

第 3 章

同步发电机励磁系统及 负阻器模拟

3.1 励磁系统概述

励磁系统向发电机提供励磁功率,起着调节电压、保持发电机端电压或枢纽点电压恒定的作用,并可控制并列运行时发电机的无功功率分配。它对发电机的动态行为有很大影响,可以帮助提高电力系统的稳定极限。特别是现代电力电子技术的发展,使快速响应、高放大倍数的励磁系统得以实现,这极大地改善了电力系统的暂态稳定性。励磁系统的附加控制,又称电力系统稳定器(power system stabilizer,PSS),可以增强系统的电气阻尼;线性最优励磁控制器及非线性励磁控制器可以改善电力系统的稳定性。由于励磁控制投资相对较小、效益高,因而对励磁控制及励磁系统的研究受到广泛的重视。

励磁系统可按励磁功率源的不同进行分类,主要分为三大类:①直流励磁系统,它通过直流励磁机供给发电机励磁功率;②交流励磁系统,它通过交流励磁机及半导体可控或不可控整流供给发电机励磁功率;③静止励磁系统,它从机端或电网经变压器取得功率,经可控整流供给发电机励磁功率,其形式通常有自并励(激)或自复励(激)。各种励磁系统的典型接线见表 3-1。

直流励磁系统由于受直流励磁机的整流子限制,功率不宜过大,又由于直流励磁机时间常数较大,响应速度较慢,价格较高,一般只用于中、小型发电机励磁。但因直流励磁机和主机同轴,电网故障时仍能可靠工作。交流励磁系统采用交流励磁机,相对于直流励磁机其时间常数较小,响应速度较快,且不含整流子,可靠性高,价格较低,故在大、中型火电机组中广泛应用,特别是可控静止整流器交流励磁系统,时间常数只有几十毫秒,有利于改善电力系统的稳定性。交流励磁机和主机同轴,电网故障时能可靠工作,但用于水轮发电机励磁时,若发电机甩负荷,易发生超速引起的过电压,对此应予以注意。

自并励或自复励的半导体励磁系统由于响应速度快(可达几十毫秒)、无旋转部件、制造简单、易维修、可靠性高,可适用于大容量机组,且对于水轮发电机组而言布置方便,并有利

表 3-1 励磁系统分类及典型接线

		结 构	命 名
直流励磁系统			自励式 直流励磁系统
			他励式 直流励磁系统
旋转电机励磁系统	交流励磁系统		(可控) 静止整流器 交流励磁系统
	交流励磁系统		(不可控) 静止整流器 交流励磁系统
	交流励磁系统		旋转整流器 交流励磁系统 (无刷励磁)
自励式静止励磁系统			自并励 静止励磁系统
			自复励 静止励磁系统

注：L—励磁机；FL—复励磁机；G—发电机；LT—励磁调节器；JL—交流励磁机；JFL—交流复励磁机。

于缓解水轮机甩负荷时的超速引起的过电压问题，故目前在大中型水电机组中得到推广应用。其主要问题是要注意防止机端故障或电网故障时可能引起的失磁问题，以及对强励和后备保护可靠动作的影响问题。

励磁系统中的电压调节器已从传统的变阻器型、旋转放大机型和磁放大器型迅速向可

控硅励磁调节器过渡,并在控制原理上逐步引入了先进的现代控制理论,硬件装置上逐步采用大规模集成电路及微机技术以及先进的电力电子器件。

本章主要介绍电力系统分析中常用的励磁系统数学模型,以便在电力系统中进行动态模拟。

3.2 励磁系统的模拟条件

当要求模拟的励磁系统能够正确而全面地反映大型同步发电机励磁系统的物理过程时,需要满足下列条件。

(1) 原型和模拟同步发电机转子励磁回路具有相同的标么值参数,即励磁绕组电阻 r_f 、电抗 x_f 、漏抗 x_{sf} ,以及定子和阻尼绕组开路时的励磁绕组时间常数 T_{d0} 等参数的标么值应该相等。

(2) 模拟励磁系统和原型励磁系统中相应的元件具有相似的静态和动态特性,例如发电机励磁系统中的励磁机和副励磁机的特性。通常要求模拟励磁机的励磁绕组的时间常数 T_e 与原型励磁机相等,模拟励磁机的空载和负载特性与原型相似。在可控硅励磁系统中,辅助发电机和电源变压器的特性要求相似等。

(3) 模拟励磁调节装置和原型励磁调节装置具有相同的特性,通常要求调节器的形式相同,调差率相同,调节的时间常数相同,强行励磁的倍数相同等。

除了上面这些基本要求之外,还要求模拟励磁系统参数能在广泛范围内进行调整,并能够方便地改变接线,使之适合于不同模拟对象。有时在模拟同步发电机上所接入的励磁调节器可直接采用大型同步发电机所用的原型调节器,这样可以真实无误地反映原型励磁调节过程,不过此时应注意避免调节器对模拟同步发电机吸收过多的功率,影响系统的工作情况。

3.3 并励磁系统等值时间常数的计算

并励磁系统接线如图 3-1 所示。图中 R_b 、 L_b 、 W_b 及 R_y 、 L_y 、 W_y 分别为励磁机 L 的并励绕组及他励绕组回路的电阻、电感及匝数。 i_b 、 i_p 、 i_f 及 i_e 分别为励磁机 L 的并励绕组、他励绕组、发电机的励磁绕组及励磁机 L 的电枢绕组内的电流。 M 为两绕组间的互感。他励绕组接到励磁调节器, u_p 为调节器的输出电压。

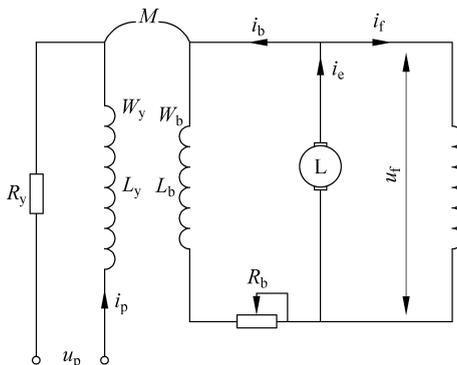


图 3-1 并励式励磁系统接线图

根据图 3-1 可列出以下三个方程式：

$$u_f = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + M \frac{di_p}{dt} \quad (3-1)$$

$$u_p = M \frac{di_b}{dt} + R_y i_p + L_y \frac{di_p}{dt} \quad (3-2)$$

$$u_f = k_b i_b + k_y i_p \quad (3-3)$$

式(3-3)说明,电压 u_f 由两部分组成,一部分由并励电流 i_b 所产生,另一部分是由调节器来的电流 i_p 所产生,而系数 k_b 和 k_y 为励磁机 L 的并励和他励励磁电势分量和电流分量的比值。且有以下关系：

$$\frac{k_b}{k_y} = \frac{W_b}{W_y} = \sqrt{\frac{L_b}{L_y}} \quad (3-4)$$

说明电感与匝数的平方成正比。

现在分析并励励磁系统的传递函数 $F_B(s)$,即经过拉氏变换后的输出电压 $U_f(s)$ 与输入电压 $U_p(s)$ 之比,即 $F_B(s) = \frac{U_f(s)}{U_p(s)}$,然后根据 $F_B(s)$ 可以求得励磁系统的等值时间常数。

将式(3-1)~式(3-3)进行拉氏变换,可得

$$U_f(s) = (R_b + L_b s) I_b(s) + M s I_p(s) \quad (3-5)$$

$$U_p(s) = M s I_b(s) + (R_y + L_y s) I_p(s) \quad (3-6)$$

$$U_f(s) = k_b I_b(s) + k_y I_p(s) \quad (3-7)$$

此外,当并励和他励绕组之间的磁链系数等于 1,即

$$M = \sqrt{L_b L_y} \quad (3-8)$$

式(3-5)~式(3-7)中的未知变量为 $U_f(s)$ 、 $U_p(s)$ 、 $I_p(s)$ 、 $I_b(s)$ 。利用式(3-4)和式(3-8)的关系来消去 $I_p(s)$ 及 $I_b(s)$,即可求出 $U_f(s)$ 与 $U_p(s)$ 之比,即并励励磁系统的传递函数为

$$F_B(s) = \frac{u_f}{u_p} = \frac{U_f(s)}{U_p(s)} = \frac{\frac{k_y}{R_y \left(1 - \frac{k_b}{R_b}\right)}}{1 + \frac{T_b + T_y}{1 - \frac{k_b}{R_b}} s} \quad (3-9)$$

式中 $T_b = \frac{L_b}{R_b}$, $T_y = \frac{L_y}{R_y}$ 分别为并励和他励励磁绕组的时间常数, $F_B(s)$ 的表达式为一个典型的惯性环节,可写成

$$F_B(s) = \frac{K_B}{1 + T_B s} \quad (3-10)$$

式中

$$K_B = \frac{k_y}{R_y \left(1 - \frac{k_b}{R_b}\right)}, \quad T_B = \frac{T_b + T_y}{1 - \frac{k_b}{R_b}}$$

由 T_B 的表达式可以看出,并励励磁机的等值时间常数 T_B 比他励磁绕组的时间常数 (T_b 或 T_y) 大很多,这严重影响同步发电机的励磁调节过程。另一方面, T_B 也并非一个固定的值,它与他励绕组的电阻有直接关系,如果在运行中将此电阻值改变了,则 T_B 的值也随之变化。

3.4 励磁机的模拟条件

当模拟励磁机和原型励磁机相似时,它们应具有相似的静态和动态特性。如果按标么值列出励磁机的各电路方程以及机组的运动方程,可以找到两者相似的条件如下:

(1) 模拟与原型同步发电机各励磁绕组的磁动势之间的比值应相等,以及由它们各自产生的电势标么值也应分别相等。

(2) 模拟与原型同步发电机各励磁绕组和电枢绕组的时间常数(T_b, T_y, T_a)应分别相等。

(3) 电枢电路相对电压降标么值应相等。

(4) 并励励磁绕组中的额定电流与电枢额定电流的比值应相等。

(5) 模拟励磁机的惯性时间常数和原型励磁机相同,且励磁机的运动转矩的静态和动态特性相同。

(6) 励磁机的无载特性和负载特性按标么值表示应该相同。

一般按照以上六个条件来设计的模拟励磁机具有通用性。

第一个条件容易得到满足,因为只要求各励磁绕组磁动势比值和电势标么值相同,并不要求各励磁绕组匝数比值相等。当模拟同步发电机的各励磁绕组匝数比值与原型同步发电机不同时,可以调整各励磁绕组中的电流数值使磁动势和电势的比值与原型同步发电机相同。

对第二个条件,由于励磁机各励磁绕组时间常数的模拟非常重要,它对自动励磁调节有着重要的影响,在一般小的直流电机上实现原型励磁机时间常数的模拟,需要特殊设计或采用附加电抗器来满足。对于原型同步发电机的电枢绕组时间常数 T_a ,由于它本身很小,可以忽略不计。

第三个条件实际上包含在第六个条件之中,当励磁系统采用间接励磁方式时,才需要考虑第五项条件,而在直接励磁方式中,励磁机的转矩和惯性时间常数只是整个机组中的很小一部分,通常可以不加考虑。

下面再着重说明励磁机无载和负载特性的模拟,这两个特性也很重要,因为当系统发生短路而引起强行励磁装置动作时,励磁机电枢中将通过很大的电流,引起磁路严重饱和。

在模拟励磁机的空载特性时,没有必要要求曲线上每一点都与原型励磁机重合,只要模拟励磁机空载特性起始直线部分和饱和后的直线部分与原型励磁机一致,则可认为具有足够的模拟精度。

图 3-2 是采用标么值描绘的两条空载特性曲线,实线是原型励磁机的,虚线是模拟励磁机的,在 N 、 M 两点原型励磁机与模拟励磁机是重合的。 N 点相当于额定电势, M 点相当于强励电势。

模拟条件为:

(1) 模拟励磁机与原型励磁机空载特性起始和饱和(由强励点 M 作切线)两段直线部分的斜率比值相同。即

$$\frac{(\tan\alpha_1)}{(\tan\alpha_2)_m} = \frac{(\tan\alpha_1)}{(\tan\alpha_2)_y} \quad (3-11)$$

其中, m 表示模型; y 表示原型。

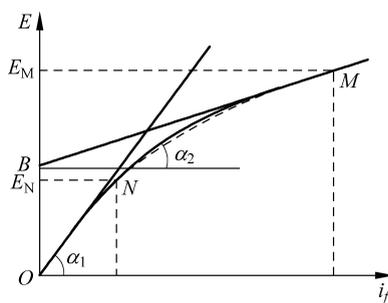


图 3-2 模拟励磁机的空载特性模拟

(2) 饱和直线部分延长线在纵坐标上交点 B 的截距 OB 与额定电压 E_N 的比值应相等。即

$$\left(\frac{OB}{E_N}\right)_m = \left(\frac{OB}{E_N}\right)_y \quad (3-12)$$

利用普通直流电机作为模拟励磁机时,可以采用适当选择其电压基准值的方法来达到标么单位的空载特性相似。这时,可以调整使空载特性的起始部分与原型相同,同时使与励磁机的额定电势 E_N 和强励时的电势 E_M 相对应的两点 N 和 M 与原型励磁机空载特性相符合就行了。

一般小容量的直流电机具有较高的剩磁电压(相对值)和较大的磁滞回线。当利用它们作为大型同步发电机的模拟励磁机模型时,必须采取措施降低剩磁和缩小磁滞回线,以便使其空载特性与原型励磁机相似。简单而有效地减小剩磁和磁滞的方法是在电机的轭部加上交流振荡绕组,并选择适当的振荡频率和电流,就可以使模拟励磁机中的剩磁和磁滞减小到足够满意的程度。

更精确的模拟,还应使模拟励磁机负载特性与原型励磁机相似。当模拟励磁机具有负载时,满足电枢电阻上的相对电压降与原型励磁机相等。

在近似模拟时,可在模型励磁机出口并联负载电阻,以模拟其负载特性,这可使模拟大为简化。

对励磁机励磁绕组时间常数的模拟:由于各种不同类型的发电机其励磁机励磁绕组的时间常数相差很大,一般高速的汽轮发电机较小,而慢速的水轮发电机较大,有时高达 1s 以上,为了模拟励磁机励磁绕组的时间常数,可以通过设计特殊的模拟励磁机来实现。因励磁绕组时间常数与电机的尺寸成正比,设计时可以采取减小气隙,减少极对数,减小电机长度,增加电机直径,加大磁极窗口面积和绕组铜面积等措施。

利用普通系列小容量直流发电机来模拟原型励磁机时,励磁绕组时间常数可以通过接入附加电抗器来满足。

在用附加电抗器来提高时间常数时,为了不使过渡过程产生弯曲,要求附加电抗器各个绕组匝数(W'_1, W'_2)应与模拟励磁机各相应的绕组匝数(指串励或并励绕组匝数) W_1, W_2 比例关系相同,即

$$\frac{W'_1}{W_1} = \frac{W'_2}{W_2} = k_w \quad (3-13)$$

同时要求电抗器磁路的磁化特性与模拟励磁机磁路的磁化特性满足下列关系式:

$$\frac{\tan\alpha'_2}{\tan\alpha'_1} = \frac{\tan\alpha_2}{\tan\alpha_1} = k_a$$

$$K_w = \frac{F_{A'}}{F_A} \quad (3-14)$$

式中 $\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha_1, \alpha_2$ 为附加电抗器和励磁机磁路的磁化特性两段线性部分对横轴的偏移角。 $F_{A'}$ 及 F_A 为与两段直线交点 A' 及 A 相对应的磁动势,见图 3-3。

设计电抗器时,除了要保证足够的电抗值外,还应尽量减小电抗器本身的电阻。这样,可以在模拟不同的励磁机时间常数时,通过外接电阻以达到所需的时间常数。由于励磁机磁路是具有气隙的,故附加电抗器还应具有气隙。磁化特性的相似可以通过调整气隙大小来达到。

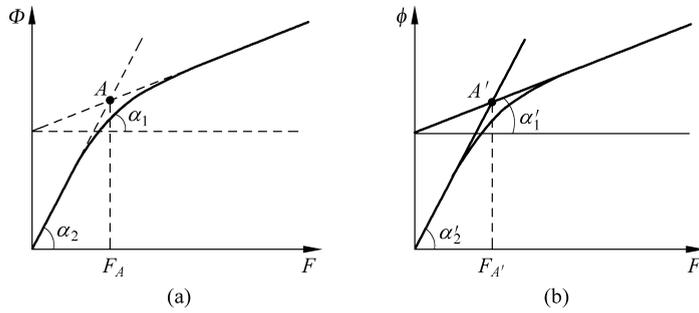


图 3-3 附加电抗器和励磁机磁路的磁化特性
(a) 模型励磁机的磁化曲线；(b) 电抗机的磁化曲线

3.5 励磁机模型

1. 直流励磁机模型

具有他励和并励绕组的直流励磁机电路如图 3-4 所示。图中 R_y 为他励绕组电阻, R_b 为并励绕组电阻, R_c 是他励调节电阻, R_g 是他励回路附加电阻, W_y 和 L_y 为他励绕组的匝数和电感, W_b 和 L_b 为并励绕组的匝数和电感 (L_y 和 L_b 计及饱和非线性), i_y 为他励电流, i_b 为并励电流, i_{FL} 为复励电流, u_y 为他励电压, u_f 是励磁机输出电压, 即发电机的励磁电压。其中他励电压 u_y 和复励电流 i_{FL} 为输入量, u_f 为输出量。励磁机数学模型的推导就是要根据励磁机的基本方程, 导出 $u_f = f(i_{FL}, u_y)$ 的函数关系。推导中要求计入饱和非线性, 并最终用标么值表示传递函数。

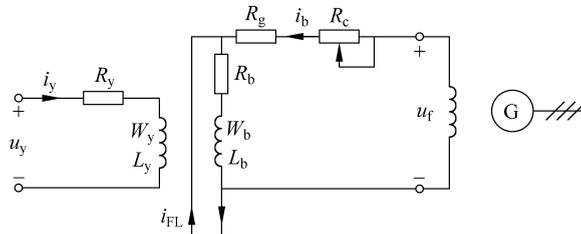


图 3-4 直流励磁机电路图

推导中假定: $W_y : W_b = 1 : 1, L_y = L_b$, 否则要作相应折算; 励磁机无漏磁通; 电机在额定转速运转, 并用空载特性代替负载特性。

数学模型推导分为三步: ①列出反映励磁机电磁量基本关系的方程组(包括曲线); ②消去中间变量, 得到有名值函数关系 $u_f = f(i_{FL}, u_y)$; ③建立标么制, 其基值的选取应便于励磁机与电压调节器、发电机的接口连接, 并将有名值传递函数转化为标么值传递函数。

(1) 励磁机基本方程

根据前面的假定, 他励绕组 L_y 和并励绕组 L_b 的磁链应相等, 即 $\psi_{Ly} = \psi_{Lb} = \psi_L$, 从而有回路方程

$$u_y = R_y i_y + \frac{d\psi_L}{dt} \quad (3-15)$$

$$u_f = (R_g + R_c + R_b) i_b + R_b i_{FL} + \frac{d\psi_L}{dt} \quad (3-16)$$

由于 $W_y = W_b$, 可直接将励磁机的励磁电流叠加得总励磁电流, 即 $i_{L\Sigma} = i_y + i_b + i_{FL}$, 并设 u_f 相对应的励磁机总励磁电流 (见图 3-5(a)) 在气隙线上为 $i_{L\Sigma 0}$, 在空载线上为 $i_{L\Sigma}$ 。显然, 由于饱和作用 $i_{L\Sigma} \geq i_{L\Sigma 0}$ 。同样, 设励磁机的励磁绕组磁链 ψ_L 相对应的励磁机总励磁电流 (见图 3-5(b)) 在气隙线上为 $i_{L\Sigma 0}$, 在空载线上为 $i_{L\Sigma}$ 。由于励磁机运行在额定转速, u_f 和 ψ_L 一一对应。图 3-5(a) 与 (b) 中曲线可通过实验测定。设图 3-5(a) 中气隙线斜率 $\tan\theta = \frac{u_f}{i_{L\Sigma 0}}$,

令 $\beta = \tan\theta$ 且为常数, 图 3-5(b) 中气隙线斜率 $\tan\varphi = \frac{\psi_L}{i_{L\Sigma 0}}$, 令 $L = \tan\varphi$ 且为常数, 则由 β 和 L 的定义可知 $\psi_L = \frac{L}{\beta} u_f$, 该关系在饱和时也成立。

式(3-15)和式(3-16)及图 3-5 中的曲线, 构成了励磁机电磁量间的基本关系。

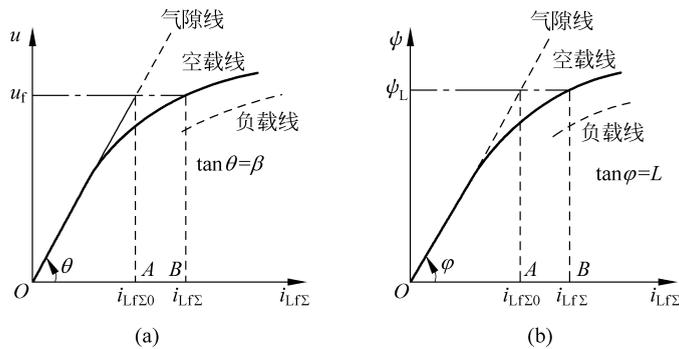


图 3-5 u_f 和 ψ_L 与总励磁电流的关系

(a) u_f 与 $i_{L\Sigma}$ 的关系; (b) ψ_L 与 $i_{L\Sigma}$ 的关系

(2) 励磁机有名值传递函数的导出过程

下面根据上述方程及曲线, 消去中间变量 i_y, i_b 及 ψ_L , 导出 $u_f = f(u_y, i_{FL})$ 的函数关系。根据图 3-5(a), 先定义饱和修正系数 k_1 和饱和系数 S_E 如下:

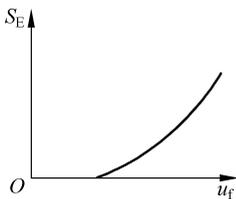


图 3-6 饱和系数 S_E 和 u_f 的关系

$$k_1 = \frac{OB}{OA} = \frac{i_{L\Sigma}}{i_{L\Sigma 0}} \geq 1 \quad (3-17)$$

$$S_E = k_1 - 1 \quad (3-18)$$

k_1 和 S_E 为 u_f 的函数, 且 S_E 和 u_f 一般有如图 3-6 所示的非线性关系, 这可根据图 3-5(a) 作出。

将式(3-15)两边除以 R_y , 并解出

$$i_y = \frac{u_y}{R_y} - \frac{1}{R_y} \frac{d}{dt} \left(\frac{L}{\beta} u_f \right) = \frac{u_y}{R_y} - \frac{T_y}{\beta} \frac{du_f}{dt} \quad (3-19)$$

式中, $T_y = \frac{L}{R_y}$ 为他励绕组的时间常数。

将式(3-16)两边除以 $R_g + R_c + R_b$, 解出

$$i_b = \frac{u_f}{R_g + R_c + R_b} - \frac{R_b}{R_g + R_c + R_b} i_{FL} - \frac{T_b}{\beta} \frac{du_f}{dt} \quad (3-20)$$

式中, $T_b = \frac{L}{R_g + R_c + R_b}$ 为自并励绕组时间常数。

由于 $i_y + i_b = i_{L\Sigma} - i_{FL}$, 故将式(3-19)和式(3-20)相加得

$$i_{L\Sigma} - i_{FL} = \frac{u_y}{R_y} - \frac{T_y}{\beta} \frac{du_f}{dt} + \frac{u_f}{R_g + R_c + R_b} - \frac{R_b}{R_g + R_c + R_b} i_{FL} - \frac{T_b}{\beta} \frac{du_f}{dt} \quad (3-21)$$

将 $i_{L\Sigma} = k_1 i_{L\Sigma} = k_1 \frac{u_f}{\beta}$ 代入上式, 并设 $T_L = T_y + T_b$ 为励磁机时间常数, 令 $s = \frac{d}{dt}$, 则可整理得

$$\frac{\frac{u_f}{\beta} u_y + \frac{\beta(R_g + R_c)}{R_g + R_c + R_b} i_{FL}}{R_y u_y + \frac{\beta(R_g + R_c)}{R_g + R_c + R_b} i_{FL}} = \frac{1}{(k_1 - 1) + \left(1 - \frac{\beta}{R_g + R_c + R_b}\right) + T_L s} \quad (3-22)$$

式(3-22)即为以 i_{FL} 和 u_y 为输入量、 u_f 为输出量的直流励磁机有名值传递函数。

(3) 标么值传递函数的导出过程

为便于励磁机数学模型的建立并和电压调节器、发电机的接口连接, 统一以发电机在忽略饱和的情况下, 空载额定电压运行时所对应的励磁机气隙线相应的电量作为电量的标么值的基值。对并励绕组取电压、电流及电阻基值为(下标 B 表示标么制基值)

$$\begin{cases} u_{fB} = u_f \text{ (发电机空载额定电压运行所对应的励磁电压)} \\ i_{L\Sigma B} = \frac{u_{fB}}{\beta} \\ R_b = \frac{u_{fB}}{i_{L\Sigma B}} = \beta \end{cases} \quad (3-23)$$

对于他励绕组, 设电流基值与式(3-23)相同, 即为 $i_{L\Sigma B}$, 取电压、电阻基值为

$$\begin{cases} u_{LFB} = i_{L\Sigma B} R_y \\ R_{LFB} = \frac{u_{LFB}}{i_{L\Sigma B}} = R_y \end{cases} \quad (3-24)$$

将式(3-22)的左边分子、分母分别除以 u_{fB} 及 $i_{L\Sigma B}$, 等式仍成立, 式(3-22)化为

$$\frac{u_{f*}}{u_{y*} + K_{L1} i_{FL*}} = \frac{1}{S_E + K_L + T_L s} \quad (3-25)$$

式中, $K_{L1} = \frac{R_g + R_c}{R_g + R_c + R_b}$ 为 i_{FL*} 的分流比, 是无量纲值; $K_L = 1 - \frac{\beta}{R_g + R_c + R_b}$ 为自并励系数, 是无量纲值; $T_L = T_y + T_b$ 为励磁机时间常数, 数值上为并励绕组和他励绕组时间常数之和; S_E 为饱和系数。

并励条件下, 为建立稳定的励磁机电压 u_f , 由图 3-7 可知 $\tan\theta = \beta > \tan\alpha = R_g + R_c + R_b$, 故并励系数 $K_L < 0$ 。

式(3-25)即为具有他励和并励绕组的直流励磁机标么值传递函数。下面对该式进行简单讨论。

① 式(3-25)相应的传递函数框图见图 3-8(a)和(b), 二者等价。

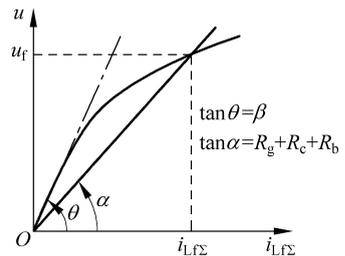


图 3-7 并励直流电机特性

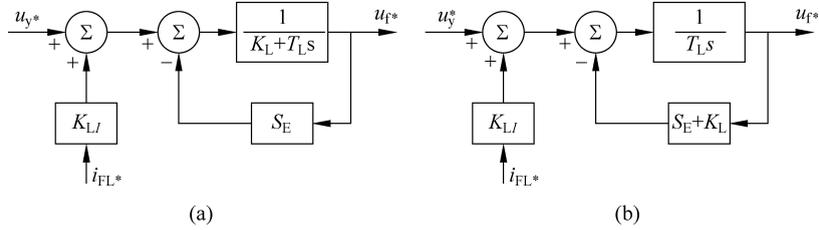


图 3-8 直流励磁机传递函数

(a) 传递函数形式之一; (b) 传递函数形式之二

② 当无复励电流时,令 $i_{FL}^* = 0$, 相应传递函数为

$$\frac{u_f^*}{u_y^*} = \frac{1}{S_E + K_L + T_L s} \quad (3-26)$$

③ 当无并励绕组时,令 $R_b \rightarrow \infty$, 则他励直流励磁机传递函数为

$$\frac{u_f^*}{u_y^*} = \frac{1}{S_E + K_L + T_L s} \quad (3-27)$$

式中, $T_L = T_y = \frac{L}{R_y}$ 为他励绕组时间常数, 此时 $K_L = 1$ 。

④ 可以证明在式(3-25)相应基值定义下, $u_f^* = E_f$ 。 E_f 为发电机电动势标么值, $E_f = \frac{x_{ad}}{r_f} u_f$, 该式中各量均为发电机标么值。下面证明此结论。

当发电机空载额定电压运行时, 由同步发电机实用模型得

$$\begin{cases} U_d = x_q I_q = 0 \\ U_q = E'_q - x'_d I_d = E_q - x_d I_d \end{cases} \quad (3-28)$$

所以

$$E_q = U_q = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} = 1(\text{p. u.}) \quad (3-29)$$

故

$$E_f = \frac{x_{ad}}{r_f} u_f = x_{ad} i_f = E_q = 1(\text{p. u.}) \quad (3-30)$$

而此时把相应的发电机实际的励磁电压有名值 u_f , 亦即直流励磁机输出电压的有名值取作它的基值, 则式(3-27)中 $u_f^* = 1\text{p. u.}$, 从而 $u_f^* = E_f = 1\text{p. u.}$ 。

由于 E_f 和 u_f 严格呈线性关系, 可设标么值关系为 $E_f = k_* u_f^*$, 则根据上述分析可知, 标么值关系中有 $k_* = 1$, 即 $E_f = u_f^*$, 这极有利于发电机和励磁系统的模型接口, 并可直接把励磁机出口电压标么值 u_f^* 写作 E_f 。

⑤ 同理, 为便于励磁机与电压调节器间的标么值传递函数接口, 可取励磁机的 $S_E = 0$, $K_L = 1$, $i_{FL}^* = 0$ (见图 3-8(a)), 且发电机空载额定电压运行时的电压调节器输出电压有名值为相应量的标么基值。容易证明此时 $u_{Lf}^* = u_f^* = E_f = 1(\text{p. u.})$, 且等于电压调节器输出电压标么值, 从而电压调节器输出和励磁机输入可直接接口, 十分方便。

⑥ 在处理励磁机饱和时, 引入了饱和修正系数 k_1 , 推导中将实际变量根据饱和修正系

① p. u. 表示标么值。