

姚守猷 张世栋 编著

自励恒压同步发电机的 励磁系统

机械工业出版社

U_N 额定电压	α 换相角, 极弧系数
U_0 空载电压	β 角度
U_ϕ 相电压	β_i 电流整流系数
u 瞬时电压值	β_u 电压整流系数
u_d 瞬时输出电压值	γ 换相重叠角
u_f 励磁电压	δ 气隙, 功率角
Δu 电压变化率 (电压调整率), 电压偏差	ε 误差信号
W 能量	η 复励电抗器电抗值与等效励磁回路电阻值之比
W_m 磁场能量	θ 角度
W_e 电场能量	λ 磁导
W_1 电枢绕组串联总匝数	μ 磁导率
W_f 励磁绕组每极匝数	τ 极距, 时间常数
W_h 谐波绕组匝数	ν 谐波次数
X 电抗, 输入量	Φ 磁通量
x_c 同步电抗	Φ_{ad} 直轴电枢反应磁通
x_d 直轴同步电抗	Φ_{aq} 交轴电枢反应磁通
x_m 互感电抗	Φ_{ad3} 直轴电枢反应磁场中三次谐波磁通
x_e 负载电抗	Φ_{aq3} 交轴电枢反应磁场中三次磁通
x_q 交轴同步电抗	φ 相角, 功率因数角
x_u 复励电抗器的电抗	ψ 磁链, 内功率因数角
x_{ad} 直轴电枢反应电抗	Ω 机械角速度
x_{aq} 交轴电枢反应电抗	Ω_1 同步发电机的角速度
x_{adh} 谐波绕组直轴电枢反应电抗	ω 电角速度, 角频率
x_{aqh} 谐波绕组交轴电枢反应电抗	
x_σ 漏抗	
$x_{\sigma h}$ 谐波绕组漏抗	
Y 输出量, 导纳	
y 电枢绕组的节距	
y' 辅助绕组的节距	
Z 阻抗, 定子槽数	
Z_{fe} 等效励磁绕组阻抗	
Z_l 负载阻抗	
Z_σ 漏阻抗	

前 言

半导体器件问世，自励恒压励磁系统应运而生。自此在中小型同步发电机中，可靠性较差，维护不方便的部件——直流励磁机逐渐被淘汰，从而提高了技术经济指标。随着电子技术的发展，自励恒压励磁系统中的扰动补偿品、偏差校正器等关键性装置，经历了各种不同类型的阶段，当大功率可控半导体器件出现以后，更趋完善。近三、四十年来，国内外对自励恒压技术作了不少的理论分析和实践研究。自七十年代开始，在国内相继出现各具特色的多种自励恒压系统，使自励恒压同步发电机在移动电站、船舶电站以及中、小型水电站中得到极为广泛的应用，为中、小型同步发电机的自动控制励磁技术提供了不少新的经验。

本书试用经典控制理论三个基本原理即按扰动控制、按偏差控制和复合控制，对典型、常用的自励恒压同步发电机励磁系统的基本工作原理作了阐述，并介绍了设计计算要点和典型线路，以期作为同步发电机原理、电子技术和控制理论三者互相渗透的雏形。

本书初稿经太原工学院熊大慰教授、机械工业部情报所高庆荣高级工程师、合肥工业大学万迪生教授、哈尔滨电工学院汤蕴璆教授和史乃副教授、沈阳机电学院唐任远副教授、上海革新电机厂陈磐华总工程师、浙江机械科学研究所陈邦本高级工程师、黄山发电设备厂汪道显工程师和刘浚生工程师等审阅，并提出了不少极为宝贵的意见。本书编写过程

中,承各兄弟单位提供有关资料,在此一并表示深切的谢意。

由于我们水平有限、经验不足,书中错误之处敬请读者批评指正。

编著者

主要符号表

A 面积、 A 相	E_{3h} 在谐波绕组中, 综合三次谐波磁场所感应产生的三次谐波电势
a 电枢绕组并联支路数, a 相	E_{ad3h} 在谐波绕组中, 直轴电枢反应磁场三次谐波所感应产生的直轴电枢反应电势
B 磁通密度(磁感强度), B 相	E_{aq3h} 在谐波绕组中, 交轴电枢反应磁场三次谐波所感应产生的直轴电枢反应电势
B_{ad} 直轴电枢反应磁场磁通密度	E_{osh} 谐波绕组的电枢反应电势
E_{aq} 交轴电枢反应磁场磁通密度	E_{osh} 谐波绕组的励磁电势
B_{ad3} 直轴电枢反应磁场磁通密度的三次谐波	E_{or} 剩磁电势
B_{aq3} 交轴电枢反应磁场磁通密度的三次谐波	e 瞬时电势
B_{δ} 气隙磁通密度	e_0 瞬时励磁电势
b 宽度、 b 相	
C C 相, 电容	F 磁通势(简称磁势)
C 励磁磁场基波含量	F_a 电枢磁势
C_3 励磁磁场三次谐波含量	F_{ad} 直轴电枢磁势
C_{3ad} 直轴电枢反应磁场三次谐波含量	F_{aq} 交轴电枢磁势
C_{3aq} 交轴电枢反应磁场三次谐波含量	F_{fo} 励磁磁势
C_{ad} 直轴电枢磁势折算系数	$F_{f(sco)}$ 空载时产生额定电压的气隙磁势
C_{aq} 交轴电枢磁势折算系数	F_{δ} 气隙磁压降
C_{dn} 谐波绕组直轴电枢磁势折算系数	f 频率
C_{qn} 谐波绕组交轴电枢磁势折算系数	f_N 额定频率
	f_h 谐波绕组电势的频率
d 导线直径	
E 感应电势有效值, 电场强度	G 传递函数
E_0 励磁电势(空载电势)	h 高度

I 负载电流(电枢电流)有效值	M 互感系数
I_d I 的直轴分量	m 相数
I_q I 的交轴分量	
I_N 额定电流	n_N 额定转速
I_f 整流装置交流侧励磁电流	P 功率
I_f' 归算到电枢绕组的励磁电流	P_M 电磁功率
I_{fi} I_f 的电流分量	P_N 额定功率
I_{fu} I_f 的电压分量	p 极对数
I_{fh} 谐波励磁系统整流装置交流侧励磁电流	p_h 谐波绕组极对数
I_{fih} I_{fh} 的电流分量	
I_{fuh} I_{fh} 的电压分量	Q_c 容性无功功率
i 瞬时负载电流	Q_L 感性无功功率
i_f 励磁电流	
	R 电阻
J 转动惯量	r_a 电枢绕组的电阻
j 电流密度	r_{ah} 谐波绕组的电阻
	r_f 励磁绕组的电阻
K_i 电流互感器的变比	r_{fe} 等效励磁绕组电阻
K_M 运动电势系数	r_{feh} 谐波绕组等效负载电阻
K_r 剩磁电势系数	r_e 负载电阻
K_u 电压互感器变比的倒数; 强励倍数	
K_a 整流电路系数	S 容量
k_{dpi} 电枢绕组的基波绕组系数	S_i 电流互感器的容量
k_{dph} 谐波绕组的绕组系数	S_u 电压互感器的容量
k_s 叠电系数	S_x 复励电抗器的容量
	S 导线截面积
L 自感系数	
L_a 电枢绕组的电感系数	T 转矩
L_f 励磁绕组的电感系数	T_1 原动机的拖动转矩
L_c 同步电感系数	T_m 电磁转矩
L_u 复励电抗器的电感系数	t 时间
L_σ 漏感系数	
l 铁心厚度	U 电压的有效值
	U_d 输出电压的平均值
	U_f 整流装置交流侧励磁电压

目 录

主要符号表	VII
第一章 励磁的作用及其与同步发电机有关性能的关系	1
§ 1-1 耦合磁场在机电能量转换过程中的作用	2
§ 1-2 发电机的励磁与其有关性能的关系	9
第二章 自励恒压同步发电机的基本原理	22
§ 2-1 同步发电机的自励作用	22
§ 2-2 恒压的重要性及其指标	29
§ 2-3 人工控制励磁的机理	31
§ 2-4 自动控制励磁有关的一些基本知识	34
§ 2-5 自动控制励磁的机理	36
第三章 按扰动控制的励磁系统	62
§ 3-1 电抗移相相复励励磁系统	62
§ 3-2 谐振式相复励励磁系统	77
§ 3-3 双绕组电抗分流励磁系统	90
§ 3-4 谐波励磁系统	97
第四章 按偏差控制的励磁系统	115
§ 4-1 可控硅直接励磁系统的基本工作原理	115
§ 4-2 整流电路的型式及选择	117
§ 4-3 整流元件的选择	123
§ 4-4 控制回路	125
第五章 复合控制励磁系统的基本原理及其典型线路	144
§ 5-1 复合控制励磁系统的基本原理	144
§ 5-2 复合控制励磁系统的几种典型线路	154
第六章 不变性原理的应用	199
§ 6-1 线性化自动控制系统的数学模型、结构图及控制方式	199

§ 6-2 不变性原理的简述	203
§ 6-3 应用不变性原理分析自励恒压的励磁系统 的恒值调节	206
附录	219
I 凸极同步电机气隙磁场谐波含量的估算	219
II 谐波绕组电枢磁势折算系数的计算	224
III 谐波绕组空载特性的计算	235
参考文献及资料	237

第一章 励磁的作用及其与同步发电机有关性能的关系

同步发电机运行时，由原动机拖动，原动机向发电机输入机械能，发电机将输入的机械能转换成电能而输出，因此同步发电机可认为是一种进行机电能量转换的机电装置。

按机电能量转换原理可知，在机电装置中，进行机电能量转换时，总有一种特殊形式的物质作为耦合介质。这种特殊形式的物质可以是磁场，也可以是电场。在这种磁场或电场中，都会储藏着一一定的能量，换句话说，在机电装置中，要用一种储藏一定能量的储能场所作为媒介，才能将机械能转换成电能，或电能转换成机械能。由于就同样大小的储能密度而言，由磁场储能比电场储能容易，例如在空气中，建立磁密为 1 韦/米^2 的磁场时，其储能密度为：

$$\frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = \frac{1}{2} \frac{1.0}{4\pi \times 10^{-7}} = 3.98 \times 10^4 \text{ 瓦} \cdot \text{秒/米}^3$$

建立储能密度相同（亦为 $3.98 \times 10^4 \text{ 瓦} \cdot \text{秒/米}^3$ ）的电场时，按下列电场储能密度计算公式

$$\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \frac{10^{-9}}{36\pi} E^2 = 3.98 \times 10^4 \text{ 瓦} \cdot \text{秒/米}^3$$

计算得电场强度为

$$E = 9.58 \times 10^7 \text{ 伏/米}$$

当电场强度高达 $9.58 \times 10^7 \text{ 伏/米}$ 时，空气早已游离（在大气压力下，电场强度达大约 $3 \times 10^6 \text{ 伏/米}$ 时，空气将被击穿）。这样的状态在工程实际中是十分危险的，所以在旋转电机这种机电装置中，总采用磁场作为机电能量转换的耦合介质。

由于上述缘由,要实现机电能量的转换,首先在发电机的气隙以及铁心里,必须建立一种大小恰当、分布合适的耦合磁场。这种耦合磁场可以由电磁铁来建立或由永久磁铁来提供。两者相比,前者有较大的激励能力,而且其磁势大小的调节也极为方便。因而常规的同步发电机总是由其转子上的绕组、通以直流电流而构成电磁铁。转子上的绕组因此称为励磁绕组,而其中通过的直流电流则称为励磁电流。因此为建立磁场而给励磁绕组的供电称为励磁,也称激磁。

§ 1-1 耦合磁场在机电能量转换过程中的作用

从电机原理可知,在同步发电机中,进行机电能量转换时,其耦合磁场因电枢绕组中有电流通过,而发生了变化,实质上,此时的耦合磁场由其电枢绕组和励磁绕组中所通过的电流共同激励。用“系统”的观点加以考虑,同步发电机便可认为是一种双边励磁的机电系统。就常规的无阻尼绕组、转场式同步发电机而言,定子上的电枢绕组和转子上的励磁绕组为其电气系统,转轴为其机械系统。将机械系统和电气系统作“力-电压”的类比,可将同步发电机抽象为一五双端网络,如图 1-1 所示。图中,三个双端为电枢绕组的三个相,其参变量就是发电机的端电压和电枢电流,即分别为 $u_a, i_a; u_b, i_b; u_c, i_c$, 直流的励磁绕组又为一个电双端,其参变量为励磁电压 U_f 和励磁电

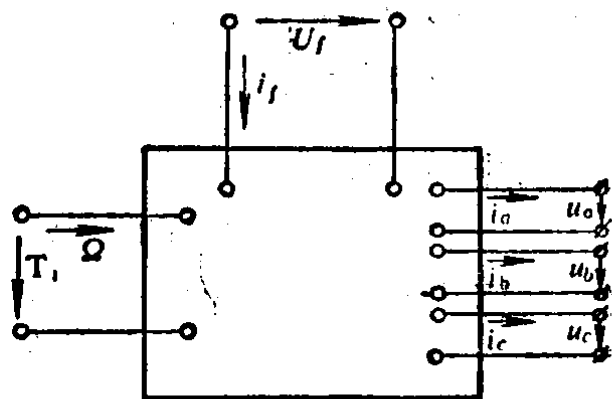


图1-1 五双端网络

流 i_f 。转轴为机双端，机双端的一个参变量为原动机的拖动转矩 T_1 ，另一个参变量就是转轴的角速度 Ω 。电双端网络的行为服从于基尔霍夫定律，机双端的行为服从于达朗伯原理。如果给定这些双端网络的参数，便可得出描写该机电系统的动态特性的数学模型——运动方程式，从而导出功率方程式，由此可看出同步发电机这种双边励磁机电系统中能量转换的机制及其耦合磁场的作用。

一、运动方程式

(一) 电双端电压方程式

图 1-2 为无阻尼绕组、两极、转场式凸极同步发电机的示意图。图中所表示的轴线 A 、 B 、 C 为三相绕组 A 、 B 、 C 的轴线； d 轴为直轴，也就是励磁绕组的轴线， q 轴为交轴， q 轴超前 d 轴 $\frac{\pi}{2}$ 电角度。 θ 角（电角度）为转子对 A 相绕组轴线的偏转角

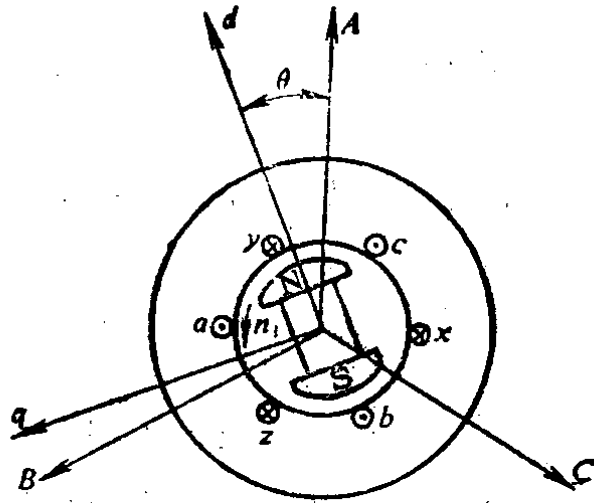


图1-2 三相同步发电机的示意图

$$\theta = \dot{\theta}t + \varphi_0 = p\Omega t + \varphi_0 \quad (1-1)$$

式中 $\dot{\theta}$ —— θ 的导数；

p ——极对数，对于图示情况 $p = 1$ ；

Ω ——转子角速度；

φ_0 ——转子的初相角（电角度）。

从电机理论可知，理想的无阻尼绕组、转场式凸极同步发电机的电枢绕组、励磁绕组的自感系数和两者间的互感系

数可分别以下列各式表达。

1. 各相电枢绕组的自感系数

$$\left. \begin{aligned} A \text{ 相} \quad L_{AA} &= L_{s0} + L_{s2} \cos 2\theta \\ B \text{ 相} \quad L_{BB} &= L_{s0} + L_{s2} \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ C \text{ 相} \quad L_{CC} &= L_{s0} + L_{s2} \cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中 L_{s0} ——电枢绕组一相自感系数的平均值；

L_{s2} ——电枢绕组一相自感系数的二次谐波幅值。

2. 电枢绕组各相间的互感系数

$$\left. \begin{aligned} A、B \text{ 相之间} \quad L_{AB} &= L_{BA} = -M_{s0} - M_{s2} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \\ B、C \text{ 相之间} \quad L_{BC} &= L_{CB} = -M_{s0} - M_{s2} \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \\ C、A \text{ 相之间} \quad L_{CA} &= L_{AC} = -M_{s0} - M_{s2} \cos 2\left(\theta + \frac{5\pi}{6}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 M_{s0} ——电枢绕组各相间互感系数的平均值；

M_{s2} ——电枢绕组各相间互感系数的二次谐波幅值。

3. 电枢绕组与励磁绕组间的互感系数

$$\left. \begin{aligned} A \text{ 相与励磁绕组之间} \quad L_{Af} &= L_{fA} = M_{sr} \cos \theta \\ B \text{ 相与励磁绕组之间} \quad L_{Bf} &= L_{fB} = M_{sr} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ C \text{ 相与励磁绕组之间} \quad L_{Cf} &= L_{fC} = M_{sr} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

4. 励磁绕组的自感系数

$$L_{ff} = \text{常数} \quad (1-5)$$

将同步发电机的四个电双端的自感系数和互感系数列成电感矩阵为

$$L = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Af} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Bf} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Cf} \\ L_{fA} & L_{fB} & L_{fC} & L_{ff} \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

电枢绕组各相的电阻为 $r_A = r_B = r_C = r_a$ ，励磁绕组的电阻为 r_f ，同步发电机四个电双端的电阻矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{ss} & 0 \\ 0 & r_{rr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_f \end{bmatrix} \quad (1-7)$$

规定输出的电流方向为电流的正方向。应用基尔霍夫第二定律和法拉第电磁感应定律，写出理想的同步发电机的电压方程式

$$-\frac{d}{dt}(LI) = -L \frac{dI}{dt} - \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) I = U + RI \quad (1-8)$$

式中 $U = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ \vdots \\ u_f \end{bmatrix}$ ——电压矩阵；

$I = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ \vdots \\ i_f \end{bmatrix}$ ——电流矩阵。

(二) 机双端的转矩方程式
同步发电机机双端的参数为

J ——转子的转动惯量；

R_e ——旋转的阻力系数。

对于发电机，原动机的转矩 T_1 是拖动转矩，电磁转矩是制动转矩，应用达朗伯原理，写出同步发电机机双端的转矩方程式为

$$T_1 = J \frac{d\dot{\theta}}{dt} + R_e \dot{\theta} + T_m \quad (1-9)$$

由电磁场理论可知

$$T_m = \frac{\partial W_m}{\partial \theta} = \frac{1}{2} I_t \frac{\partial L}{\partial \theta} I \quad (1-10)$$

式中 W_m ——磁共能；

I_t ——电流矩阵 I 的转置矩阵。

二、功率方程式

将式(1-8)左乘 I_t ，得电双端的功率方程式为

$$-I_t L \frac{dI}{dt} - I_t \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) I = I_t U + I_t R I \quad (1-11)$$

将式(1-11)改写为

$$-\frac{1}{2} I_t \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) I = \frac{1}{2} I_t \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) I + I_t L \frac{dI}{dt} + I_t U + I_t R I \quad (1-12)$$

式中 $-\frac{1}{2} I_t \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) I$ ——由机械功率转换而来的电功率（惯称电磁功率）；

$\frac{1}{2} I_t \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) I + I_t L \frac{dI}{dt}$ ——励磁绕组的电源及原动机的机械功率源输入耦合磁场单位时间内的能

量,

$I_1 U$ ——电双端输出的功率;

$I_1 R I$ ——电双端中耗能元件 (电阻) 上的损耗。

将式(1-9)乘以 $\Omega = \dot{\theta}$, 得机双端的功率方程式为

$$T_1 \dot{\theta} = J \frac{d\dot{\theta}}{dt} \dot{\theta} + R_o \dot{\theta}^2 + T_m \dot{\theta} = J \frac{d\dot{\theta}}{dt} \dot{\theta} + R_o \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_1 \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) I \quad (1-13)$$

式中

$T_1 \dot{\theta}$ ——由原动机经机双端输入发电机的机械功率;

$J \frac{d\dot{\theta}}{dt} \dot{\theta}$ ——由惯性制动转矩所消耗的机械功率;

$R_o \dot{\theta}^2$ ——由阻力转矩所消耗的机械功率;

$\frac{1}{2} I_1 \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) I$ ——即电磁功率。

从上列的电双端的功率方程式(1-12)和机双端的功率方程式(1-13)可知, 由原动机这个机械功率源经转换而输入发电机的电磁功率为 $\frac{1}{2} I_1 \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) I$ 。观察机双端的转矩方程〔式(1-9)和(1-10)〕和电双端的电压方程〔式(1-8)〕, 又可清楚地看到, 因子 $\frac{\partial L}{\partial \theta}$ 同时出现于这两个方程式中, 可见 $\frac{\partial L}{\partial \theta}$ 对功率 $\frac{1}{2} I_1 \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) I$ 的转换有着特殊意义。这个因子的出现是将电感与电流的乘积 LI (也就是磁链 Ψ) 对转子转角 θ 求偏导数的结果。将该因子左乘 I_1 , 右乘 I , 再除以 2, 便得发电机机械系统中的电磁转矩 $\frac{1}{2} I_1 \frac{\partial L}{\partial \theta} I$ 。将该因子乘以转子角速度 $\dot{\theta}$ 和右乘以 I , 又得出发电机电气系统中的电势 $\left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) I$, 由于这个电势因机械运动而产生, 故称为运动

电势。就能量转换的机制而言,发电机中机电能量转换就是通过其中所存在的耦合磁场对其机械系统和电气系统作用的结果。耦合磁场对发电机机械系统的反作用表现为制动性质的电磁转矩 $\frac{1}{2}I_t \frac{\partial L}{\partial \theta} I = -\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{2} I_t L I \right)$ 。磁场储能随发电机转子位置的变化而变化时,转子就会受到电磁转矩的作用,发电机便从机械功率源吸取机械能。在恒速运行时,转子动能没有变化,于是所吸取的机械能为

$$dW_m = T_m \dot{\theta} dt$$

耦合磁场对发电机电气系统的作用表现为感应的运动电势 $\left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) I$ 。当磁场旋转时,发电机电枢绕组的磁链发生变化,电枢绕组内就会感应产生运动电势,若加上负载,电枢绕组中有电流通过,发电机在电气系统中产生总电能为

$$dW_e = \sum_{i=1}^3 e_i dt$$

发电机对称稳定运行时,若不计气隙内磁场的谐波含量,不计铁心损耗,气隙内磁场为恒幅旋转磁场,在运行过程中,发电机内磁场储能不变,于是 $dW_m = 0$,按能量守恒原理,输入发电机的机械能等于转换成的总电能

$$dW_m = dW_e$$

在这种情况下,耦合磁场没有能量增减,仅起媒介作用。

耦合磁场不仅对能量转换起着媒介作用,而对所输供的能量起着控制作用。当发电机与电网并联运行时,调节其励磁,即改变其耦合磁场,便能控制其感性无功功率的输出,或者说是容性无功功率的输入,当发电机单机运行时,若其负载阻抗一定,调节其励磁,便可改变端电压,从而控制其有功功率的输出。

§ 1-2 发电机的励磁与其有关性能的关系

励磁不仅仅是实现机电能量转换必不可少的环节，而且对发电机的有关性能有一定关系。对于同步发电机，这些关系为：

- 1) 励磁与发电机端电压的关系；
- 2) 励磁与发电机无功功率的关系；
- 3) 励磁与发电机运行稳定性的关系。

下面分别说明这些关系。

一、发电机的励磁与其端电压的关系

同步发电机端电压 u 和电枢电流（即负载电流） I 是发电机运行状态的两个参变量。这两个参变量互相联系、互相制约。这种联系与制约表现为发电机的电枢电流随其端电压的变化而变化，而发电机的端电压又与电枢电流（包括电流的大小及其性质）有关，但是它们之间的这些电磁关系又建立在励磁电流为恒值的基础上。同步发电机重要的运行特性之一是，负载变化时，其端电压是否恒定不变，发电机端电压能否保持不变与励磁的大小有关，同时又取决于励磁能否得到及时应有的调节。

从电机理论得出，凸极同步发电机稳态电压平衡方程式为

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}Z_s + j\dot{I}_q x_{aq} + j\dot{I}_d x_{ad} \quad (1-14)$$

式中

$\dot{E}_0$ ——发电机励磁电势（或称空载电势）的相量；

$\dot{U}$ ——发电机端电压的相量；

$\dot{I}$ ——发电机电枢电流（负载电流）的相量；