第一章 绪 论

§1-1 概 说

在最近的20～30年内，随着电力系统的扩大和机组单机容量的增大，大型同步电机的励磁及其控制系统发生了很大的变化，主要表现在：

（1）半导体励磁代替了直流励磁机。过去同步电机都是用与它同轴的直流发电机提供直流励磁电流，单机容量增大，所需的励磁容量也随着增大；现代同步电机的励磁容量约占电机容量的0.2%～0.6%，励磁机的额定电压一般不超过400～500V，所以，100、200、300、600MW大型机组的励磁机励磁容量分别达到450、800、1300、1700～2000kW，励磁电流达到2000～6000A。制造这样大容量、高速度（汽轮发电机转速为3000r/min）的直流发电机显然有很多困难，如机械整流复杂不可靠、炭刷磨损大、容易冒火花等，所以汽轮发电机的直流励磁机的极限容量一般不超过350～450kW。水轮发电机组的转速低，机械整流不显得特别困难，但极限容量受到它本身尺寸和体积的限制。如果励磁机的体积尺寸太大，机组长度增大，则会使水电厂厂房高度增加，经济上显得很不合理。因此，现在容量大于150MW的汽轮发电机和水轮发电机，都不用同轴的直流电机作为励磁机，几乎全部用半导体整流电源供给直流励磁电流。

巨型机组由于采用内冷和其他强制冷却方式，绕组的电流密度取得很大，这样将引起发电机的阻抗值增大、惯性常数降低。例如，汽轮发电机单机容量从100MW增大至1200MW时，纵轴电抗x_d差不多增加1.5倍，暂态电抗x'_d差不多增加2倍，机械时间常数T_J约减少一半（见表1-1）。发电机参数的恶化引起系统稳定性能降低，直流发电机的机械时间常数大、反应速度慢，满足不了大系统稳定的要求。从这一方面要求出发，也必须用快速半导体励磁取代常规的直流励磁机。

表 1-1 汽轮发电机的参数

参数 \ 容量(MW)	100	300	500	1200
x_d(标么值)	1.6～1.7	2.2	2.4	2.4
$x_{d'}$(标么值)	0.26	0.3	0.37～0.4	0.5
T_J(s)	7.85～9.85	6.5	5.6	4.8

（2）励磁调节器逐步演变成多功能、多变量的控制器。随着电力系统的扩大以及快速半导体励磁的应用，在系统中出现了很多新问题。例如：系统联络线上出现了持久的低频振荡；由于线路串联电容所引起的次同步振荡、机组轴上的扭动振荡；应用快速励磁后产

生的负阻尼等等。应用单输入、单变量的励磁调节器已很难解决上述问题。为了阻尼振荡、扩大稳定范围，就必须应用控制理论和计算机技术将单纯的励磁调节器演变为多功能、多变量的控制器。例如，在励磁调节器上加上频率偏差或加速度信号就可能有效地抑制负阻尼，迅速阻尼振荡，扩大稳定范围。苏联强力式调节器中加入电压微分或频率微分信号就可在系统大干扰时提高稳定极限功率 5％～10％左右，使故障后的振荡由8～15次 缩 短为3～5次。

最近，电力系统中最佳控制理论的应用也有了发展，在励磁控制方面也希望有一个最佳动态特性，即状态变量偏差连同控制量一起达到最小程度。由于系统在遭受大小干扰时，其状态变量（如功率、电压、电流、频率等）都随运行状况而改变，所以，励磁控制的结构设计和参数整定必须能适应各种运行状况的改变。例如，电压放大倍数的整定和振荡频率有关，当发电机接近稳定极限运行时，在某种振荡频率范围内往往要求降低放大倍数，以便增加阻尼，为此，往往要求在控制回路中增加几个变量回路（图1-1）。经验证明，这种多回路的控制器能够发挥更大效能，尤其在发电机的严重运行状态下（如满负荷、欠励运行等）有一个比较大的稳定运行范围。

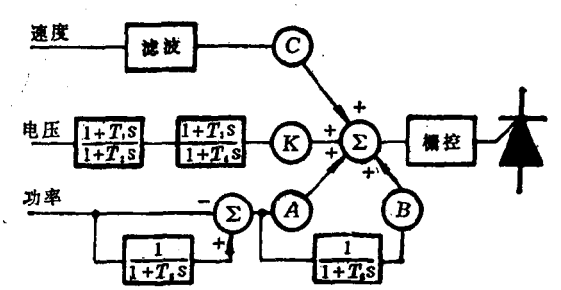


图 1-1　多回路励磁控制示意图

A，B，C，K—放大倍数

这两方面的深刻变化，提高了电力系统稳定的运行水平，也促进了科学研究的深入开展。目前，各国科技工作者正在努力钻研和探讨这方面的新课题，积极应用新理论、新技术来解决同步电机励磁和励磁控制方面出现的新问题。结合我国实际情况，我们开设了“同步电机励磁及其控制”的选修课，它是一门综合专业选修课程，结合系统运行要求，讲解同步电机励磁系统的作用和型式；结合控制理论，讲解励磁控制的结构、动态特性、参数整定和对系统稳定的影响等内容。

§1-2　同步电机的励磁系统和励磁控制

励磁系统是同步电机的重要组成部分，它是供给电机直流励磁电源的一套系统。其中包括：励磁电源（直流或交流励磁机、励磁变压器、整流桥等），调节和控制设备（自动电压调节器、稳定器等），以及其他附属保护和量测设备等。

励磁控制是一种控制系统，它控制同步发电机发出的电势，所以它不仅控制发电机的端电压，而且还控制发电机的功率因数和电流等参量。由于大型机组的这些参量直接影响

系统的运行状态，在某种程度上也可以说，励磁控制也控制着系统的运行状态，特别是系统的稳定和励磁控制密切有关。

和其他控制系统一样，励磁控制可以看成是由前馈元件和反馈元件组成的自动调节系统，其示意图如图1-2所示。它的前馈元件包括：控制对象（即同步发电机）、调节和放大元件（励磁机和自动电压调节器等），其反馈信号取自发电机端电压和电流。图1-3为励磁控制典型方框图。图中虚线框图部分表示自动调节器（ZLT）部分，它是励磁控制系统的智能部件，能使发电机的电压和功率向所希望的方向变化；辅助控制信号U_s可以是速度反馈，加速度或其他参数。信号的反馈用来阻尼功率振荡，防止过调节，或作为低励限制，防止不稳定。由图1-3还可看出：励磁控制系统非但包括由励磁机和自动电压调节器所组成的励磁系统，而且还包括发电机本身。



图 1-2　励磁控制示意图

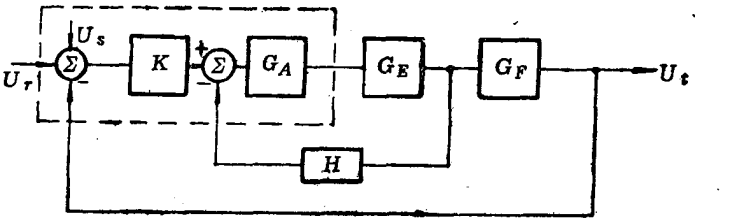


图 1-3　励磁控制典型方框图

G_A—放大器传递函数；G_E—励磁机传递函数；G_F—发电机传递函数；ZLT—自动电压调节器；H—反馈回路；K—放大器的放大倍数；U_r—参考电压；U_t—发电机端电压；U_s—辅助信号

§1-3　励磁控制的作用

励磁控制的作用可归纳如下：

一、在稳态运行时

（1）保持发电机在运行中电压恒定。

（2）在并列运行时，调节无功功率的分配。

（3）提高静稳定极限。

（4）抑制自励磁，增加充电线路允许长度。

二、在暂态过程中（即在大干扰时）

（1）抑制切断负荷时电压的升高。

（2）提高暂态稳定性。

上面所说的稳态运行时的作用系指微小电压偏差时的动作。它的特征是控制系统具有线性范围，是对静特性和频率响应特性有些影响的区域。在暂态时的作用相当于大干扰时或者说是大幅度电压变化时的动作，控制系统是属于非线性的，是对暂态响应有重大影响的区域。现在分别叙述这两方面的作用。

（一）在稳态时

（1）恒压控制。当发电机单独运行时，保持电压恒定是励磁控制中最基本的动作，影响电压变化的干扰主要来自三方面，即：①负荷的变化（包括功率因数的变化）；②转速的变化；③发电机及励磁系统的温度变化。负荷改变时，发电机的电枢反应将发生变化，调节励磁电流才能使它的内电势有相应的变化，以保持电压恒定。发电机的电势和转速成比例，如有同轴连接的励磁机，则励磁机的转速和电压也将跟着改变，这样就加重了发电机电压的变化。所以，此时要大力调节励磁，才能维持电压恒定。温度变化影响到转子励磁绕组以及励磁系统各元件电阻的变化。铜线的温度系数约为0.004,假定温度变化50℃,电阻值就要变化20%左右，所以如果励磁电流不变，就会产生20%的发电机电压的变化。

（2）并列运行时无功功率的调节。几台发电机在母线上并列运行时，无功功率在机组间的分配决定于发电机的调差特性，即发电机端电压U_t和无功电流I_{*R}的关系曲线$U_t=f(I_{*R})$通常是个有差特性曲线（图1-4），它的特征系数称为调差系数ξ，用式子表示为

$$\xi=\frac{\Delta U_*}{\Delta I_{*R}}=\frac{\frac{\Delta U}{U_e}}{\frac{\Delta I_R}{I_e}}=\mathrm{tg}\alpha \qquad (1\text{-}1)$$

式中 ΔU_*——发电机端电压变化对额定电压之比，$\Delta U_*=\Delta U/U_e$;

ΔI_{*R}——无功电流变化对额定电流之比，$\Delta I_*=\Delta I_R/I_e$;

α——有差特性直线的斜角。

两台或多台发电机并列运行时，无功功率的分配决定于母线电压水平和其调差系数，假定两台发电机在母线上并列运行，调差系数分别为ξ_1和ξ_2。如果母线上的电压由U_t变化至U'_t，即变化ΔU_*时，两台发电机的无功电流也分别变化ΔI_{*1}和ΔI_{*2}（图1-5）。从图1-5可看出

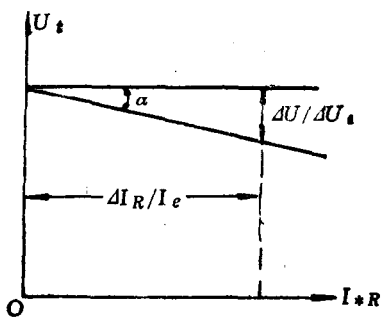


图 1-4 发电机的调差特性曲线

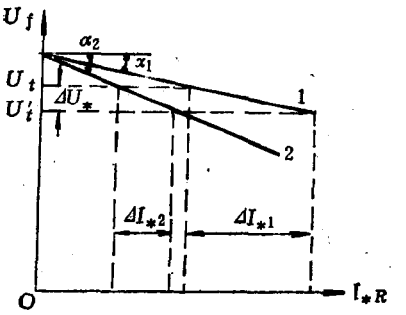


图 1-5 两台发电机并列运行时无功功率分布

$$\Delta U_*=\Delta I_{*1}\mathrm{tg}\alpha_1=\Delta I_{*1}\xi_1$$
$$\Delta U'_*=\Delta I_{*2}\mathrm{tg}\alpha_2=\Delta I_{*2}\xi_2$$

则
$$\frac{\Delta I_{*1}}{\Delta I_{*2}}=\frac{\xi_2}{\xi_1} \qquad (1\text{-}2)$$

因此，如果需改变发电机间的无功功率分布，可以在发电机自动电压调节器量测回路中调节

调差电阻，用以改变调差系数的大小。

（3）提高发电机的静稳定极限。发电机加装励磁控制后，负荷增加，能使励磁电流增加，使发电机端电压保持恒定，从而增加同步转矩，提高稳定极限。

（4）抑制自励磁现象。由于励磁控制能抑制电容电流的助磁作用，所以可防止同步发电机产生自励磁现象，从而增加充电线路的允许长度。

当水轮发电机向高压长距离线路空载合闸（向长线充电）时，或者发电机接有集中电容（串联电容）负荷时，由于电容电流产生助磁性的电枢反应，很可能引起自发性的增幅振荡，从而产生很高的端电压，这种现象称为发电机的自励磁。它可进一步的图解如下：如图1-6所示，曲线 L表示发电机的充电特性曲线，即端电压U_t和电容电流I_c的关系曲线，即 $U_t=f(I_c)$ 曲线。直线 A表示输电线路的外特性，即端电压U_t和I_c的伏安特性。设发电机未加励磁，仅有剩磁，发电机的残压将产生一个小的充电电流，这个电流产生助磁性的电枢反应，使发电机电压上升到充电特性 L上的相应数值，同时充电电流也相应的增大，产生更大的助磁电枢反应，使发电机电压进一步升高，如此往复，一直延续到发电机的充电特性L和外特性 A有明显交点为止。从这个过程中可以看到，发电机发生自励磁也是有条件的，这个条件就是线路电容要超过一定的数值。如图1-6所示，外特性 A的斜率等于电容阻抗x_c，当电容阻抗变小时，即充电线路变长时，此时相当于直线 A顺时针旋转，旋转至A'位置，和充电特性L相交，说明很容易发生自励磁。如果x_c值变大时，相当于 A逆时针旋转，旋转至A''位置，充电特性 L的直线部分和直线A''相互重合。x_c值继续增大，则两者不相交，说明不发生自励磁。

总之，当发电机带电容性负荷，产生自励磁的条件与发电机参数及线路长度有关。同步电机的纵轴电抗和横轴电抗分别为x_d和x_q，如果线路的电容电抗$x_c<x_q$，则线路电流是电感性的，发电机不会产生自励磁；当$x_c\geqslant x_d$时，由于L直线部分的斜率为x_d（不饱和值），充电特性 L和外特性 A不相交或重合，所以不会发生自励磁。这样，发生自励磁的

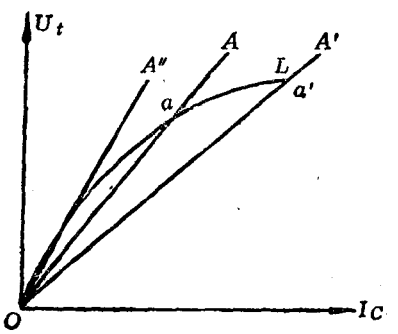


图 1-6　发电机自励磁图解

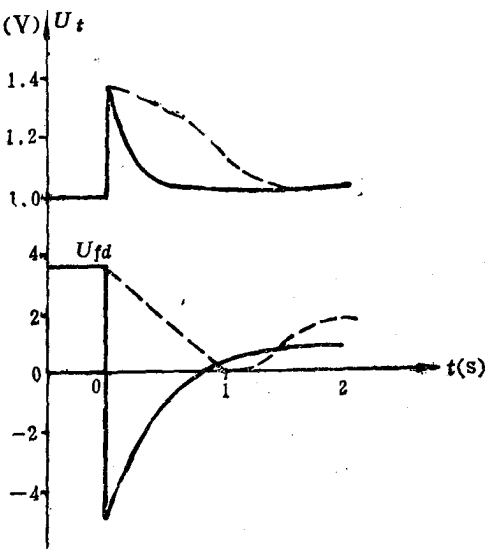


图 1-7　切断无功负荷，电压的升高

条件是

$$x_d > x_C > x_q \qquad (1\text{-}3)$$

由于上述原因，为了避免在线路充电时发生自励磁，通常线路的充电长度要受到限制，即要使 $x_C \geqslant x_d$。但如果在水轮发电机上备有快速励磁控制，充电时当线路电压高于预定值的瞬间，可使励磁电流反向降到零以下，这样可使充电线路的长度增加，抑制自励磁。

（二）在暂态时（即在大干扰时）

（1）抑制切断负荷时电压的升高。发电机切断负荷时，转速升高，发电机的去磁反应减小，其电压可能上升到危险数值，在此情况下，如果备有快速能逆变的励磁系统，及高增益的自动电压调节器，则在发电机切断额定无功负荷时，发电机电压可在0.4s以内降至1.1倍额定电压（图1-7）。在图1-7中，实线表示高增益快速的可逆变系统，虚线表示低增益的慢速系统。

（2）提高暂态稳定。发电机的暂态稳定是系统故障（短路、接地、断线等）引起大干扰时，使之恢复到稳定状态并能继续运行的能力。励磁控制对提高暂态稳定的作用可归纳为以下几个方面：①快速响应和高顶值的控制系统可以提高暂态稳定极限功率，延长故障切除时间；②短路切除后可以加速电压的恢复，使过程比较平稳，无后续振荡；③利用辅助信号，阻尼功率的后续振荡和低频振荡等。

除此之外，励磁控制系统尚包括一些保护设备，例如过电流限制、欠励限制、灭磁和转子过电压保护等，这些设备能够在一些特殊运行状况下保护或控制发电机或其他设备的安全运行。

值得提出的是，励磁控制作用的大小和很多因素有关，首先和励磁型式、励磁控制的结构及各种特性参数有关，其中快速响应和高顶值的励磁控制在保证电能质量、抗干扰、阻尼振荡、扩大稳定范围等方面的作用特别显著。

§1-4 对励磁及其控制的要求

对励磁及其控制的要求主要有两方面，即高度可靠性和快速响应。具体地说，就是要实现下列要求：

（1）同步电机的励磁及其控制应能保证在各种运行状态下的可靠性，其中包括：起励状态、空载状态、负荷状态、强励状态、灭磁状态等。

（2）在正常工作状态时，电压控制和无功功率控制应能得到很好的响应，并有足够的调节范围。例如，当负荷从零值变到额定值时，端电压应得到稳定调节，调节精度应保证在 $\pm 0.5\%$以内。

（3）励磁控制系统应能快速动作，在故障状态时应能迅速强励，将励磁电压迅速上升至顶值电压，换句话说，应有大的强励倍数和电压上升速度。强励倍数是指强励时励磁机最大稳定电压对发电机额定转子电压之比。根据规程，强励倍数一般不小于1.8～2.0。为了提高远距离输电极限，强励倍数可以提高到 3 ～ 4 及以上，转子电压上升速度一般为每秒 2 倍。

（ 4 ）在电磁暂态和机电暂态过程中应有足够的阻尼，以保证有良好的稳定性能。

（ 5 ）故障消除后，电压应能得到很好的恢复。

值得注意的是，在各种运行状态下，上述各项要求的侧重面是不相同的。例如，在负荷波动时，要求调节性能好；在出现小振荡时，要求稳定性能好；在严重故障时，要求迅速消除故障，维持暂态稳定。所以，在设计励磁控制和选择整定有关参数时，必须分析各种可能的运行情况，综合考虑各方面的要求。必要时，可将一些参数作为随机变量，以便得到最佳的动态性能。

第二章　同步电机的励磁系统型式

§2-1　概　　说

同步电机励磁系统型式的分类方法有多种，通常都是根据励磁电源分类，主要分为三大类：

（1）直流励磁机励磁系统。励磁电源是直流发电机，直流励磁机通常和同步电机装在同一轴上，由原动机带动旋转，励磁功率取自轴功率，与交流网路无关。

（2）自励半导体励磁系统。这种励磁系统的电源取自发电机本身或发电机所在的电力系统，例如在发电机出口处接一台励磁变压器，励磁变压器作为交流电源，经过半导体整流器整流，供给发电机励磁。在这种励磁系统中，励磁变压器、半导体整流器等都是静止元件，所以这种励磁系统又称全静止励磁系统。

自励半导体励磁系统又可分成几种不同型式，如果只用一台励磁变压器并联在机端，则称为自并励型式。如果除励磁变压器外，尚有与发电机定子回路串联的变压器作为交流励磁电源，则构成所谓自复励型式。根据励磁变压器和串联变压器的组合方式又可分为：1）直流侧并联自复励型式；2）直流侧串联自复励型式；3）交流侧并联自复励型式；4）交流侧串联自复励型式。

（3）他励半导体励磁系统。这种系统系用与主机同轴的交流发电机作为交流励磁电源，经半导体整流后，供给发电机的励磁。由于励磁功率取自轴功率，不受电力系统和发电机运行的影响，所以这种系统称为他励半导体励磁系统。这种励磁系统根据半导体整流器（硅二极管式可控硅）是静止的还是旋转的，又可分为他励静止半导体励磁系统和他励旋转式半导体励磁系统。

综上所述，励磁系统型式的分类可列入表2-1。

表 2-1　　励　磁　系　统　型　式　分　类　表

励磁系统型式	励　磁　功　率	整　流　方　式	交流励磁电源
直流励磁机	取自轴功率或厂用电系统	机械换向	—
自励半导体系统(全静止)	取自发电机本身或电力系统	硅二极管或可控硅	励磁变压器—自并励 励磁变压器和串联变—自复励
他励半导体系统	取自轴功率	静止二极管或可控硅 旋转二极管或可控硅	交流励磁机 静止式 旋转式(无刷)

§2-2 直流励磁机系统

直流励磁机系统的接线有自励式和他励式[图2-1(a)、(b)]。在自励式接线中，应用并激直流发电机作为励磁机，利用剩磁自励；在他励式接线中，除主励磁机外，尚有副励磁机，副励磁机供给主励磁机的励磁。励磁机、副励磁机大多与主机同轴旋转。在自励和他励接线中（图2-1），励磁回路都装有调节电阻 R，改变R的大小，即可改变直流励磁机的电压，从而改变发电机的励磁电流。有的接线图中，在励磁回路中加入旋转放大器或者引入附加控制电流，改变放大器电势或控制电流的大小，也可调节励磁。

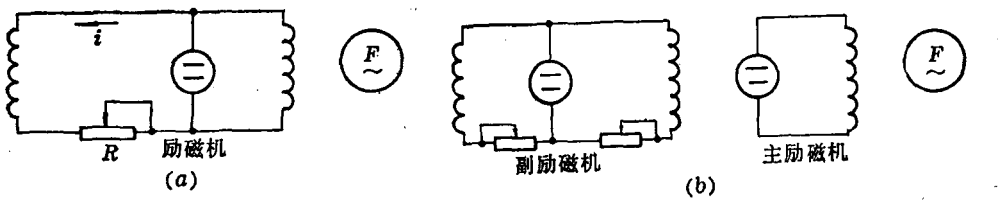


图 2-1 直流励磁机系统接线图
(a)自励式；(b)他励式

直流励磁机系统有很多优点：1)由于励磁机一般和发电机同轴相连，所以系统中发生短路或电压发生剧变时，主机的惯性很大，励磁机的转速不受影响，能够照常励磁； 2)由于励磁机可以改变极性，所以在切断负荷时能快速去磁； 3) 当系统发生故障时，在发电机励磁绕组上感应的交流电形成闭环回路，不会发生转子过电压。其主要缺点是：整流子集电环电刷的维护工作量较大，且往往是故障的根源；同轴高速励磁机由于受到机械强度和换向困难等限制，极限容量在300～500kW之间，所以不能用于大型机组（单机容量大于（150MW）；直流励磁机有较大的时间常数，因此电压响应速度较慢。

§2-3 自并励半导体励磁系统

图2-2表示自并励半导体励磁系统原理图。励磁变压器LB接在发电机机端，通过可控硅整流装置KZ供给发电机励磁。当发电机电压变化时，自动电压调节器ZLT可以改变可控硅KZ的控制角α的大小，保证机端电压恒定。自并励半导体励磁系统的优缺点如下：

（ 1 ）制造简单、经济、布置方便。

（ 2 ）由于没有转动部分，工作可靠、维护简单。

（ 3 ）由于没有励磁机的时滞，反应速度快，有高速响应的特征（响应时间一般小于0.05S）。

（ 4 ）在负荷变化而引起速率变化时，端电压只反应速率的一次方；而用同轴励磁机时，励磁机的电压反

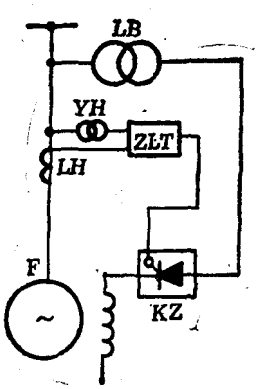


图 2-2 自并励半导体励磁系统原理图
LB—励磁变压器，KZ—可控硅整流器；ZLT—自动电压调节器

应速率的一次方，因而发电机的端电压要反应速率的二次方。因此，这种系统对抑制水轮发电机甩负荷引起的过电压特别有利。

（ 5）系统发生短路时，端电压下降，从而使强励能力受到影响，在最不利的情况下可能引起失磁。

（ 6 ）由于短路电流迅速衰减，带时限的继电保护可能会拒绝动作。

§2-4　自并励半导体励磁系统中发电机的短路特性

在设计和选用自并励半导体励磁系统时，必须考虑发电机在近端短路时的强励能力以及带时限继电保护的动作情况。为此，必须分析自并励半导体励磁系统中发电机的短路特性。

自并励发电机的短路特性和他励励磁系统有很大的不同，由于励磁变压器高压侧接在发电机端，所以励磁电势E_q、励磁电压U_{fd}都与发电机端电压 U_t有关。当发电机端三相短路时，端电压下降至零，所以自并励发电机的三相短路电流也迅速衰减到零。在他励励磁系统中，发电机的稳态励磁电势不受端电压的影响，所以短路电流只衰减到一个与励磁电势相对应的稳态数值。除此之外，自并励和他励系统中短路电流衰减时间常数也不相同。在自并励系统中，由于励磁电压U_{fd}的稳态值随发电机的短路电流值而变化。短路电流越大时，励磁电压的稳态值也随着增大，所以自并励发电机短路时，相当于在转子励磁回路中引入一个负电阻，短路电流衰减的时间常数因而要比他励系统的大。图2-3表示在自并励系统和他励系统中发电机短路电流的变化曲线。由图2-3可见，在$t=0$的瞬间,二者短路电流相同；之后，由于自并励系统中短路电流衰减的时间常数较大，所以在最初一段时间自并励发电机的短路电流衰减比他励慢。但由于他励系统中短路电流衰减到一个稳态数值，而自并励发电机的短路电流最终衰减到零，所以，后一段时间自并励发电机的短路电流就好象衰减得快些。

校验自并励发电机在短路时的强励能力，分析影响短路特性的因素，可用完整的派克方程。但为了简化计算，最好采用图 2-4所示的计算电路图，并作下列假定： 1)忽略定子电流的非周期分量；2)阻尼绕组的影响暂不考虑；3)假定整流桥是全控桥，忽略管压降和换流压降；4)假定三相短路后，自并励发电机的励磁电压、端电压和定子电流成线性比例关系；5)发电机的转速不变。

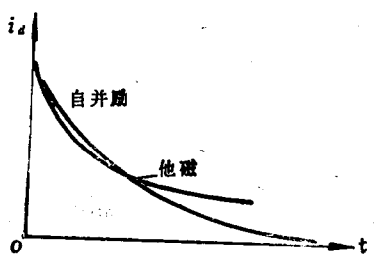


图 2-3　在自并励和他励系统中发电机短路电流变化曲线

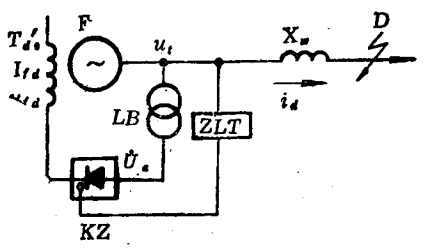


图 2-4　自并励发电机短路时计算电路图

自并励发电机在外部发生三相短路时，可用联系定子和转子的电磁暂态基本方程式表式为

$$E_{q\infty}=E_q+T_{d0}'\frac{dE_q'}{dt} \qquad (2\text{-}1)$$

式中 E_q——发电机的空载电势；

$E_{q\infty}$——发电机空载电势的稳态值；

E_q'——发电机的暂态电势；

T_{d0}'——发电机定子绕组开路时，转子绕组的时间常数。

短路时，自并励发电机强励，根据假定4)，励磁电压、端电压和定子电流的关系式可用标么值表示为

$$E_{q\infty *}=U_{fd*}=\frac{\cos\alpha_q}{\cos\alpha_0}U_{t*}=K_\alpha U_{t*} \qquad (2\text{-}2)$$

$$U_{t*}=I_{d*}X_w \qquad (2\text{-}3)$$

式中 K_α——顶值电压系数，α_q、α_0分别为可控硅强励工况和空载工况的控制角，

$$K_\alpha=\frac{\cos\alpha_q}{\cos\alpha_0};$$

U_{fd*}——发电机的励磁电压标么值；

I_{d*}——发电机的短路电流标么值；

X_w——短路地点的外部电抗。

因为

$$E_{q*}'=E_{q*}\frac{X_d'+X_w}{X_d+X_w} \qquad (2\text{-}4)$$

$$I_{d*}=\frac{Eq_*}{X_d+X_w} \qquad (2\text{-}5)$$

将式(2-2)、(2-3)、(2-4)和式(2-5)代入式(2-1)，得（为书写简明起见，略去＊号）

$$E_q+T_{d0}'\frac{X_d'+X_w}{X_d+X_w}\times\frac{dE_q}{dt}=K_\alpha\frac{X_w}{X_d+X_w}E_q$$

或写成下列形式

$$\frac{dE_q}{dt}+T_{de}E_q=0 \qquad (2\text{-}6)$$

$$T_{de}=\frac{T_{d0}'\dfrac{X_d'+X_w}{X_d+X_w}}{1-K_\alpha\dfrac{X_w}{X_d+X_w}} \qquad (2\text{-}7)$$

T_{de}称为自并励发电机短路时励磁回路的等效时间常数。他励励磁系统中，发电机短路时，时间常数为$T_d'=T_{d0}'\frac{X_d'+X_w}{X_d+X_w}$。显然，$T_{de}>T_d'$。从式(2-7)可知，自并励发电机短路时，相当于转子励磁回路中引入了一个负电阻，其标么值为$K_\alpha\frac{X_w}{X_d+X_w}$，使励磁回路的等效电阻减小，因而等效时间常数$T_{de}$增大。

从式(2-7)可看到，影响自并励发电机短路特性的因素有下列几个：

（1）外部电抗X_w。短路地点离得愈远时，X_w值愈大，式（2-7）中$K_\alpha\frac{X_w}{X_d+X_w}$值就显得愈大，说明在励磁回路中引入的负电阻值愈大，也就是自并励发电机的短路电流衰减愈慢。在极限情况下：

当 $$1-K_\alpha\frac{X_w}{X_d+X_w}=0 \text{ 时}$$

$$T_{de}=\infty$$

相当于短路电流暂态分量不衰减，此时，外部电抗称为临界外电抗$X_{w(lj)}$，可用下式计算为

$$X_{w(lj)}=\frac{X_d}{K_\alpha-1} \qquad (2\text{-}8)$$

如果短路点的外电抗在临界值之内，即$X_w<X_{w(lj)}$，则短路电流是衰减的；如果$X_w>X_{w(lj)}$，等效时间常数T_{de}为负值，暂态过程中短路电流及励磁电流是上升的，这时自动电压调节器能自动增大整流桥的控制角，减小励磁。在这种情形下，应用自并励励磁系统并不影响系统运行。由于上述原因，所以在选用励磁系统型式时，可根据具体参数计算临界外电抗。如果临界外电抗数值比较小，则说明引起短路电流衰减的短路范围较小，对采用自并励励磁型式是有利的。欲使$X_{w(lj)}$小，则要求K_α大，即需减小$\cos\alpha_0$，增大α_0角。但空载励磁电压是一定的，减小了$\cos\alpha_0$，就需要增大励磁变压器的二次电压，这样会导致变压器容量增大、造价提高。

（2）短路种类。上面分析的是三相对称短路，对于不对称短路，短路电流的正序分量I_1可用下式计算为

$$I_1^{(n)}=\frac{E}{X_{1\Sigma}+X_\Delta^{(n)}} \qquad (2\text{-}9)$$

式 中 (n)——短路种类。两相短路时，n写成2；

$X_\Delta^{(n)}$——额外电抗、随短路种类的不同而不同。在单相接地时，$X_\Delta^{(1)}=X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}$；

在两相短路时$X_\Delta^{(2)}=X_{2\Sigma}$；两相接地短路时，$X_\Delta^{(1,1)}=X_{2\Sigma}/\!/X_{0\Sigma}$；

$X_{1\Sigma}$、$X_{2\Sigma}$、$X_{0\Sigma}$—— 分别为网路的正序电抗、负序电抗和零序电抗。

由上可知，在不对称短路时，短路电流的正序分量相当于在短路点每相中接入一个额外电抗$X_\Delta^{(n)}$时的三相短路电流。这时的临界电抗由下式决定，即

$$1-K_\alpha\frac{X_{w(lj)}^{(n)}+X_\Delta^{(n)}}{X_d+X_{wlj}^{(n)}+X_\Delta^{(n)}}=0 \qquad (2\text{-}10)$$

$$X_{w(lj)}^{(n)}=\frac{X_d}{K_\alpha-1}-X_\Delta^{(n)} \qquad (2\text{-}11)$$

由式（2-11）可知，在不对称短路时，临界电抗比三相短路时小，因此，在自并励系统中校验短路时，强励能力应以三相短路为计算条件。

（3）顶值电压系数K_α。提高K_α可使$X_{w(lj)}$减小，但空载控制角α_0如果增加太大，运行会不太稳定。前已述及，α_0增大，将会使变压器投资增大。对一般可控硅励磁，α_0约为70°～80°。

综上所述，自并励发电机只有在近处短路时$[X_w<X_{w(lj)}]$，短路电流才衰减。最不利

的故障情况是机端三相短路，即使在这种最不利的情况下，由于衰减时间常数较大，也能保证主保护可靠动作。如果短路地点稍远（如发电机一变压器组接线时高压母线短路），则短路电流衰减已较慢，此时自并励励磁系统的缺点显得并不严重。

缩短故障切除时间在很大程度上可以弥补自并励励磁系统的不足，因为短路切除时间愈快，电压恢复愈快，强励能力也能迅速恢复，只有在近端短路，切除时间又较慢的情况下（例如保护第二段动作，时间为0.5～0.7S），自并励励磁系统的缺点才比较严重。在这种情况下，就需考虑增大强励能力、改进保护方式、或者考虑采用自复励励磁系统或他励励磁系统。

§2-5　自复励半导体励磁系统

产生以上自励励磁系统缺点的原因，主要是由于励磁电压和发电机的工作状态有关，尤其在中小容量发电机供电的孤立系统，短路故障或大容量电动机的起动往往会使发电机电压长时间低落，不能保证用户电动机的起动和正常运行．在这种情况下就必须加一串联变压器和发电机电流回路串联，这样就构成自复励励磁系统。前已述及，根据励磁变压器和串联变压器的组合方式又可分为交流侧和直流侧串联、并联几大类．现在分别叙述它们的作用和原理。

一、交流侧叠加自复励励磁系统

图2-5表示交流侧串联自复励励磁系统的原理接线图。如图所示，加在可控硅桥上的交流电压由两部分组成：一部分由励磁变压器 LB 二次侧供给，另一部分由串联变压器 GLH 供给。发电机运行方式改变时，其电压和电流都有变化，由于加在整流桥的阳极电势 E_a 是两部分电压的相量和，所以，E_a 能够不随发电机运行方式的改变而保持恒定。这样，在自复励励磁系统中，自并励励磁系统的缺点在很大程度上被克服，也就是自复励励磁系统能够使自励励磁系统具有他励励磁的特性。

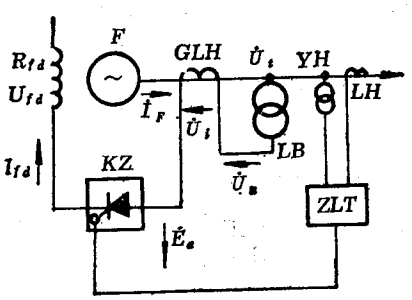


图 2-5　交流侧串联自复励励磁系统原理接线图

图2-6表示交流侧并联自复励励磁系统原理图，和交流侧串联相同，发电机的励磁电流由两个交流电源 LB 和 GLH 经过整流器 GZ 供

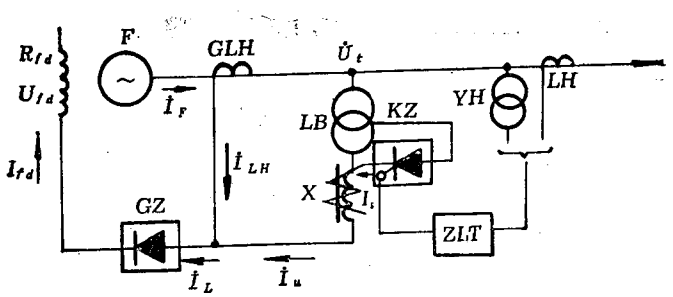


图 2-6　交流侧并联自复励励磁系统原理图

给，所不同的是LB和GLH在交流侧并联。发电机空载时，GLH无输出，LB经过可控电抗器和整流器GZ供给发电机的空载励磁电流。有负荷时，GZ交流侧的电流I_L由两部分组成：由LB供给的I'_μ和由GLH供给的I_{LH}，用式子表示如下：

$$\dot{I}_L=\dot{I}'_\mu+\dot{I}_{LH} \qquad (2\text{-}12)$$

I_{LH}和发电机定子电流成比例。当发电机负荷或功率因数变化时，I_{LH}也跟着变化，所以这种系统能够自动补偿电枢反应而调节发电机的电压，起到相复励的作用。I'_μ落后于发电机端电压$\dot{U}_t 90°$，它的大小和可控电抗器的电抗值X有关。从图2-6可以看到，自动电压调节器ZLT可根据电压偏差，通过可控整流桥KZ控制电抗器的饱和程度，改变X值，以改变$\dot{I}'_\mu$值的大小，从而保证电压能得到很好的调整。总之，在交流侧叠加自复励励磁系统中，两个电源连接方式虽然有并联和串联的不同，但所起的作用是相同的。电压源来自发电机端电压，电流源来自发电机的电枢电流，两个电源组合可起到相补偿的作用，即能抑制由于负荷变化而引起的电压变化。如果负荷增加，则可强力的快速励磁；如果发生短路，则可利用强大的短路电流本身来提高系统的稳定性。并联和串联不同之点在于：并联时，应当是两个电流源并联，而励磁变压器LB本身是个电压源，所以在并联时必须串联一个高阻抗的电抗器X才能转化成电流源。此时，串联变GLH本身是个电流源，它的互感抗很大，空载电流小，不必具有空气隙；另一方面，它正常运行时和电流互感器相似，接近短路状态，所以不容许二次侧开路，否则容易产生过电压。交流侧应当是两个电压源串联，而此时串联变GLH本身是个电流源，电流源要转化为电压源必须并联一个低值电抗，为此串联变GLH必须制成具有空气隙的低电抗X_μ。正常运行时，它接近空载状态，二次侧开路也不会产生过电压。

二、直流侧叠加自复励励磁系统

图2-7表示直流侧并联和串联自复励励磁系统的原理图。从图上可看到，发电机的励磁电流I_{fd}或励磁电压U_{fd}由两部分组成：

并联时[图2-7(a)]

$$I_{fd}=I_{KZ}+I_{GZ} \qquad (2\text{-}13)$$

串联时[图2-7(b)]

$$U_{fd}=U_{KZ}+U_{GZ} \qquad (2\text{-}14)$$

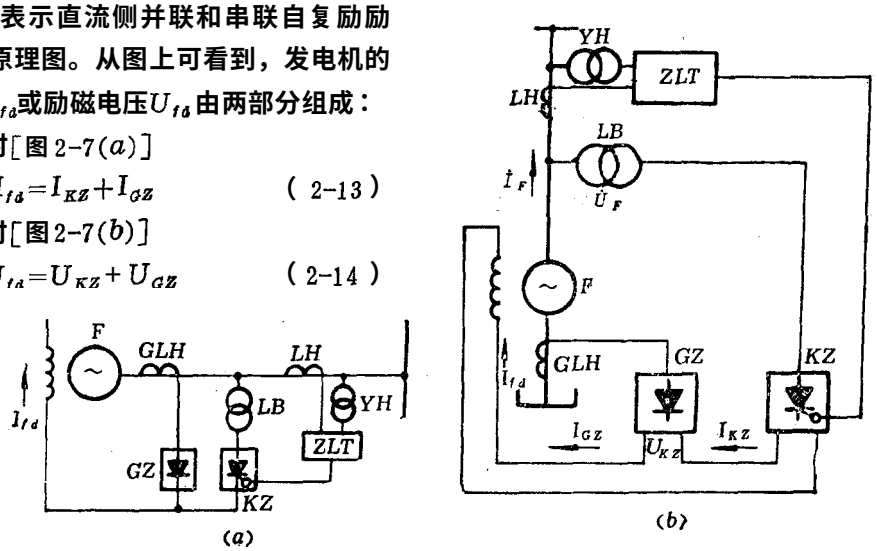


图 2-7 直流侧叠加自复励励磁系统的原理图

(a)并联时；(b)串联时

当发电机空载运行时，定子电流$I_F=0$，仅由自励部分KZ供给空载励磁电流，改变可控桥KZ的控制角可以调节发电机的端电压。当发电机带负荷运行时，可控桥KZ和二极管GZ共同供给发电机的励磁。当负荷增加时，GZ供给的部分自动增加；当发电机端短路时，可控桥KZ失去交流电源，I_{KZ}或U_{KZ}等于零，但这时由于复励桥GZ供给励磁的部分增大，如果参数选择适当，就可对发电机进行强行励磁，使定子短路电流和励磁电流衰减很慢而趋于较高的稳定值，从而改善了短路过程的动态性能。

值得提出的是，直流侧叠加自复励励磁系统和交流侧叠加时不同，无论并联或串联，励磁电流或电压都是在直流侧算术相加，而不是在交流侧相量相加，所以，直流侧叠加自复励励磁系统不具有相补偿的特性。

直流侧叠加自复励励磁系统广泛应用于中小型机组。它的主要优点是，可以降低对硅元件反向电压或电流的要求；缺点是，可控桥和复励桥在各种运行状态下不容易很好地配合，可能会产生一方被封锁或一方被堵塞的现象。例如并联叠加时，励磁电流是I_{KZ}和I_{GZ}电流之和，两者都不能反向。当发电机发生近端短路时，自励电流I_{KZ}很小，可能被封锁而送不出去；复励桥电流I_{GZ}虽然很大，如果串联比选择不适当，I_{GZ}可能小于转子绕组中的暂态电流，强励电流送不出去，因而造成I_{GZ}被堵塞，产生很高的尖峰过电压。串联叠加时与上述情形有所不同，交流侧是两个电压源经过各自的整流桥串联运行，复励桥的电流I_{GZ}等于可控桥电流I_{KZ}。在机端三相短路的情况下，复励桥的输出电压U_{GZ}高，可控桥失去电源，U_{KZ}接近零，但可控桥能保持最后的导通状态，所以直流回路中仍能流过强励电流，不产生配合和堵塞的问题。由于上述原因，直流侧串联自复励励磁系统要比直流侧并联自复励励磁系统的应用广泛得多。

§2-6　自复励半导体励磁系统的计算和参数选择

要使自复励发电机具有相类似的他励励磁特性，必须合理地计算和选择自复励励磁系统的各个参数，其中包括励磁变压器和串联变压器的变比和互感抗。计算和选择的原则是：在发电机一变压器组升高电压侧发生三相对称短路或不对称短路时，整流桥的阳极电势E_d基本上保持恒定，同时还要保证在下列运行状态时有足够的强励能力，即：1）发电机一变压器组升高电压侧三相短路；2）由于远方短路、系统中大容量机组或联络线切除等原因使发电机端电压下降5％时，发电机带85％额定有功，功率因数为额定值。上述两种工作状态对强励来说都是难以实现的，所以，校验强励能力时应作为计算条件。通常规定，在此两种工作状态下，强励电压不得小于两倍额定励磁电压。除此之外，设计自复励励磁系统时，还必须校验发电机后备继电保护在外部短路时的动作情况以及发电机能否进行自同期等情况。现以交流侧串联的自复励励磁系统为例，说明符合上述原则的计算方法。

一、励磁变压器变比K_u的选择

1.按三相短路时，维持可控桥阳极电压E_d不变的原则求$K_u X_\mu$

图2-8表示交流侧串联自复励系统中E_d的相量图。从图上可看到，在带额定负荷时[图2-8（a）]，阳极电势为

$$E_{a(e)}=\sqrt{\left(\frac{U_{F(e)}}{K_u}\cos\psi_e\right)^2+\left[\frac{U_{F(e)}}{K_u}\sin\psi_e+I_{F(e)}X_\mu\right]^2}$$

$$=\frac{U_{F(e)}}{K_u}\sqrt{\cos^2\psi_e+\left(\sin\psi_e+\frac{I_{F(e)}}{U_{F(e)}}K_uX_\mu\right)^2}$$

$$=\frac{U_{F(e)}}{K_u}\sqrt{\cos^2\psi_e+(\sin\psi_e+K_uX_{\mu*})^2} \qquad (2\text{-}15)$$

式中 $U_{F(e)}$、$I_{F(e)}$、$\cos\psi_e$——分别为额定负荷时，发电机的相电压、定子电流和额定功率因数；

$E_{a(e)}$——发电机带额定负荷时，整流桥上的阳极电势；

K_u——励磁变压器的变比；

X_μ——串联变压器的互感抗。

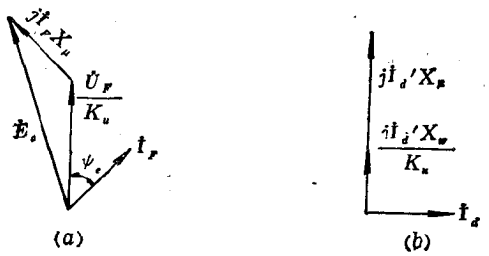


图 2-8 交流侧串联自复励系统中 $\dot{E}_a$ 的相量图
（a）带额定负荷时（b）三相短路时

电力系统中发电机经外电抗 X_w 三相短路时[图2-8（b）]，阳极电势 $E_{a(D)}$ 为两个串联电压的算术和，即

$$E_{a(D)}=\frac{I_d'X_w}{K_u}+I_d'X_\mu=\frac{I_d'}{K_u}(X_w+K_uX_\mu)=\frac{E_q'}{K_u(X_d'+X_w)}(X_w+K_uX_\mu) \qquad (2\text{-}16)$$

由于发电机的暂态电势 E_q' 为

$$E_q'=U_{Fe}\sqrt{\cos^2\psi_e+(\sin\psi_e+X_{d*}')^2} \qquad (2\text{-}17)$$

式中 I_d'——发电机暂态短路电流；

X_d'、X_{d*}'——分别为发电机的暂态电抗和其标么值。

将式（2-16）代入式（2-15），得

$$E_{a(D)}=\frac{U_{F(e)}(X_w+K_uX_\mu)}{K_u(X_d'+X_w)}\sqrt{\cos^2\psi_e+(\sin\psi_e+X_{d*}')^2} \qquad (2\text{-}18)$$

若使三相短路时阳极电压 $E_{a(D)}$ 和额定负荷时的 $E_{a(e)}$ 相等，即式（2-15）和式（2-18）相等，则得

$$K_uX_\mu=X_d' \qquad (2\text{-}19)$$

2.按电力系统不对称短路时，维持可控桥阳极电压不变，求 K_uX_μ

不对称短路时，阳极电势 $E_{a(D)}$ 可分为正序分量 $E_{a(D)1}$ 和负序分量 $E_{a(D)2}$。相对应的

发电机相电压U_F和定子电流I_F也有正序分量U_{F1}、I_{F1}和负序分量U_{F2}、I_{F2}。因此

$$\dot{E}_{a(D)1}=\frac{\dot{U}_{F1}}{K_u}+j\dot{I}_{F1}X_\mu \qquad (2\text{-}20)$$

$$\dot{E}_{a(D)2}=\frac{\dot{U}_{F2}}{K_u}+j\dot{I}_{F2}X_\mu=\frac{1}{K_u}(\dot{U}_{F2}+jK_u\dot{I}_{F2}X_\mu)$$

$$=\frac{1}{K_u}[\dot{U}_{F2}+j\dot{I}_{F2}X_2+j\dot{I}_{F2}(K_uX_\mu-X_2)] \qquad (2\text{-}21)$$

由于发电机的内电势在任何情况下都是三相对称的，所以

$$U_{F2}+jI_{F2}X_2=0 \qquad (2\text{-}22)$$

在不对称短路时，要求阳极电压仍保持对称，即$E_{a(D)2}=0$。根据式（2-21）和式（2-22），则有

$$K_uX_\mu-X_2=0 \qquad (2\text{-}23)$$

由于发电机的X_2和X'_d在数值上相差不会很远，所以根据式（2-19）和式（2-23）适当地选择K_uX_μ值，可以在电力系统发生不同情况的故障时，使阳极电压的数值和对称度都不会偏离需要值太多。

3.根据强励要求，取$E_{a(D)}=E_{a(e)}$，求励磁变压器的变比K_u

假定整流桥是三相半控桥，强励时可控硅全开放，控制角$\alpha=0$，换流角为$\gamma=\gamma_q$，一般为40°～50°。根据整流桥的外特性公式，得

$$U_{fd(q)}=K_\alpha U_{fd(e)}=1.35\sqrt{3}\,E_{a(D)}\frac{1+\cos\gamma_q}{2}-\Sigma\Delta U \qquad (2\text{-}24)$$

式中 $U_{fd(q)}$、$U_{fd(e)}$——分别为强励和额定负荷时的励磁电压；

K_α——顶值电压系数；

γ_q——强励时的换流角；

$\Sigma\Delta U$——可控桥臂的正向压降。

根据$E_{a(D)}=E_{a(e)}$以及式（2-15）和式（2-19），得

$$E_{a(D)}=E_{a(e)}=\frac{U_{F(e)}}{K_u}\sqrt{\cos^2\psi_e+(\sin\psi_e+K_uX_{\mu*})^2}$$

$$=\frac{U_{F(e)}}{K_u}\sqrt{\cos^2\psi_e+(\sin\psi_e+X'_{d*})^2} \qquad (2\text{-}25)$$

将式（2-25）代入式（2-24），得

$$K_u=\frac{1.35\sqrt{3}U_{F(e)}(1+\cos\gamma_q)}{2(K_\alpha U_{fd(e)}+\Sigma\Delta U)}\sqrt{\cos^2\psi_e+(\sin\psi_e+X'_{d*})^2} \qquad (2\text{-}26)$$

二、串联变压器互感抗X_μ的选择

根据所求出的K_u值，再根据式（2-19），得

$$X_\mu=\frac{X'_{d*}}{K_u}\times\frac{U_{F(e)}}{I_{F(e)}}\Omega \qquad (2\text{-}27)$$

三、串联变压器变比K_i的选择

求出串联变压器互感抗X_μ后，即可根据整流器的外特性和换流角的条件，求出励磁变压器和串联变压器二次侧的总电抗X_2和串联变压器的变比K_i。假定串联变二次侧的漏