第3章　水轮发电机励磁的自动调节

1. 水轮发电机的励磁方式
2. 发电机特性和调节励磁电流的方法
3. 自动调节励磁装置的任务及其要求
4. 强行励磁、强行减磁和自动灭磁
5. 可控硅励磁系统中的整流原理
6. 自动励磁调节器的基本原理
7. 可控硅励磁的数字控制原理

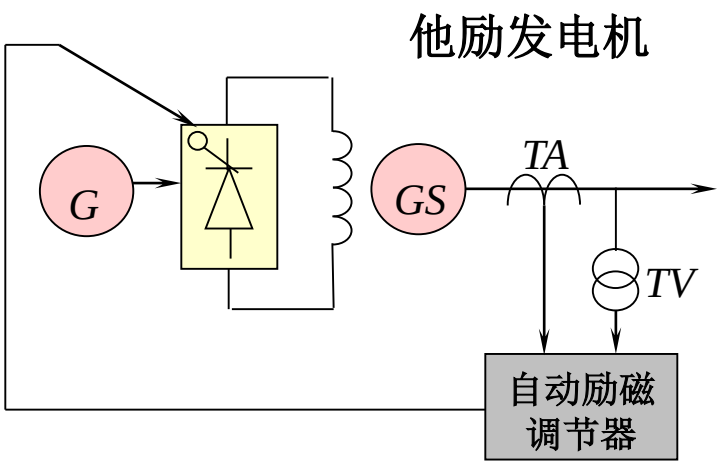
3.1　水轮发电机的励磁方式（《励磁系统》课程第1章）

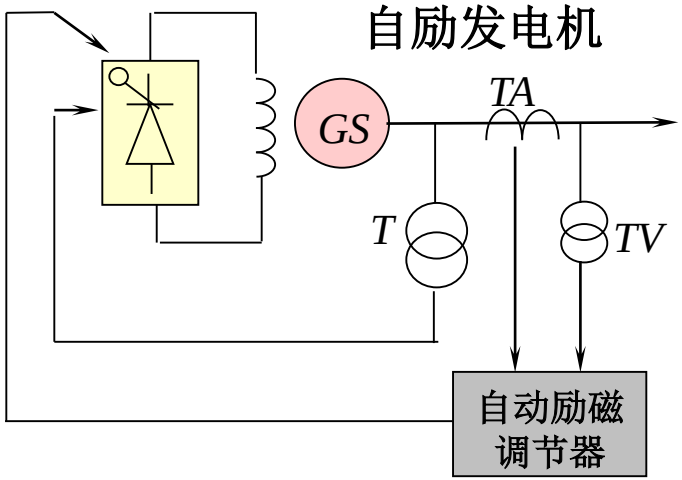
同步发电机将旋转的机械能转换成为电能，在转换中需要有一个直流磁场。而产生这个磁场的直流电流称为励磁电流。

励磁方式是指发电机获得励磁电流的方式：

- 从其它电源获得励磁电流的发电机称为他励发电机；
- 从发电机本身获得励磁电流的发电机称为自励发电机。

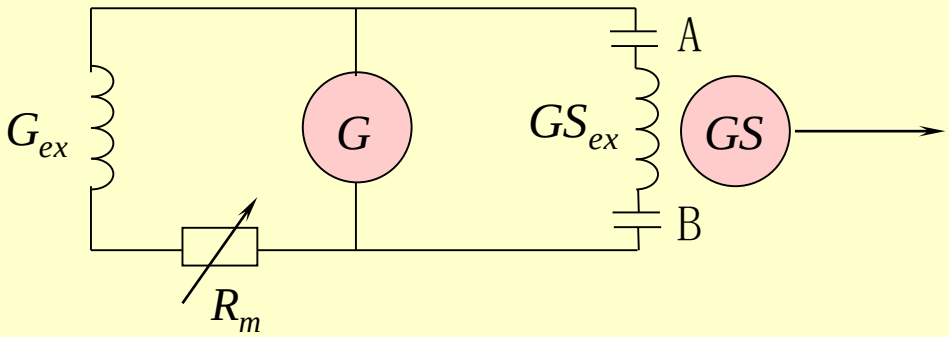
同步发电机的两种励磁方式：

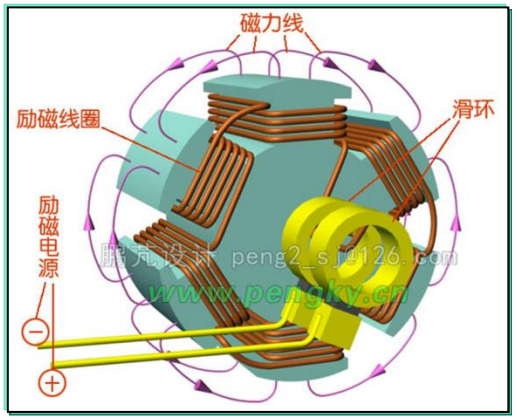




1、由直流发电机供电的励磁方式

这种励磁方式的发电机具有专用的直流发电机。其中直流发电机称为励磁机（发电机属于他励方式）。励磁机与发电机同轴，发电机的励磁绕组通过装在大轴上的滑环及固定电刷从励磁机获得直流电流。原理如下：





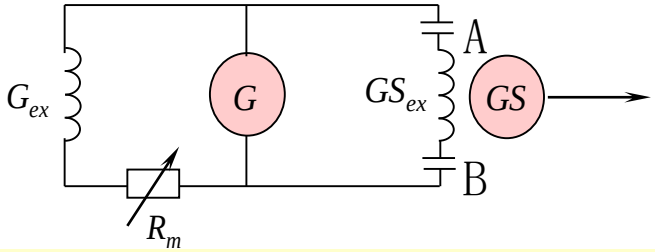
GS — 同步发电机；　GS_{ex} — 发电机的励磁绕组；

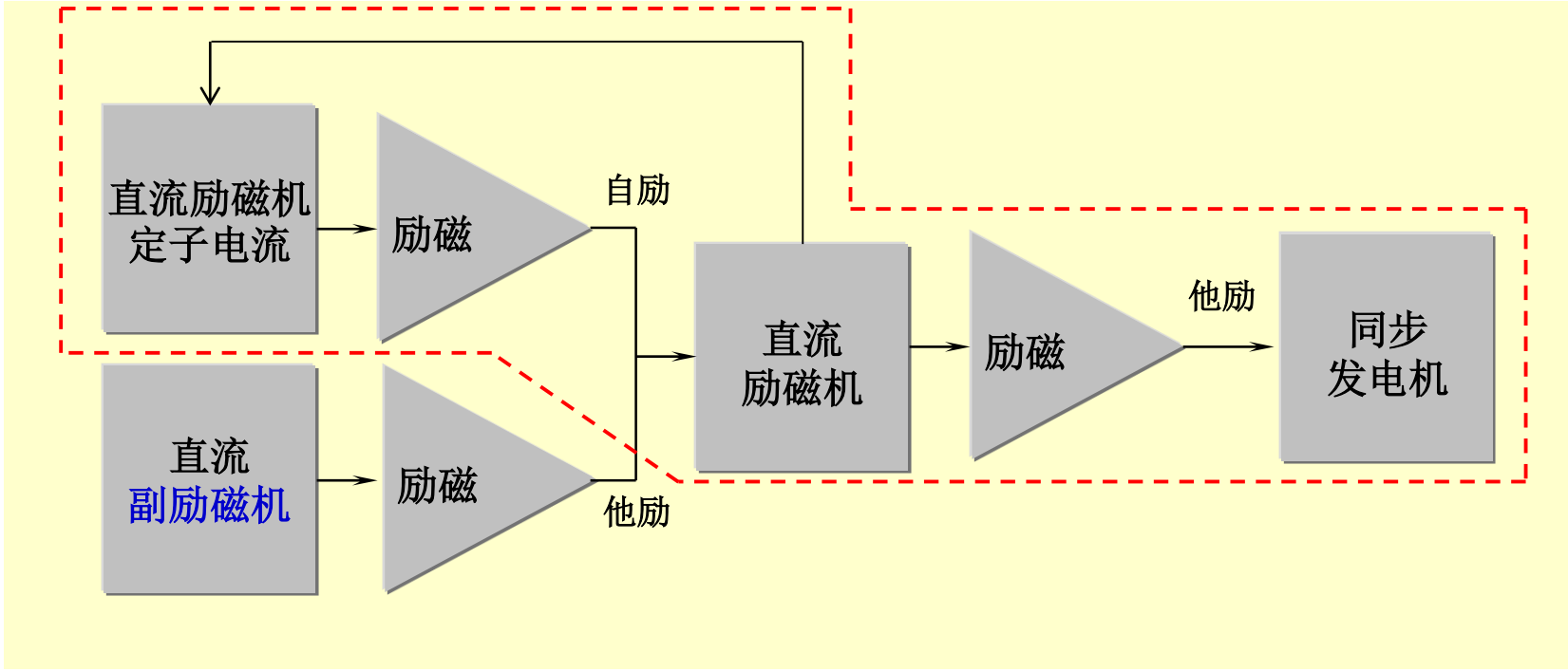
G — 直流励磁机电枢；G_{ex} — 励磁机的励磁绕组；

R_m — 磁场调节电阻；　A, B — 滑环和电刷。

图中，发电机属于他励，而励磁机则属于自励。

若励磁机的励磁电流由另外一台励磁机提供，则励磁机的励磁方式属于他励，而给励磁机提供励磁电流的直流发电机称为副励磁机。





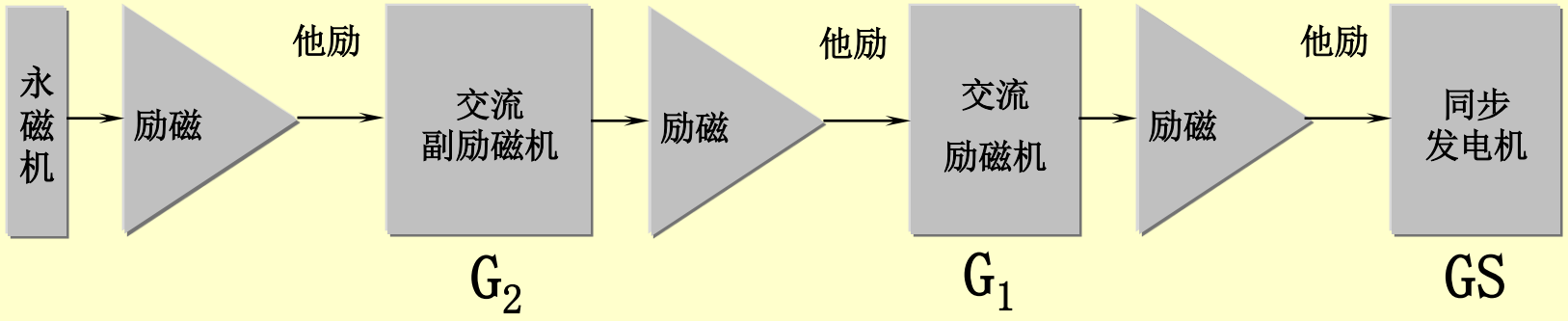
上述由直流发电机供电的励磁方式具有励磁电源独立、工作比较可靠和减少自用电消耗量（与无励磁机的励磁方式相比）等优点，是过去几十年间发电机的主要励磁方式，具有较成熟的运行经验。

其缺点是励磁调节速度比较慢，维护工作量较大，且随着发电机容量的增大，励磁机的容量要求越来越大，由于直流励磁机存在整流环（电机内部），而大功率的整流环的制造、使用和维护都比较困难，成本也很高，无法适用大容量机组的需要，故在**100MW**以上的机组中很少采用。

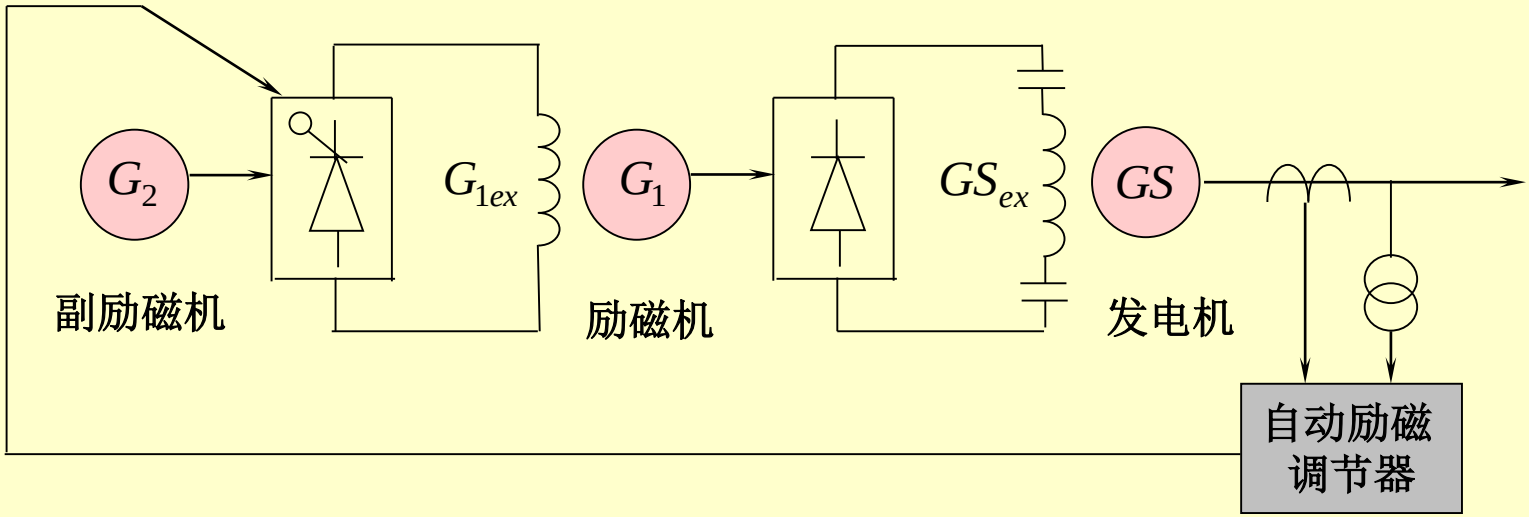
2、由交流励磁机供电的励磁方式

这种励磁方式的发电机（GS）采用交流励磁机（G_1）提供励磁电流。它输出的交流电流经整流后供GS励磁，因此属于他励方式。

- 若G_1的励磁电流由自身提供，则G_1为自励方式；
- 若G_1的励磁电流由另外一台励磁机（称为交流副励磁机G_2）提供，则G_1为他励方式。而G_2可以是交流发电机，并且G_2输出的交流电流经整流后供G_1励磁。



交流励磁机供电的励磁方式原理：



GS — 同步发电机；G_1 — 交流励磁机；G_2 — 交流副励磁机；

GS_{ex} — 同步发电机的励磁绕组，不可控硅励磁；

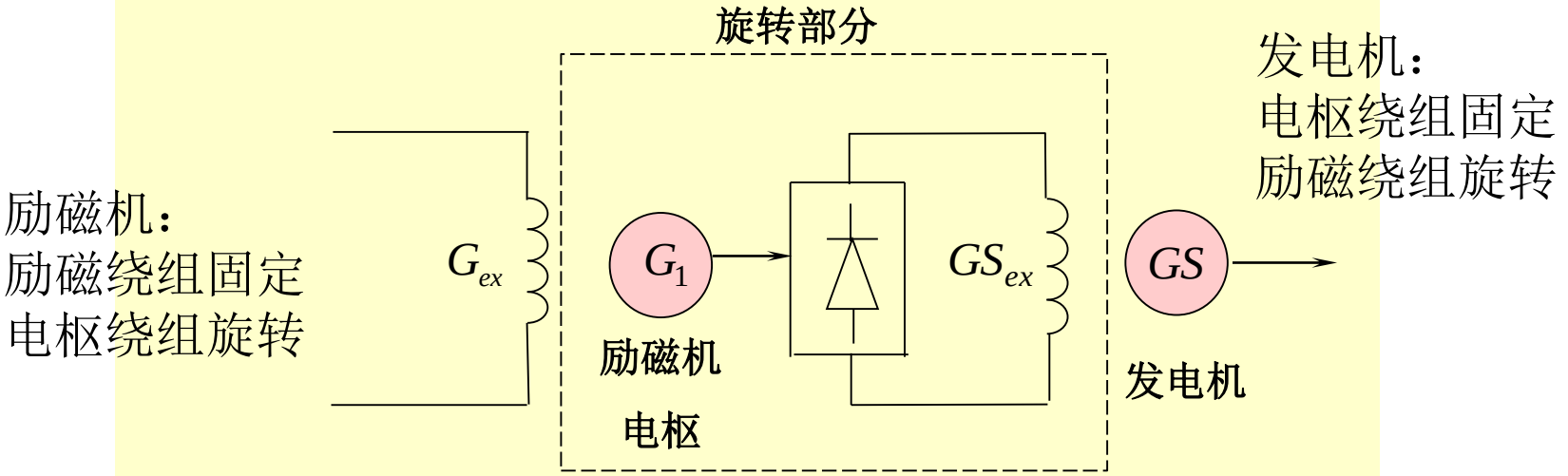
G_{1ex} — 励磁机的励磁绕组，可控硅励磁；

也可采用可控硅整流装设在励磁机的输出回路。

上述由交流励磁机供电的励磁方式由于没有整流环，故维护工作量小。同时也是独立电源，受外界干扰较小，工作比较可靠，因此在大容量发电机中得到广泛的应用。

这种励磁方式的主要缺点是发电机转子回路仍存在电刷和滑环，而这些转动接触部件是比较薄弱的环节，因此滑环的巡视、检修工作量很大，为了解决这个问题，根本的办法是革除滑环、电刷这一薄弱环节，因此便出现了无刷的励磁方式。

无刷励磁的励磁机也是交流发电机，所不同的是其电枢是旋转的，从励磁机电枢输出的三相交流电，经整流后直接送至发电机的转子回路。由于励磁机电枢和发电机转子在同一根轴上旋转，且整流装置也装在同一根轴上一起旋转，所以他们之间无需采用任何滑环和电刷之类的转动接触部件，因而就实现了无刷励磁。



该励磁方式滑环和电刷，因此结构简单，维护工作量小。但是其转子回路的电压、电流一般很难进行监测（高速旋转），目前在我国还未被广泛采用，但是有一定的发展前途。

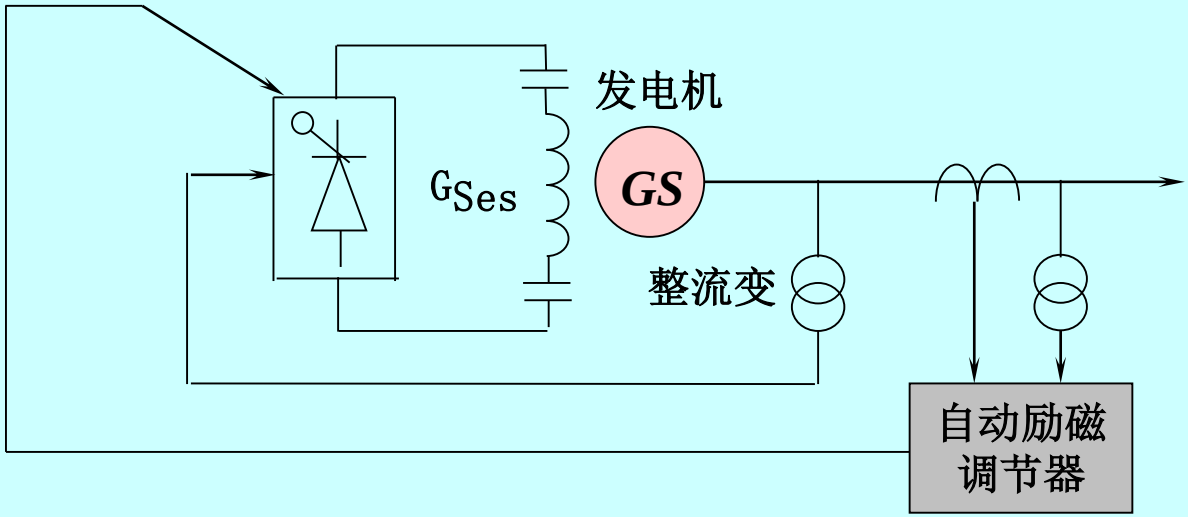
3、无励磁机的励磁方式

这种励磁方式没有专门的励磁机，而是从发电机本身获取励磁电流，经整流后再供发电机励磁，因此又称为自励式静止励磁。

自励式静止励磁又可分为自并励和自复励两种方式：

1）自并励方式

通过接在发电机出口的整流变压器（亦称为并联变压器T）取得励磁电流，经整流后供发电机励磁。



优点：设备少、结构简单、维护方便；

缺点：在发电机或系统发生短路时，由于电压的大幅下降或消失，导致整流变压器提供的励磁电流下降或消失，而此时本应大大增加励磁（即强行励磁）来维持电压的。

考虑到现代大型电网多采用封闭母线，且高压电网一般都装有快速保护，认为有足够的可靠性，故采用自并励的机组较多。

2）自复励方式

为了克服自并励方式在发生短路时不能提供较大的励磁电流缺点，发电机还可采用自复励方式。与自并励方式相比，自复励方式除设有整流变压器外，还设有串联在发电机定子回路的大功率电流互感器（或励磁变流器）。

自复励方式的特点是：当短路故障发生时电压降低，但电流却巨增，则电流互感器（或励磁变流器）的作用是将该电流转换成为励磁电流。因此，这种励磁方式具有两种励磁电流，即整流变和励磁变的励磁电流。

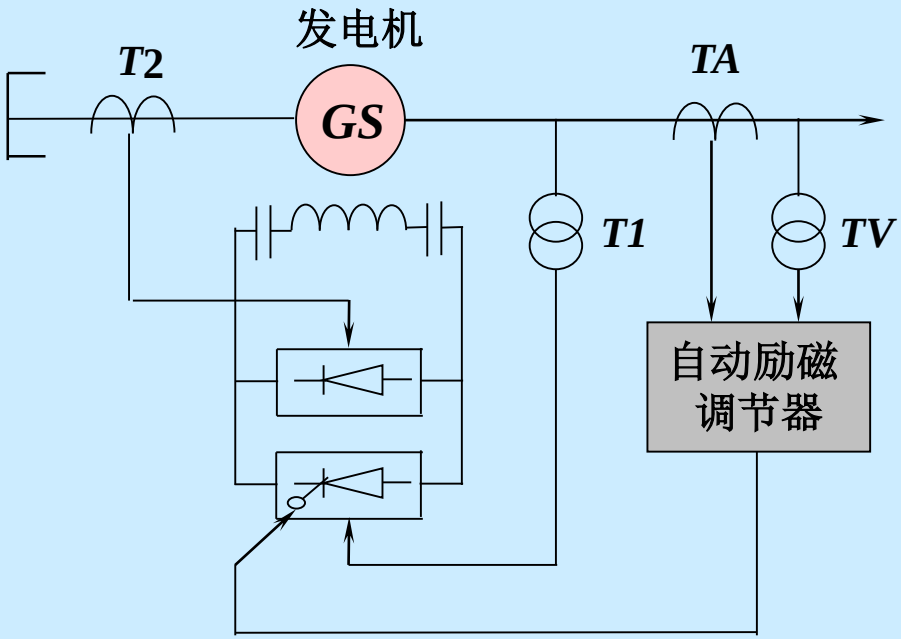
自复励又可分为并联自复励和串联自复励两种。

➢ 并联自复励

直流侧并联的自复励如图所示：

电压源和电流源分别经可控硅和不可控硅整流后在直流侧并联起来，共同供发电机励磁。

一般情况下，由电压源提供励磁电流。电流源则主要提供带负载时需增加的励磁电流和短路时的励磁电流（具有反馈作用）。

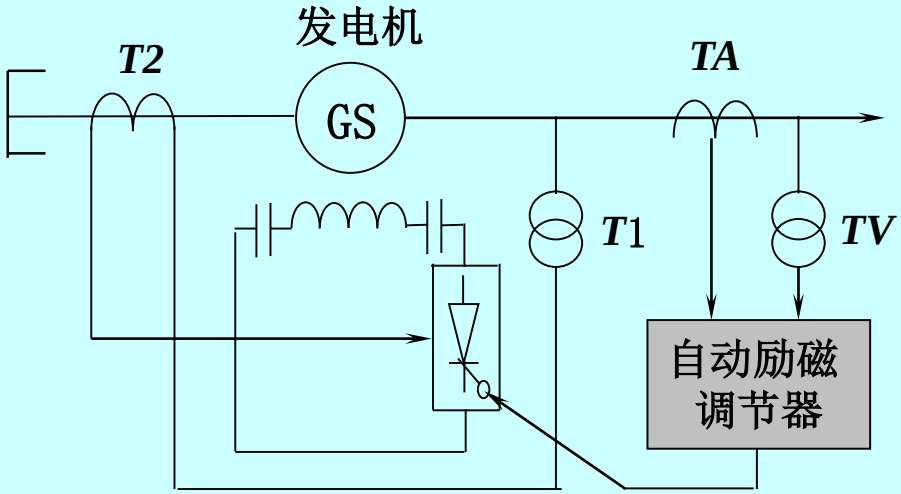


除上述直流侧并联的自复励外，还有交流侧并联的自复励（两个电源在交流侧并联后，经整流桥输出励磁电流，只需一个整流桥）。

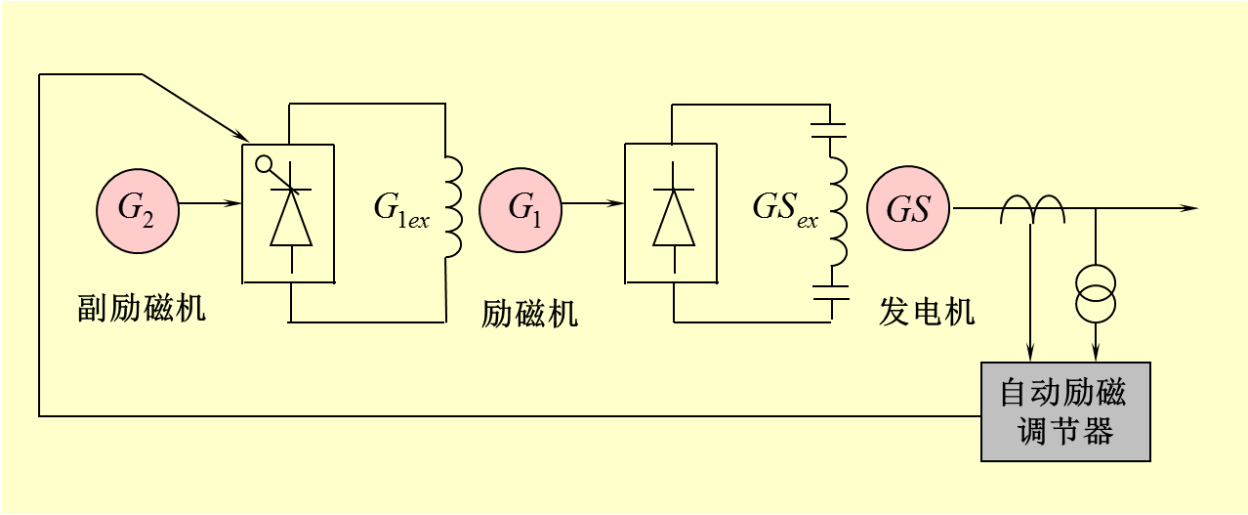
➢ 串联自复励

交流侧串联的自复励如图所示：

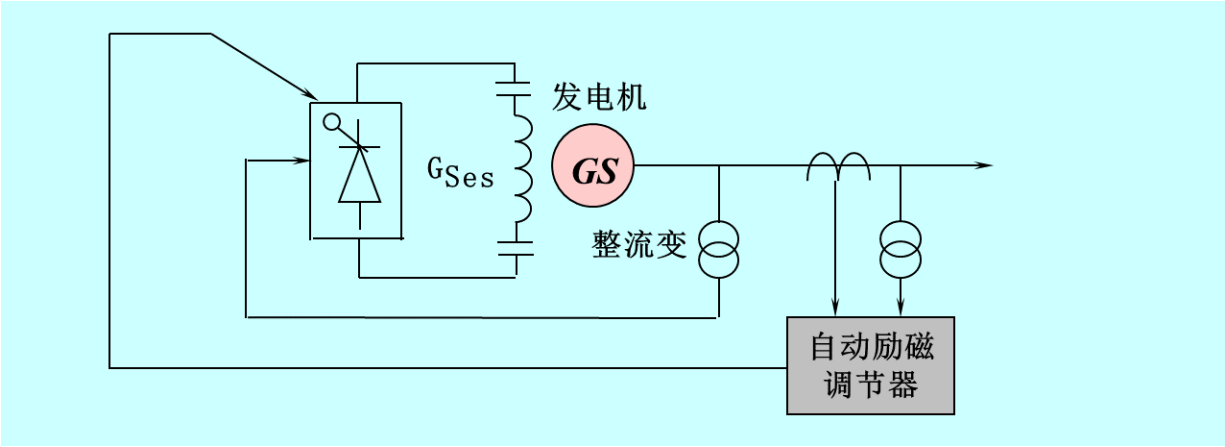
由电压源和电流源共用一组可控硅装置，在整流以前先串联起来，即加在可控硅上的电压是串联和并联变压器二次电压的向量之和。



以直流或交流励磁机供电的他励方式是过去几十年中主要的励磁方式，但使用和维护比较困难，技术含量低且成本也高。



目前，无励磁机的自励静止励磁方式在计算机技术和可控硅技术发展（工作可靠性提高）的推动下得到了广泛的应用。

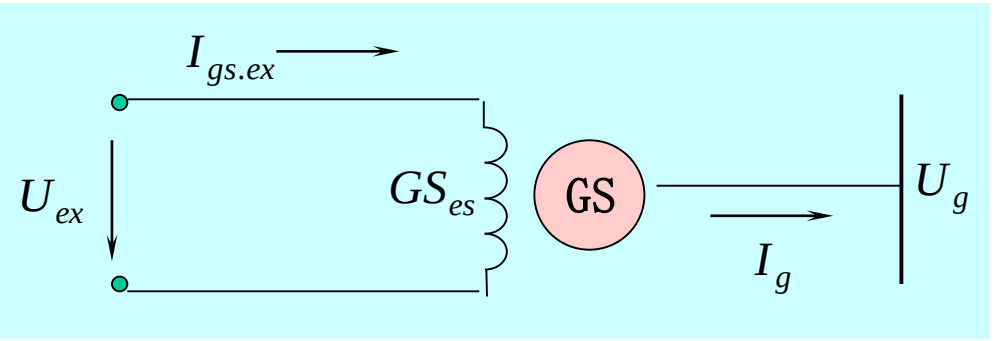


3.2 水轮发电机的有关特性和调节励磁电流的方法

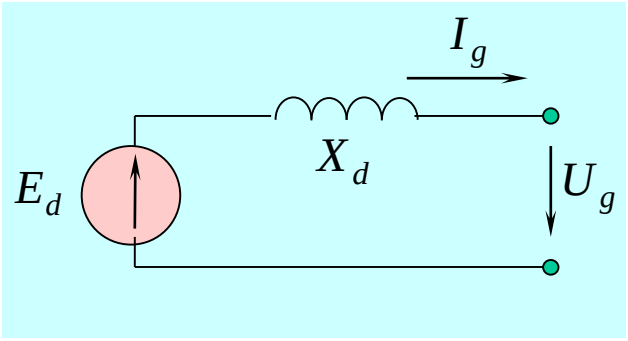
由于电力系统电能质量（电压、频率）和无功功率的要求，水轮发电机的励磁电流在运行中需要经常进行调节。为了说明调节励磁电流的必要性和实现调节励磁电流的自动调节装置的任务，先讨论水轮发电机与励磁电流的有关特性（电压的调节、无功电流的调节、无功负荷的分配、功角特性和电力系统稳定）：

1、水轮发电机的有关特性

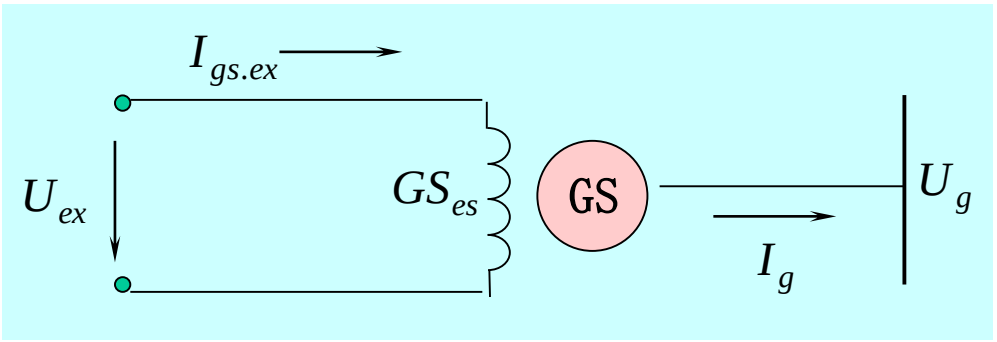
1）电压的调节（单机运行）



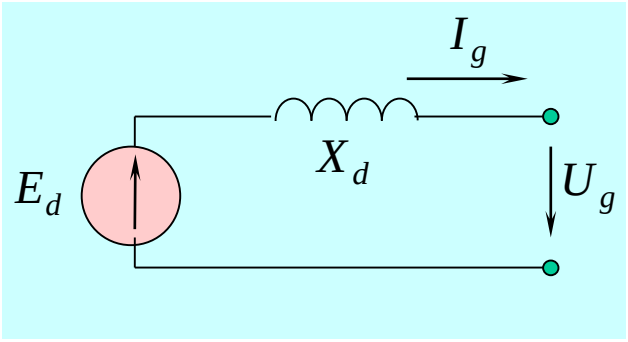
同步发电机的原理图



同步发电机的等值电路图



同步发电机的原理图



同步发电机的等值电路图

X_d — 发电机的纵轴同步电抗；

X_q — 发电机的横轴同步电抗，且设 $X_d = X_q$ ；

$I_{gs.ex}$ — 励磁电流；

E_d — 发电机定子绕组的感应电势；

U_g — 发电机端电压；

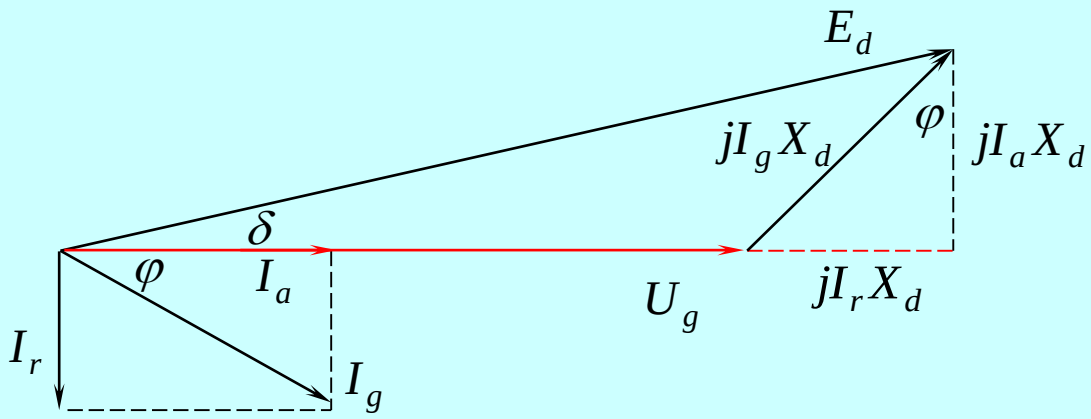
I_g — 发电机负载电流。

发电机的纵轴同步电抗：对于凸极式发电机而言，当定子绕组形成的磁场与转子磁极形成垂直角度时的电抗。同步电抗X_d为发电机稳态运行时的电抗；

根据等值电路图可得：

$$\dot{E}_d = \dot{U}_g + j\dot{I}_g X_d$$

设： δ为 E_d与 U_g 间的相位差； φ为 U_g与 I_g 的相位差；I_a为发电机的有功电流；I_r为发电机的无功电流。则相应的向量图为：



则得：

$$E_d \cos\delta = U_g + I_r X_d$$

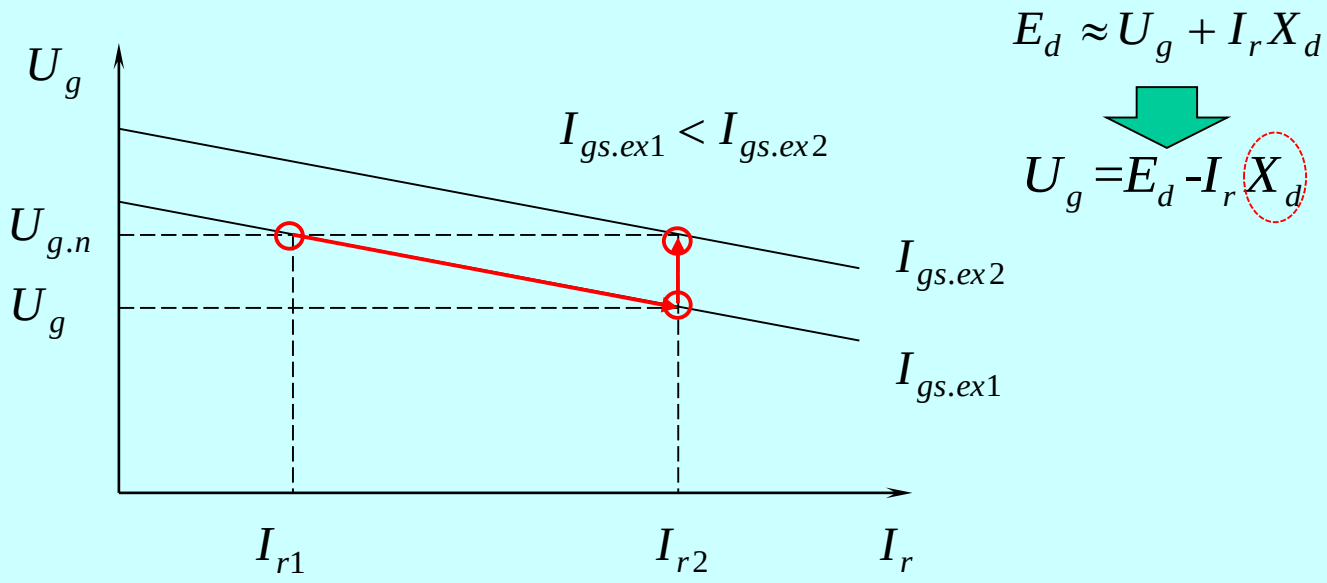
由于在正常时 δ很小，$\cos\delta \approx 1$，则有

$$E_d \approx U_g + I_r X_d$$

上式表明，无功电流是造成机端电压下降的主要原因，且机端电压与无功电流成反比。

$$E_d \approx U_g + I_r X_d$$

由上式可得机端电压与无功电流、励磁电流的关系图如下：



从上图可知，当励磁电流 $I_{gs.ex}$ 不变时，发电机的端电压 U_g 随无功电流 I_r 的增大而降低。显然，当发电机的无功电流变化时，调节发电机的励磁电流 $I_{gs.ex}$，可以维持额定电压 $U_{g,n}$ 的不变。

2）无功电流的调节（发电机与系统并列时）

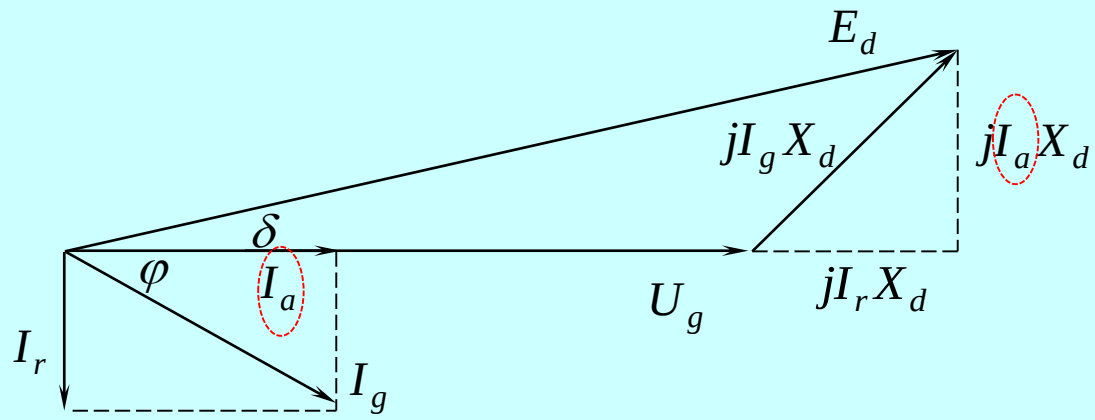
在发电机并列运行时，由于单台发电机的容量有限，此时改变励磁电流 $I_{gs.ex}$将不会引起母线电压 U_{sys} 的变化。

设导叶开度$\tau = const$（有功输出不变 KQH），且设 $X_d = X_q$，则发电机的有功功率满足如下关系：

$$\begin{cases} P = U_g I_a = \dfrac{E_d U_g}{X_d}\sin\delta = const \\ P = U_g I_a = U_g I_g \cos\varphi = const \end{cases}$$

$\Leftarrow I_a = \dfrac{E_d \sin\delta}{X_d}$

$\Leftarrow I_a = I_g \cos\varphi$



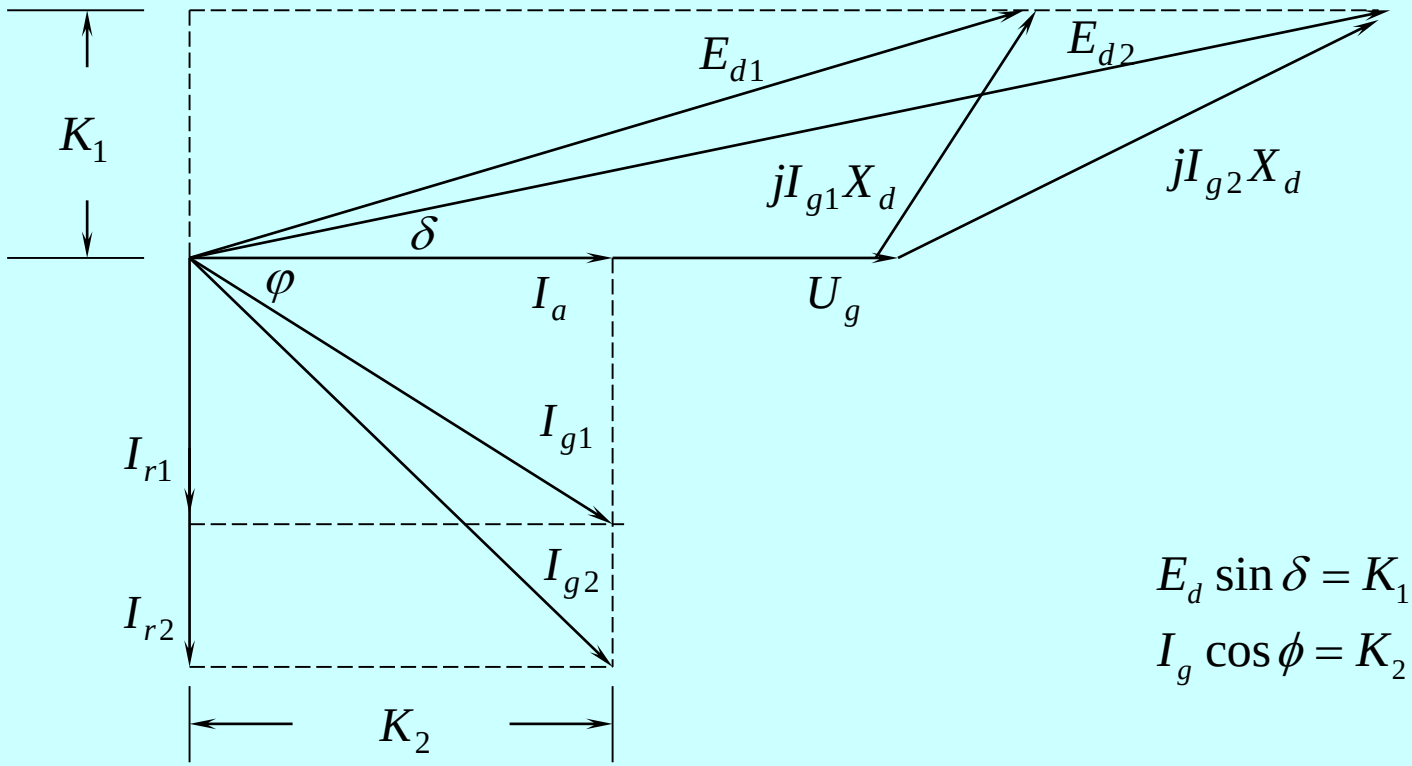
$$\begin{cases} P = U_g I_a = \dfrac{E_d U_g}{X_d} \sin\delta = const \\ P = U_g I_a = U_g I_g \cos\varphi = const \end{cases}$$

由于并网运行时，发电机端电压等于系统电压$U_g = U_{sys} = const$，不随发电机的励磁电流的变化而变化。因此，改变励磁 $I_{gs.ex}$ 时，有

$$E_d \sin\delta = K_1 \quad ; \quad I_g \cos\varphi = K_2$$

式中，K_1与K_2均为常数。

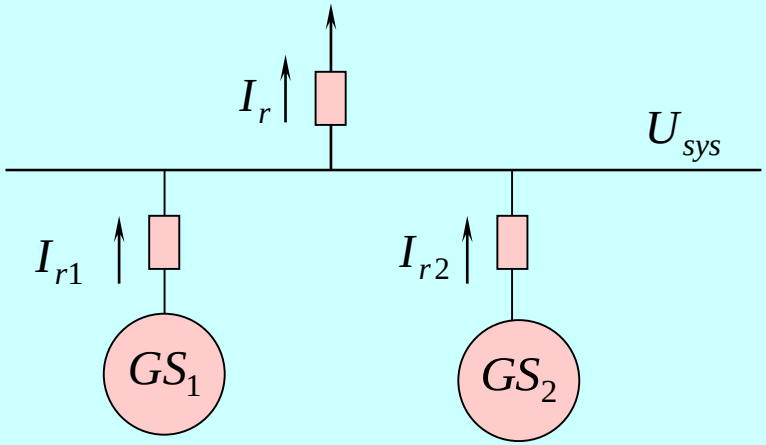
下图说明了当 $I_{gs.ex}$ 变化时，发电机E_d，δ及φ变化的情况：



改变励磁电流时，E_d和I_g虽然跟随变化，但是$E_d\sin\delta=K_1$（有功电压）和$I_g\cos\varphi=K_2$（有功电流）为常数，此时发电机无功电流I_r随之变化。这表明发电机并网运行时，为了改变发电机输出的无功功率，必须调节励磁电流。此时改变发电机励磁电流并没有通常所说的“调压”作用，而只是改变发电机送入系统的无功功率，与单机运行时不同。

3）无功负荷的分配（多台发电机与系统并列时）

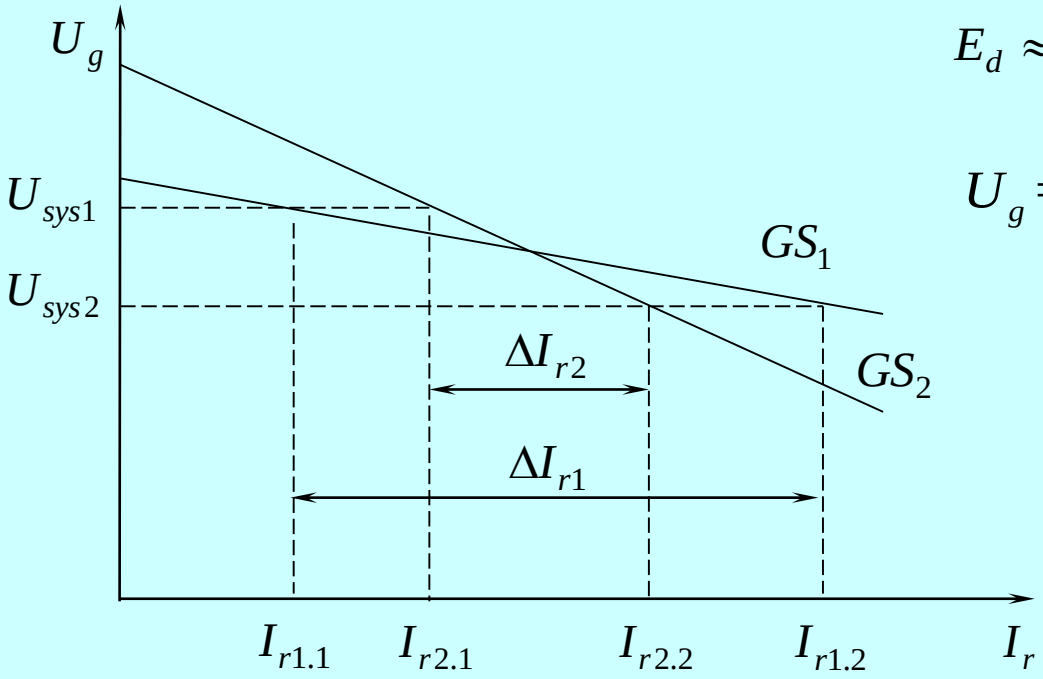
如图所示的两台并列运行的发电机：



I_{r1} -- 发电机GS_1的无功电流；I_{r2}-- 发电机GS_2的无功电流；

I_r -- 负荷的总无功电流；　　U_{sys}-- 系统电压。

显然，$I_r = I_{r1} + I_{r2}$，　$\boldsymbol{I}_{r1}$和$\boldsymbol{I}_{r2}$的大小如何确定？（反映了两台机组的无功分配情况）。此时$\boldsymbol{I}_{r1}$和$\boldsymbol{I}_{r2}$的大小取决于各自的电压特性（如下图所示）。



$$E_d \approx U_g + I_r X_d$$

$$U_g = E_d - I_r X_d$$

当$U_g = U_{sys1}$时，$I_{r1.1} < I_{r2.1}$；随着无功负荷的增加，U_g降至 U_{sys2} ，则 $I_{r1.1}$增大到$I_{r1.2}$ ，$I_{r2.1}$增大到$I_{r2.2}$ ，但 $I_{r1.2} > I_{r2.2}$ 。

总无功：$I_r = I_{r1.2} + I_{r2.2}$ 。

显然$\Delta I_{r1} > \Delta I_{r2}$ ，说明 GS_1(发电机外特性较平坦)由原来承担较小的无功负荷，变为承担较大的无功负荷；而GS_2（发电机外特性较陡峭)由原来承担较大的无功负荷，变为承担较小的无功负荷。

为了合理分配无功，通常要求并列运行的发电机根据各自的额定容量，按比例进行无功电流的分配，即：

大容量的发电机承担较多无功负荷；

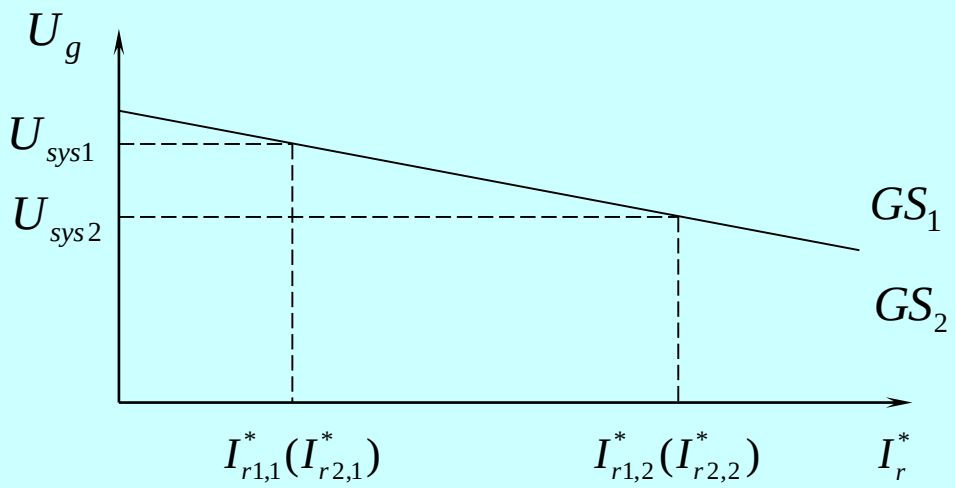
小容量的发电机承担较少无功负荷。

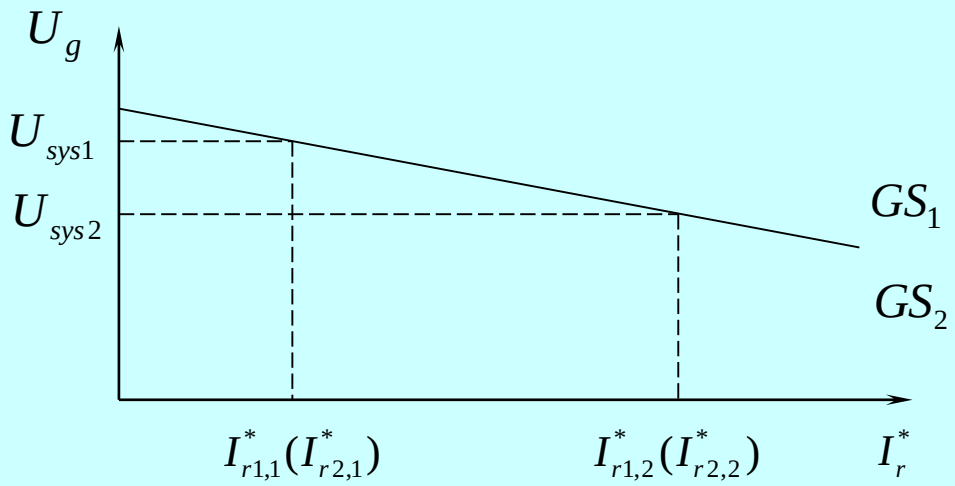
若以发电机各自的额定容量作为基准值。则各台发电机承担的无功电流标幺值应相等，即：

$$I_{r1}^{*} = I_{r2}^{*} = I_{r}^{*}; \qquad I_{r}^{*} = \frac{I_{r}}{I_{rn}}$$

为了达到上述目的，则要求并列运行发电机的电压调节特性相同：

$$U_{g1} = f(I_{r1}^{*}) = U_{g2} = f(I_{r2}^{*})$$





由于两台发电机的电压调节特性相同，所以无功电流增大时，各台发电机无功电流增加的标幺值相等，若GS_1与GS_2的容量不同，则较大容量的发电机增加的无功电流就多。反之亦然。

为了实现上述要求，从制造上做文章，不论其容量大小使各台发电机的电压调节特性相同是不可能的。但是，可以通过自动调节励磁装置来实现。

自动励磁调节装置既可通过改变发电机的励磁电流维持其端电压不变，也可对发电机调节特性进行调整，以实现无功的合理分配。

$$E_d \approx U_g + I_r X_d \Rightarrow I_r \approx \frac{E_d - U_g}{X_d} \Rightarrow I_r^* = \frac{I_r}{I_{rn}} \approx \frac{E_d - U_g}{I_{rn} X_d}$$

综上所述，无论是单机还是多台机组并列运行，为了保持发电机的端电压不变、调节无功以及实现无功的合理分配，都要求对发电机的励磁电流进行调节。

发电机励磁系统的工作原理

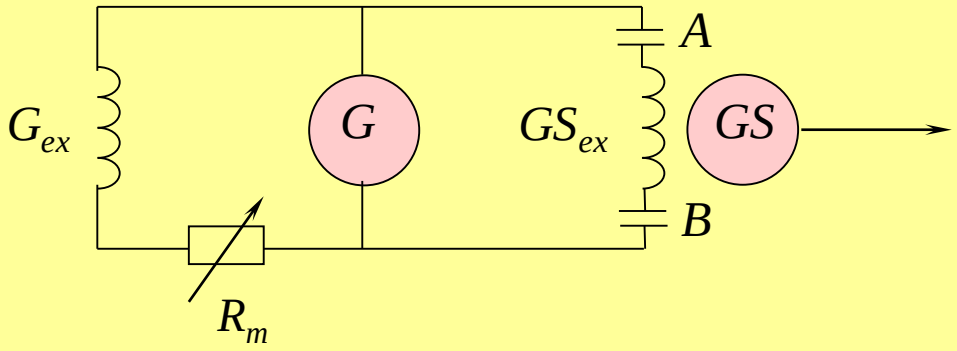


2、调节励磁电流的方法

有如下几种调节励磁电流的方法：

1）改变励磁机励磁回路的电阻

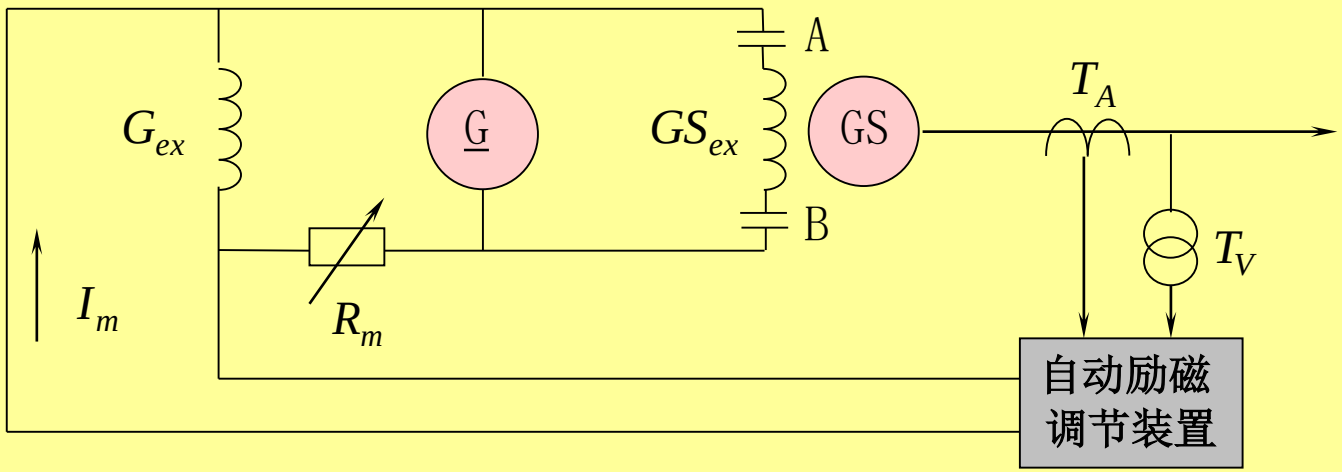
由于在发电机转子回路中改变励磁电流极为困难，故一般不采用。通常的方法是，改变励磁机的励磁电流，以达到调节发电机励磁电流的目的。如图所示：



但由于上述改变励磁电流的装置有转动部分，存在着不灵敏、有失灵区、精度差和速度慢的缺陷，无法满足电力系统的需要，故已淘汰。

2）改变励磁机的附加励磁电流

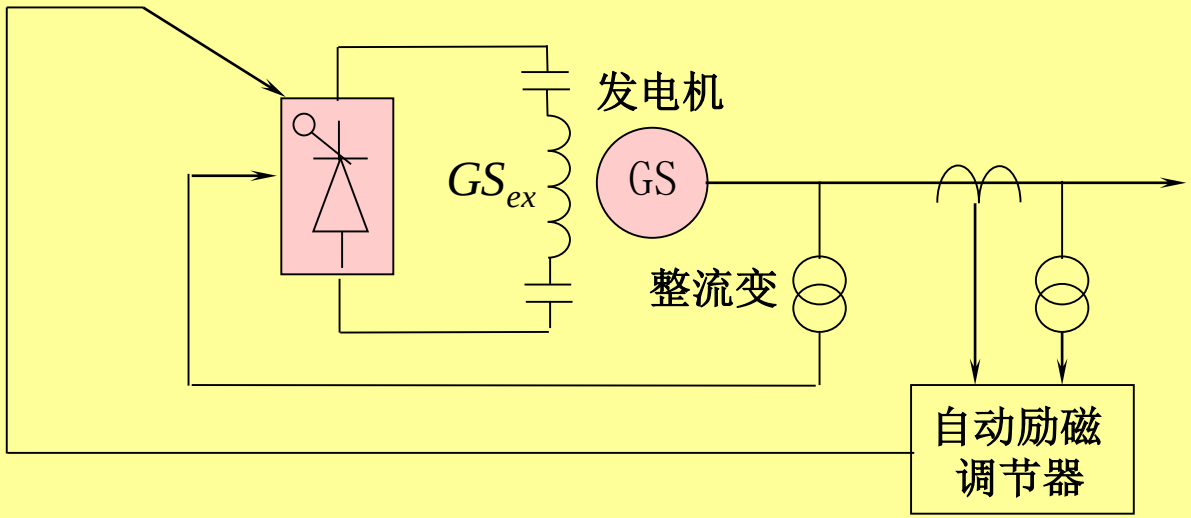
为了消除前述改变励磁机励磁回路电阻方法的缺陷，采用了改变励磁机的附加励磁电流的方法，如图所示。



用于改变附加励磁电流的装置一般采用电磁型。这种调节装置没有失灵区，可提高并列运行发电机工作的稳定性。

3）改变可控硅的导通角

在自并励或自复励的励磁方式（自励式静止励磁）中，自动调节装置根据发电机电压、电流或功率因数的变化，相应地改变可控硅整流器的导通角，以达到调节发电机励磁电流的目的。



3.3 自动调节励磁装置的任务及其要求

1、自动调节励磁装置（*AVR*）的任务

- **维持发电机端电压水平并合理分配各机组的无功负荷**

正常运行时，随着发电机电压、电流或功率因素的变化，***AVR***将相应地调节发电机的励磁电流，以保持发电机端电压为额定值或维持系统中某点的电压于一定水平。同时，利用***AVR***改变发电机的励磁电流，可使发电机间的无功负荷得到合理分配。

- **提高同步发电机并列运行的稳定性**

若在增加发电机输出功率时，增大励磁电流，即提高发电机定子绕组的感应电势，则可在提高输出功率的同时，保证静态稳定性（提高了储备系数）。

- **提高带时限动作继电保护的灵敏度**

系统发生短路时，由于调节装置将强行增加励磁电流，使短路电流增大，故相应继电保护的灵敏度可得到提高。但由于调节装置的动作和励磁电流的增大要有一段时间，因此只能对延时动作的继电保护的灵敏度产生影响。

- **加速短路后的电压恢复过程和改善异步电动机的启动条件**

发生短路时，由于系统电压下降，故大多数电动机被制动。短路切除以后，随着电压的上升，电动机将开始自启动。但由于启动电流较大，所以电压恢复较慢，这样就影响自启动过程的完成。**在装有*AVR*之后，由于它能够提高发电机电压，因而可以缩短电动机自启动时间，改善异步电动机的启动条件。**

- **改善自同期或发电机失磁运行时电力系统的工作条件**

发电机自同期并列或因失磁而转入异步运行时，将从系统吸收大量的无功功率，使系统电压下降，严重时甚至可能导致系统瓦解。在这种情况下，***AVR*将自动加大励磁电流，以提高系统电压，弥补系统中无功功率的不足，从而改善自同期或发电机失磁运行时电力系统的工作条件**。

- **防止水轮发电机突然甩负荷时电压过度升高**

机组由于各种原因突然甩负荷时，随着转速上升，发电机定子回路的电压可能上升到危险的程度，此时***AVR***的强行减磁作用，可以在机组突然甩负荷时减小励磁电流，故可防止电压过高。

2、对自动调节励磁装置（*AVR*）的要求

- **有足够的输出容量**：*AVR*的容量既要满足正常运行时调节的要求，又要满足发生短路故障时强励的要求；

  ①正常运行时，应能按要求自动而又平稳地调节励磁电流，以维持电压不变，并平稳地分配机组间的无功负荷。

  ②发生短路时，应能迅速地将发电机的励磁电流加到顶值，实现强行励磁作用，以提高系统稳定性；

- **工作可靠**：*AVR*装置本身发生故障，可能迫使机组停机，甚至可能对电力系统造成严重影响，故要求其工作应十分可靠；

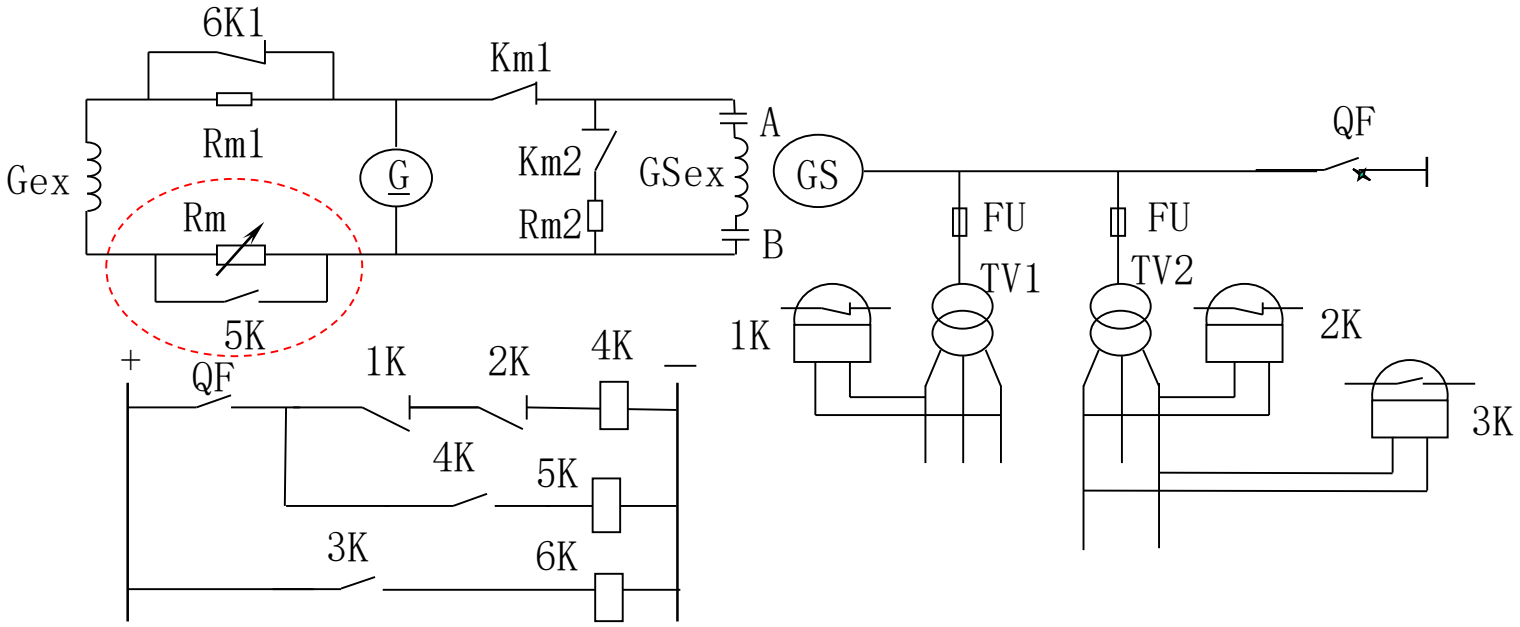
- **动作迅速**：水电站往往经长距离输电线路与系统的负荷中心连接，因此，采用快速动作的*AVR*对改善系统的稳定性和提高输送能力具有重要意义；

- **无失灵区**：没有失灵区的*AVR*有助于提高系统的静态稳定性。此外还要求装置简单，运行维护和调整试验方便。

3.4 强行励磁、强行减磁和自动灭磁

1、强行励磁

发生短路时，电力系统和水电站的电压可能大幅度降低。此时，为保证系统稳定运行和加快切除故障后的电压恢复，应使发电机的励磁电流迅速加大到顶值，既实行强行励磁。下图为采用直流励磁机强行励磁的原理图：



图中：1K，2K为反应发电机电压降低的低电压继电器，当电压降低到整定数值时动作，使强励接触器5K的线圈接通，将磁场变阻器Rm短接，励磁电压上升到顶值，实现了强励。

为了使低电压继电器1K，2K在发电机电压恢复到正常时能可靠返回，强励继电器的动作电压U_{PU} 按下式整定：

$$U_{PU}=\frac{U_{g.n}}{K_{re}K_{rel}}$$

式中：

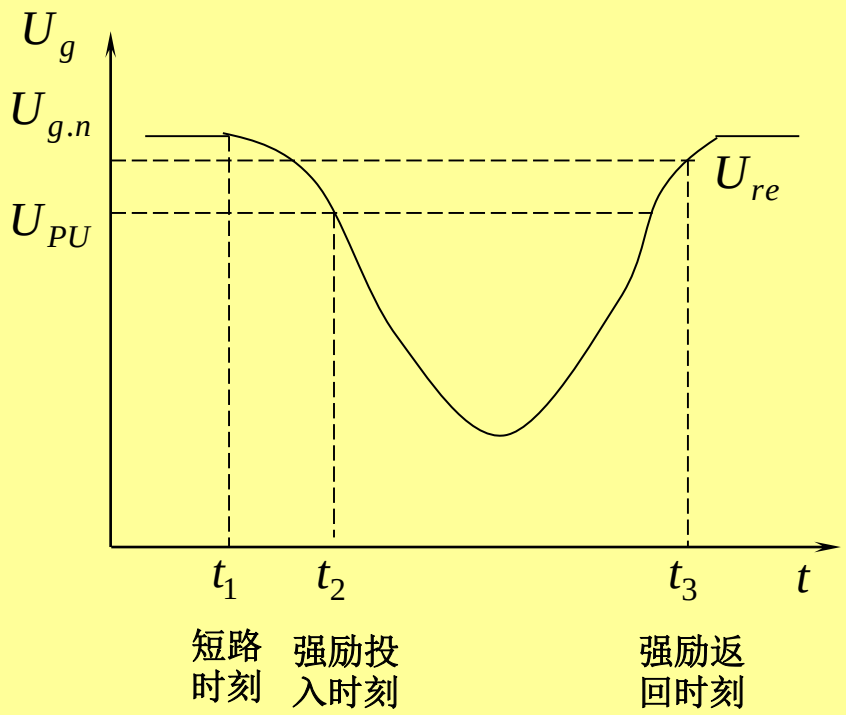
$U_{g.n}$ 为发电机额定电压；

K_{re} 为继电器返回系数，一般取 $1.1\sim1.2$ ；

K_{rel} 为可靠系数，取 1.05 。

因此可得：

$$U_{PU}=(0.8\sim0.85)U_{g.n}$$

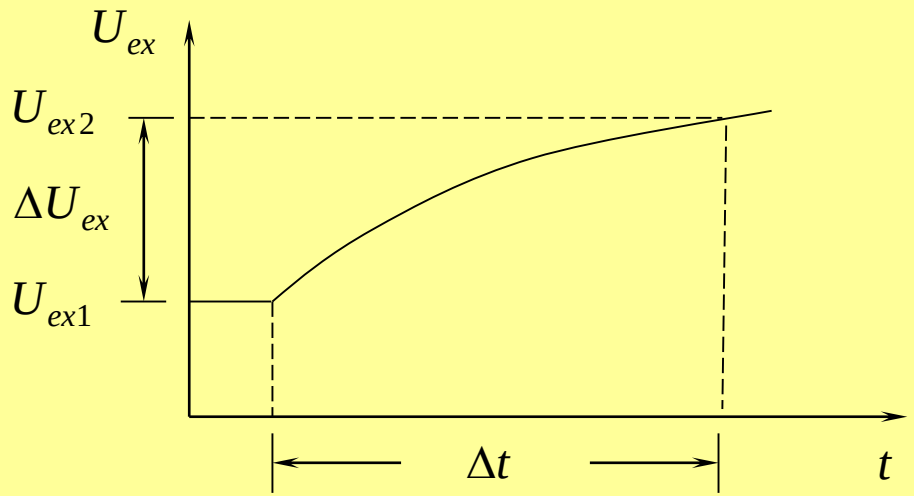


U_{re}为继电器返回动作电压，若$U_{PU}=U_{re}$，则电压继电器在发电机电压恢复到正常时又马上投入，如此反复动作。现整定后$U_{PU}<U_{re}$就不会出现这种情况。

衡量强励作用的两个重要指标：强励时励磁电压的上升速度快和强励倍数大。

励磁电压上升速度是指强励开始后的 $\Delta t = 1.1 \sim 1.5s$ 内，励磁电压上升的平均速度，通常以励磁机额定电压的 $U_{ex.n}$ 的倍数表示。此值越大越好，对现代励磁机而言，一般约为 $(0.8 \sim 1.2)U_{ex.n}(V/s)$ 即

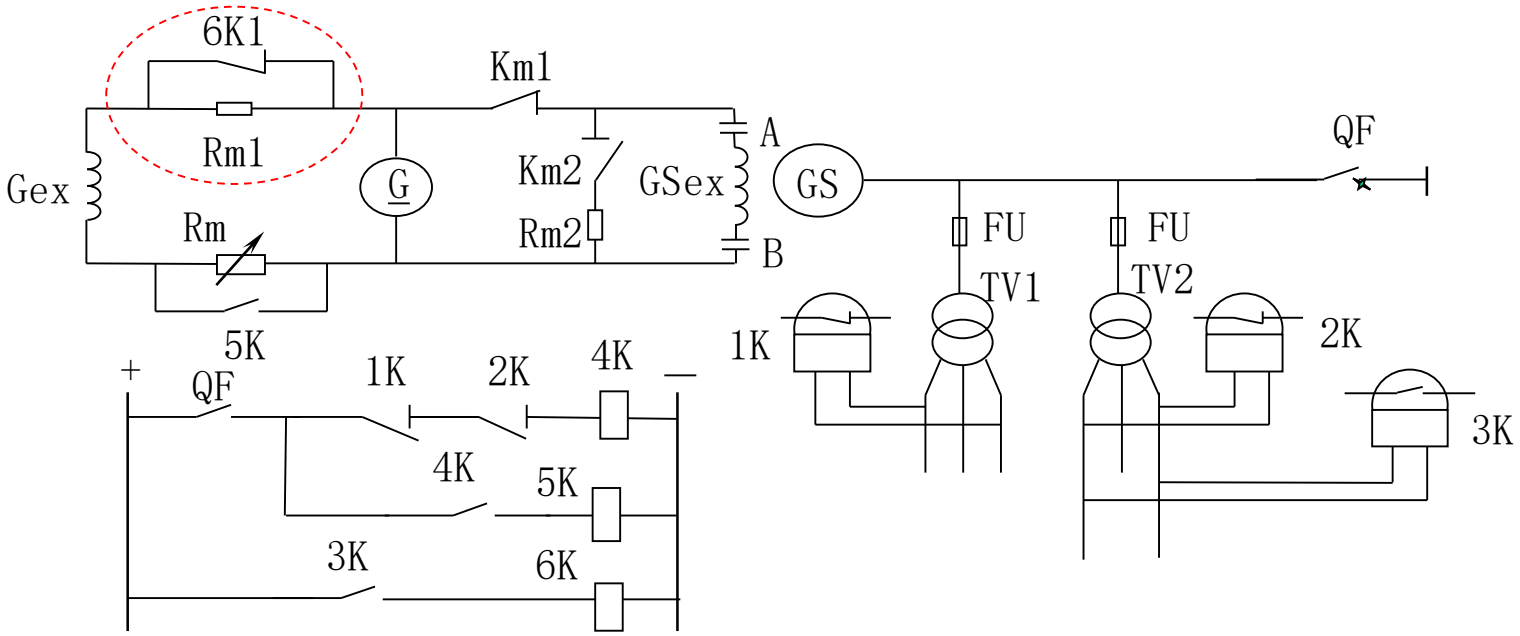
$$\text{上升速度} = \Delta U_{ex} / \Delta t = (0.8 \sim 1.2)U_{ex.n}(V/s)$$



励磁电压上升速度与励磁机励磁回路及发电机转子回路的时间常数等因数有关，即与励磁机的励磁方式有关。

2、强行减磁

为了防止水轮发电机突然甩负荷时电压过度升高，需要对发电机实施强行减磁。采用直流励磁机的强行减磁装置的原理如图所示。



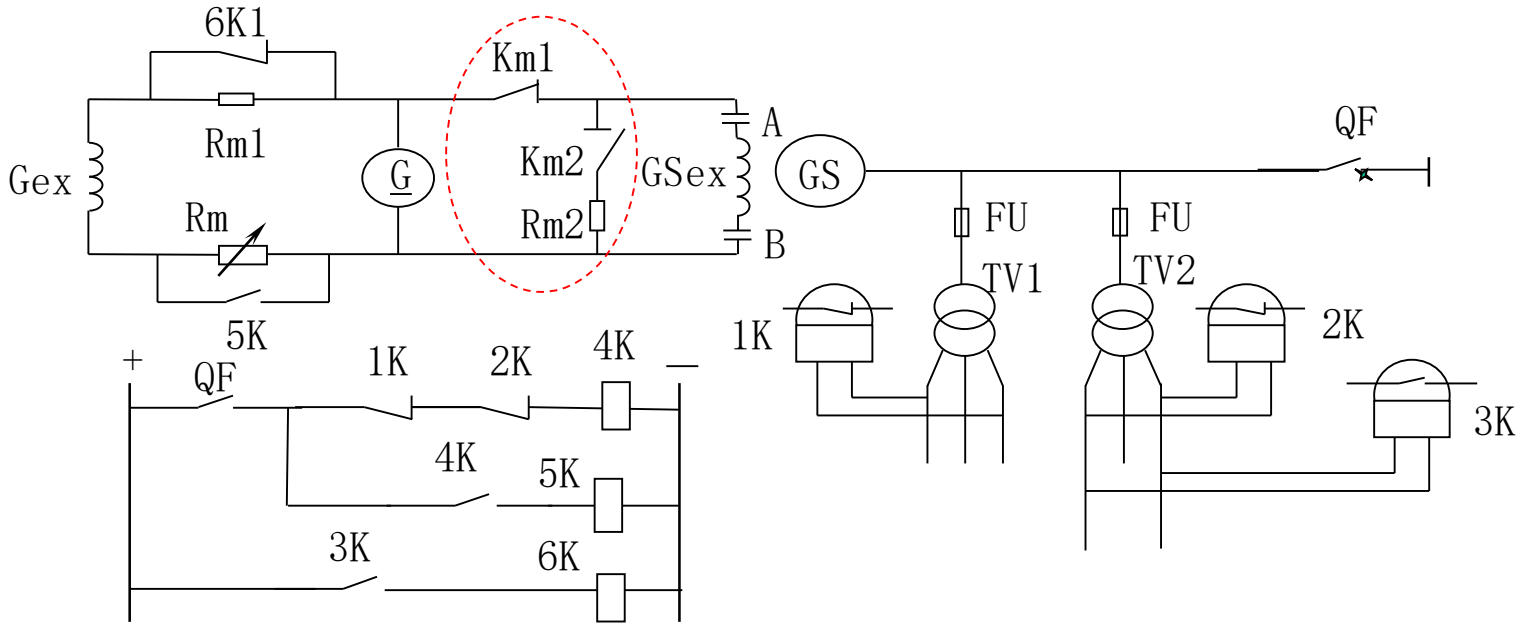
图中：*6K*为强减接触器，它具有一对动断接点；*3K*为过电压继电器，其动作值一般整定为 $1.15\sim1.20U_{g.n}$ 。当发电机电压上升到该值时，*3K*动作，接通*6K*线圈，其动断接点打开，使 R_{m1} 接入励磁机励磁回路，使发电机减磁，以使发电机定子回路不会产生过电压。

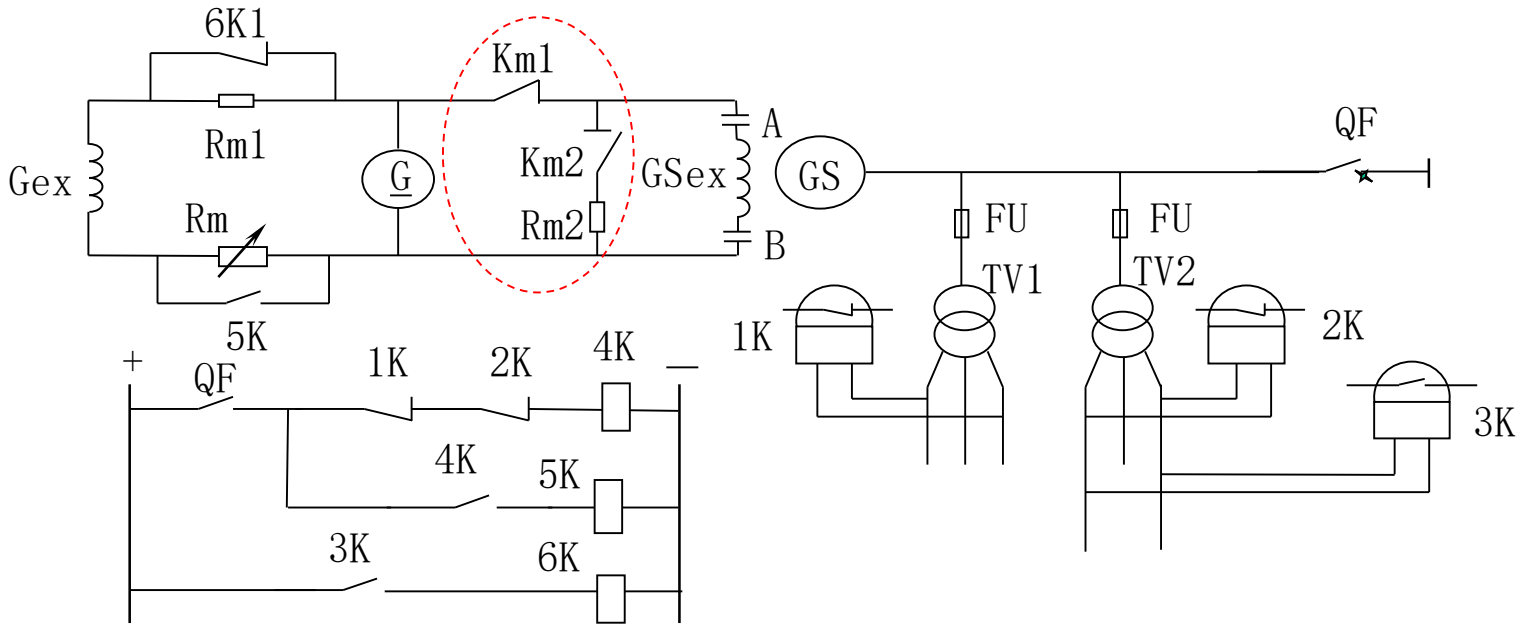
3、自动灭磁

当发电机内部或其出口短路时，除了断开发电机出口断路器外，还必须迅速切断发电机的励磁电流，以使转子磁场消失，短路电流不复存在。

由于发电机的转子具有很大电感，在切断电流时，如何在很短的时间内使转子磁场中储存的大量能量迅速消释，而不至产生危及转子绝缘的过电压是一个重要问题。

采用直流励磁机的自动灭磁装置的原理如图所示。





为了切断转子电流，在发电机的励磁回路设置了灭磁开关K_m。灭磁开关具有K_{m1}和K_{m2}两个控制接点。当K_{m1}闭合、K_{m2}断开时，发电机处于正常励磁状态。故障时，发电机断路器和灭磁开关将同时动作。其动作顺序是：K_{m2}先闭合，灭磁电阻R_{m2}并入转子回路；然后K_{m1}断开，切断发电机转子电流。由于R_{m2}先投入并消耗了转子储存的能量，因此避免了在转子绕组中产生过高的电压。

评价灭磁装置的两个重要指标是：

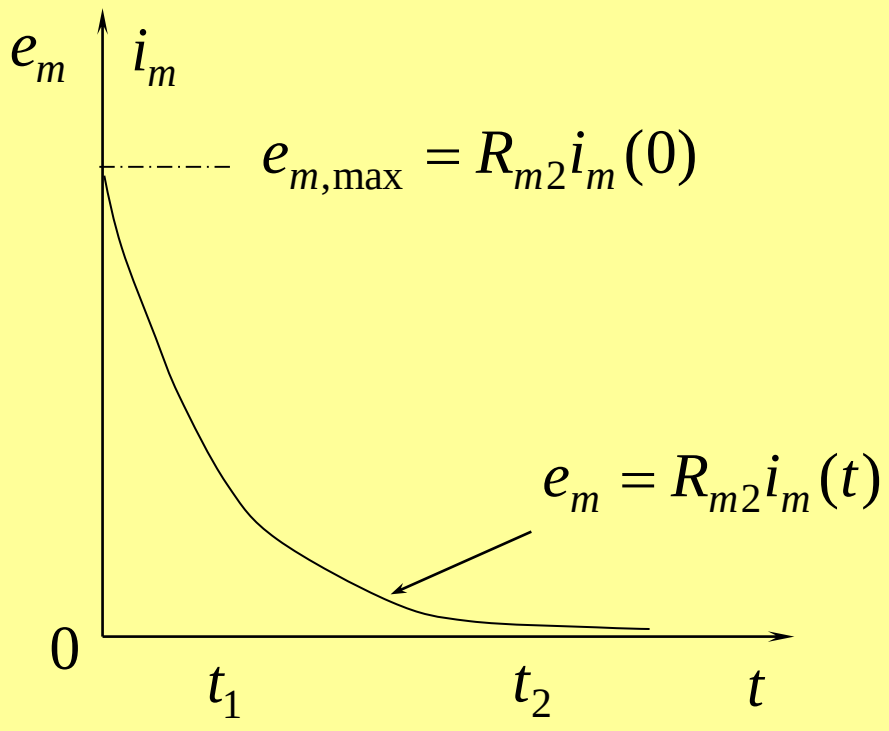
- 灭磁时间短；
- 灭磁过程中转子电压不应超过允许值，通常取其额定电压的4~5倍。

由于上述灭磁电路是*RL*回路，因此转子回路的电流是按指数衰减的（电流从初始值开始，随时间按指数规律下降，最终趋近于0）。如右图所示，在灭磁过程中，转子绕组的端电压e_m始终与R_{m2}两端的电压相等，即

$$e_m = i_m R_{m2}$$

其中，i_m为灭磁回路电流。

$$i(t) = i_{m,0} e^{-Rt/L}, \quad t > 0$$

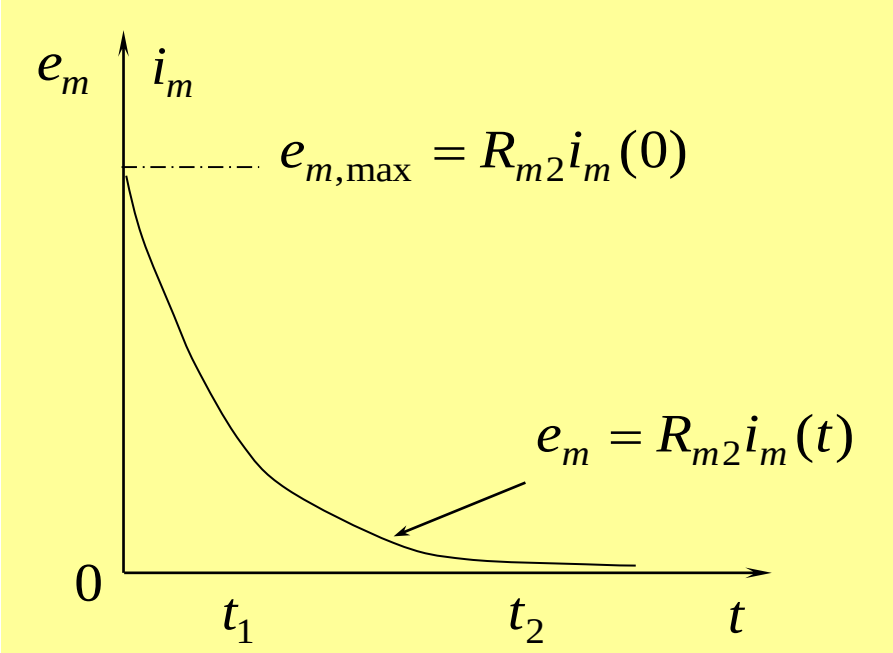


转子绕组端电压e_m的最大值为：

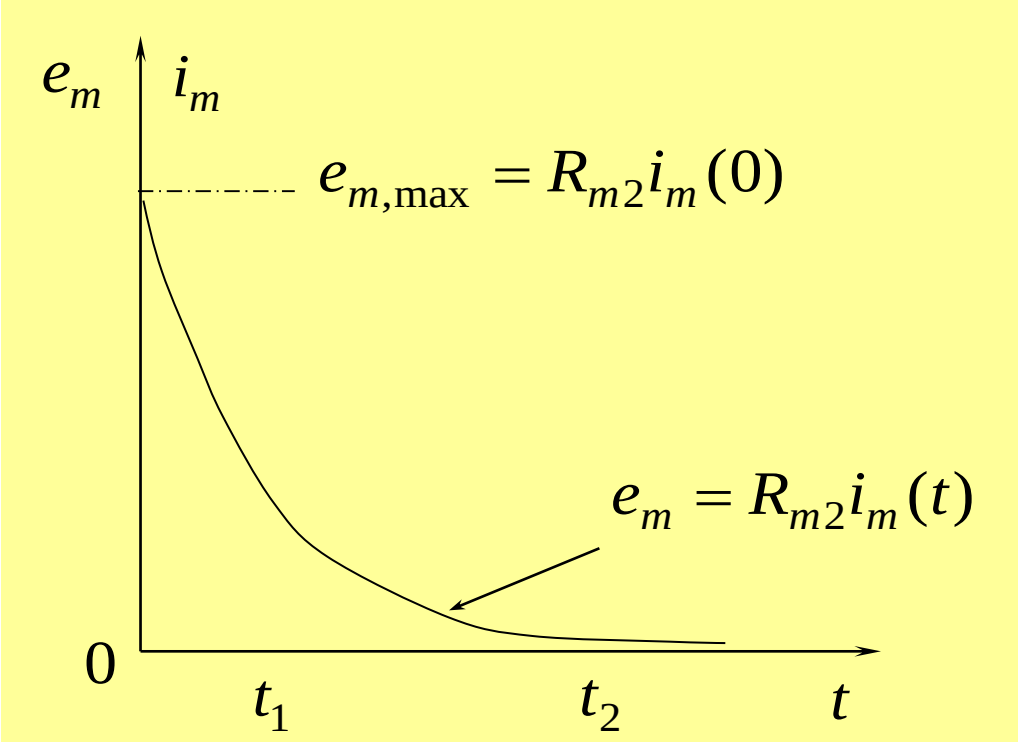
$$e_{m,\max} = i_{m,0} R_{m2}$$

其中，$i_{m,0}$ 为灭磁回路电流的初始值。

由此可知，在灭磁过程中e_m是可以控制的，其最大值$e_{m,max}$与R_{m2}成正比。R_{m2}值越大，灭磁过程的衰减就越快，但此时$e_{m,max}$也大，安全性较低；R_{m2}越小，$e_{m,max}$就越小，转子绕组比较安全，但灭磁过程就慢些。



在上述灭磁过程中，虽然可以限制转子绕组的最高电压$e_{m,max}$，保证了转子绕组的安全，但并没有自始至终地充分利用这一条件，即在灭磁过程中始终保持转子电压为最大允许值不变，因而灭磁的过程就减慢。



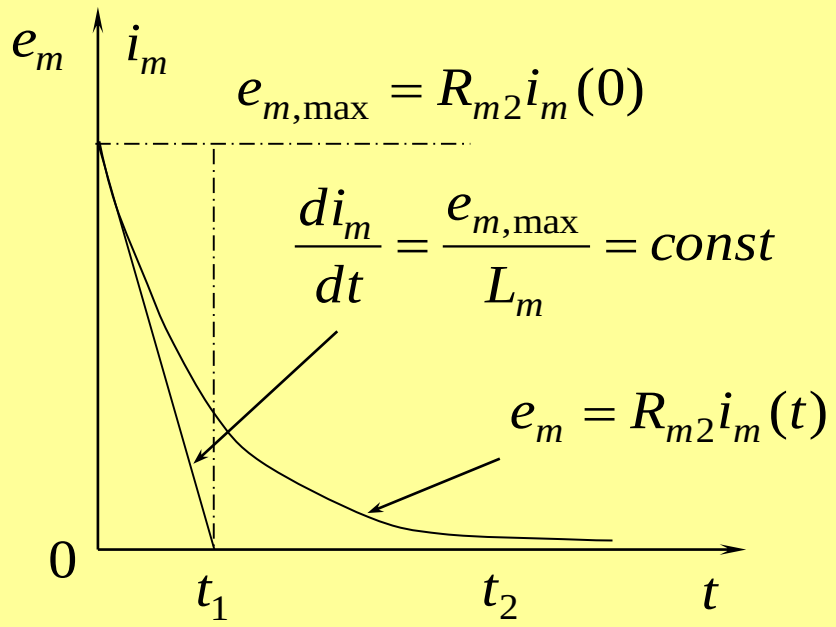
理想的灭磁过程是，始终保持转子绕组的端电压为最大允许值不变，直至励磁回路断开为止。

由于

$$e_m = L_m \frac{di_m}{dt}$$

其中，L_m为转子回路的电感（自感系数）。

使e_m不变，就是使di_m/dt=常数。这就是说，转子回路的电流应始终以等速度减小，直至为零（而不再按指数曲线减小了）。



大型发电机采用的DM型具有灭弧栅的灭磁开关，就可以做到**转子回路的电流应始终以等速度减小，直至为零**。

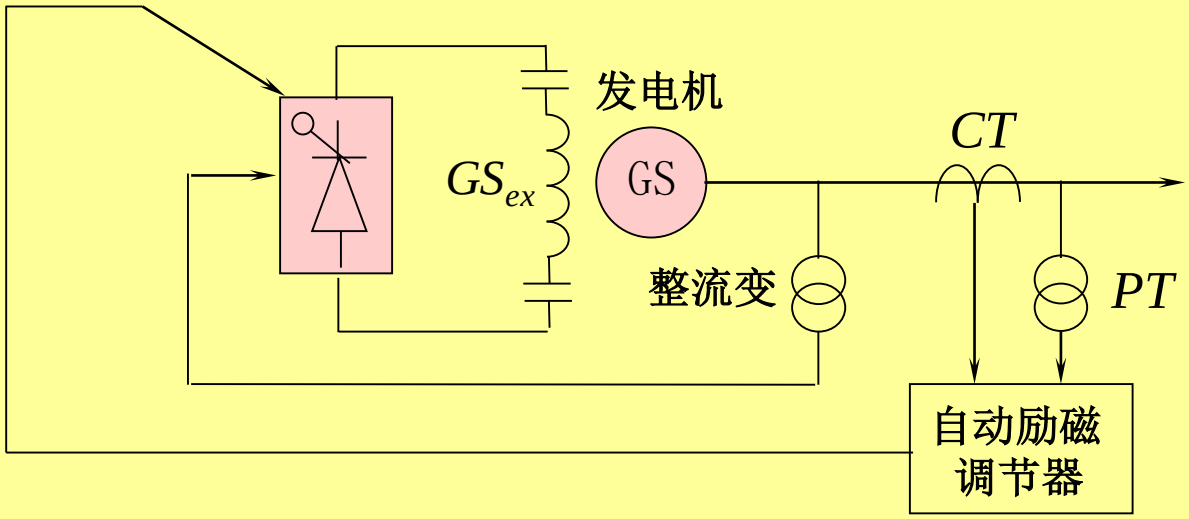
对于采用可控硅励磁装置的发电机，则可以考虑应用晶闸管的有源逆变特性来进行转子回路的快速灭磁。此时，可不再设置灭磁开关；也可设置灭磁开关作为事故状态下的灭磁。

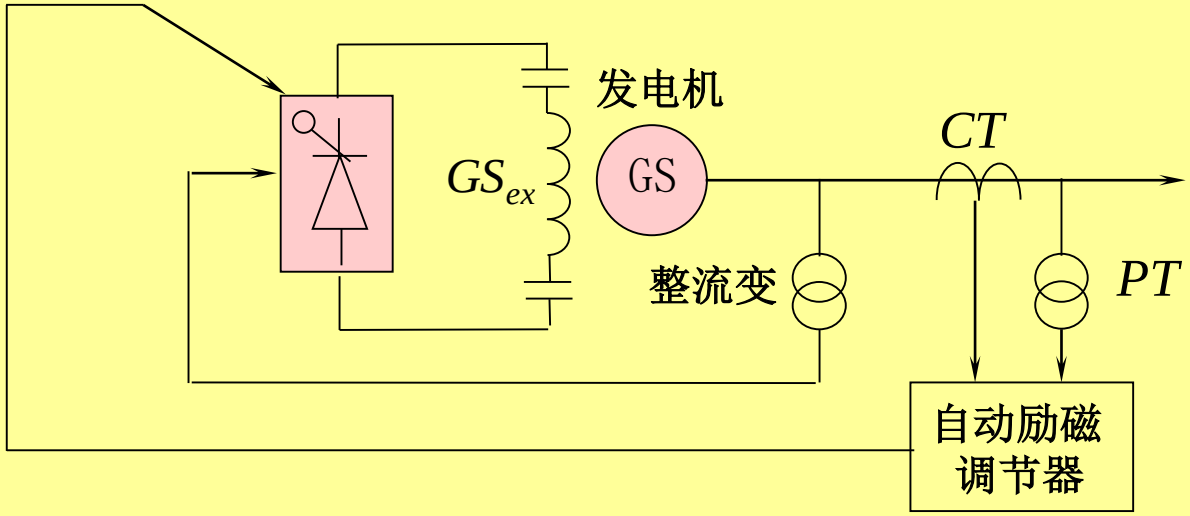
3.5 可控硅励磁系统中的整流原理

参见《励磁系统》课程的第4、5章！

3.6 自动励磁调节器的基本原理

自动励磁调节器是综合应用自动控制理论、计算机技术、电力电子技术，实现发电机电压和无功功率自动控制的自动化装置。它的输入量是发电机定子电压和电流，输出量是励磁机的励磁电流(它励)或发电机的转子励磁电流(自励)。





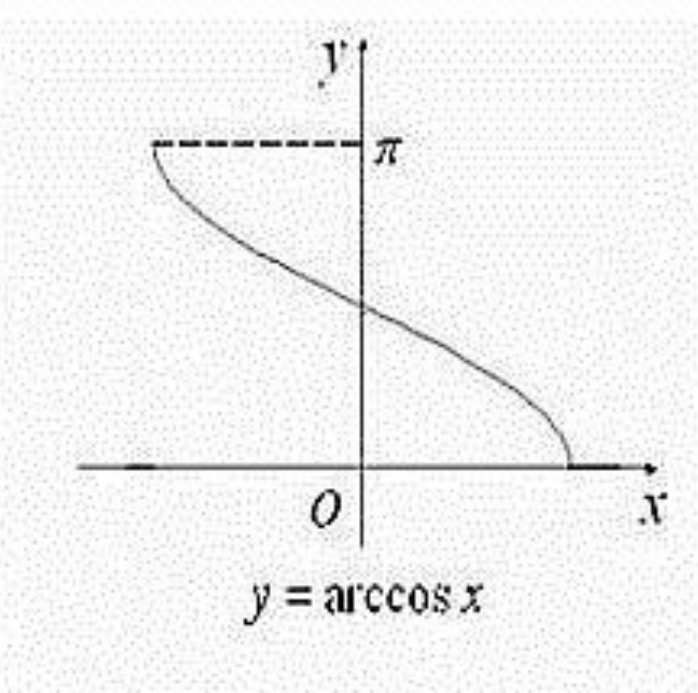
自动励磁控制的基本工作原理为：通过*PT*和*CT*测量发电机定子电压 U_G，与给定电压 $U_{G.n}$ 比较后获得电压差 $\Delta U_G = U_{G.n} - U_G$，经综合放大后得到控制信号 u_c。根据控制信号和同步信号计算可控硅的导通角 α，从而控制发电机的励磁电流 $I_{g.ex}$，使发电机的电压稳定。

①当扰动使发电机电压升高时的自动控制过程如下：

$U_G\uparrow \Rightarrow \Delta U_G = U_{G.n} - U_G\downarrow \Rightarrow u_c\downarrow \Rightarrow \alpha\uparrow \Rightarrow I_{G.ex}\downarrow \Rightarrow U_G\downarrow$

扰动使电压升高　电压差减少　控制信号减少　导通角增加　励磁电流降低　电压恢复

$$\alpha = \arccos\frac{u_c}{U_{SM}}$$

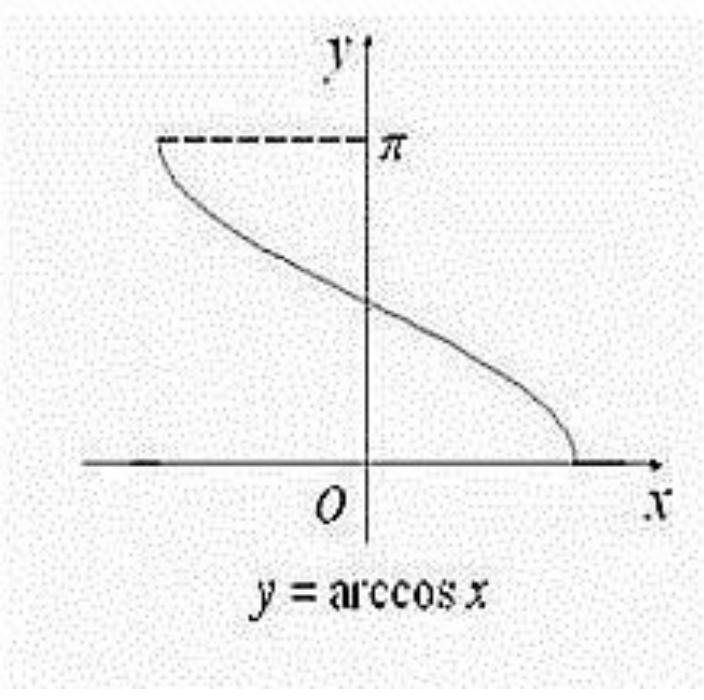


②当扰动使发电机电压降低时的自动控制过程如下：

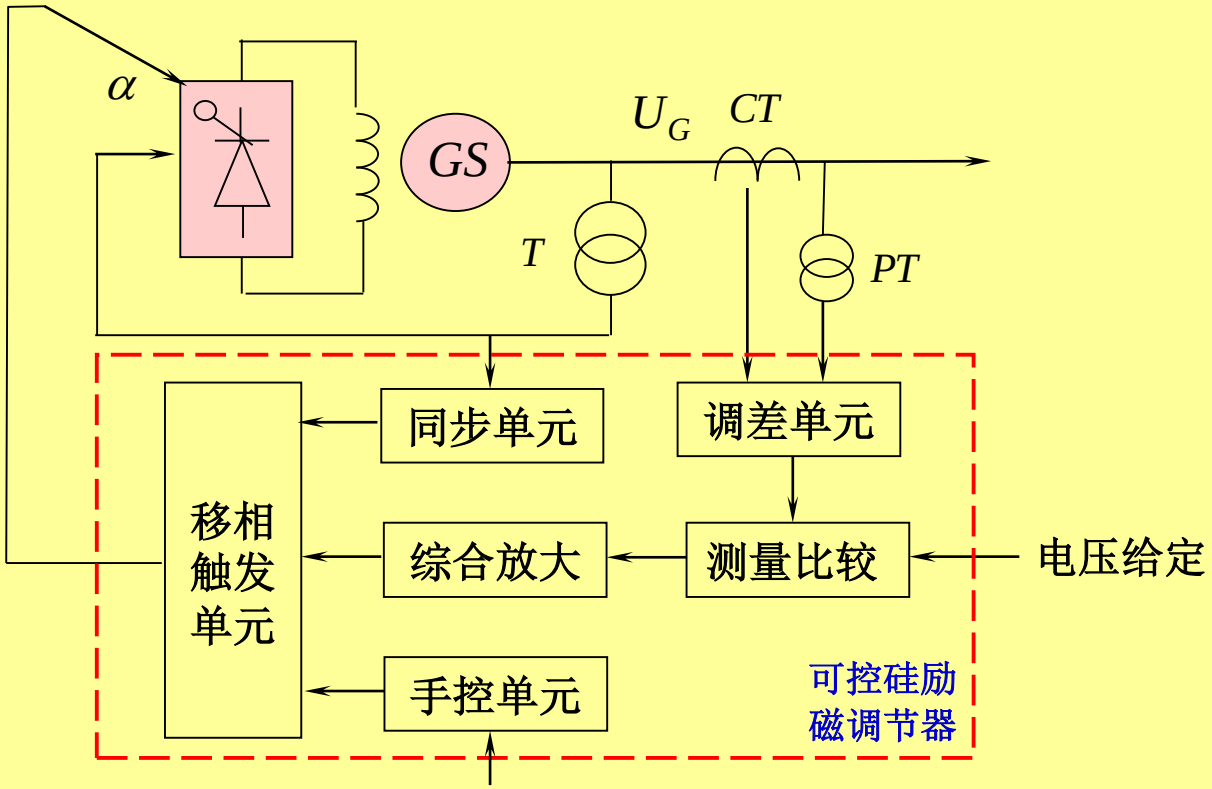
$U_G \downarrow \Rightarrow \Delta U_G = U_{G.n} - U_G \uparrow \Rightarrow u_c \uparrow \Rightarrow \alpha \downarrow \Rightarrow I_{G.ex} \uparrow \Rightarrow U_G \uparrow$

扰动使电压降低　电压差增加　控制信号增加　导通角减小　励磁电流增加　电压恢复

$$\alpha = \arccos \frac{u_c}{U_{SM}}$$



构成自动励磁器的型式有多种，但自动控制系统的核心部分却很相似。基本的控制由测量比较单元、调差单元、综合放大单元、同步单元、移相触发单元和手动单元组成。应用可控硅的自动励磁器构成如图所示：



应用计算机控制可控硅自动励磁调节器各单元的工作原理如下：

1、测量比较单元

用于测量机端电压的变化，并将测量值与给定值进行比较

$$\Delta U_G = U_{G.n} - U_G$$

式中：$U_{G.n}$ 为电压给定值；U_G为发电机电压测量值。

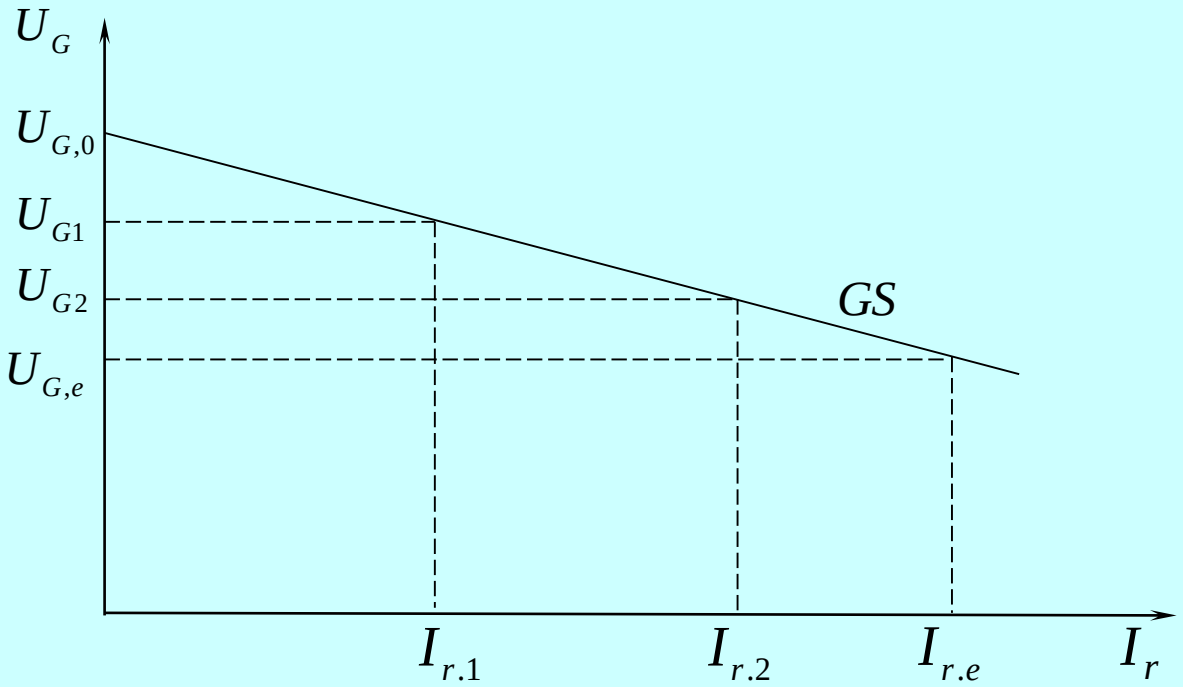
励磁调节器是根据测量比较单元输出的电压偏差进行控制。

2、调差单元

用于改变调差系数K_q，以实现合理分配各机组间的无功。调差系数定义为

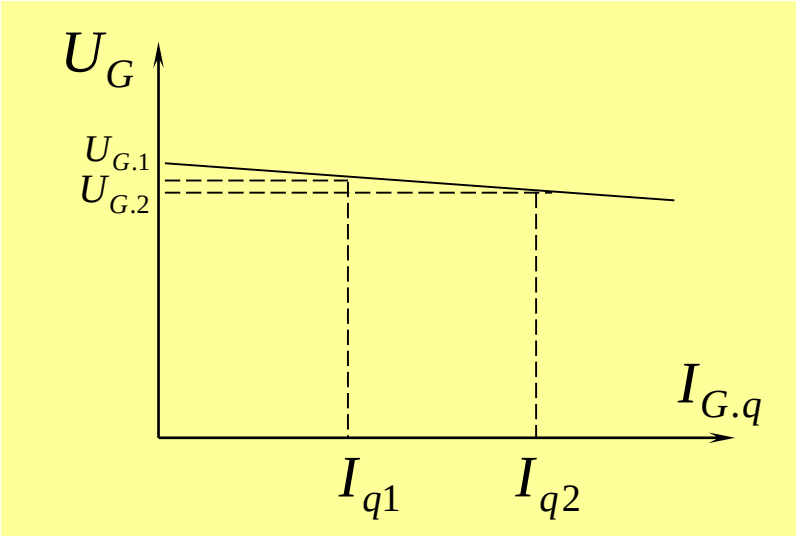
$$K_q = \frac{U_{G.0} - U_{G.e}}{U_{G.e}} \times 100\%$$

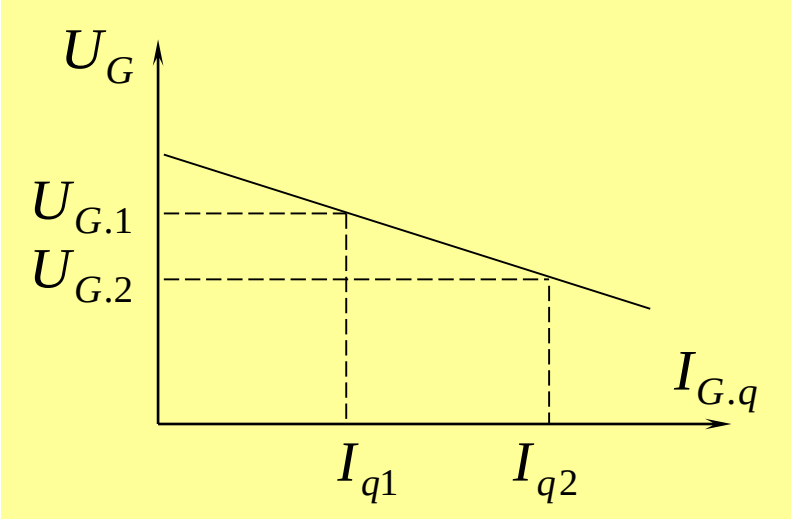
式中：$U_{G.0}$为无功电流为零，即空载下的机端电压；$U_{G.e}$为无功电流等于发电机额定无功电流值时的机端电压。如下图所示。



$$K_q = \frac{U_{G.0} - U_{G.e}}{U_{G.e}} \times 100\%$$

调差系数K_q表示了无功电流从零增加到额定值时，发电机电压的相对变化。调差系数越小，无功电流变化时发电机电压变化就越小。所以调差系数表征了励磁控制系统维持发电机电压的能力。

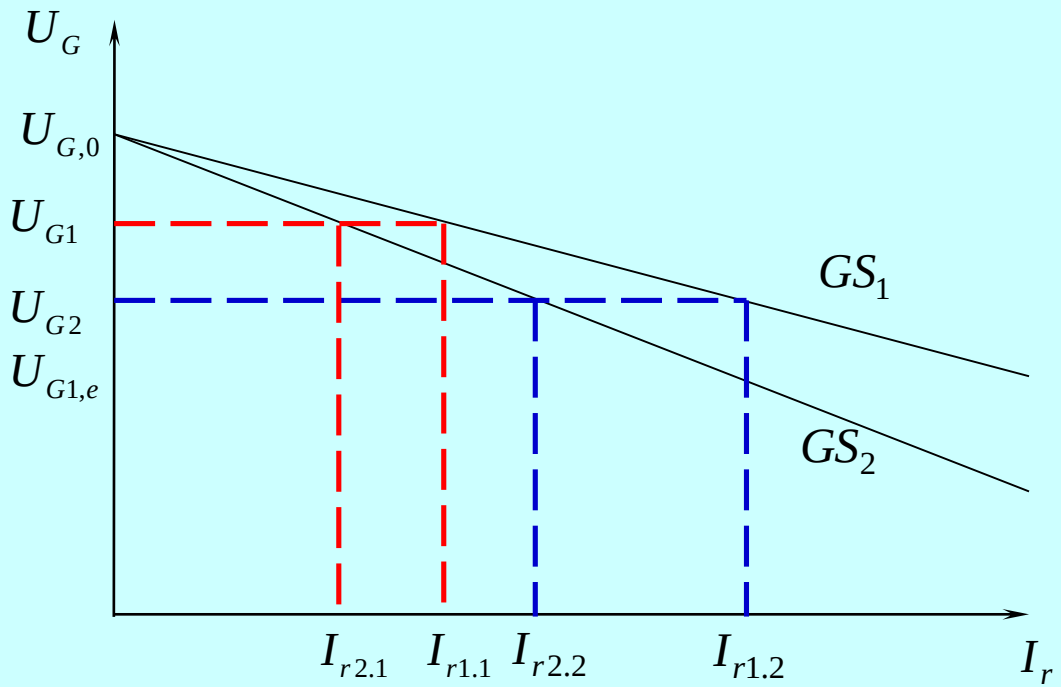


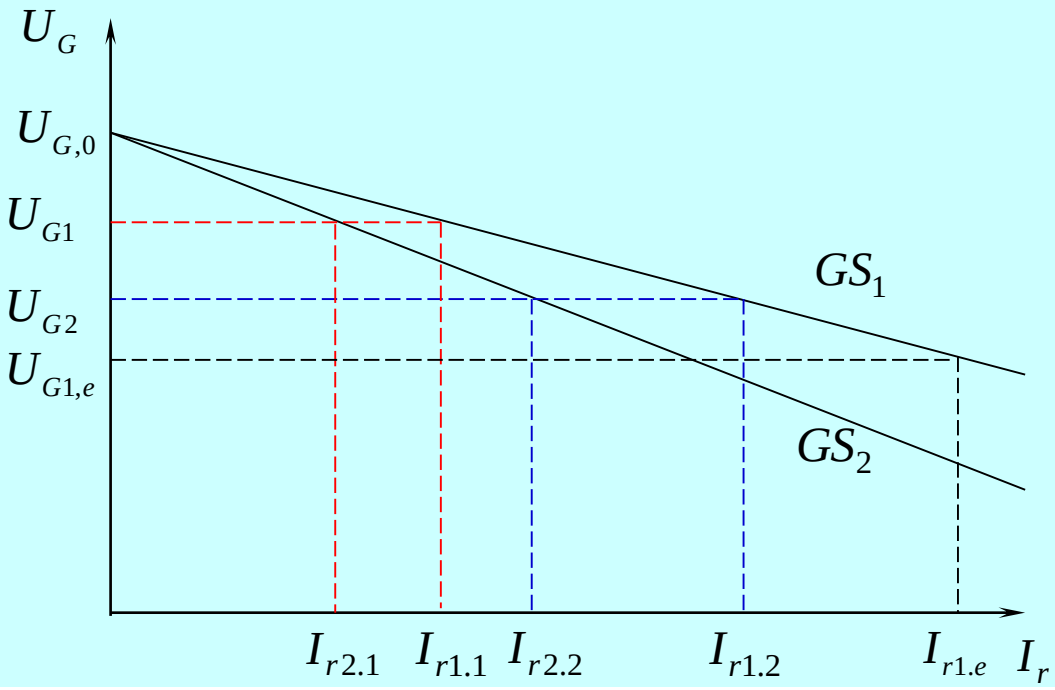


但是实际中，为了合理分配机组间的无功，并不希望调差系数太小，反而需要人为的调大调差系数。调差单元就是用于改变调差系数K_q。

为什么说改变调差系数就可以实现各机组间的无功合理分配？

假定两台发电机在公共母线上并联运行，其调节特性下如图所示。当无功负荷为某一定值时，由于两台发电机的端电压相同，等于母线电压U_{G1}，因此，每台发电机承担的无功电流是确定的，分别为$I_{r1,1}$和$I_{r2,1}$。当无功负荷增加时，母线电压下降，励磁调节器将通过增加励磁电流，达到新的稳定电压U_{G2}，这时两台发电机承担的无功电流分别为$I_{r1,2}$和$I_{r2,2}$。两台发电机分别承担一部分增加的无功负荷，大小取决于各自的调差系数。（？？？）





如图所示，对于曲线1，无功电流为0时发电机端电压为$U_{G,0}$；无功电流为额定值$I_{r1,e}$时，发电机端电压为$U_{G1,e}$。则母线电压为U_{G1}时曲线1对应的发电机的无功电流可由下式表示（线性插值）：

$$I_{r1,1} = \frac{U_{G.0} - U_{G1}}{U_{G.0} - U_{G1.e}} \times I_{r1,e}$$

$$I_{r1,1}=\frac{U_{G.0}-U_{G1}}{U_{G.0}-U_{G1.e}}\times I_{r1,e}$$

$$\Rightarrow\quad I^{*}_{r1.1}=\frac{I_{r1,1}}{I_{r1,e}}=\frac{U_{G.0}-U_{G1}}{U_{G.0}-U_{G1.e}}=\frac{\dfrac{U_{G.0}-U_{G1}}{U_{G1.e}}}{\dfrac{U_{G.0}-U_{G1.e}}{U_{G1.e}}}=\frac{U^{*}_{G.0}-U^{*}_{G.1}}{U^{*}_{G.0}-1}$$

因调差系数：$K_q=\dfrac{U_{G.0}-U_{G.e}}{U_{G.e}}\times 100\%=U^{*}_{G.0}-1$

$$\Rightarrow\quad I^{*}_{r1.1}=\frac{U^{*}_{G.0}-U^{*}_{G.1}}{U^{*}_{G.0}-1}=\frac{1}{K_q}\left(U^{*}_{G.0}-U^{*}_{G.1}\right)$$

同理，当母线电压变到U_{G2}时，有：

$$I^{*}_{r1.2}=\frac{U^{*}_{G.0}-U^{*}_{G.2}}{U^{*}_{G.0}-1}=\frac{1}{K_q}\left(U^{*}_{G.0}-U^{*}_{G.2}\right)$$

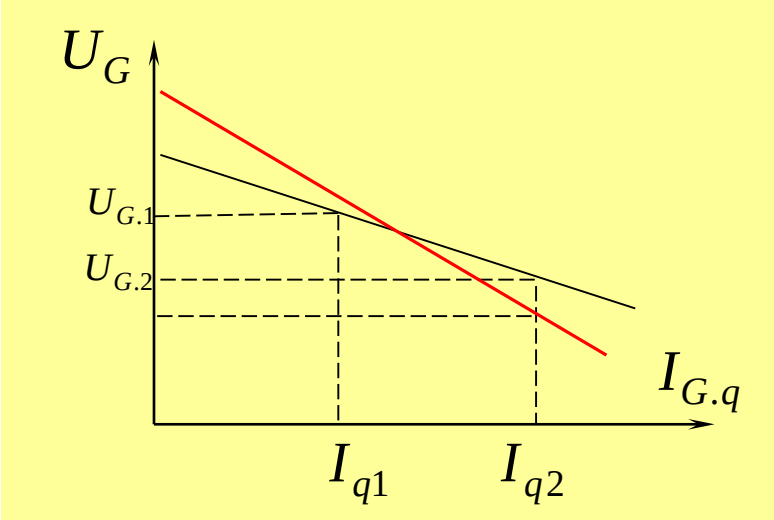
$$I^*_{r1.1}=\frac{1}{K_q}\left(U^*_{G.0}-U^*_{G.1}\right)\qquad I^*_{r1.2}=\frac{1}{K_q}\left(U^*_{G.0}-U^*_{G.2}\right)$$

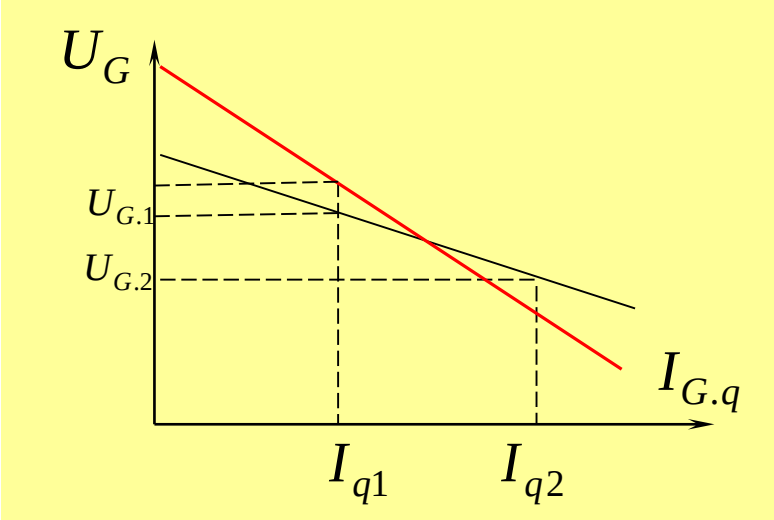
$$\Delta I^*_{r1}=I^*_{r1.2}-I^*_{r1.1}=\frac{1}{K_q}\left(U^*_{G.1}-U^*_{G.2}\right)=-\frac{\Delta U^*_G}{K_q}$$

上式表明，当母线电压波动时，发电机无功电流的增量与电压偏差成正比，与调差系数成反比，而与电压具体值无关。负号则表示当母线电压降低时，发电机无功电流将增加。两台发电机并联运行，当系统无功负荷波动时，其电压偏差相同。由上式可知，若希望各台发电机无功电流波动量的标幺值ΔI_r^*相等，则要求母线上并联运行的各发电机具有相同的调差系数。

实际上各发电机的自然调差特性是不同的，调差系数也不同，因此为了发电机具有相同的调差系数，就有出现了励磁调节器的数字调差功能。

实现调差功能的基本原理：在电压给定相加点处附加一个与发电机无功成正比的系数（即K_q）。当无功电流增加时，使电压给定减少，通过励磁调节器去减少发电机的励磁；当无功电流减少时，使电压给定增加，通过励磁调节器去增加发电机的励磁。这样就增大了发电机的调差系数。

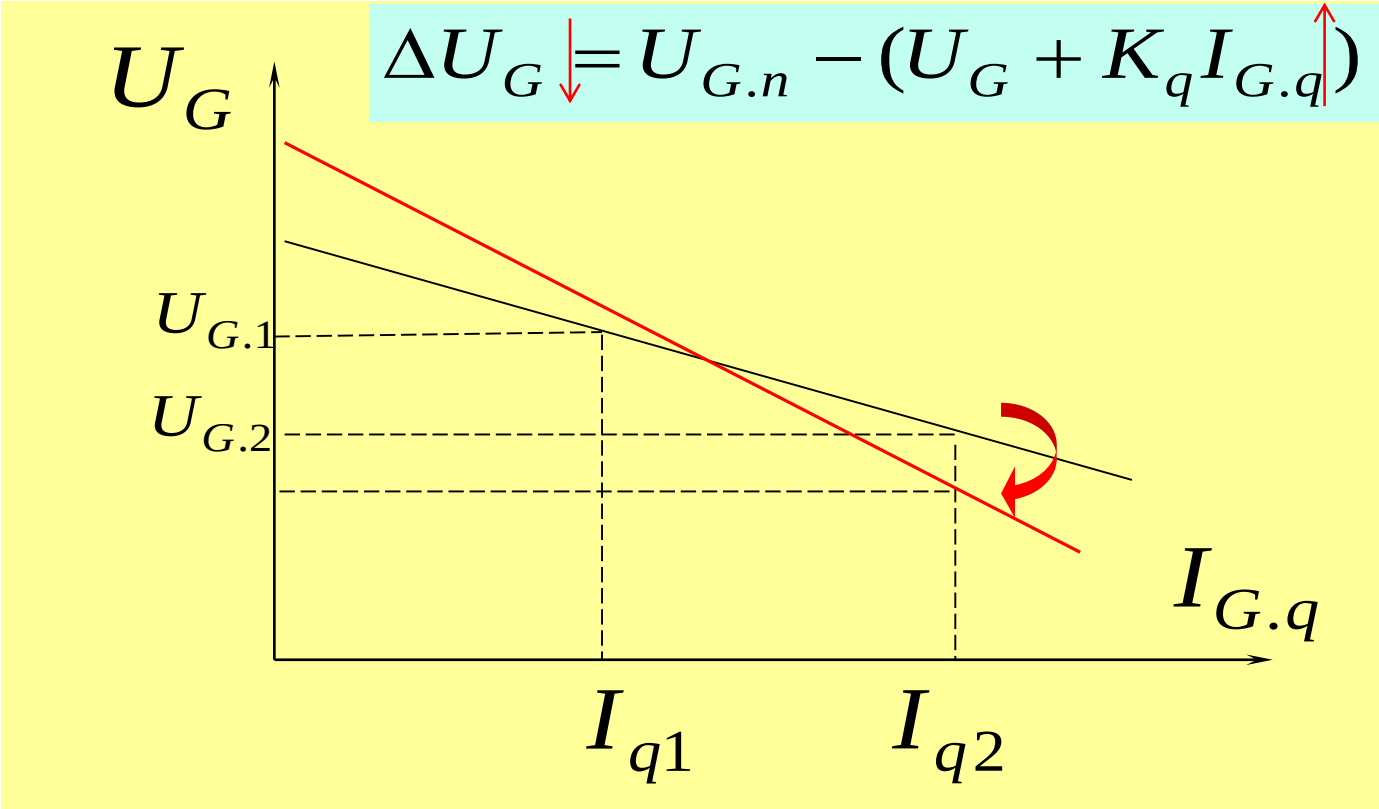




调差计算式为：

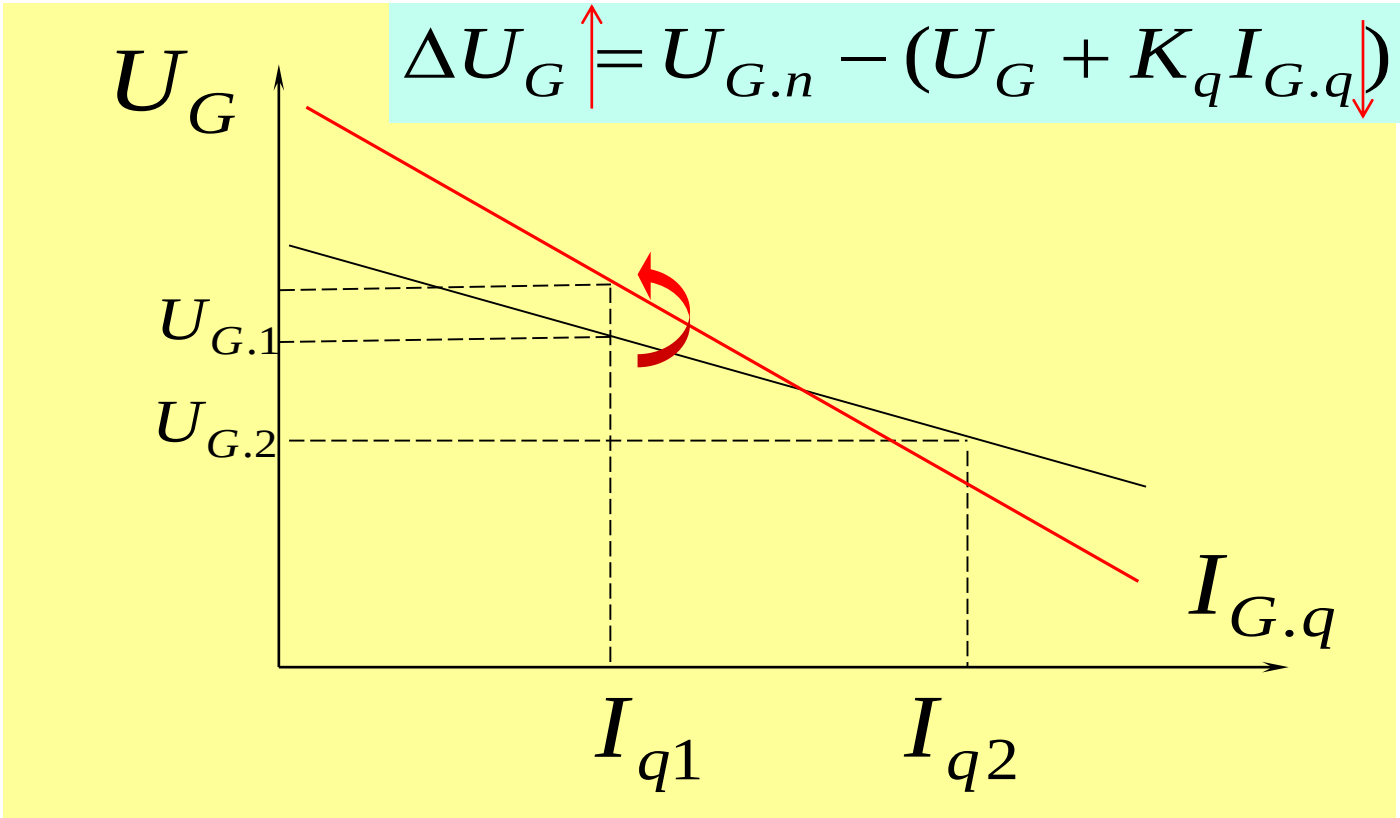
$$\Delta U_G = U_{G.n} - (U_G + K_q I_{G.q}) \quad \Rightarrow \quad \Delta U_G = \left(U_{G.n} - K_q I_{G.q}\right) - U_G$$

当无功电流增加时，母线电压下降，励磁调节器将通过增加励磁电流，达到新的稳定电压$U_{G2,}$但此时由于使电压给定减少(无功电流增大导致，根据调差计算式可知)，通过励磁调节器去调节发电机的励磁，最终使得稳定后的电压小于U_{G2}，使得特性曲线更加倾斜，相当于增加了调差系数；



当无功电流增加时

当无功电流减少时，母线电压上升，励磁调节器将通过减少励磁电流，达到新的稳定电压$U_{G1,}$但此时由于使电压给定增加(无功电流减少导致，根据调差计算式可知)，通过励磁调节器去调节发电机的励磁，最终使得稳定后的电压大于U_{G1}，同样使得特性曲线更加倾斜，相当于增加了调差系数；

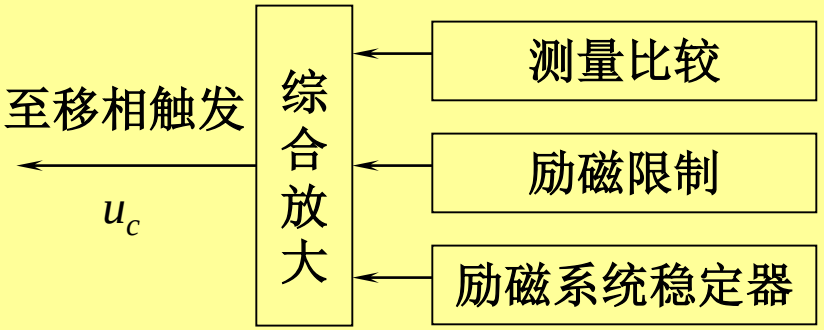


当无功电流减少时

3、综合放大单元

综合放大单元是沟通测量比较单元与移相触发单元的一个中间单元。来自测量比较单元及调差单元的电压信号在综合放大单元与励磁限制、反馈控制等其它调节信号综合后加以放大，用来得到满足移相触发单元相位控制所需的控制信号。

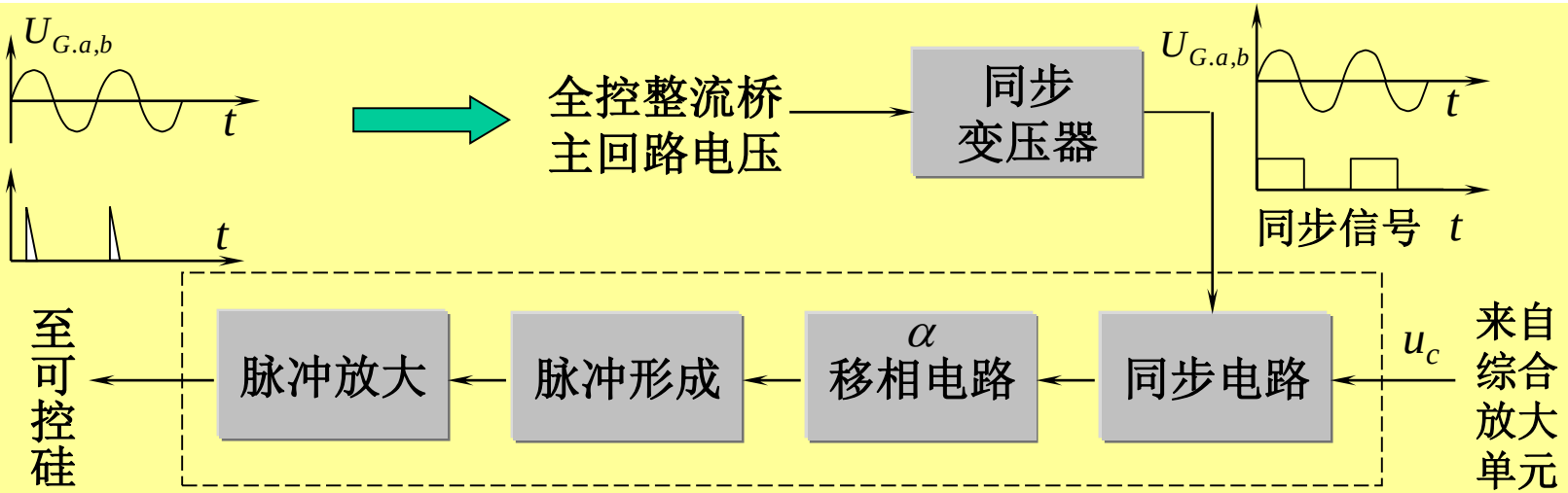
在综合放大单元的输入信号中，除电压偏差信号外，为适应发电机各种工况的工作，还需要多种辅助信号，如最大（小）励磁限制信号；定子电流限制、转子电流限制信号；转速、频率、机组电功率及功角信号；为改善控制系统动态性能的微分反馈控制信号等。



4、移相触发单元

移相触发单元是励磁调节器的输出单元，它根据综合放大单元送来的综合控制信号u_c的变化，转变为脉冲相位的变化，并以此脉冲触发全控整流桥（励磁调节系统的功率输出部分）的晶闸管，使其导通角α随u_c的变化而改变，从而达到自动调节励磁的目的。

移相触发单元由同步、移相、脉冲形成和脉冲放大等环节组成，如图所示：



在不计交流回路感抗的存在时，认为换流是在瞬间完成的。余弦波移相触发单元的输入电压（即综合放大单元送来的综合控制信号 u_c）与晶闸管的导通角 α 就会具有下述关系

$$u_c = U_{SM}\cos\alpha \quad \Rightarrow \quad \alpha = \arccos\frac{u_c}{U_{SM}}$$

式中，U_{SM} 为同步信号电压的幅值。

根据述整流原理可知，全控整流桥输出的直流电压 U_d 的大小是随晶闸管导通角 α 的变化而变化的，其表达式为：

$$U_d = 1.35E_l\cos\alpha$$

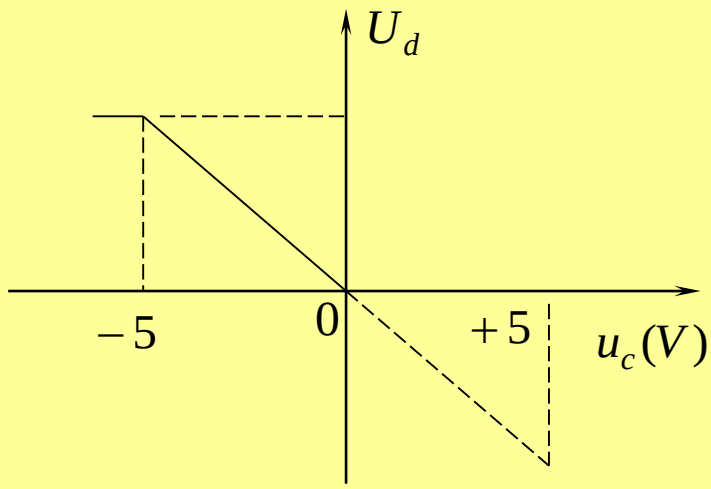
式中，E_l 为全控整流桥输入的线电压。

$$u_c = U_{SM}\cos\alpha \qquad U_d = 1.35E_l\cos\alpha$$

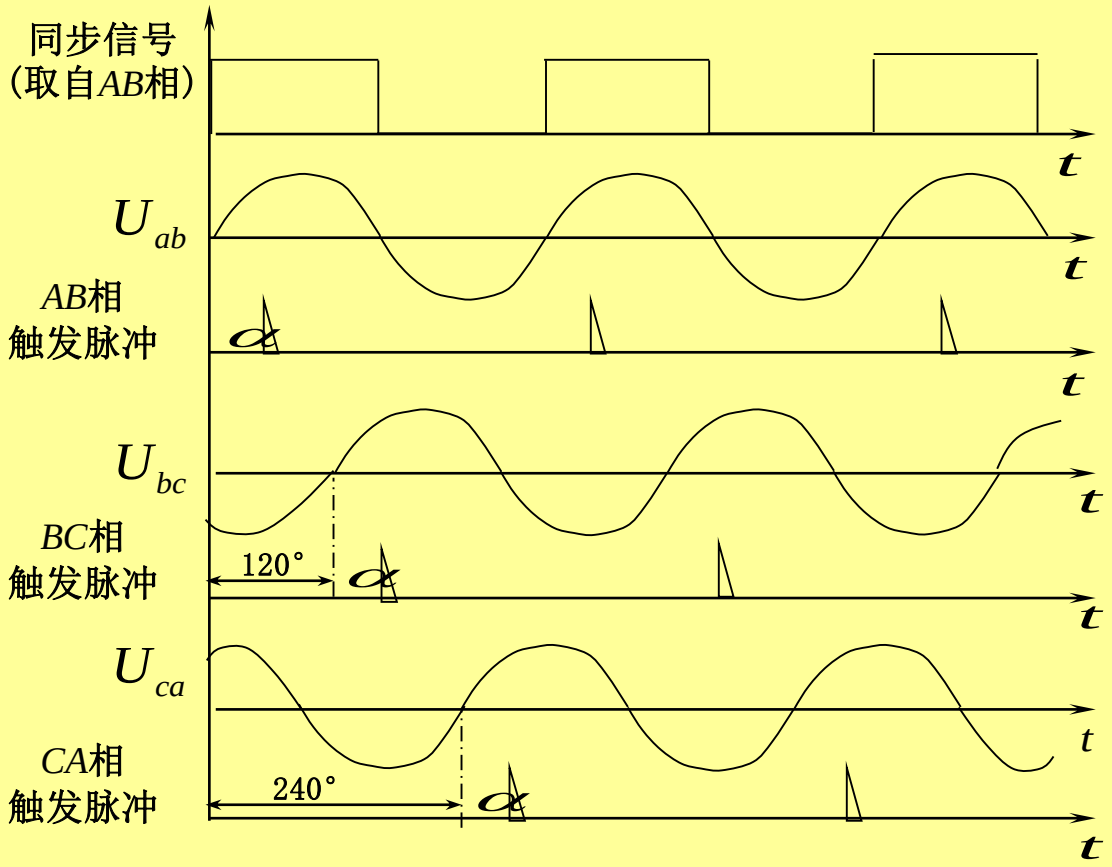
由此可得全控整流桥输出电压的平均值为

$$U_d = U_{AVR} = 1.35E_l\frac{u_c}{U_{SM}}$$

上式说明全控整流桥的输入量与输出量之间呈线性关系，其特性如图所示。图中实线表示整流特性，虚线表示逆变特性。



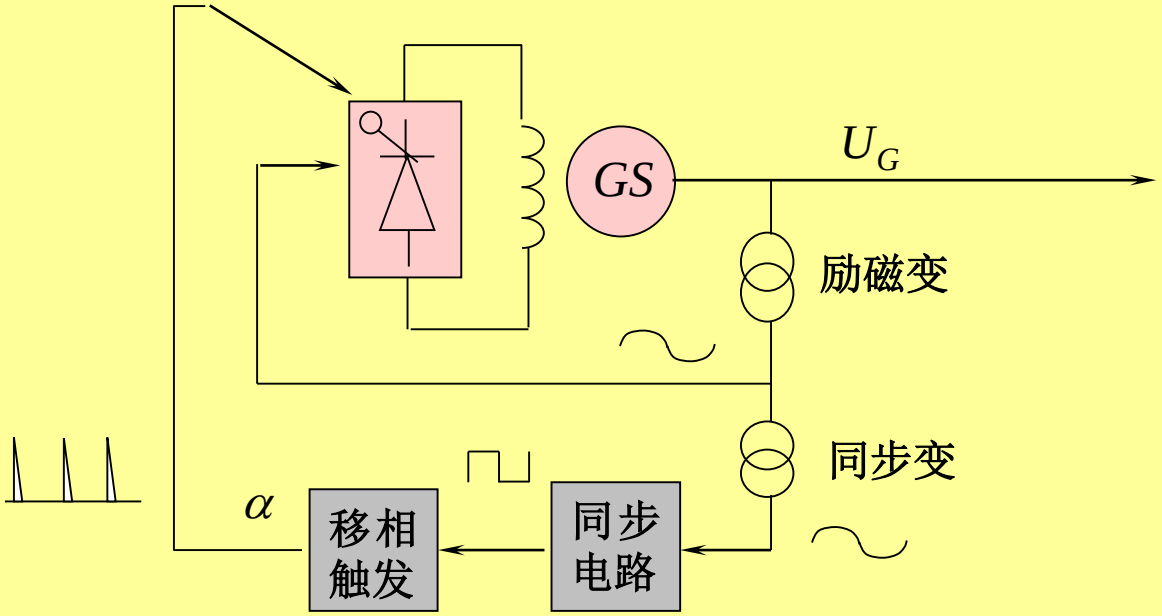
对三相全控整流桥而言，当控制电压u_c一定时，各相的每个周期送出的触发脉冲，对应于该相阳极电压的时刻都应相同，即控制角 α 相同。晶闸管触发脉冲与主回路之间的这种相位配合关系称为同步。取自主回路的同步信号，就是用于保证主回路与触发电路之间的同步。



同步电路的任务是：

将取自同步变压器二次侧信号经滤波整形成同频率、同相位的方波后，送入计算机的高速输入端口，其上升沿作为控制角 α 的计时起点，并启动计时器。

采用自并励可控硅励磁方式时的一次接线原理图如下：



对移相触发单元的基本要求：

- 各相触发脉冲必须与整流桥主回路同步，即具有相同的频率并保持一定的相位关系；（通过同步信号实现）
- 为确保晶闸管可靠触发，要求触发电路有足够大的功率输出，且触发脉冲的上升沿要陡，并具有足够的幅值和宽度；
- 移相范围及数目应能满足整流桥和电压调节范围的要求；
- 在整个移相范围内，各相触发脉冲的控制角应保持一致（各相触发脉冲相位偏差小于5°），以减少整流桥输出电压的谐波分量；
- 脉冲强度不应大于控制极的电压、电流和功率的规定允许值，为避免可控硅反向击穿，在控制极不应出现反向电压。
- 为确保安全，触发电路应与处于高电压的主回路隔离。

5、手动单元

励磁调节器由自动励磁调节器和手动调节励磁器组成，为双通道结构。其中，自动励磁调节器是主励磁调节器，按发电机端电压（或无功功率）的偏差自动调节发电机的励磁，以维持发电机端电压的稳定。当自动励磁调节器故障时，手动励磁调节器投入，通过手动控制调节励磁电流，保证发电机的正常工作。

采用手动控制方式时，调差单元和综合放大单元均退出工作，而移相触发单元则继续工作。此时励磁调节器属于开环运行情况。

3.7 可控硅励磁的数字控制原理

主要包括微机励磁调节器的构成、采样控制和数字移相原理等内容。

1、微机励磁调节器的构成

- 计算机系统

包括***CPU***、随机存储器*RAM*、可擦除可编程*ROM芯片*(*EPROM*) 、总线及辅助电路等，是控制系统核心。

- 开关量输入部分

由光电隔离并行接口构成的开关量输入部分，用于检测外部输入的接点或电平信号，如：增/减励磁、开/停机、手动启励、断路器位置（开/关）以及灭磁开关状态等控制命令和状态信息。

- **开关量输出部分**

由光电隔离并行接口构成的开关量输出部分，具有输出驱动能力和电平转换能力，**用于输出包括可控硅触发脉冲、灭磁控制等开关型控制信号，并向其它系统报告励磁系统的工作状态。**

- **模拟量输入部分**

由信号处理（信号滤波、放大、阻抗匹配、电流/电压转换等）、多路转换、采样保持和*A/D*转换组成了模拟量输入部分，**用于将交流电压、电流等模拟信号转换为数字信号，并输入到计算机**。在励磁控制中要求模拟量输入电路的实时性强，能够完成三相电压和电流的同步采样。

- 计数器/中断

  用于完成导通角脉宽、60°角中断以及频率计算等任务的定时和计数。

- 通信接口

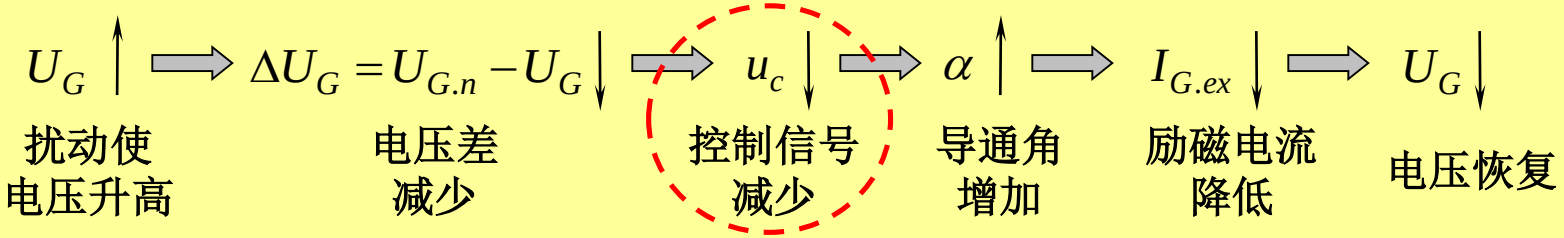
  用于完成励磁调节器与其他控制系统的数字信息的交换，多采用*KAN*网、*MB*网*Profibus*等现场总线技术。

- 人机接口

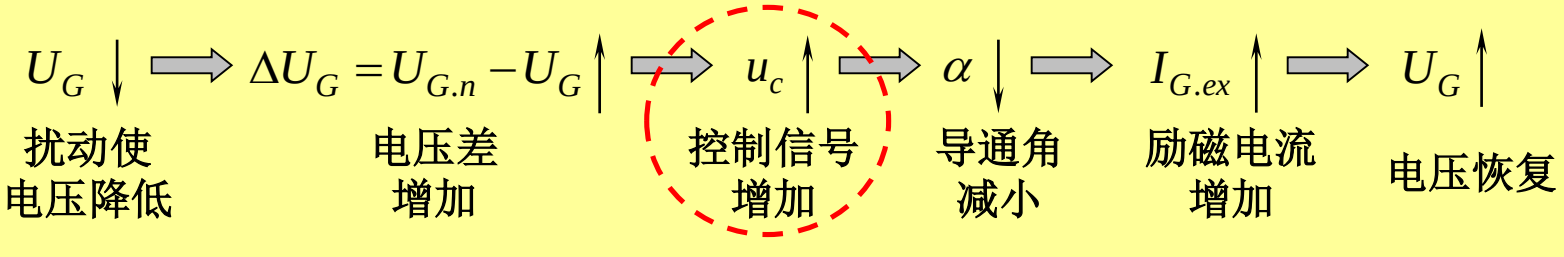
  由触摸屏、液晶显示器、鼠标等设备实现人机交互，接受操作人员的命令和显示励磁系统的工作状态信息。

2、采样控制

当扰动使发电机电压升高时的自动控制过程如下：



当扰动使发电机电压降低时的自动控制过程如下：



目前在励磁调节中，通常采样控制应用较多的是*PID*调节：

连续型*PID*调节规律为：

$$u(t)=K_P\left[e(t)+\frac{1}{T_I}\int_0^t e(t)dt+T_D\frac{de(t)}{dt}\right]$$

式中，$u(t)$为控制信号；$e(t)$ 为偏差信号。

由于计算机控制是一种采样控制，故对上式进行离散化处理，取：

$$\begin{cases}\int_0^t e(t)dt\approx\sum_{j=0}^{k}e_jT\\ \frac{de(t)}{dt}\approx\frac{1}{T}(e_k-e_{k-1})\end{cases}$$

则：

$$u_k=K_P[e_k+\frac{T}{T_I}\sum_{j=0}^{k}e_j+\frac{T_D}{T}(e_k-e_{k-1})]$$

上式称为位置式*PID*算法。若采样周期T足够小，离散系统与连续系统非常接近。

$$u_k = K_P[e_k + \frac{T}{T_I}\sum_{j=0}^{k} e_j + \frac{T_D}{T}(e_k - e_{k-1})]$$

如果在控制中，当执行机构需要的不是控制量的绝对数值，而是其增量时，由上式可导出增量式PID控制算法：

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$$

$$= K_P[e_k + \frac{T}{T_I}\sum_{j=0}^{k} e_j + \frac{T_D}{T}(e_k - e_{k-1})] - K_P[e_{k-1} + \frac{T}{T_I}\sum_{j=0}^{k-1} e_j + \frac{T_D}{T}(e_{k-1} - e_{k-2})]$$

$$= K_P[e_k - e_{k-1} + \frac{T}{T_I}e_k + \frac{T_D}{T}(e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2})]$$

$$= K_P[e_k + \frac{T}{T_I}e_k + \frac{T_D}{T}e_k - 2\frac{T_D}{T}e_{k-1} - e_{k-1} + \frac{T_D}{T}e_{k-2}]$$

$$= C_1 e_k + C_2 e_{k-1} + C_3 e_{k-2}$$

式中：$C_1 = K_P(1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T})$；$C_2 = -K_P(1 + \frac{2T_D}{T})$；$C_3 = K_P\frac{T_D}{T}$；

在励磁调节中，*PID*控制是按电压偏差 $\Delta U = U_{sys} - U_G$ 来计算的。其中：

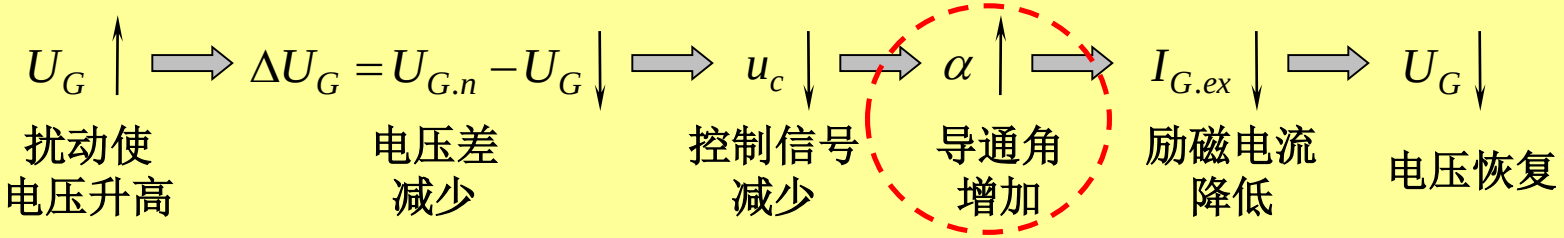
- **比例调节**是按ΔU的大小成比例地改变控制量，从而改变励磁电流，以减少ΔU 。比例调节不能消除稳态误差，稳态误差的大小与K_P成正比；

- **积分调节**是根据ΔU的积分来调节励磁电流，理想积分调节可消除稳态误差；

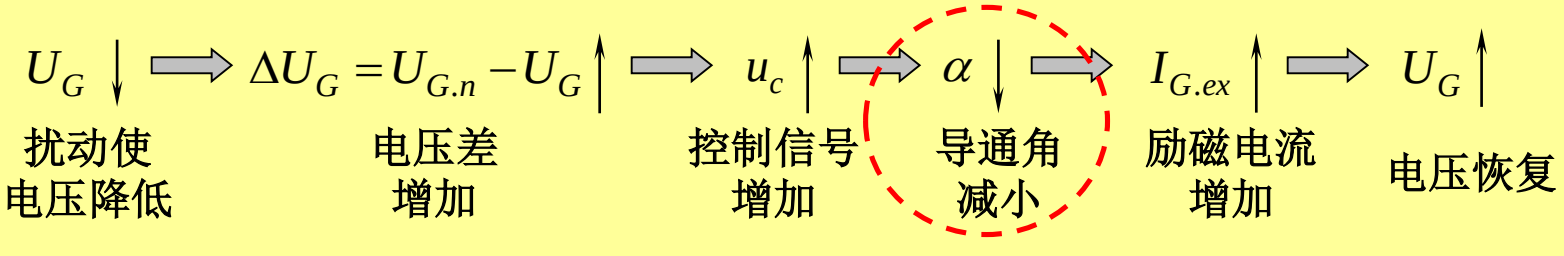
- **微分调节**是按电压的变化趋势进行调节，以减少超调量、缩短调整时间，可以提高系统的动态品质和稳定性。

3、数字移相原理

当扰动使发电机电压升高时的自动控制过程如下：



当扰动使发电机电压降低时的自动控制过程如下：



通过*PID*运算后得到了控制信号 u_c ，然后再根据 u_c 计算出晶闸管触发角 α，由于触发角与控制信号成余弦关系，可以表示为:

$$\alpha = \arccos \frac{u_c}{U_{SM}}$$

就可由控制信号 u_c 求出触发角 α ； $\boldsymbol{U_{SM}}$ 为同步信号电压的幅值。

数字移相是把*PID*计算确定（通过 u_c）的晶闸管触发角 α 折算为计算脉冲个数*N*。折算公式为：

$$N = \frac{\alpha}{360} T f_c$$

式中：*T*为阳极电压周期； f_c 为计算机的计数频率(单位时间计数个数)。

一般情况下，考虑到励磁控制的实时性要求，对上式进行离线计算，可得关系表 $\alpha = f(u_c)$，并保持在存储器中，运行时由*PID*调节算法求得 $\boldsymbol{u_c}$ 后，利用查表技术求取控制角 α 。

例：当可控硅励磁调节器对电压进行调节时采用了比例控制规律。在某采样周期k，微机调节器测量到发电机端电压的偏差相对值为$\Delta U_g(k)=0.15$，比例控制参数$K_p=1$。

若:控制信号与导通角α余弦关系中的因子$U_{SM}=1$，计算机的计数频率$f_c=1MHz$，同步信号周期$T=20ms$。

试求出：可控硅导通角$\alpha(k)$以及对应的脉冲数$N(k)$。

解：由于采用了比例控制规律，故控制信号为

$$u_c(k)=K_p\Delta U_g(k)=1\times 0.15=0.15$$

由于触发角与控制信号成余弦关系，得

$$\alpha(k)=\arccos\frac{u_c(k)}{U_{SM}}=\arccos 0.15=81.373^\circ$$

将晶闸管触发角$\alpha(k)$折算为计算脉冲个数，得

$$N(k)=\frac{\alpha(k)}{360}Tf=\frac{81.373}{360}\times 0.02\times 10^6=4521\text{(个)}$$

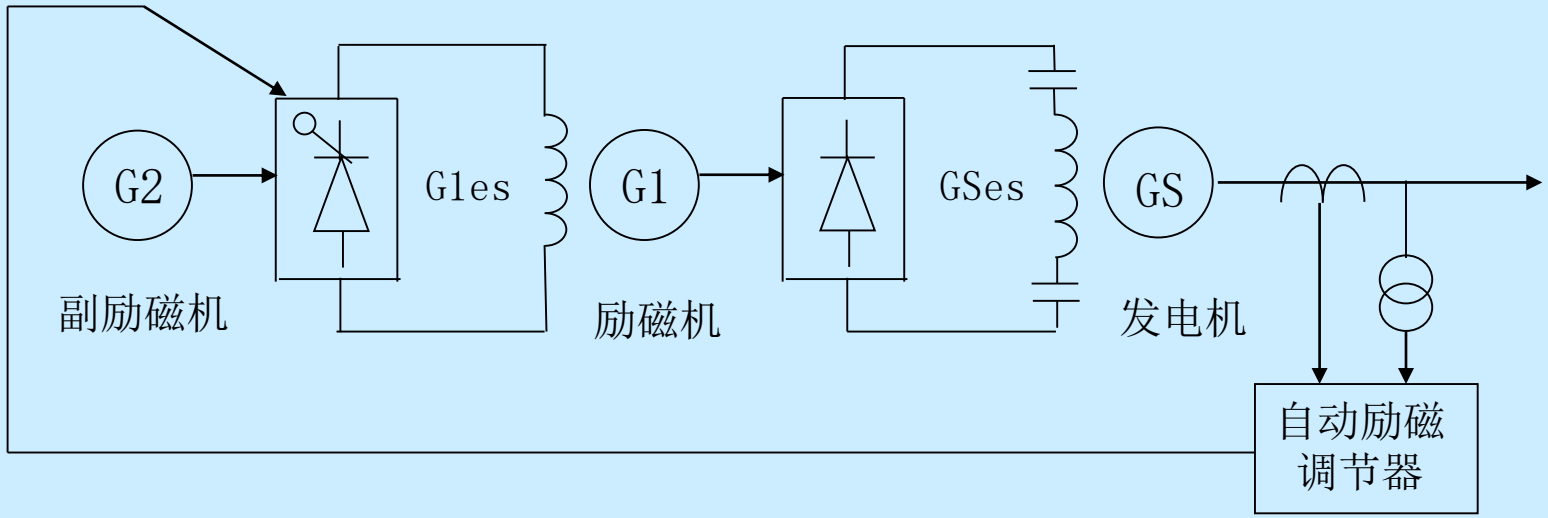
第三章作业

1、简述水电机组励磁控制的作用，以及对自动调节装置的要求。

2、当一台同步发电机带孤立网运行时，试分析无功负荷电流的增加是造成发电机端电压下降的主要原因。

3、简述强行励磁、强行减磁和自动灭磁的作用。

4、简要说明下图所示励磁系统的工作原理。



4、可控硅励磁系统由那些基本单元所组成？其各自的作用又是什么？

5、写出位置型离散*PID*控制算法的表达式，并分别说明比例、积分和微分控制在调节过程中的作用。

6、在可控硅励磁中的“同步”是指什么？为什么同步信号取为同步发电机的AC相电压？

7、当可控硅励磁调节器对电压进行调节时采用了比例控制规律。在某采样周期k, 微机调节器测量到发电机端电压的偏差相对值为 $\Delta U_G(k)=0.15$，比例控制参数 $K_p=1$。

若:控制信号 u_c 与导通角 α 余弦关系中的因子 $U_{SM}=1$，计算机的计数频率 $f_c=1MHz$，同步信号周期 $T=20ms$ 。

试求出：可控硅导通角 $\alpha(k)$ 以及对应的脉冲数 $N(k)$。

The End