

2

# 同步发电机可控硅励磁

专 辑

增刊

天津电气传动设计研究所

《电 气 传 动》  
《水 电 设 备》 编辑部

一九七七年九月

## 出版说明

近十多年来，我国在同步发电机可控硅励磁的研究、试制工作中取得了很大的成绩。各兄弟单位在这方面都做了许多工作，作出了贡献。

我所从1968年开始对同步发电机可控硅励磁进行了研制。自1970年4月天津第一发电厂3万千瓦汽轮发电机组的可控硅静态励磁装置投入运行以来，相继又有各种型式可控硅励磁装置投入运行。为了总结、提高，拟对天津第一发电厂这套励磁装置进行鉴定。借此机会，对我所和各有关单位一起研制的其他励磁系统进行资料总结，汇编成本册，以便交流。

本专辑是初步的工作小结，仅起抛砖引玉作用。由于我们水平有限，错误和缺点在所难免，请同志们批评指正。

一九七七年十二月

# 目 录

## 直流侧并联自复励可控硅励磁系统

——天津第一发电厂四号机可控硅励磁..... 陈叔霖 (1)

他励可控硅励磁系统..... 潘永征 (32)

## 无刷励磁系统

——安阳十万千瓦汽轮发电机无刷励磁..... 尹庆明 (70)

## 交流侧串联自复励可控硅励磁系统

——三三〇机组可控硅励磁中间试验..... 蒋建华 (90)

## 可控硅励磁调节器标准单元试验

——佳木斯造纸厂12000千瓦汽轮发电机可控硅励磁..... 耿承宪 (118)

## 可控电抗器移相式相复励系统

——15000千瓦同步调相机半导体励磁..... 陈叔霖 (139)

双绕组电抗分流自励恒压系统..... 韩毓龙 (161)

23000千瓦燃气轮发电机励磁调节器..... 陈贤明 (170)

## 500—5000千瓦水轮发电机系列单变压器可控硅

励磁系统..... 黎 锦 (190)

## 500—5000千瓦水轮发电机系列交流励磁机静止

整流器励磁..... 杨新维 (205)

两相零式自励系统..... 韩金宝 (217)

本所研制的同步发电机可控硅励磁装置一览表..... 王书珍 (228)



A 793930

# 直流侧并联自复励可控硅励磁系统

## ——天津第一发电厂四号机可控硅励磁

陈叔霖

### 一、前言

日益发展的工农业生产对电力系统首先提出了提高发电量和发电质量的要求，而半导体技术的发展正是为电力系统的技术革命和技术革新开辟了道路。69年8月份，天津第一发电厂提出取消直流励磁机，应用可控硅励磁的大胆设想，随即得到电气传动设计研究所的大力支持和协作。从此，厂所结合，组成了从拟定方案到试验、生产、安装、调试直至投入运行后的维护和改进，始终紧密结合的课题小组。

由于厂所主动配合，自己动手创造条件，经过9个月的努力，使这套可控硅励磁装置在70年4月25日正式投入运行，至今已连续运行七年多。在这七年多的时间里，尤其在初期，也出现过一些故障（详见“故障记录”），经过几次改进，经过多次电网故障及长期运行的考验，使这套装置的运行情况越来越好，使它即使在76年7月28日强烈地震的严酷条件下，仍能保证正常强励和运行。长期连续运行和多次系统事故的考验，证明这套可控硅励磁装置基本上是成功的。但是，事物总是一分为二的，而且总是向前发展的。这套装置还存在着某些缺陷，对于它的合理设计及复励过电压等问题也有待于作进一步分析。对于这套自动励磁调节器，由于近几年来半导体技术发展很快，已经有许多比它更好的线路。

这份小结作为对70年7月份写的“三万千瓦汽轮发电机可控硅励磁装置”一文的补正。天津一厂四号发电机的名牌数据是25000千瓦，当时曾提出超出力，改为30000千瓦。现仍用原来的名牌参数。

### 二、励磁主回路

#### 1. 励磁主回路原理

图1为直流侧并联自复励系统的原理图。同步发电机F的励磁电流由可控硅整流桥KGZ和硅整流桥GZ并联供给，KGZ和GZ分别由励磁变压器LB（电压源）和励磁变流器LH（电流源）供电。LB接于机端，LH串于机端。发电机空载时，由KGZ单独供给励磁电流；发电机负载时，由KGZ和GZ共同供给励磁电流，其中GZ输出电流与发电机定子电流成正比，KGZ输出电流起励磁调节作用，它是由自动励磁调节器ZLT控制的。当近端电力系统短路故障时，由GZ提供强励电流，当远方电力系统短路故障时，则由KGZ和GZ两部份共同提供强励电流。

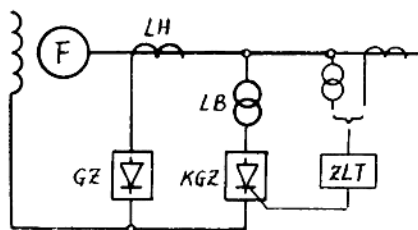


图1 直流侧并联自励系统原理图

## 2. 励磁变流器LH设计原则

这套装置的LH当初是按发电机端三相稳态短路时保证1.8倍强励电流设计的，这个设计出发点是不合适的。现在，我们试用如下设计原则。

当主变高压侧三相短路时，该励磁系统必须具有一定的强励倍数，这强励倍数应满足电力系统稳定性的要求，同时还应满足自励条件（即大于临界强励倍数）；此外还要兼顾正常运行下GZ和KGZ两部份的电流分配，不致于使KGZ在高功率因数下失去调节作用。对于汽轮发电机，如果有必要时也可适当考虑当发电机向电网输出某预定有功功率时，KGZ退出，单独由GZ供给励磁电流时的进相情况。

## 3. 励磁变流器LH及复励桥GZ设计步骤

### (1) 强励倍数的初步确定

所谓临界强励倍数 $K_0$ 是指发电机经外电抗 $X_c$ 短路时（若在主变高压侧短路，则 $X_c$ 为主变漏抗 $X_B$ ），暂态励磁电流 $I'_L$ 与额定励磁电流 $I_{LN}$ 之比。如果励磁系统在短路初瞬实际所提供的强励倍数 $K = K_0$ 时，则在短路过程中能维持励磁电流不衰减。由于主变高压侧三相突然短路的情况比较严重，因此通常以它作为设计依据。发电机在额定状态下主变高压侧发生三相突然短路时，其临界强励倍数

$$K_0 = \frac{I'_L}{I_{LN}} = \frac{I_s}{I_{LN}} E_{d*} = \frac{I_s}{I_{LN}} (X_{d*} + X_{B*}) I'_{d*} = \frac{I_s (X_{d*} + X_{B*})}{I_{LN} (X'_{d*} + X_{B*})} E'_{d*} \\ = \frac{I_s (X_{d*} + X_{B*})}{I_{LN} (X'_{d*} + X_{B*})} \sqrt{\cos^2 \varphi_N + (\sin \varphi_N + X'_{d*})^2}$$

兼顾电力系统所要求的强励倍数 $K'$ 和满足自励条件所需的强励倍数 $K_0$ ，可初步确定并联自励系统的强励倍数 $K$ 。

### (2) LH的接法

LH接法有 $\parallel/Y$ 和 $\parallel/\Delta$ 两种。原边绕组可串于发电机定子绕组出口端，也可串于发电机定子绕组中性点侧，视具体情况而定。串于中性点侧，当发电机正常运行时可提高LH的绝缘耐压储备。副边绕组有星形和三角形两种接法，三角形接法可削减三次谐波，而星形接法的中性点可通过放电间隙接地（不允许直接接地）。有人认为副边采用三角形接法有可能降低过电压，但从我们的动模试验来看，在相同的复励系数和磁密下，两种接法的过电压值差不多。

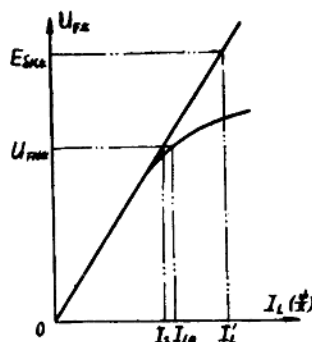


图2 发电机空载特性

在以下计算中用//Y接法。

(3) 由强励初定LH匝比

强励时LH副边线电流

$$I_{LH2} = \frac{KI_{LN}}{\beta_i}$$

式中 $\beta_i$ 为复励整流桥电流整流系数, 三相桥式接线时 $\beta_i = 1.35 \sim 1.41$ 。

强励时LH原边电流 $I_{LH1}$ 为发电机暂态定子电流 $I'_d$

$$I_{LH1} = I'_d I_{FN} = \frac{E'_{d*} I_{FN}}{X'_{d*} + X_{B*}} = \frac{I_{FN}}{X'_{d*} + X_{B*}} \sqrt{\cos^2 \varphi_N + (\sin \varphi_N + X'_{d*})^2}$$

由强励倍数初步确定LH变比

$$k_{LH} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{I_{LH1}}{I_{LH2}} = \frac{\beta_i I_{FN}}{KI_{LN}(X'_{d*} + X_{B*})} \sqrt{\cos^2 \varphi_N + (\sin \varphi_N + X'_{d*})^2}$$

(4) 由正常运行校核并确定强励倍数和LH匝比

由磁势图解法求得在额定电压下对应于不同的定子电流和功率因数下的励磁电流值, 绘出发电机的调节特性 $I_f = f(I_F, \cos \varphi)$ 。

据 $I_{GZ} = \frac{\beta_i I_F}{k_{LH}}$ 式, 在发电机调节特性上作出复励特性 $I_{GZ} = f(I_F)$ , 式中 $I_{GZ}$ 为复励桥输出的直流电流 (见图3)。

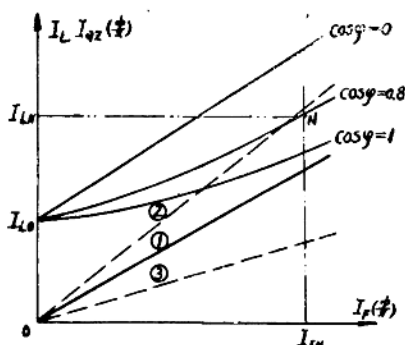


图3 复励特性和发电机调节特性

$$I_{LH2N} = \frac{I_{FN}}{k_{LH}} \quad (\text{安})$$

式中 $I_{FN}$ 为发电机额定定子电流。

LH额定副边线电压

$$U_{LH2N} = \frac{U_{LN}}{\beta_u} \quad (\text{伏})$$

式中 $U_{LN}$ 为发电机额定励磁电压。 $\beta_u$ 为复励桥GZ电压整流系数( $\beta_u = 1$ 左右)。

LH额定容量

$$P_{LH} = \sqrt{3} I_{LH2N} U_{LH2N} \times 10^{-3} (\text{千伏安})$$

出的直流电流 (见图3)。

若复励特性斜率太大, 与调节特性相交 (如曲线②), 则可说明LH匝比 $k_{LH}$ 太小, 复励太强, 当电网电压低落和发电机在高功率因数下运行时, 可控硅部份可能会失去调节作用。反之, 若 $k_{LH}$ 太大, 复励太弱 (如曲线③), 则加重了正常负载和强励时的可控硅负担。

综合以上的考虑, 并结合以下LH电磁设计时的匝数安排, 即可最后确定匝比 $k_{LH}$ 和强励倍数。

(5) LH和GZ的参数

LH额定副边电流

强励时复励桥GZ每臂平均正向电流为  $\frac{KI_{LN}}{3}$ 。强励时复励桥GZ每臂最大反向电压为

$K_u KU_{LN}$ ，式中 $K_u$ 为考虑过电压系数，取 $K_u = 2 \sim 4$ 。按强励时每臂平均正向电流和最大反向电压，计及一定的储备系数，来确定每臂硅整流器的串并联数。

#### (6) LH的电磁设计特点

励磁变流器LH磁密的取法，目前看法还不一致，它是与其副边过电压问题有联系的。在下面讨论过电压问题时，有我们初浅的看法。对其磁密的取法，不外乎三种：①取低些，甚至强励时也不愿使它太饱和。其出发点是认为有可能减少过电压，可是我们认为这样做的结果是多用了材料，过电压也不一定低。②取高些，额定时就让它运行在较高磁密值，则强励时必然很饱和。但我们认为这样做的结果虽能节省材料，而且过电压也不一定高，但强励时由于LH过份饱和，强励倍数不能保证。③取得适中。这套装置的励磁变流器额定磁密为10000高斯左右（冷轧硅钢片）。我们目前认为LH的磁密既不要如电流互感器那样低，也不要取得过高，以适中为宜。

励磁变流器的电磁设计和结构设计与变压器差不多，但在结构上应采取机械加固措施，以适应电力系统短路时发电机定子冲击电流所引起的电动力；同时还应考虑高次谐波电压所引起的发热问题。

#### 4. 励磁变压器LB设计原则

这种并联自复励方式的可控硅整流桥KGZ一般用三相桥式半控线路。根据电站的具体要求，LB和KGZ的设计有两种考虑方式，一种是考虑LH退出运行，由LB和KGZ单独供给励磁电流的单变压器励磁方式（即自并励方式），并要求此时LB和KGZ能供给发电机带一定负载时的励磁电流，有时甚至还要求有一定的强励能力。这时的LB和KGZ可参照自并励方式的设计方法。另一种是不考虑单变压器运行方式。由于我们认为复励部份（LH和GZ）是比较可靠的，一般不会出现故障，所以这套装置的LB和KGZ是按照不考虑单变压器励磁方式设计的。

由于近端电力系统故障时，励磁系统的强励是由LH、GZ提供的，这时KGZ即使全开放，也有可能被GZ输出的强励电压所封锁。因此，LB、KGZ可从正常运行着手考虑。LB的副边线电压 $U_{LB2}$ 是LB首先要确定的参数，它直接影响到发电机空载和负载运行时KGZ的开放角 $\beta$ 。发电机额定负载时KGZ的 $\beta$ 越大， $U_{LB2}$ 越低，则LB容量也可小些，而且在起励或电力系统故障切除后机端电压恢复过程中可能引起的KGZ过流和机端电压超调量也相应减少，但它会使起励建压和机端电压恢复过程变慢。相反，发电机额定负载时KGZ的 $\beta$ 取小些，并考虑空载机端电压最大调节量和发电机的过载运行，相应地提高了 $U_{LB2}$ 和LB的容量，可加快起励建压或电力系统故障切除后机端电压的恢复过程，而且能对远方的电力系统故障扰动可能有灵敏的强励反应。我们认为后面这种设计原则比较有利。至于起励或电力系统故障切除后可能引起的可控硅过电流和端电压超调，可以用可控硅过流保护及微分测量来解决。

为便于计算LB副边电压，可假定机端电压降到某一数值时，KGZ全开放，能提供一定的“强励电压”，这个所谓的“强励电压”，可以低于LH和GZ所提供的实际强励电压。

这套装置  $U_{LB2} = 264$  伏。当发电机额定负载时 ( $U_{LN} = 190$  伏),  $\beta_N = 86^\circ$ , 当发电机空载时 ( $U_{L0} = 69.5$  伏),  $\beta_0 = 52^\circ$ 。它基本上是按照强励时 KGZ 全开放输出电压等于 1.8 倍强励电压计算的。

## 5. 励磁变压器 LB 及可控桥 KGZ 设计步骤

### (1) LB 副边线电压和 KGZ 的开放角

LB 的接法有多种, 最好采用三角形接法, 使输出电压波形较好。不论哪种接法, 都要注意同步信号及其移相范围。这套装置 LB 用 Y/Δ-11 接线。

考虑当机端电压下降到  $x\%$  时, KGZ 全开放能提供  $K_{KGZ}$  倍“强励电压”, 当忽略换弧和硅元件压降, 其副边线电压

$$U_{LB2} = \frac{K_{KGZ} U_{LN}}{1.35 \times x\%} \quad (\text{伏})$$

式中  $K_{KGZ} \leq K$  (复励部份实际能提供的强励倍数)。

据  $U_{LB2}$  可计算出发电机在不同运行状态下 KGZ 的开放角  $\beta$ 。

### (2) LB 副边线电流和容量

发电机空载时, LB 副边线电流

$$I_{LB2} = I_{L0} \sqrt{\frac{\beta}{180}} \quad (\text{安})$$

在计算发电机空载运行时的 LB 容量时,  $U_{LB2}$  和  $I_{L0}$  应取发电机空载端电压调节范围的最高值。

发电机负载时, LB 副边线电流

$$\begin{aligned} I_{LB2} &= (I_L - I_{GZ}) \sqrt{\frac{\beta}{180}} \\ &= \left( I_L - \frac{\beta_i I_F}{k_{LH}} \right) \sqrt{\frac{\beta}{180}} \quad (\text{安}) \end{aligned}$$

当  $\beta > 120^\circ$  时

$$I_{LB2} = \left( I_L - \frac{\beta_i I_F}{k_{LH}} \right) \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (\text{安})$$

比较各种运行状态下的  $I_{LB2}$  及其相对应的  $U_{LB2}$ , 取其最大值作为计算 LB 容量的依据:

$$S_{LB} = \sqrt{3} I_{LB2} U_{LB2} \times 10^{-3} \quad (\text{千伏安})$$

### (3) KGZ 参数

KGZ 的电压等级选择与 GZ 相同, 三相半控可控硅整流桥各支路的电流值列于表 1 (参见图 4 和图 8), 再考虑适当的裕量, 选定其硅元件的串并联数。

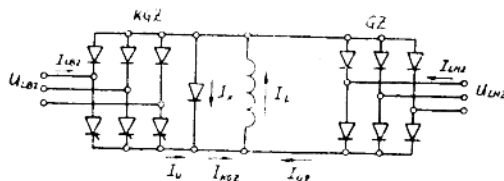


图 4 直流侧并联自复励硅元件接线图

表 1

|                               |     | $\beta < 120^\circ$<br>(波形不连续)               | $\beta \geq 120^\circ$<br>(波形连续) |
|-------------------------------|-----|----------------------------------------------|----------------------------------|
| 输出电压 $U_L$ (平均值)              |     | $0.675 U_{LB2} (1 - \cos \beta)$             | $0.675 U_{LB2} (1 - \cos \beta)$ |
| 输出电流 $I_{KGZ}$ (平均值)          |     | $I_{KGZ}$                                    | $I_{KGZ}$                        |
| LB副边线电流 $I_{LB2}$ (有效值)       |     | $I_{KGZ} \sqrt{\frac{\beta}{180}}$           | $I_{KGZ} \sqrt{\frac{2}{3}}$     |
| 可控桥输出电流<br>(不包括续流电流)<br>$I_u$ | 幅值  | $I_{KGZ}$                                    | $I_{KGZ}$                        |
|                               | 平均值 | $I_{KGZ} \frac{\beta}{120}$                  | $I_{KGZ}$                        |
| 每桥臂电流<br>$I'_{KGZ}$           | 幅值  | $I_{KGZ}$                                    | $I_{KGZ}$                        |
|                               | 平均值 | $I_{KGZ} \frac{\beta}{360}$                  | $\frac{I_{KGZ}}{3}$              |
|                               | 有效值 | $I_{KGZ} \sqrt{\frac{\beta}{360}}$           | $\frac{I_{KGZ}}{\sqrt{3}}$       |
| 续流管电流<br>$I_x$                | 幅值  | $I_{KGZ}$                                    | 0                                |
|                               | 平均值 | $I_{KGZ} \left(1 - \frac{\beta}{120}\right)$ | 0                                |
|                               | 有效值 | $I_{KGZ} \sqrt{1 - \frac{\beta}{120}}$       | 0                                |

注: 当发电机空载时,  $I_{KGZ} = I_{L0}$ ; 当发电机负载时,  $I_{KGZ} = I_L - \frac{\beta I_F}{k_{LH}}$ 。

## 6. 天津一厂四号机及其励磁装置参数

### (1) 汽轮发电机参数

额定功率  $P_{FN} = 25000$  千瓦

额定电压  $U_{FN} = 10500$  伏

额定电流  $I_{FN} = 1720$  安

功率因数  $\cos \varphi_N = 0.8$

额定励磁电压  $U_{LN} = 190$  伏

额定励磁电流  $I_{LN} = 455$  安

励磁绕组电阻  $R_{L(17.2^\circ C)} = 0.272$  欧

直轴同步电抗  $X_{d*} = 1.50$

直轴瞬变电抗  $X'_{d*} = 0.15$

直轴超瞬变电抗  $X''_{d*} = 0.11$

漏梯电抗  $X_{p*} = 0.138$

### 空载特性

|                |   |      |      |      |       |       |       |       |       |
|----------------|---|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 定子电压 $U_F$ (伏) | 0 | 6300 | 8400 | 9250 | 10500 | 11300 | 12250 | 12900 | 13700 |
| 励磁电流 $I_L$ (安) | 0 | 100  | 140  | 160  | 194   | 220   | 260   | 300   | 390   |

## 短路特性

|                            |   |      |      |      |
|----------------------------|---|------|------|------|
| 短 路 电 流 $I_{FK}(\text{安})$ | 0 | 1175 | 1650 | 1720 |
| 励 磁 电 流 $I_{LK}(\text{安})$ | 0 | 194  | 273  | 284  |

### (2) 励磁装置主回路参数

#### 1) 励磁变流器

容量 100千伏安

接法  $\text{///Y}$ , 原边串于定子出口

原边电流2360安

副边电流337安

$$\text{匝比 } k_{LH} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{28}{4} = 7$$

#### 2) 励磁变压器

容量 60千伏安

接法  $\text{Y}/\Delta-11$

原边线电压 10500伏

副边线电压 264伏

#### 3) 可控桥采用三相桥式半控接线。

74年12月12日以前可控硅50安/800~1000伏六只, 每臂两并, 每支路快速熔断器为RTK50安; 硅整流器100安/350~500伏六只, 每臂两串, 每臂快速熔断器为RTK150安。

74年12月12日以后改用可控硅200安/1100伏三只, 每臂一只; 硅整流器200安/1000伏三只, 每臂一只。每臂快速熔断器为RS3 200安。

4) 复励桥采用三相桥式接线, 有硅整流器200安/600~800伏二十四只, 每臂两串两并。不装快速熔断器。

5) 续流管用200安/1000伏一只。起励充电二极管用200安/500伏一只。

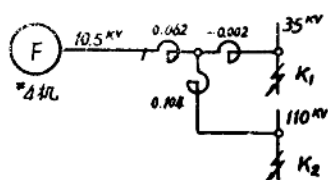


图5 四号机主变高压侧短路图

### 7. 对天津一厂四号机励磁变流器匝比和强励倍数的重新核算

四号机主变为三绕组变压器, 经折合换算后其参数如图5。

在35KV( $K_1$ )处三相短路时, 主变短路电抗

$$X_{B(K1)*} = 0.062 - 0.002 = 0.060$$

在110KV( $K_2$ )处三相短路时, 主变短路电抗

$$X_{B(K2)*} = 0.062 + 0.104 = 0.166$$

35KV( $K_1$ )三相短路时临界强励倍数

$$K_{o(K1)} = \frac{I_d(X_{d*} + X_{B(K1)*})}{I_{LN}(X'_{d*} + X_{B(K1)*})} \sqrt{\cos^2 \varphi_N + (\sin \varphi_N + X'_{d*})^2}$$

$$= \frac{103(1.50 + 0.060)}{455(0.15 + 0.060)} \sqrt{0.8^2 + (0.6 + 0.15)^2}$$

$$= 1.85$$

110KV(K<sub>2</sub>)三相短路时临界强励倍数

$$K_{c(K_2)} = \frac{I_d(X_{d*} + X_{B(K_2)*})}{I_{LN}(X'_{d*} + X_{B(K_2)*})} \sqrt{\cos^2 \varphi_N + (\sin \varphi_N + X'_{d*})^2}$$

$$= \frac{103(1.50 + 0.166)}{455(0.15 + 0.166)} \sqrt{0.8^2 + (0.6 + 0.15)^2}$$

$$= 1.30$$

天津一厂要求强励倍数为 1.8 倍 (原先提的按机端稳态三相短路的概念是不合适的), 现就按分别在 35KV(K<sub>1</sub>)和 110KV(K<sub>2</sub>)两处三相突然短路时强励倍数 K = 1.8 来验算。

强励时 K = 1.8, LH 副边所需的线电流

$$I_{LH2} = \frac{KI_{LN}}{\beta_i} = \frac{1.8 \times 455}{1.35} = 607 \text{ 安}$$

35KV(K<sub>1</sub>)处三相短路时, LH 原边暂态电流

$$I_{LH1(K_1)} = I'_{d(K_1)} \cdot I_{FN} = \frac{\sqrt{\cos^2 \varphi_N + (\sin \varphi_N + X'_{d*})^2}}{X'_{d*} + X_{B(K_1)*}} I_{FN}$$

$$= \frac{\sqrt{0.8^2 + (0.6 + 0.15)^2}}{0.15 + 0.60} \times 1720$$

$$= 5.22 \times 1720 = 8980 \text{ 安}$$

则 LH 匝比

$$k_{LH(K_1=1.8)} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{I_{LH1(K_1)}}{I_{LH2}} = \frac{8980}{607} = 14.8$$

110KV(K<sub>2</sub>)处三相短路时, LH 原边暂态电流

$$I_{LH1(K_2)} = I'_{d(K_2)} \cdot I_{FN} = \frac{\sqrt{\cos^2 \varphi_N + (\sin \varphi_N + X'_{d*})^2}}{X'_{d*} + X_{B(K_2)*}} I_{FN}$$

$$= \frac{\sqrt{0.8^2 + (0.6 + 0.15)^2}}{0.15 + 0.166} \times 1720 = 3.46 \times 1720 = 5950 \text{ 安}$$

则 LH 匝比

$$k_{LH(K_2=1.8)} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{I_{LH1(K_2)}}{I_{LH2}} = \frac{5950}{607} = 9.8$$

可是, 这套装置原先设计的 LH 匝比

$$k_{LH} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{28}{4} = 7$$

这样, 当 35KV(K<sub>1</sub>)三相短路时, 实际强励倍数

$$K_{(K_1)} = \frac{\beta_i I_{LH1(K_1)}}{k_{LH} I_{LN}} = \frac{1.35 \times 8980}{7 \times 455} = 3.81$$

当 110KV(K<sub>2</sub>)三相短路时, 实际强励倍数

$$K_{(K_2)} = \frac{\beta_i I_{LH1(K_2)}}{k_{LH} I_{LN}} = \frac{1.35 \times 5950}{7 \times 455} = 2.52$$

这套装置的LH在额定运行时的磁密

$$B_{LH(N)} = \frac{U_{LN}}{\beta_U \sqrt{3}} \times 10^8 = \frac{190}{222 \times 28 \times 174} \times 10^8 = 10150 \text{ 高斯}$$

按实际匝比 $k_{LH} = 7$ ，当主变高压侧三相突然短路时，LH的计算磁密：

35KV( $K_1$ )短路时

$$B_{LH(K_1)} = K_{(K_1)} B_{LH(N)} = 3.81 \times 10150 = (38600) \text{ 高斯}$$

110KV( $K_2$ )短路时

$$B_{LH(K_2)} = K_{(K_2)} B_{LH(N)} = 2.52 \times 10150 = (25600) \text{ 高斯}$$

由此可知，这套装置的励磁变流器实际匝比 $k_{LH} = 7$ ，不论在110KV或35KV处三相突然短路时，其强励倍数都超过要求值，在暂态过程中的励磁变流器铁心都是相当饱和的。因此我们认为，这只励磁变流器的匝比应适当地增大，以降低目前存在的静态运行时过大的复励比例及减少强励时过高的强励倍数和磁通密度。

下面再对这套装置作进一步的分析。

(1) 四号机额定运行时的额定励磁电流 $I_{LN} = 455$ 安，其中由复励部份供给的励磁电流 $I_{GZ} = \beta_i I_{FN} / k_{LH} = 1.35 \times 1720 / 7 = 332$ 安，则可控桥（包括续流管）供给的励磁电流 $I_{KGZ} = I_{LN} - I_{GZ} = 455 - 332 = 123$ 安。可是，四号机在高峰负荷时，往往工作在有功功率高于25000千瓦，功率因数在0.9以上，而机端（电网）电压又较低的情况下，这时，可控桥的输出电流经常只有30~40安，这样的调节量就嫌少了。所以从静态运行来看，复励是过强的。

(2) 当主变高压侧短路时，由于励磁变流器自身的饱和，吸收了大量激磁安匝，破坏了原副边电流比与匝数比的反比例关系，因此实际强励倍数也不会升到以上的计算值那样高。在励磁变流器匝数比相同的条件下，铁心设计得越饱和，它的实际强励倍数就越低。

(3) 这套装置在励磁变流器副边有饱和电抗器BHK，它的磁化特性是按强励倍数 $K = 1.8$ 倍设计的，当LH副边线电压低于强励电压值时，BHK处于线性区；当LH副边线电压超过强励电压值后，BHK即进入饱和区，使LH的副边电流通过它分流。因此，饱和电抗器BHK实际上起到限制强励倍数的作用。这样，即使当主变高压侧短路而主保护拒绝动作时，也不致于因复励而造成循环作用，使强励电流上升至过高数值。

## 8. 对励磁变流器副边过电压的初步看法

励磁系统（包括发电机转子绕组）的过电压是由多种原因引起的，但对于这种并联自复励系统，由于励磁变流器的存在，又增加了一个过电压的因素。

励磁变流器实质上是大功率的电流互感器。当原边有电流，副边开路时，必然会产生很高的过电压。这种副边开路引起的过电压是可以避免的。我们在励磁变流器副边装有短路开关，它与灭磁开关有电气联锁，当跳开灭磁开关时，短路开关必然先闭合。但如果在发电机运行中灭磁开关误碰失磁时，则需经几周波后短路开关才闭合，因此仍存在LH副边短时开路的可能性。最好能象天津发电二厂那样，利用灭磁开关的第二组常闭触头接入与转子电阻相当（或大数倍）的电阻，使励磁变流器在任何情况下都能避免副边的开路。

需要着重考虑的是电力系统故障所引起的励磁变流器副边过电压问题。从这套装置的实际运行情况来看,在70年4月25日投入运行至今的七年多的时间内,虽然遇到许多次因风雪雷电,甚至地震等原因造成的电力系统或近或远,或重或轻的短路故障,但从未造成复励桥、可控桥及续流管的硅元件损坏。所以从这实际考验来看,尽管它的复励过强,因电力系统短路故障造成的LH副边过电压也并没有达到硅元件损坏的程度。

这套装置的励磁变流器副边所采取的过电压保护措施有:(1) 硒整流器。面积为 $60 \times 60$ 平方毫米,三角形接法,每相正反各20片。(2) 避雷器。它是用于500伏线路的放电间隙,经改装后,调整到击穿电压为700伏左右(有效值)。但这两种保护措施都是不理想的,而我们目前又没有找到更好的保护措施来取代它。由于励磁变流器是作为电流源的功率元件,一旦过电压释放,必然造成较大的电流,所以一直担心着硒堆和避雷器容量不够。七年多以来的运行,曾几次发生因35KV电力系统短路故障时,避雷器开裂甚至炸碎的情况(见故障记录),并发现硒片上也有一些击穿点(但未发现过硒片击穿后不能恢复的情况)。为防止硒堆击穿后不能恢复和避雷器开裂造成的事故扩大,72年2月将硒堆和避雷器通过刀闸和20安保险丝接到励磁变流器副边。

过电压还与发电机、主变压器及电力系统的参数有关。从故障记录上看,在73年4月之前,几次避雷器炸裂都发生在35KV系统短路的时候。这是由于天津一厂四号主变35KV侧的短路电抗较小,因此35KV系统短路电流大,过电压就较严重。

值得注意的是,自从73年4月经过彻底改进的可控硅过流保护投入运行之后,即使遇到近十次的35KV线路短路故障,也不再发生避雷器开裂事故了(见故障记录)。这说明可控硅过流保护对降低励磁变流器副边过电压也起到一定的作用。对此,我们作如下初步分析。天津一厂所遇到的电力系统故障,通常为35KV或110KV系统两相间或单相短路,这时的强励电流是由复励桥与可控桥共同供给的。在可控硅过流保护未改进之前,当电力系统故障时,复励桥与可控桥都出现过电流,使可控硅的快速熔断器几乎在每次故障时都熔断。同时由于励磁变流器变比小,复励过强,强励倍数已大于临界强励倍数,尤其在35KV近处短路时,复励的正反馈作用,使强励电流在短路之后不断上升,若故障点不及时切除,则必定一直上升到复励特性饱和段与发电机及系统的短路特性相交点为止。这种递增的短路电流,使复励电流越来越大,使励磁变流器副边造成较高的过电压,造成避雷器击穿等现象。避雷器被过电压击穿后,流经它的大电流使放电间隙粘连,即引起炸裂事故。当可控硅过流保护彻底改进,能正确动作之后,则当电力系统短路出现可控桥过电流时,即能发出保护信号,将可控硅开放角迅速关小,限制了可控桥的输出电流,这样就在一定程度上降低了强励电流,也就降低了短路电流,从而反过来限制了复励电流,抑制了复励部份过电压的出现。因此,我们认为可控硅过流保护除限制可控硅过流,避免快速熔断器因强励经常熔断的明显作用之外,同时还能对电力系统不对称短路时的强励倍数及励磁变流器副边过电压也起到一定的抑制作用。

再回过头来讨论一下,在着手设计励磁变流器时,怎样做才能使它的副边过电压低一些?产生过电压的根本原因是由于在电力系统故障的情况下,破坏了励磁变流器原副边之间的磁势平衡,造成铁心的饱和而形成过电压。这就牵涉到励磁变流器磁密的设计。

在励磁变流器变比及铁心相同的条件下,是否铁心设计得不饱和一些,则主变高压侧短路时励磁变流器副边的过电压就会越低呢?我们在天津大学动模试验室的模拟机组上得到的

试验结果正好是相反的。试验模拟110KV和35KV系统两种短路情况，励磁变流器铁心相同，变比 $k_{LH}$ 都为11，接法 $///Y$ 。试验结果见表2，示波图见附一。

表 2

|                                     | $W_2(\text{匝})/W_1(\text{匝})$ | 短路后过电压<br>最高尖峰倍数 | 短路稳定后<br>励磁电流倍数 | LH额定磁密(高斯) | 示波图号 |
|-------------------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|------------|------|
| 模拟110KV<br>三相短路<br>$U_{B*} = 0.148$ | 66/6                          | $9.5U_{L0}$      | $3.3I_{L0}$     | 7400       | 1    |
|                                     | 44/4                          | $4.5U_{L0}$      | $2.5I_{L0}$     | 11100      | 4    |
|                                     | 33/3                          | $2.4U_{L0}$      | $2.2I_{L0}$     | 14800      | 5    |
| 模拟35KV<br>三相短路<br>$U_{B*} = 0.065$  | 66/6                          | $9.1U_{L0}$      | $3.9I_{L0}$     | 7400       | 6    |
|                                     | 44/4                          | $5.2U_{L0}$      | $2.8I_{L0}$     | 11100      | 7    |
|                                     | 11/1                          | $2.1U_{L0}$      | $1.35I_{L0}$    | (44300)    | 10   |
| 模拟110KV<br>单相短路<br>$U_{B*} = 0.148$ | 66/6                          | $8.3U_{L0}$      |                 | 7400       | 11   |
|                                     | 44/4                          | $5.5U_{L0}$      |                 | 11100      | 14   |
|                                     | 33/3                          | $5.5U_{L0}$      |                 | 14800      | 16   |
| 模拟35KV<br>单相短路<br>$U_{B*} = 0.065$  | 66/6                          | $11.9U_{L0}$     |                 | 7400       | 17   |
|                                     | 44/4                          | $6.9U_{L0}$      |                 | 11100      | 18   |
|                                     | 11/1                          | $4.7U_{L0}$      |                 | (44300)    | 19   |

从模拟试验的结果得知，在励磁变流器变比及铁心截面相同的条件下，原副边匝数越少，即磁密设计得越饱和，当主变高压侧短路时，励磁变流器副边过电压越低。但是，若原副边匝数太少，由于饱和，铁心吸收的激磁安匝也越多，则它的实际强励倍数也越低。因此在磁密设计时，既考虑不要使过电压太高，又要保证有一定的强励能力，磁密应取得适中。

在模拟试验中，还在相同的复励系数和铁心磁密的情况下，对励磁变流器的 $///Y$ 和 $///\Delta$ 两种接法进行对比试验（见表3，示波图见附一）。试验结果表明，励磁变流器副边采用三角形接法对降低过电压并没有什么作用。

表 3

|                 | 接 法         | $W_1(\text{匝})/W_2(\text{匝})$ | 短路后过电压<br>最高尖峰倍数 | 示波图号 |
|-----------------|-------------|-------------------------------|------------------|------|
| 模拟110KV<br>三相短路 | $///Y$      | 6/66                          | $9.5U_{L0}$      | 1    |
|                 | $///\Delta$ | 6/104                         | $9.4U_{L0}$      | 3    |
| 模拟110KV<br>单相短路 | $///Y$      | 6/66                          | $8.3U_{L0}$      | 11   |
|                 | $///\Delta$ | 6/104                         | $9.3U_{L0}$      | 13   |

### 三、自动励磁调节器

#### 1. 概述

自动励磁调节器是可控硅励磁系统的重要组成部份。当发电机的输出电压、无功功率等

发生变化时，由自动励磁调节器的测量单元测得这些变化量，经综合放大，作用于移相和脉冲单元，改变可控硅的开放角，从而自动地控制励磁装置输出的励磁电流，以达到自动调节同步发电机的端电压或无功功率的目的。因此，自动励磁调节器实质上就是通过同步发电机转子和定子的闭环反馈控制系统。

这套自动励磁调节器比较简单，包括：电压测量、调差、综合放大、脉冲移相、稳压电源及可控硅过流保护等单元。它们所形成的闭环反馈控制原理的示意图见图 6。现将它的调节过程作简单的分析。

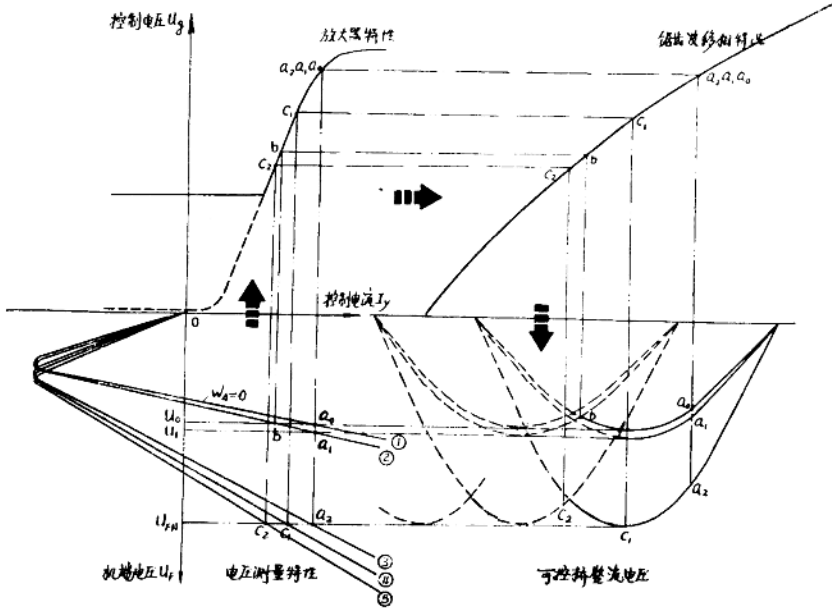


图 6 自动励磁调节器反馈控制原理示意图

(1) 发电机空载时，通过对整定电位器  $W_4$  的调节来改变机端电压的过程。由于发电机在额定电压以下的空载特性基本上是线性的，所以从起励之后直到额定电压时，可控桥的开放角基本上不变（因随机端电压升高，发电机稍趋饱和，开放角实际上稍有加大）。发电机在  $W_4$  为零圈位置起励后，其电压测量特性为①，则电压测量、综合放大、脉冲移相及可控桥分别运行于  $a_0$  点，此时对应的机端电压  $u_0$  较低。加大  $W_4$ ，使电压测量特性改变为②，则在励磁电流尚未来得及改变时，其测量特性工作在②的  $b$  点，结果使脉冲前移，开放角增大，励磁电流增加，机端电压提高，使之稳定在较高电压下的  $a_1$  点运行，此时所对应的机端电压为  $u_1$ 。若继续加大  $W_4$ ，则测量特性的工作点沿  $a_0 a_1 a_2$  的轨迹变化，使空载机端电压不断升高，直到额定电压  $u_{FN}$ （曲线③）。

(2) 自动调节励磁的过程。例如，当发电机空载或者并网运行于额定电压  $u_{FN}$ ，这时整定电位器  $W_4$  在某一位置上，其电压测量特性曲线为③，则测量、放大、移相及可控桥分别运行于  $a_2$  点。若由于某种原因（如空载运行时转速下降，并网运行时负载加大）使机端电压

稍有下降,则自动励磁调节器的工作点即有所变化,使 $I_f$ 减少, $u_g$ 降低,脉冲前移,可控桥开放角加大,从而使励磁电流增加,力图使机端电压维持不变。反之亦然。

(3) 当电力系统短路故障时,机端电压显著下降,其过程和上述相同,开放角达最大值,使发电机强励。

(4) 发电机并网后调节 $W_4$ 来改变无功电流的过程。例如并网时整定电位器 $W_4$ 在某一位置上,其电压测量特性为③,各单元工作于 $a_2$ 点。加大 $W_4$ ,使电压测量特性改变为④。由于机端电压受电网牵制基本保持不变,则测量特性工作于 $c_1$ 点,使 $I_f$ 减少, $u_g$ 降低,脉冲前移,开放角加大,励磁电流增加,从而使输出无功电流增加。若继续调节 $W_4$ ,则测量特性的工作点沿 $a_2c_1c_2$ 规迹变化,使输出无功电流不断增加。

关于这套自动励磁调节器的线路及其原理可参考《三万千瓦汽轮发电机可控硅励磁装置》,这里不再详述。以下仅对七年来其中某些单元的线路和参数的改动及其理由作简单的说明。

## 2. 电压测量

(1) 测量变压器副边改成三角形接法,线电压值不变,以改善波形。

(2) 对称测量桥桥臂上的稳压管由2CW21A改为2CW21E,电阻由200 $\Omega$ 改为430 $\Omega$ 。理由是原参数下运行时,整定电位器 $W_4$ (3W,1K,十圈电位器)的使用功率已达2瓦,影响 $W_4$ 寿命,易在运行中造成接触不良,使无功晃动。修改参数后, $W_4$ 的实际使用功率为1瓦以下,延长使用寿命。

## 3. 磁放大器

(1) 取消偏移绕组和励磁电压反馈绕组,改成磁放大器输出电压小反馈。理由是,原来的励磁电压负反馈虽能对自动励磁调节器的稳定起到一定的作用,但它将发电机励磁绕组的电位引至放大插件,运行不安全。尤其在电力系统故障,可控硅强励时,反馈电容对过电压的容抗很小,将过电压引至磁放大器控制绕组上,容易造成磁放大器损坏(这套装置曾发生过励磁电压通过插座短路事故,详见故障记录)。因此索性取消励磁电压反馈,同时取消作用不大的偏移,改成放大器输出电压负硬反馈。

(2) 中频振荡器由两磁环改成单磁环,使其元件和线路简化。

(3) 加装下限幅环节,它由 $R_{54}$ 、 $W_{14}$ 和46BZ组成,当放大器输出电压过低时,由二极管46BZ将它箝位至 $W_{14}$ 的整定值,以防止可控桥开放角超越180°造成失控。

## 4. 脉冲移相

(1) 加于10BG基极的正电压原先取自24伏稳压电源,现改接到单独的7伏稳压电源上。

(2) 为防止干扰引起无功摆动,在10BG的eb端加电容 $C_8$ (0.15 $\mu$ f)。

## 5. 稳压电源

(1) 增设7伏参数稳压电源,供脉冲移相的10BG基极作为防干扰电位。

(2) 改进24伏稳压电源线路, 由原来的三只调整管串联改为两只串联, 并加设过载短路保护。修改后的稳压范围仍有40~125%。

(3) 两组24伏稳压电源输出端加装直流电压表, 以便运行监视。

## 6. 可控硅过电流保护

(1) 原来用直流互感器测量可控桥的输出电流, 直流互感器是由厂用电供电的, 因此当电力系统短路故障过程中造成可控硅过电流, 急需过流保护动作时, 由于厂用电电压也同时跌落, 使其动作值上升, 失去应有的保护作用。现改用交流互感器, 测量可控桥输入的三相交流电流, 它比用直流互感器更简单可靠。

(2) 原先的可控硅过流保护分两级, 现改为一级, 并简化其线路。

(3) 取消专用的12伏稳压电源, 与自动励磁调节器的24伏稳压电源共同。

(4) 为便于整定, 加装输入输出表计。

以下对73年4月改进的可控硅过流保护作较详细的说明。其量测部份的原理线路见图7。

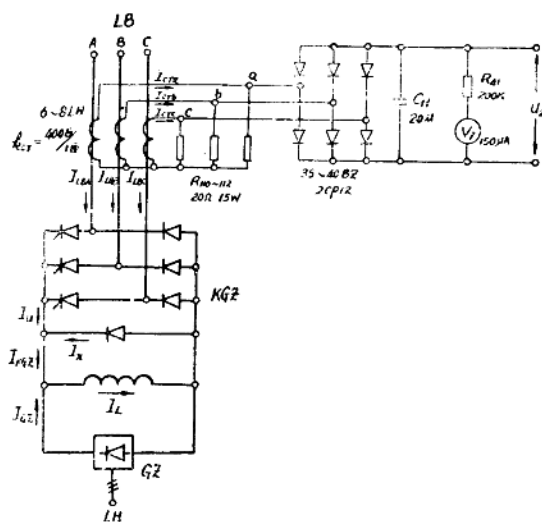


图7 可控硅过流保护量测部份原理图

电流互感器6~8 LH的原边串于可控桥交流输入母线（一匝穿心），则在其副边负载电阻 $R_{110\sim112}$ 上形成正比于原边电流的电压。为使此电压有一定的数值， $R_{110\sim112}$ 的阻值不宜太小，故6~8 LH不能用一般的仪用电流互感器。这套装置的6~8 LH电流比为200A/0.5A，匝比为400/1，用 $D\sim d/H = \phi 60\sim30/25$ 环形铁心。负载电阻 $R_{110\sim112}$ 为20Ω，当原边电流为200安匝时，铁心磁密为3220高斯，保证量测线性度。

参照图8的简化波形分析， $u_2$ 与 $I_{KGZ}$ 的关系为：

$$u_2 = \frac{2RI_{KGZ}}{k_{CT}} - 2\Delta u \quad (\text{伏})$$