

前 言

相复励自动励磁调节器在我省电力系统中应用日益广泛，为确保电力系统安全运行和提高电能质量起了应有的作用。为了更好地发挥装置的应有作用，合理地计算选择参数和调试是很重要的。有关这方面的资料很多但比较分散，工作中甚感不便，为此我们将有关参考资料和工作中的一点粗浅体会加以汇编作为电力系统继电保护和自动装置试验规程的第五册。

考虑到我省系统内尚有不少F—D系列自动调整励磁装置，因此将原电科院F—D系列自动调整励磁屏调整试验方法翻印作为本册的第二部分。

由于我们水平有限，工作做得不细，错误之处肯定不少，请提出意见以便修正。

第一部分所用符号除调节器元件符号采用新符号外，其余参数符号尚未查到统一的新符号，故仍用原习惯用的旧符号，为了避免混淆特附主要符号表备查。第二部分所用符号仍按原稿。

目 录

第一部分 相复励自动励磁调节器

第一章 调节器的工作原理	(1)
第一节 概述.....	(1)
第二节 调节器的结线及各元件的作用.....	(2)
第三节 磁放大器反馈对调节器输出特性的影响.....	(9)
第四节 互感器结线方式的选择.....	(16)
第五节 调节器的运行稳定性问题.....	(25)
第二章 调节器运行情况的计算	(31)
第一节 计算所需要的原始数据.....	(31)
第二节 发电机转子电流的解析法与图解法.....	(32)
第三节 调节器运行情况的计算.....	(35)
第三章 调节器的调整与试验	(45)
第一节 一般检查与试验.....	(45)
第二节 单元件特性试验.....	(46)
第三节 调节器工作特性的调整.....	(56)
第四节 发电机运行情况下对调节器的试验.....	(68)
第四章 调节器的运行与维护	(74)
第一节 调节器的投入与切除.....	(74)
第二节 调节器的正常运行与故障处理.....	(75)
第三节 调节器运行中的维护与检查.....	(76)
附录一 主要符号表	(78)
附录二 KFD—3装置中硒整流器改为硅整流	

	器参考方案.....	(81)
附录三	调节器各元件内部结线及参数附表1~11	(83)
附录四	安装结线图附图1~4.....	(92)
附录五	电流互感器的允许二次电压值.....	(94)

第一章 调节器的工作原理

第一节 概 述

相复励自动励磁调节器是一种电磁式调节器，具有灵敏度高，无机械可动部分，无失灵区等优点。但又不同于一般的电磁式自动励磁调节器(如FD型)，由于在调节器中采用了相复励变压器，使发电机的励磁不仅与定子电压和电流有关，而且与定子电压和定子电流间的相位有关，亦即同负载的功率因数有关。因此，从原理上讲，当发电机定子电压和电流一定而发电机负载的功率因数改变时，调节器能保证发电机所需要的励磁，亦即实现了相复励调节。

国内生产的相复励调节器为KFD型(上海开关厂)或KLT型(哈尔滨电机厂)其原理与结构无甚差异。原理方框图如图1—1—1。

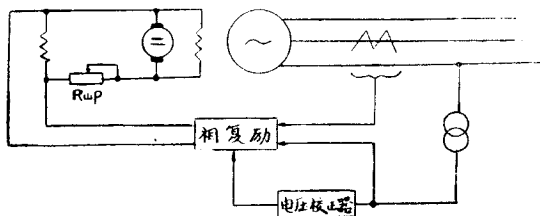


图1—1—1 相复励自动励磁调节器原理方框图

相复励自动励磁调节器(以下简称调节器)同一般的电磁式自动励磁调节器相比较具有以下主要特点：

1) 由于电压校正器的输出用来控制相复励变压器, 而不是直接供给励磁机的励磁电流, 因而大大降低了校正器的输出功率和放大系数, 也减小了磁放大器的时间常数, 从而提高了调节器的动作速度。

2) 由于调节器的输出能反映发电机的功率因数, 这样在系统发生振荡的情况下, 可以快速地改变励磁机的励磁, 从而提高了系统运行的稳定水平。

3) 由于相复励变压器的变比随控制磁势的不同而不同, 因而当系统发生短路故障时, 可以使发电机获得较高的强行励磁水平。

4) 由于调节器相应于发电机空载及负载下的输出特性不同, 所以需要对发电机空载和负载情况分别进行调整试验, 亦不必采取其他措施可保证两种工况下调节器工作的稳定性, 但增加了调试工作量及复杂性。

5) 由于校正器的输出仅作为相复励变压器的控制电源其输出功率较小、故调节器用的电压互感器负担大大减轻。

6) 在实现并联发电机间无功功率的稳定分配时, 相复励自动励磁调节器的调整试验, 比一般电磁式调节器要麻烦得多。

第二节 调节器的接线及各元件的作用

相复励自动励磁调节器, 主要由电压校正器和可控相复励变压器两部分组成。其原理接线见图1—2—1, 安装接线图见附录四的附图2、附图3, 现分别叙述如下。

(一) 电压校正器部分

调节器的电压校正器部分由整定自耦变压器TBZ、测量变压器BC、可调电阻 R_{t1} 、磁放大器FC、定子电流反馈调整

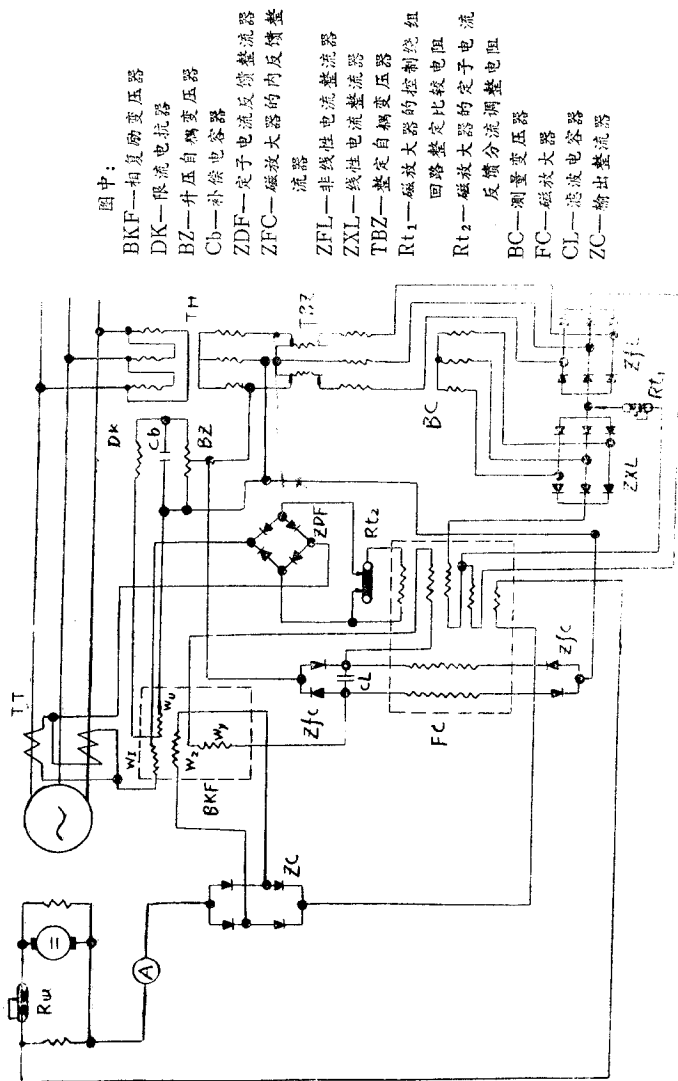


图1-2-1 相复励自动励磁调节器原理接线图

电阻 R_{t2} 、非线性回路整流器 Z_{fL} 、线性回路整流器 Z_{XL} 、定子电流回路整流器 Z_{DF} 、磁放大器内反馈整流器 Z_{fC} 和输出整流器 Z_C 等组成。下面分别概述主要元件的作用。

测量变压器 BC 是一个三相变压器，作为调节器的测量元件由 $P \cdot T$ 供电，由于铁芯工作在饱和状态，一次绕组内的电流就含有大量的高次谐波，并随 U_r 的升高而急剧增加，则经过 Z_{fL} 整流后的电流与 U_r 呈非线性关系，如图1—2—2中的曲线

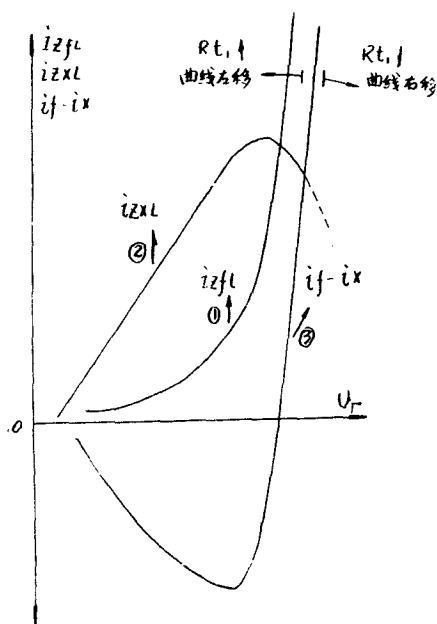


图1—2—2 测量变压器输出特性曲线图

图中：①— $i_{zfL} = f(U_r)$

②— $i_{zXL} = f(U_r)$

③— $(i_f - i_x) = f(U_r)$

①，此电流为非线性电流 i_{zfL} 。二次绕组接成星形，其感应电压正比于一次绕组所加电压，并接到恒定阻抗负载上，则经过 Z_{XL} 整流后的电流与 U_r 呈线性关系，如图1—2—2中的曲线②，此电流为线性电流 i_{zXL} ，其后部由于 i_{zfL} 的闭锁作用开始下降，并最后到零。若将 i_{zfL} 和 i_{zXL} 反极性加入到磁放大器中匝数相等的两个控制绕组上，则 FC 的控制磁势为 $i_{zfL} - i_{zXL}$ 之差所产生的磁势差。由于这两电流都是与 U_r 的变化关系，所以

当 U_r 的大小变化时，这两电流差值也相应变化。 BC 的作用

就在于从这两电流差值的变化,测量出 U_r 与给定值的偏差,而这 ΔU_r 信号体现在FC控制绕组产生的磁势也相应发生变化。

接于 Z_{fL} 和 Z_{XL} 公共回路中的可调电阻 R_{t1} ,由于其阻值比BC的一次绕组阻抗要小得多,则改变电阻时对 i_{ZfL} 影响较小,而主要影响 i_{ZXL} ,所以改变 R_{t1} 时能改变加入到FC控制绕组内两个电流的大小比例关系,也即改变了控制磁势,其作用就在于改变磁放大器的输出特性,以能够调整调节器空载特性曲线的位置来满足发电机空载运行的需要。BC的技术数据见附录三的附表4,各整流器的技术数据见附录三的附表6。

磁放大器FC是将 ΔU_r 信号及其它信号综合在内而后去控制BKF的放大元件。它采用内反馈自激线路,在工频的每一个

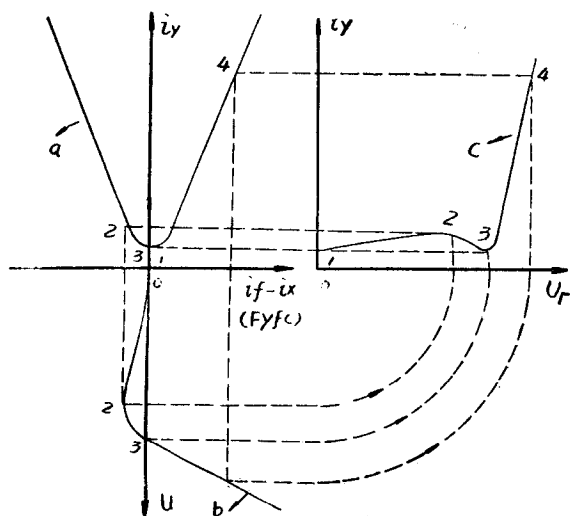


图1—2—3 磁放大器输出特性曲线图(无反馈)

图中: a—FC的输出电流 i_y 与控制电流 $i_f - i_x$ 的关系
b— $i_f - i_x$ 与电压 U_r 的关系
c— i_y 与 U_r 的关系

周期内与交流绕组串联的ZFC中流过与回路电流成比例的脉动直流成分,因此交流绕组又起内反馈作用,在原理接线上内反馈的磁势与非线性电流的磁势方向相同。另外还有接入其它信号可调整的外反馈绕组(其作用在第三节中叙述)。FC在控制及反馈信号的综合磁势作用下,可以改变铁芯的饱和程度即改变了导磁率的大小,使交流绕组的电流得以放大,从而改变磁放大器的输出特性。其特性曲线图见图1—2—3,其技术数据见附录三的附表5。

(二)可控相复励变压器部分

可控相复励变压器BKF,实质是一个变压器式磁放大器,它有四个绕组,一次侧“ W_I ”接C·T回路,作用与一般复励装置相同;一次侧“ W_U ”经“DK”和“BZ”接P·T回路,其作用是保证发电机空载及轻载时,调节器能起调节作用。若将“ W_I ”和“ W_U ”这两个一次绕组的接线在相位上适当配合可获得反映 $\cos\varphi$ 变化的一次合成安匝磁势,而起到即有复励又有相补偿的作用;直流控制绕组“ W_y ”(它有两段绕组,为防止交流对其感应而反极性连接)其中接入FC的输出电流 i_{kop} 是随 U_T 的大小成正比变化的,当 $U_T \uparrow$ 时 $i_{kop} \uparrow$,而BKF的特性又与一般磁放大器相反,它是随着合成控制磁势 $F_{yfc} \uparrow$ 而输出电流 $i_{pfr} \downarrow$,这是因为 $i_{kop} \uparrow$ 时,BKF铁芯更饱和,使一次、二次传变变坏,若一次安匝不变时,二次绕组“ W_2 ”感应电压 $\downarrow$,故 $i_{pfr} \downarrow$ 。“ W_y ”的作用即是控制BKF的输出特性。由此看出,作为执行元件的BKF输出电流不仅与发电机电流的大小及 $\cos\varphi$ 的变化有关,而且还受 U_T 变化的控制,故能够对发电机的励磁起到可控相复励的调节作用。

BKF的结构及技术数据见附录三的附表2,原理接线见图1—2—4。

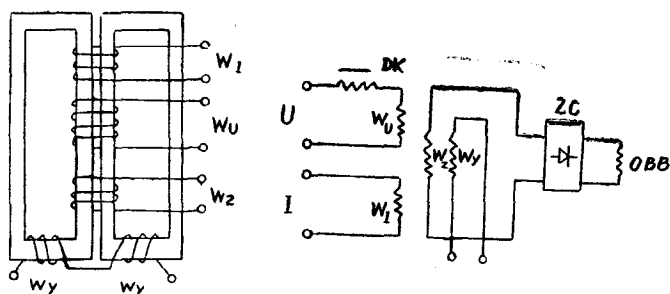


图1—2—4 BKF原理接线图

可控相复励变压器部分还有以下各附属元件，其作用是：

限流电抗器DK的作用，在于限制 W_U 回路中的电流，由于DK的电抗值比 W_U 的电抗值大得多，这就使得 W_U 回路中的电流主要由自耦变压器BZ的电压及电抗器DK的电抗来决定，即BKF的饱和程度对其影响不大，从而改善了额定情况时的调节性能。另外，在发电机短路时 W_U 回路经DK闭合，由于DK电抗数值较大，这就限制了流入 W_U 回路的外汲电流，从而使 W_I 回路的电流大部分传变至 W_2 回路，亦即提高了相复励回路的强励性能。DK的技术参数见附录三的附表1。

补偿电容器Cb，用来补偿感性电流以减小电压互感器的二次负担，如果选择正确，可使电压互感器的负担减少约50%。

升压自耦变压器BZ，用来升高 W_U 回路的电压，使得在较低的电压互感器二次电压(182伏)时，调节器仍有足够的直流输出电压(140伏)。另外，升高电压也可以减小Cb的数值。

BZ与Cb的技术参数见附录三的附表3。

下面画出调节器各主要元件特性曲线相互关系示意图，以帮助我们了解调节器为什么能够自动调整发电机励磁的一般概念。参看图1—2—5。

调节器投入运行后，即工作在特性曲线的适当位置上，BKf已有相应的控制电流 i_{kop} 。由TBZ依照发电机外特性视系统运行需要而整定在某一给定值，当出现 ΔU_r 或人为的改变给定值时，BC将测量到变化的偏差即 $i_f - i_x$ 差值，此信号经FC综合放大后，其输出电流 i_{kop} 相应变化，因而改变了BKf的输出特性则调节器输出电流 i_{per} 随之改变。当发电机的电流、电压及 $\cos\varphi$ 都发生变化时，不但 i_{kop} 变化，而BKf的

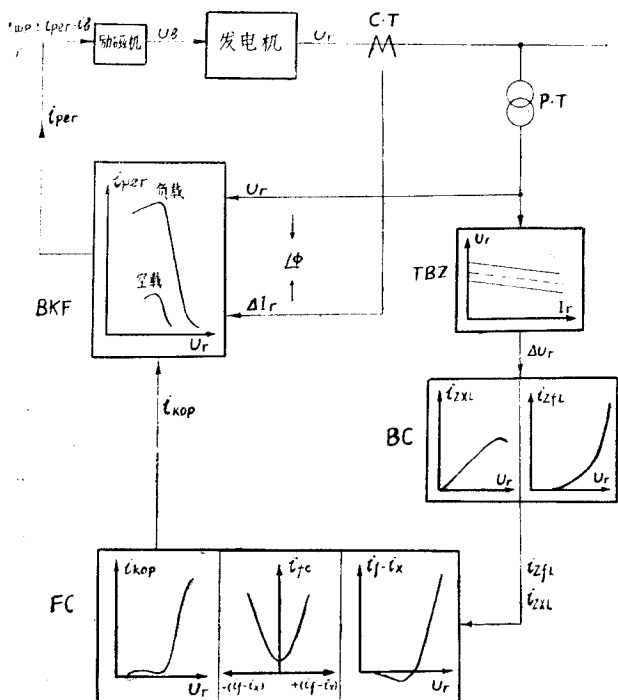


图1—2—5 调节器各主要元件特性曲线相互关系示意图

一次合成安匝磁势也随之变化,当 $\cos\varphi \downarrow$ 时则 $i_{\text{PER}} \uparrow$ 。 $\cos\varphi \uparrow$ 时则反之。 i_{PER} 改变后, i_{B} 和 U_{B} 也将改变,由此看出,调节器能够根据变化的需要而自动地调整发电机的励磁达到新的稳定值。

第三节 磁放大器反馈对调节器输出特性的影响

如前所述,调节器采用了内反馈式磁放大器,为了使调节器的输出特性调整得满足运行要求,所以在磁放大器中引入了三个外反馈绕组,即:校正器电流反馈绕组、调节器电流反馈绕组和定子电流反馈绕组。

这里有必要首先对反馈的定义和本调节器中反馈特点作以简要说明。

反馈:用输出电流或下一级被控元件的输出电流反回来给本放大器助磁的接线称作反馈。所谓外反馈即是由另外附加的控制绕组接入输出电流或下一级被控元件的输出电流来改善放大器的特性,以补充内反馈不能调整的不足。上述的三个反馈都是外反馈。

反馈尚有“正”“负”之分。所谓正反馈是指通过反馈绕组的电流所产生的磁势与磁放大器总控制磁势方向一致,因而加强了控制磁势。负反馈是指通过反馈绕组的电流所产生的磁势与磁放大器的总控制磁势方向相反,因而削弱了控制磁势。一般情况用“正”“负”来表示反馈的性质时,凡是增强放大作用的就是正反馈;削弱放大作用的就是负反馈。

对反接的校正器的磁放大器来说,由于控制磁势是非线性元件电流与线性元件电流之差所产生的,所以引入反馈绕组的

电流所产生的磁势与非线性元件电流所产生的磁势方向一致的叫正反馈，反之叫负反馈。但这种定义在实用调整时显得不够确切，比如说，校正器电流正反馈，是使相应于发电机空载运行的调节器输出特性变陡，而调节器电流正反馈，却使相应于发电机负载运行的调节器输出特性变平，这样容易造成概念的混乱。为了实用的方便，我们定义为凡使调节器输出特性变陡的反馈称之为正反馈，使调节器输出特性变平的称之为负反馈。

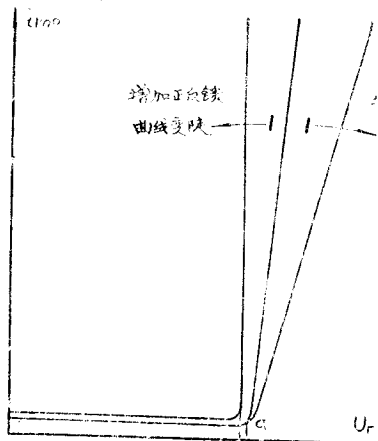
下面简要说明本调节器中各反馈绕组的作用及对调节器工作特性的影响。

(一)校正器输出电流反馈

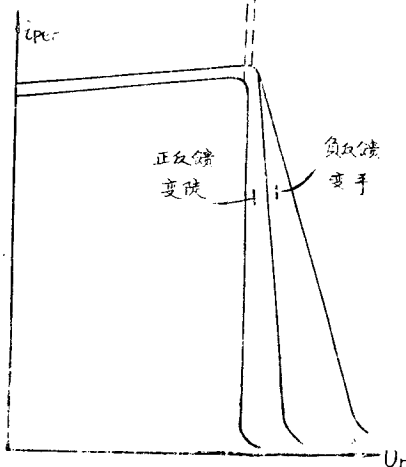
校正器输出电流反馈作为磁放大器内反馈的补充，用来改变磁放大器的反馈系数，亦即改变相应于发电机空载时调节器输出特性工作部分的陡度。

校正器电流反馈对校正器输出特性和调节器输出特性的影响见图1—3—1的(a)和(b)。

由图可知：校正器电流负反馈的减少或正反馈的增加使调节器输出特性的斜率增加，即曲线变陡；而负反馈的增加或正反馈的减少使调节器输出特性的斜率减小，即曲线变平。由图还可以看出：调节器输出电流的最大值对应于校正器输出的最小值a点，不同反馈系数时曲线的陡度变化较大，但a点位置移动很小，所以接入正反馈使调节器特性曲线以最大值为固定点向左移动，亦使曲线的陡度增加。而接入负反馈使调节器特性曲线向右移动，使曲线的陡度减小。由于发电机空载运行时调节器输出电流不大，所产生的反馈磁势也不大，所以调节器在发电机空载时的稳定性主要由校正器电流反馈来决定，试验表明，为了保证空载运行时的稳定，应取校正器电流反馈为负反馈（反馈电流与非线性元件电流反方向）在反馈电流一定时，反



(a)校正器输出特性曲线



(b)调节器输出特性曲线

图1—3—1 改变校正器电流反馈对调节器及校正器特性的影响

注：负反馈接法即为反馈电流与FC的非线性电流方向相反

馈绕组匝数愈多，其抑制可能发生的过调作用就愈强，则发电机空载运行时的稳定性就愈高。

(二) 调节器输出电流反馈

调节器输出电流反馈能够改变相应于发电机负载时调节器输出特性工作部分的陡度。当接入调节器电流反馈后，磁放大器的控制磁势便由两部分组成，即是由反映发电机电压 U_T 的电流 ($i_{ZIL} - i_{ZXL}$) 产生的磁势和调节器输出电流 i_{PEF} 产生的磁势。当调节器输出电流最小时 (即 i_{KOP} 输出最大时) 对磁放大器的特性影响很小，故调节器输出特性曲线的最低点的变化也较小，而当调节器电流最大时，对磁放大器的控制磁势就有较大的影响，则调节器电流也就在最大值变化较大。按照前面下的定义，正反馈使调节器输出特性曲线近似于以最小值为固定点向右移动使曲线的陡度增加，而接入负反馈时则曲线陡度将减小，并可以增加调节器的正调差系数。

试验证明，发电机在负载运行时，调节器工作的稳定性主要由调节器电流反馈来决定，为了保证运行的稳定性，调节器电流反馈应取负反馈 (反馈电流与非线性元件电流同方向)。反馈电流一定时，反馈匝数愈多，稳定性愈高。

由于调节器电流的变化反映了功率因数的变化，所以也可以说调节器电流反馈是相灵敏反馈，即可改变相补偿程度的强与弱。例如将其接为负反馈后，当调节器输出电流因功率因数的降低而增加时，但又会使磁放大器输出电流也增加，则反而减小了调节器的输出电流，这就使得调节器的输出电流比引入负反馈前要减小，也就意味着相灵敏度减弱了。

调节器电流反馈对校正器输出特性和调节器输出特性的影响见图1—3—2(a)和(b)。

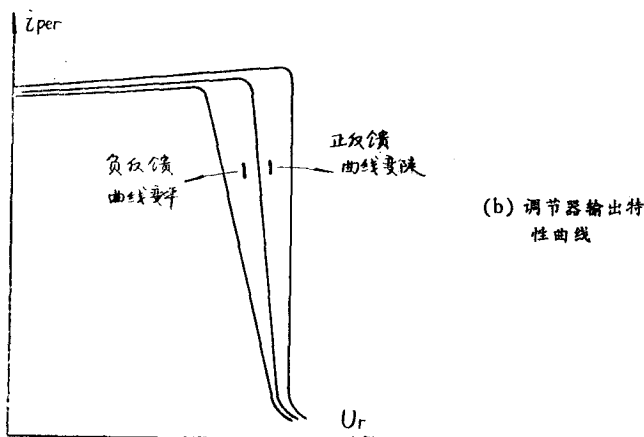
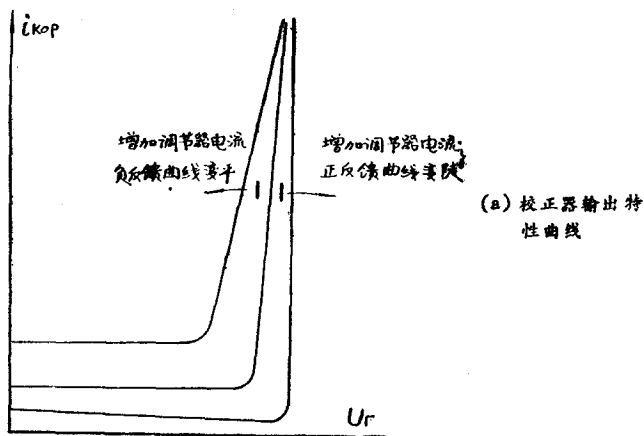


图1—3—2 改变调节器电流反馈对调节器及校正器的特性影响

注：负反馈接法即为反馈电流与FC的非线性电流方向相同

(三) 发电机定子电流反馈

发电机定子电流反馈绕组实际上是一个随发电机定子电流

不同而改变安匝的位移绕组，不同的定子电流反馈决定了不同的调节器输出特性对发电机电流的调差系数。

调节器的调差系数，可以用相应于发电机空载运行状态下调节器输出特性上输出电流为 $i_{PF(X)}$ 时的电压 $U_{r(X)}$ 与相应于发电机在额定运行状态下调节器输出特性上输出电流为 $i_{PF(H)}$ 时的电压 $U_{r(H)}$ 之差与 $U_{r(X)}$ 之比的百分数来表示：

$$\delta = \frac{U_{r(X)} - U_{r(H)}}{U_{r(X)}} \times 100\%$$

定子电流反馈的大小，可用调整与反馈绕组并联的分流电阻 R_{t_2} 的方法来改变，分流电阻的一部分(约 0.2Ω)与反馈绕组串联，这样可以提高反馈的稳定性和改善反馈的均匀性，如果需要最大反馈可以移动滑头的位置而把这串联部分电阻短接。

当不接入定子电流反馈时，调节器具有负的调差系数。当接入定子电流正反馈(反馈电流与非线性元件电流的方向相同)时，可使相应于发电机负载时的调节器输出特性左移(降压方向)，使调节器具有正的调差系数。若要改变调差系数的大小，则可调整 R_{t_2} 的阻值，如增加电阻时使得正反馈电流增大，亦即增加正调差系数；反之，接入负反馈时，可使调节器输出特性曲线右移(升压方向)，使调节器具有负的调差系数。

调差系数取正值还是取负值，与发电机一次系统接线方式有关，并由保证并列运行发电机间无功负荷的稳定分配来决定。一般发电机在母线上并列运行时，应采取正的调差系数；而在发电机—变压器组接线情况下，为了补偿变压器压降的影响，应采取负的调差系数。调差系数的最小数值，在调节器不是采用均压接线连接时，就要考虑并列运行机组间无功负荷分配的稳定性，当调节器特性为额定相灵敏度(相补偿度)时，若调差