受到电磁力作用, 产生**电磁转矩  $T$** 。
- $T$  与  $n_1$  的方向相反, 企图减小  $\theta'$  角, 是**制动性转矩**。
- 气隙磁通和  $I_f$  一定时,  $T \propto \sin \theta'$ , 即  **$T$  有最大值**。
- 只要  $T_1$  不超过  $T$  的最大值,  $T$  就能**自动**与  $T_1$  相平衡, 达到新的稳态。

代表气隙合成磁场的磁极  
定子  
转子磁极





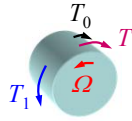
## 2. 调节原动机转矩

## (4) 稳态运行时的转矩、功率平衡方程式

## ► 转矩平衡方程式

按右图规定转矩的参考方向, 得

$$T_1 = T + T_0$$



即: 发电机的输入转矩  $T_1$  (拖动转矩) 等于电磁转矩  $T$  与空载转矩  $T_0$  之和 (制动转矩)。

139



## (4) 稳态运行时的转矩、功率平衡方程式

## ► 功率平衡方程式

在转矩平衡方程式两边同乘机械角速度  $\Omega$ , 得

$$T_1 \Omega = T \Omega + T_0 \Omega$$

即

$$P_1 = P_{em} + P_0$$

- 输入功率  $P_1 = T_1 \Omega$   
(即原动机输出的机械功率)
- 电磁功率  $P_{em} = T \Omega$
- 空载损耗  $p_0 = T_0 \Omega$

140



## (4) 稳态运行时的转矩、功率平衡方程式

## ► 功率平衡方程式 (续)

■ 电磁功率  $P_{em}$ 

$P_{em}$  既是电磁转矩  $T$  吸收的机械功率 ( $= T \Omega$ ), 也是通过气隙合成磁场传递到定子绕组中的电功率,

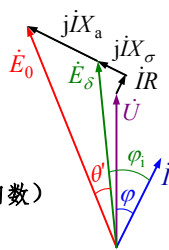
$$P_{em} = m E_\delta I \cos \varphi_1 = m E_0 I \cos \psi$$

$$= m UI \cos \varphi + m I^2 R \quad (m \text{ 为相数})$$

即

$$P_{em} = P_2 + p_{Cu}$$

- 发电机输出功率  $P_2 = m UI \cos \varphi$
- 发电机定子铜耗  $p_{Cu} = m I^2 R$



141

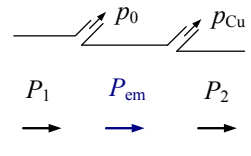


## (4) 稳态运行时的转矩、功率平衡方程式

## ► 同步发电机的功率流程图

$$P_1 = P_{em} + p_0$$

$$P_{em} = P_2 + p_{Cu}$$



- 电磁功率  $P_{em}$  表明发电机通过电磁感应作用, 将机械功率转换为电功率。
- $P_{em}$  既可表示成机械功率,  $T \Omega$   
也可表示成电功率,  $m E_\delta I \cos \varphi_1 = m UI \cos \varphi + m I^2 R$

142



## 第10章 同步发电机的并联运行

## 10.3 同步发电机的功角特性

- 将电磁功率  $P_{em}$  用下列 3 个物理量表示:

相电压  $U$  等于电网相电压

空载相电动势  $E_0$  不计饱和时,  $E_0 \propto I_f$   
 $\dot{E}_0$  与  $\dot{U}$  的夹角  $\theta$

- 电枢绕组电阻  $R$  远小于额定频率下的同步电抗, 通常忽略不计。则

$$P_{em} = P_2 = m UI \cos \varphi = m UI \cos (\psi - \theta)$$

143



## 10.3 同步发电机的功角特性

以凸极发电机为例 (不计饱和)

从电动势相量图可得

$$P_{em} = m UI (\cos \psi \cos \theta + \sin \psi \sin \theta)$$

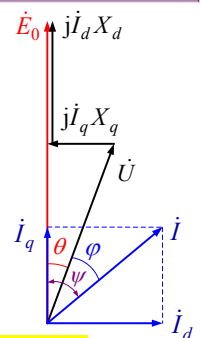
$$= m UI I_q \cos \theta + m UI I_d \sin \theta$$

由电抗压降  $I_d X_d$ 、 $I_q X_q$  可得

$$I_d = \frac{E_0 - U \cos \theta}{X_d}, \quad I_q = \frac{U \sin \theta}{X_q}$$

代入  $P_{em}$  表达式, 得功角特性表达式

$$P_{em} = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \theta + m U^2 \frac{X_d - X_q}{2 X_d X_q} \sin 2\theta$$



144



## 10.3 同步发电机的功角特性

## ■ 讨论

- $\theta$  为  $\dot{E}_0$  超前  $\dot{U}$  的角度, 称为**功角**。
- 凸极同步发电机的功角特性由两部分组成。
  - ◆ 第1部分:  $P'_{em} = m \frac{E_0 U}{X_d} \sin \theta$   
 $P'_{em}$  与  $E_0$  成正比, 必须有  $I_f$  才能产生, 是  $I_f$  在气隙磁场中产生电磁力而引起的**励磁电磁功率**。
  - ◆ 第2部分:  $P''_{em} = m U^2 \frac{X_d - X_q}{2 X_d X_q} \sin 2\theta$   
 $P''_{em}$  产生的条件:  
 (a) 有  $U$  ( $\propto U^2$ ); (b)  $X_d \neq X_q$  (凸极) (**内因**)。

145



## 10.3 同步发电机的功角特性

## ■ 讨论 (续)

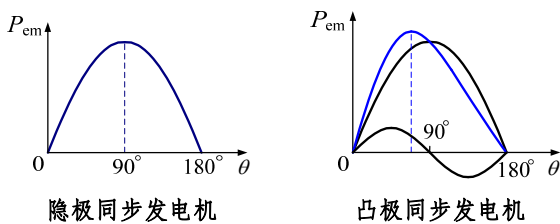
- $P''_{em}$  是气隙磁场吸引凸极铁磁体产生的电磁力所引起的, 称为**凸极电磁功率**。  $P''_{em}$  的最大值通常小于  $P'_{em}$  的最大值 (发电机主要依靠励磁来产生电磁转矩和电磁功率)。
- 隐极同步发电机,  $X_d = X_q = X_s$ , 没有凸极电磁功率, 电磁功率是励磁电磁功率, 其功角特性为
 
$$P_{em} = m \frac{E_0 U}{X_s} \sin \theta$$
 即电磁功率  $P_{em}$  与功角  $\theta$  为**正弦函数**关系。
- 不同的励磁电流  $I_f$  下, 有不同的功角特性。

146



## 10.3 同步发电机的功角特性

## ► 功角特性曲线



隐极发电机, 最大电磁功率出现在  $\theta = 90^\circ$  处。  
 凸极

147



## 第10章 同步发电机的并联运行

## 10.4 无功功率调节和V形曲线

## 1. 无功功率的调节

无功功率  $Q$  的调节通过改变励磁电流  $I_f$  来实现  
 仅调节  $I_f$  而不改变  $T_1$  时, 发电机的有功功率不变

以隐极发电机为例。设输出功率  $P_2$  保持不变, 即  
 $P_2 = m U I \cos \varphi = \text{const}$

忽略电枢绕组电阻  $R$ , 则  $P_{em} = m \frac{E_0 U}{X_s} \sin \theta = P_2 = \text{const}$   
 因  $m$ 、 $U$ 、 $X_s$  均为常数, 则

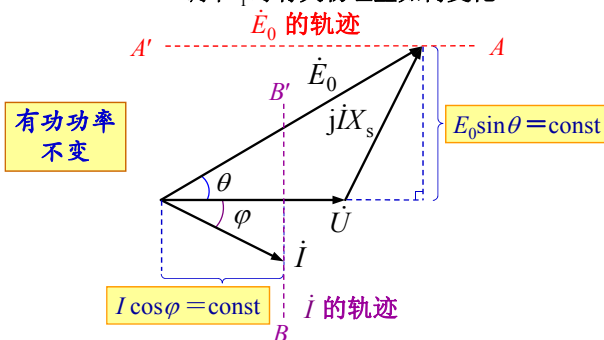
$$I \cos \varphi = \text{const}, \quad E_0 \sin \theta = \text{const}$$

148



## 1. 无功功率的调节

用相量图分析: 在保持发电机有功功率不变的条件下,  
 调节  $I_f$  时有关物理量如何变化?



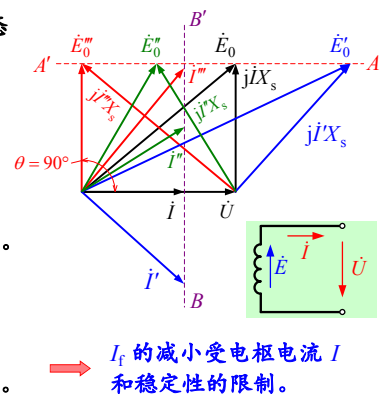
149



## 1. 无功功率的调节

## 考察不同的励磁状态

- ① 正常励磁  
使发电机  $Q=0$ 。
- ② 过励  
 $I_f >$  正常励磁。  
发电机发出**电感性**  
(滞后) 无功功率。
- ③ 欠励  
 $I_f <$  正常励磁。  
发电机发出**电容性**  
(超前) 无功功率。



150

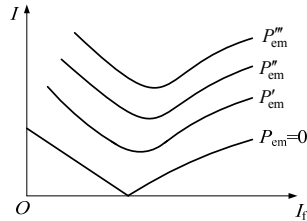


## 10.4 无功功率调节和V形曲线

## 2. 同步发电机的V形曲线特性

发电机运行时, 电枢电流  $I$  和励磁电流  $I_f$  是主要监视的两个量, 关系到电枢绕组和励磁绕组的温升、功率因数和运行稳定性。

- 把不同负载下  $I$  和  $I_f$  的关系画成曲线  $I = f(I_f)$ , 称为 **V形曲线特性**。
- V形曲线特性可通过负载试验测得; 也可利用相量图求出。



151



## 第10章 同步发电机的并联运行

## 小 结

- ✓ 无限大电网对同步发电机的约束条件; 独立运行与并联运行时运行条件的差别。
- ✓ 并联合闸条件。
- ✓ 同步发电机的功率平衡方程式和转矩平衡方程式; 功率和转矩之间的关系; 电磁功率的意义, 电磁转矩的性质。
- ✓ 同步发电机并联运行时有功功率和无功功率的调节方法; 有功功率调节对无功功率的影响。

152



## 第10章 同步发电机的并联运行

## 小 结 (续)

- ✓ 同步发电机(隐极、凸极)的功角特性。
- ✓ 同步发电机并联运行时励磁状态对无功功率(大小、性质)的影响。
- ✓ 运用功率平衡方程式、功角特性和电动势相量图, 分析有功功率、无功功率调节时有关物理量( $P$ 、 $Q$ 、 $\cos\varphi$ 、 $I$ 、 $I_f$ 、 $\theta$ 等)的变化规律。

153



## 第10章 同步发电机的并联运行

## 小 结 (续)

- ✓ 主要概念  
无限大电网  
电磁功率、输入功率、输出功率、空载损耗  
励磁电磁功率, 凸极电磁功率  
电磁转矩, 空载转矩, 输入转矩  
功角, 功角特性  
励磁状态: 正常励磁、过励(磁)、欠励(磁)

154



## 第3篇 同步电机

## 第11章 同步电动机

## ▼ 学习目标

- 理解同步电机的两种运行状态(发电机、电动机)的可逆性
- 熟练掌握电动机惯例与发电机惯例的异同以及判断同步电机运行状态的方法
- 掌握同步电动机的功率、转矩平衡关系和功角特性
- 理解同步电动机无功功率调节的原理、方法
- 了解同步电动机启动时存在的问题和启动方法

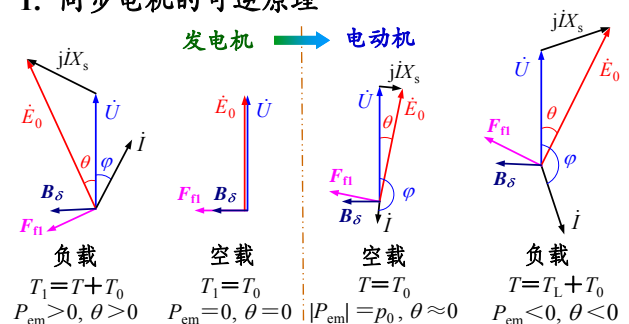
155



## 第11章 同步电动机

## 11.1 同步电动机的运行分析

## 1. 同步电机的可逆原理



156

1. 同步电机的可逆原理

在按发电机惯例作出的相量图中:

- $\varphi > 90^\circ$ ,  $P_2 = mUI \cos \varphi < 0$   
说明实际上从电网吸收有功功率。
- $\theta < 0$ ,  $P_{em} = m \frac{E_0 U}{X_s} \sin \theta < 0$   
说明电机实际上吸收电功率, 转换为机械功率。

所以, 电机运行在电动机状态。

**可逆原理:** 一台旋转电机, 在一种条件下可运行于发电机状态, 在另一种条件下可运行于电动机状态。

1. 同步电机的可逆原理

如何判断一台同步电机的运行状态?

根据电磁功率  $P_{em}$  或功角  $\theta$  的正负

按发电机惯例:

- $\theta > 0$ , 为发电机;
- $\theta < 0$ , 为电动机。

即

发电机:  $\dot{E}_0$  超前  $\dot{U}$

电动机:  $\dot{U}$  超前  $\dot{E}_0$

11.1 同步电动机的运行分析

2. 同步电动机的电压方程式和相量图

(1) 电动机惯例

用发电机惯例也可以分析同步电动机。但  $\varphi > 90^\circ$ ,  $\theta < 0$ , 不够方便。因此, 改用电动机惯例。

发电机惯例  $\longleftrightarrow$  电动机惯例

电流参考方向反向

(参见习题8-6)

2. 同步电动机的电压方程式和相量图

(2) 电压方程式

按电动机惯例列出电压方程式。

隐极同步电动机

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_\sigma + \dot{I}R$$

$$\Downarrow \quad \dot{E}_a = j\dot{I}X_a, \quad \dot{E}_\sigma = j\dot{I}X_\sigma$$

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}R + j\dot{I}X_s$$

凸极同步电动机

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}R + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q$$

2. 同步电动机的电压方程式和相量图

(3) 电动势相量图

按电动机惯例:

- $P_1 = mUI \cos \varphi > 0$ , 表示吸收电功率。
- $\dot{U}$  超前  $\dot{E}_0$ ,  $\theta > 0$ ,  $P_{em} > 0$ , 表示电功率转换为机械功率。
- $Q = mUI \sin \varphi < 0$ , 表示吸收电感性无功功率 (发出电感性无功功率)。

隐极电动机 凸极电动机

11.1 同步电动机的运行分析

3. 同步电动机的功率和转矩平衡关系

(1) 功率平衡方程式

$$P_1 = P_{em} + p_{Cu}$$

$$P_{em} = P_2 + p_0$$

功率流程图

- $P_1$  为电动机的输入功率 (电功率),  $P_1 = mUI \cos \varphi$
- $P_2$  为电动机的输出功率 (机械功率),  $P_2 = T_2 \Omega = T_L \Omega$  ( $T_L$  为负载转矩)
- $p_{Cu}$ 、 $p_0$  分别为电动机的铜耗和空载损耗。

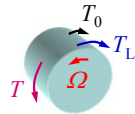


## 3. 同步电动机的功率和转矩平衡关系

## (2) 转矩平衡方程式

以转矩的实际方向作为其参考方向, 有

$$T = T_L + T_0 = T_2 + T_0$$



- $T$  为**电磁转矩** (拖动转矩),  $T_0$  为空载转矩,

$$T = \frac{P_{em}}{\Omega}, \quad T_0 = \frac{P_0}{\Omega}$$

- $T_2$  为发电机的**输出转矩**, 等于转轴上拖动的机械负载转矩  $T_L$ ,

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega} = T_L$$

163



## 11.1 同步电动机的运行分析

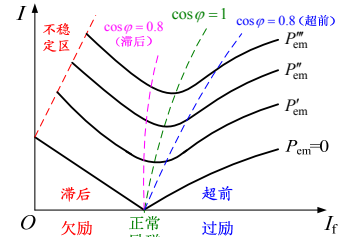
## 4. 同步电动机有功功率和无功功率的调节

## (1) 有功功率调节 —— 功角特性

- 与同步发电机的类似 ( $\theta$  角正值的**规定相反**)。
- 电动机的输出功率取决于**机械负载 (转矩)** 的大小。

## (2) 无功功率调节 —— V 形曲线特性

- 功率因数可在一定范围内调节, 是同步电动机的优点。



164



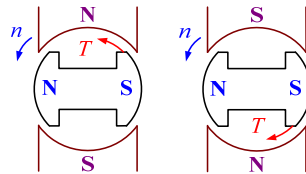
## 第11章 同步电动机

## 11.2 同步电动机的起动

## 1. 同步电动机存在起动问题

**起动:** 电动机从静止加速到稳定的工作转速的过程。

- 同步电动机电磁转矩依靠定、转子磁场相互作用而产生。只有在二者相对静止时, 才能产生平均电磁转矩。
- 起动时, 因转子有机械惯性, 作用在转子上的电磁转矩是交变的, 平均值为零。故同步电动机**不能直接起动**。



165



## 11.2 同步电动机的起动

## 2. 同步电动机的起动方法

常用的起动方法

## ■ 辅助电动机起动

- 用异步电动机 (容量为同步电动机的5%~15%) 将同步电动机拖动到接近同步转速, 再用自同步法将同步电动机投入电网。
- 适用于同步电动机空载起动的场合。

## ■ 变频起动

- 采用变频电源, 使频率从很低的值逐步升高到额定频率。

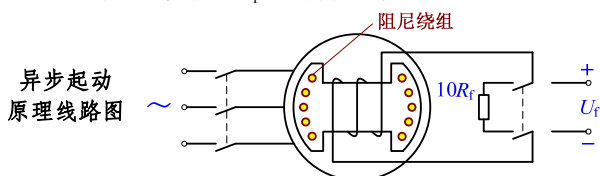
166



## 2. 同步电动机的起动方法

## ■ 异步起动

- 现代同步电动机大多在转子上装设**阻尼绕组**, 利用异步电动机的起动方法来起动同步电动机。
- 起动时, 励磁绕组 (**切忌开路**) 串联大小约为  $10R_f$  的电阻, 将定子投入电网, 按异步电动机起动。待转速升至接近同步转速  $n_1$  时, 再投入励磁。



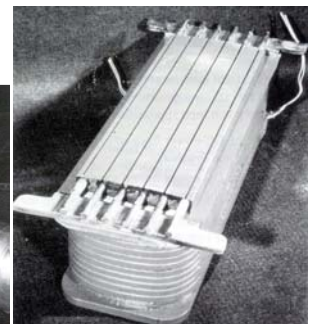
167



## 2. 同步电动机的起动方法

## ■ 异步起动

同步电机的阻尼绕组



168





## 小 结

- ✓ 发电机惯例与电动机惯例的异同
  - 判断同步电机运行状态的方法；功角的正负。
  - 同步电动机的电压方程式、电动势相量图。
  - 同步电动机的功率、转矩平衡关系。
  - 同步电动机的功角特性。
- ✓ 同步电动机的功率因数可在一定范围内调节。
- ✓ 同步电动机的起动问题；常用的异步起动方法。
- ✓ 主要概念
  - 输出转矩，负载转矩，起动

169



## 第3篇 同步电机

## 总 结

1. 同步电机的参考方向规定，发电机惯例与电动机惯例；发电机与电动机状态的判别。
2. 空间矢量；时空相矢量图的特点与应用。
3. 隐极同步发电机的电磁关系（饱和、不饱和时）。
4. 隐极同步发电机的时空相矢量图（饱和时）；隐极、凸极同步发电机的电动势相量图（不饱和时）。  
[会作图，会定性分析，会定量计算]

170



## 总 结 (续)

5. 同步发电机的运行特性。  
[能从电磁关系的角度理解运行特性的变化规律]
6. 同步发电机并联运行条件。
7. 同步电机（发电机、电动机）的功率、转矩平衡关系；功率与转矩的关系。
8. 同步发电机并联运行时有功功率的调节（功角特性）和无功功率的调节。[掌握并联运行方面的计算；能分析励磁、有功调节时电枢电流、功角、无功、功率因数等的变化]

171



## 总 结 (续)

9. 同步电机的电抗参数，影响电抗参数的因素，同步电抗不饱和值的求取方法。
10. 同步电机的额定值，标么值。
11. 与以上内容相关的主要概念。

172