

# 多支路小电流中性点引线发电机的继电保护

东方电机厂 李 蒙

随着我国电力工业的迅速发展,发电机组的单机容量也愈来愈大。为了实现我国的四个现代化,已经提出了在1985年前建成三十座大型电站的宏伟目标,并且提出在近年制造单机容量为70万千瓦~100万千瓦水轮发电机的任务。

东方电机厂在设计制造10万千瓦以上的水轮发电机过程中,定子支路数已由单支路增大到四支路,甚至六支路。发电机定子支路数的增多给发电机的电气和机械结构及继电保护提出了新的问题。

第一:目前我国普遍采用的继电保护方式没有直接针对多支路发电机的保护,要求设计新的保护方案。过去适应双支路匝间短路保护的横联差动保护,在定子支路数为四支路以上,尤其支路数为奇数时(如某发电厂机组为三支路,另一发电厂机组为五支路)就更难实现。某电厂发电机组由于无横差保护就曾发生烧坏发电机的事故。因此要求有支路保护的电路。

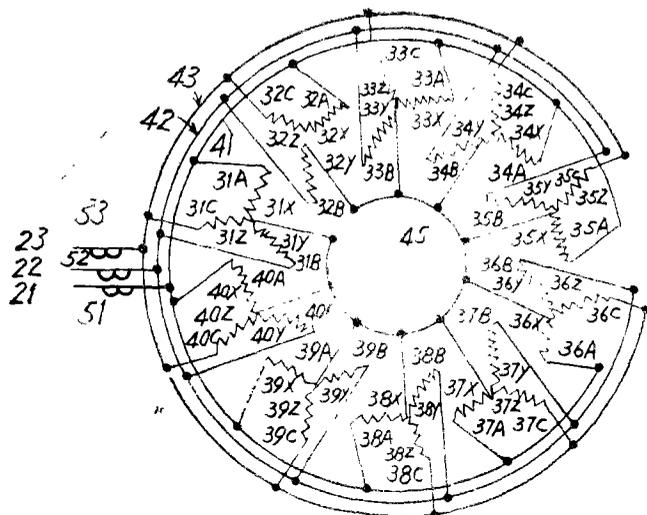
第二:过去横联差动保护要求发电机引出两组共六根大电流的中性点铜环引线,这种大电流引线不仅制造困难,增加了发电机的高度,而且六根中性环和三根出线环靠在一起,距离近,散热条件很差,导线的趋表效应和邻近效应使导线发热很严重,甚至影响发电机的额定出力(如我国22.5万千瓦,30万千瓦发电机的引线发热问题)。

上述问题虽然由于投入运行的大机组数量少,反映的不够普遍,但问题的严重性并不因此而减低。目前投运的机组所出现的这类问题只是一个报警的信号,大电机的设计制造部门及继电保护的研究及设计部门必须引起重视,慎重对待,以便保证大型水电机组的安全运行。

《IEEE TRANS ON POWER APPARATUS & SYSTEMS》1975, PAS-94 No 6 发表的“大古力第三电站61.5万千瓦安水轮发电机的电气与机械设计特点”〔1〕一文介绍了该发电机十支路并联定子绕组联接方式及其继电保护方案(译文见《国外大电机》1975年5.6期)。大古力发电机组的定子结构和继电保护方案对介决多支路发电机的保护及引线结构具有一定的参考价值。本文将根据大古力发电机组的电气设计特点进行分析,并讨论保护的整定值,最后介绍对四支路发电机保护的定性模拟试验。

## (一) 大古力第三发电机定子绕组结构

文〔1〕中介绍大古力第三发电机定子绕组有下述特点:(图一)



图一 定子绕组接线图

(1) 集中绕组的定子分成十支路，均匀分布在圆周上，三根主引线铜环构成不封闭的环形，从铜环的中间出线。每五支路的电流流经一半铜环，所以出线铜环中理论上只有 $\frac{1}{2}$ 的额定电流流通，相应的减少了主引线铜环的电流密度，又由于引线铜环为管形结构，也增大了散热面积。

(2) 每支路对应的三相中性点在定子内部相连，再通过一个按中性点不平衡电流及电容电流设计的小电流中性点铜环将十个支路的中性点连接，然后经中性点变压器或消弧线圈接地，因此发电机各支路及其连线在正常时均不超过 $\frac{1}{10}$ 的额定电流。

(3) 在定子三相每一支路的中性点侧都接有一个按支路额定电流设计的保护用电流互感器。这些电流互感器所组成的继电保护电路，除满足一般发电机保护要求的纵差及横差保护外还能指示各支路的过电流故障和发电机定、转子气隙偏移故障。

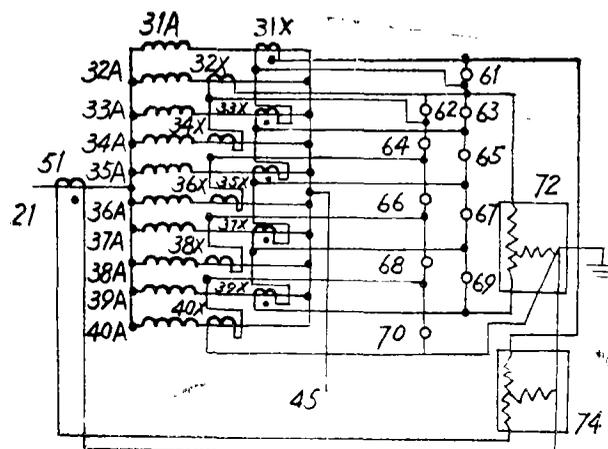
大古力发电机定子电气结构的优点是明显的，他们在继电保护方面所采取的相应措施同样也是可取的。

## (二) 大古力发电机的继电保护方式

1. 文章〔1〕介绍了发电机一相中继电器和电流互感器的原理接线图(图二)。它是由下列五部分所组成:

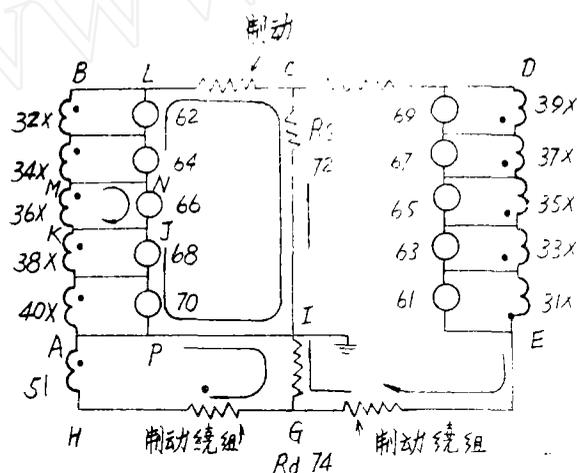
- (1) 每相中十个支路中性点侧所接的电流互感器 $31X \sim 40X$ ，变比为(3000/5)。
- (2) 出线电流互感器51，变比(30000/5)。
- (3) 与 $31X \sim 40X$ 对应的过电流继电器61~70。
- (4) 差动继电器74(纵差继电器)。

(5) 分相继电器72(横差继电器)。



图二 1相继电器回路接线图

为了便于分析,根据文中的介绍将图二改画成图三的形式。从图三可以看出十个支路的电流互感器中的奇数互感器31X、33X、35X、37X、39X为一组。偶数互感器32X、34X、36X、38X、40X为一组,这两组互感器与出线互感器51首尾串联,纵差继电器74和横差继电器72的工作绕组附接在奇数互感器和偶数互感器组之间,它们的制动绕组串接在互感器回路中。



图三 一相继电器回路接线展开图

过电流继电器61~70相应地与各支路电流互感器并联。另外两相也以同样的方式连接。

由于电流互感器为电流源,内阻很大,外电路的电流很难穿越,因此各电流互感器的电流只能在各继电器回路中流通,再根据叠加原理可知,各电流互感器的电流按下述

路线流通：

(1) 电流互感器“51”按  $A I G H$  回路流经74的工作绕组和制动绕组。

(2) 电流互感器  $31 X \sim 40 X$  中任意一个的电流均分成两路，现以  $36 X$  为例说明。

第一路：按  $M N J K$  路径，经本电流互感器回路的过电流继电器66闭路。

第二路：按  $M N L C I P J K$ ，经64；62；72的平衡绕组和工作绕组；70；68闭路。

可以选择过电流继电器61~70的阻抗远大于72，74继电器的阻抗，而且只有满足这个条件时才能不计72，74的阻抗。这样上述两个回路的阻抗之比为  $1 : 4$ ，因此两个回路中的电流按第一回路分流80%；第二回路分流20%流通。当不计电流互感器的角误差，比误差及负载的差别时，各电流按代数和相加，在各支路正常状态时，根据叠加原理得出：

(1) 两相邻电流互感器之间的公共线中如  $M N$ ， $K J$  等电流为另。

(2) 任意一个过电流继电器中由本电流互感器的80%电流即第一路电流和本组另外四个电流互感器中的20%电流即四个第二路电流 ( $4 \times 20\%$ ) 相减，使继电器61~70中的电流也为另。

(3) 奇数组电流互感器的  $5 \times 20\%$  电流和偶数组互感器的  $5 \times 20\%$  电流在横差继电器72的工作绕组中相减，合电流为另。

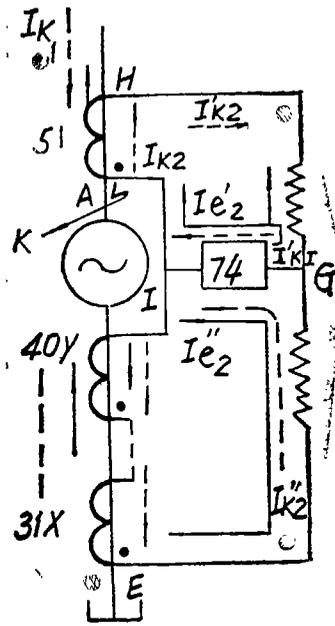
(4) 出线电流互感器“51”的付边电流和十个支路互感器的付边电流在差动继电器74的工作绕组中相减，使74的工作绕组中的总电流为另。因此正常状态下各小环路的电流为另，各继电器都不动作，相当由电流互感器的付边电流按  $A K M B L C D E G H A$  大环路径流通。当一次电路发生故障时，各电流互感器的付边电流虽然分流的比例仍为80%和20%，但是电流的方向或数值发生了变化，流过各继电器的差电流达到整定值时，继电器就会动作。

## 2. 发电机的纵差保护

发电机纵差保护原理图如图四所示，将图四和图三比较可知，出线电流互感器“51”组成纵差的一个回路，中性点互感器“ $31 X \sim 40 X$ ”组成纵差回路的另一个回路。当正常运行时保护回路内的电流如实线箭头所示。在差动继电器74中的电流为  $I'_{e_2} - I''_{e_2} = 0$ 。

当保护区域内发生相间短路故障时，出线互感器的电流反向，继电器74中的动作电流纵差保护仍采用下述整定原则：

$I_{dz} = I'_{K_2} + I''_{K_2}$  如虚线箭头所示。当发电机单机运行时无系统反送电流，继电器74中流过短路电流，此时也应保证继电器动作。大古力发电机纵差保护的原理和我国目前大型机组的比率制动式纵差保护方案没有差别。唯这种保护中各分支电流互感器和出线电流互感器的规格不同。



图四 纵差保护原理图

按动作电流大于发电机差动回路最大不平衡电流整定，一般取继电器动作电流：

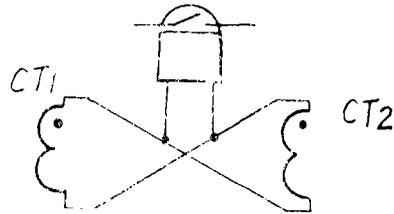
$$I_{a21} = (0.1 \sim 0.5) \frac{I_{e1}}{n_L}$$

$n_L$ ——电流互感器变比，当  $I_{e1}$  取发电机的额定电流时， $n_L$  取电流互感器“51”的变比。

纵差保护的灵敏度仍以一台机单独运行时出口二相短路故障校验。

### 3. 发电机的横差保护

根据前面的分析可知大古力发电机的横差保护和一般常用的三继电器法横差保护原理相同，也即和常用的输电线路方向横差保护相同，原理图如图五。将图五和图三对照可知横差保护部分如图六，正常时横差继电器工作绕组无电流，而两个制动绕组各有制动电流

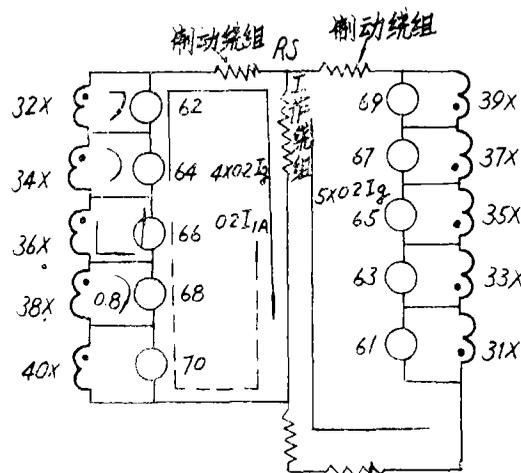


图五 发电机的方向横差保护原理图

$5 \times 0.2 I_{e1} = I_{e1}$  ( $I_{e1}$  为一分支额定电流)，所以继电器 72 可靠不动作。

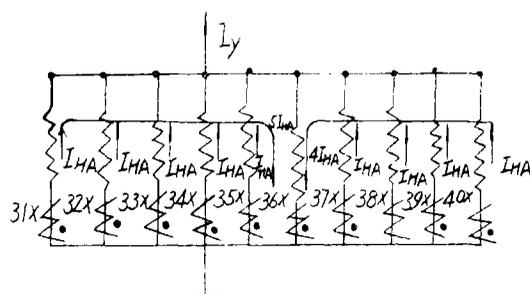
#### 〔1〕 匝间短路时的电流分析

当某一支路发生故障时并以只计算一条支路故障为条件，例如 36X 所在支路发生匝间短路，由于故障支路电势降低，在其它九条支路与故障支路间产生环流如图七所示。此时各支路中的电流根据叠加原理可分成两部份：① 供给外电路电流  $I_y$ 。② 各支路间的环流。因为供给外电路的电流对各支路来说仍然是相等的，对各继电器来说是平衡的，所以在各继电器中不产生动作电流。各支路之间的环流为九个正常支路向故障支路供给电流。电流互感器 36X 的电流反向。设每一正常支路供给故障支路的电流为  $I_{HA}$ ，发电机定子支路数为  $n$ ，则任意一个电流互感器的电流根据前面的分析为小环部分 80%，即  $(1 - 2/n) I_{e1}$  和 20%，即  $(2/n) I_{e1}$ 。



图六 大古力横差保护部分接线图

在分析各继电器电流时略去平衡的外供电流  $I_y$  则正常支路供给  $I_{HA}$ ，故障支路吸收  $(n-1)I_{HA}$ 。



图七 单支路故障情况

①故障回路小环继电器电流  $I_{66}$ 。

$$I_{66} = (1 - 2/n) (n-1) I_{HA} + (n/2 - 1) 2/n I_{HA} \\ = (n-2) I_{HA}$$

对十支路情况  $I_{66} = 8 I_{HA}$

②故障组内的正常支路小环继电器电流， $I_{62}$ ， $I_{64}$ ， $I_{68}$ ， $I_{70}$

$$I_{62} = I_{64} = I_{68} = I_{70} = (1 - 2/n) I_{HA} + 2/n (n-1) I_{HA} \\ - \left( \frac{n}{2} - 2 \right) \frac{2}{n} I_{HA} \\ = 2 I_{HA}$$

该组电流继电器的电流和发电机的支路数无关，对于偶数支路的发电机条件为  $2 I_{HA}$ 。

③非故障支路组内的各小环继电器电流

$$I_{61} = I_{63} = I_{65} = I_{67} = I_{69} \\ = (1 - 2/n) I_{HA} - 2/n (n/2 - 1) I_{HA} \\ = 0$$

即这一组继电器的合电流为另，不会动作

④横差继电器72的电流

$$\text{制动电流} = n/2 \cdot 2/n I_{HA} + (n/2 - 1) 2/n I_{HA} - (2/n) (n-1) I_{HA} = 0$$

$$\text{工作电流 } I_{72} = (n/2) \cdot (2/n) I_{HA} - (n/2 - 1) (2/n) I_{HA}$$

$$+ (2/n) (n-1) I_{HA} = 2 I_{HA}$$

即  $I_{72}$  中的电流也与发电机的支路数无关

由上述的计算可见在发电机任意一支路匝间短路故障时各保护分支路的电流分配关系总的说与发电机的定子支路数及故障环流有关，其中特别应该指出的是横差继电器72中的电流及故障组中的正常支路继电器  $I_{62} \sim I_{64}$ ， $I_{68}$ ， $I_{70}$  等的电流则只与故障环流有关。 $I_{HA}$  亦与支路数  $n$  有关，而非故障组各小环继电器电流也为另。上述电流关系仅适用于发电机具有偶数支路，而且仅有一支路故障的情况。所求出的电流比例关系为横

差保护提供了整定的参考值。

上述分析同时说明了一分支发生匝间短路时，横差继电器制动电流为零，而工作绕组有较大电流（ $2 I_{HA}$ ），所以横差保护灵敏动作。】

〔2〕发电机定子为奇数支路时的保护

当发电机定子支路数为奇数时，其保护回路原则上采用偶数支路保护电路的半边，其电路图如图八所示，这种保护的纵差保护部分和前面介绍的相同，不再赘述。它没有横差继电器，而靠各支路的过电流继电器保护。现以五支路的保护电路为例分析各继电器中的电流。

仍设发电机的支路数为 $n$ ，任意一个支路电流互感器的电流仍分为两部分，第一部分是电流互感器的小环部分，为80%，即 $(1 - \frac{1}{n}) I_{CT}$ 。第二部分是环部分，为20%，即 $(\frac{1}{n}) I_{CT}$ 。当一个支路故障时，四个正常支路向故障支路供环流。在不计向外供的电流时其参考电路如图九所示。根据图九计算各继电器中的电流。假设以第三支路为故障支路，正常支路供给的环流为 $I_{HA}$ ，则

①故障回路小环继电器 $R_3$ 中的电流 $I_3$

$$I_3 = (1 - \frac{1}{n}) I_{HA} (n-1) + (n-1) \frac{1}{n} I_{HA} = (n-1) I_{HA}$$

对应 $n=5$ 时 则  $I_3 = 4 I_{HA}$

②非故障支路的小环

继电器电流 $I_1, I_2, I_4, I_5$

$$I_1 = I_2 = I_4 = I_5 = (1 - \frac{1}{n}) I_{HA} + (n-4) \frac{1}{n} I_{HA} - (n-2) \frac{1}{n} I_{HA} = I_{HA}$$

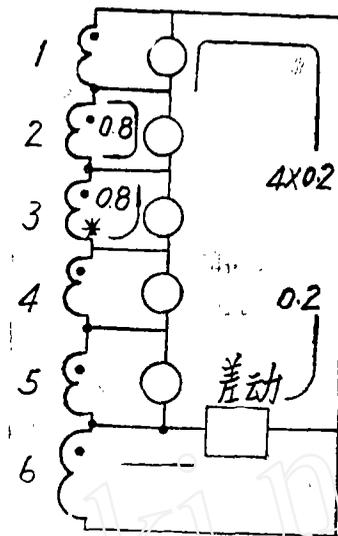
③环流在纵差继电器 $Rd$ 中产生的附加电流

$$I_d = (n-1) \cdot \frac{1}{n} I_{HA} - (n-1) \frac{1}{n} I_{HA} = 0$$

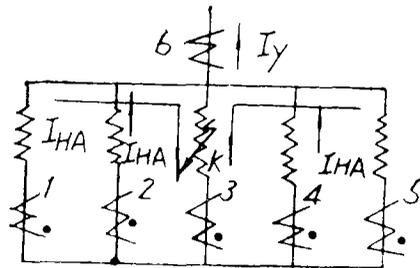
其计算结果与上节偶数支路的结果相近，纵差继电器中无附加电流通过。故障支路的小环继电器电流为 $(n-1)$ 倍的正常支路小环继电器电流。

(3) 求解故障环流

上几节分析了故障时各继电器支路中的电流分配关系，现在根据图十所示的等值电



图八 单数支路保护原理图



图九 支路故障情况

路图来求解故障支路的总环流。

设发电机每一支路的等值电势以  $\dot{E}_1$  代表，支路电阻以  $R$  代表，电抗以  $X$  代表。

①所有非故障支路合并成一个等值电路，其等值的电势即为发电机的相电势

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_\phi$$

②正常支路的等值电阻， $R_1$  为所有正常支路电阻并联，若发电机一相定子电阻为  $R_c$ ，支路数为  $n$  则

$$R_1 = R_c \cdot \frac{n}{n-1}$$

③正常支路的总电抗即发电机一相各正常支路定子漏抗的并联值。

$$X_1 = X_s \cdot \frac{n}{n-1}$$

式中  $X_s$  为发电机定子漏抗。

④故障支路的电势  $\dot{E}_2$

故障支路的剩余电势  $\dot{E}_2$  不但与短路匝数的百分比有关而且和正常支路的电势有相位差。不同型号及容量的发电机定子有不同的支路数和定子槽数，不同形式的绕组，转子极对数也不同，使得计算故障支路的剩余电势  $\dot{E}_2$  和正常支路的电势  $\dot{E}_1$  之间的相位差很困难。但理论上只要知道了具体的数据又是可计算的。当按一个磁极或整数倍磁极下的定子绕组匝数全部被短路的条件来计算时， $\dot{E}_1$  和  $\dot{E}_2$  的相位就很接近。经过一些计算可以证明短路匝数不大时相角差也不大。因此在进行初步估值计算时根据具体的参数作有条件的简化不计相角差只计电势的幅值差是可以的。假设短路电压系数为  $K$ ， $K$  可取  $0.1, 0.2, 0.3 \dots$ 。则

$$E_2 = E_1 (1 - K)$$

⑤故障支路的电阻  $R_2$

$$R_2 = R n (1 - K)$$

⑥故障支路的电抗  $X_2$

$$X_2 = X_s [n (1 - K)^2]$$

⑦环路电流  $I_{HA}$

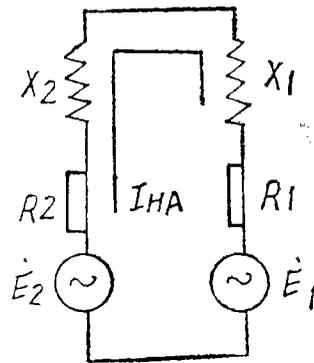
$$\dot{I}_{HA} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{(R_1 + R_2) + j(X_1 + X_2)}$$

$$|I_{HA}| = \frac{E_1 - E_2}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

将上式求出的环流值代入各继电器的分流值即可求出继电器的电流值。

以  $n = 6$ ， $X_s = 0.2$  的发电机为例，当  $K = 10\%$ ，忽略  $R$ ，则

$$I_{HA} = \frac{0.1}{0.2 \left( \frac{6}{5} + 6 \times 0.81 \right)} = 8.3\%$$



图十 求环流的等值电路

#### (4) 横差保护的灵敏度

目前我国采用的双支路发电机单元件式横差保护起动电流约为20%~30%发电机额定电流, 电流互感器变比为 $\frac{0.25 I_{N1}}{5}$ , 这种横差保护灵敏度低。但对本文介绍的多支路发电机横差保护的差保护, 设整定值为10%, 则由上述算例可知, 在六支路发电机的一分支中发生10%匝间短路, 横差保护中有 $2 I_{HA} = 16.6\%$ 的动作电流, 所以横差保护正确动作。而且分支路数愈少, 灵敏度愈高。

#### 4. 发电机定转子气隙偏移指示

##### (1) 气隙偏移指示的一般性讨论

“大古力第三电站61.5万千瓦伏安水轮发电机的电气与机械设计特点”一文介绍发电机由于热和磁的作用产生较大的径向移动, 再加上一些意想不到的尺寸变化(如混凝土基础的移动)造成气隙不均, 气隙减小侧支路的电流互感器就会感觉到无功过励电流的增大, 气隙增大侧的电流互感器就会感到无功过励电流的减少。根据文中介绍, 所采用的保护系统是利用过电流继电器61~70做气隙偏移指示的。

实际上发电机气隙偏移后造成气隙磁场的不均匀, 于是在定子各并联支路中产生环流。这环流所产生的谐波磁势当与基波磁势在100HZ共振时使定子铁芯出现较大的振动。这种振动增加定子绕组绝缘的磨损和电腐蚀, 并会使一些受力杆件, 螺钉等产生疲劳裂纹。另一方面环流在并联支路中造成过负荷。因此当振动值或环流值超过允许值时必须停机处理。

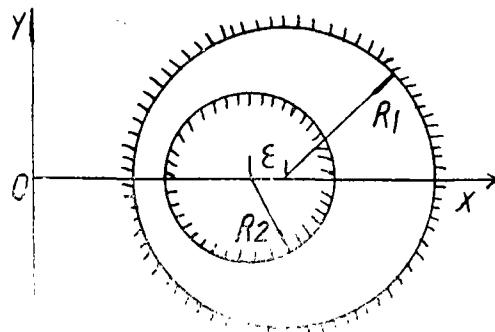
发电机气隙偏移对各支路影响的大小与发电机定子绕组的连接方式有关, 当定子绕组为集中绕组时影响最大, 而当定子绕组一支路沿360°分布时则气隙偏移对各支路的影响就是一样的, 保护回路仍然是平衡的。

发电机气隙偏移的大小还与发电机定子机座的刚度有关。我国设计制造的大型水轮发电机绝大多数为刚性机座, 在运行中产生梅花形变形, 这种结构的气隙偏心相对要小一些。发电机弹性结构机座产生的定子铁心变形相对要大得多, 需要采取予应力, 多并联支路等许多措施来减少气隙的偏移值。大古力机组采取各种措施使实际的气隙比额定值小1.3mm, 无支承铁心的自然振动频率为谐振频率的4倍。整个定子铁心对垂直梁的横向振动自然频率为谐振频率的20倍, 所以是优良的。

参照我国有关规程对10万千瓦以上的发电机定转子气隙在运行中允许的偏移值没有明确的规定, 仅要求安装时的静止气隙偏移为正常值的10%, 因此建议对气隙偏移指示仅做报警信号。

##### (2) 气隙偏移时的故障环流

不论是计算气隙偏移时发电机产生的



图十一 气隙偏移示意图

机械振动大小，还是计算各支路内的环流，从理论上讲是可以准确算出的。但实际上是一个很繁难的计算过程。下面简单介绍一下计算途径供有关单位研究时参考。

①气隙偏移时的定子环流

对于图十一所示的气隙偏移情况，若发电机定子内径为  $R_1$ ，发电机转子外径为  $R_2$ ，偏心距离为  $\varepsilon$ ，按照“电机内的电磁场问题”一书介绍的方法，可以对任意的  $X$ ， $Y$  座标，根据  $R_1$ ， $R_2$ ， $\varepsilon$ ，及正常气隙  $\delta$  求出该坐标点的幅向及切向磁场强度：

$$B_x = -\frac{2Mshu_1}{chu - \cos v} \left[ \Omega d_1 \sum_{K=1}^{\infty} \frac{chk(u-u_2)}{shk(u_1-u_2)} Ke^{-Ku_1} \cos kv - \Omega q_1 \sum_{K=1}^{\infty} \frac{chk(u-u_2)}{shk(u_1-u_2)} Ke^{-Ku_1} \sin Kv \right]$$

$$B_y = \frac{2Moshu_1}{chu - \cos v} \left[ \Omega d_1 \sum_{K=1}^{\infty} \frac{shk(u-u_2)}{shk(u_1-u_2)} Ke^{-Ku_1} \sin Kv + \Omega q_1 \sum_{K=1}^{\infty} \frac{shk(u-u_2)}{shk(u_1-u_2)} Ke^{-Ku_1} \cos Kv \right]$$

$$\lambda = R \frac{\delta}{\varepsilon} \quad \text{其中} \quad R = \frac{1}{2} (R_1 + R_2)$$

$$u_1 = sh^{-1} \frac{R}{R_1} \frac{\delta}{\varepsilon}$$

$$u_2 = sh^{-1} \frac{R}{R_2} \frac{\delta}{\varepsilon}$$

$$X = \frac{\lambda shu}{chu - \cos v}$$

$$Y = \frac{-\lambda siuv}{chu - \cos v}$$

根据气隙中的磁场强度可以求出定子各线棒的电势，进而可求出各支路的电势，最后可求出各支路的环流。

对求气隙偏移所产生的环流还有更简化的计算方法，按照发电机满负荷条件，励磁安匝和气隙磁密等有下列关系：

$$AW \delta = 0.16 K \delta B \delta$$

式中  $K \delta$  ——总气隙系数，在气隙改变时  $K \delta$  变化大约在10%左右，故可以认为是常数。如果认为在气隙改变时励磁不变则气隙  $\delta$  和气隙磁密  $B \delta$  成反比关系，当  $\delta$  改变为计算值后用新的  $B' \delta$ ，相当于对某些定子绕组来说等值于具有气隙磁密  $B' \delta$  和新的气隙  $\delta'$  的均匀气隙的发电机，再参考发电机参数所具有的约束条件或者参照发电机的负载曲线折算出对应的电流变化。

②同样参考水轮发电机定子铁心磁振动方面的资料，可以求出发电机因转子偏心所导致的振动。

综上所述：上面的计算方法是不便于用来进行工程计算的。

### (三) 对电流互感器的要求

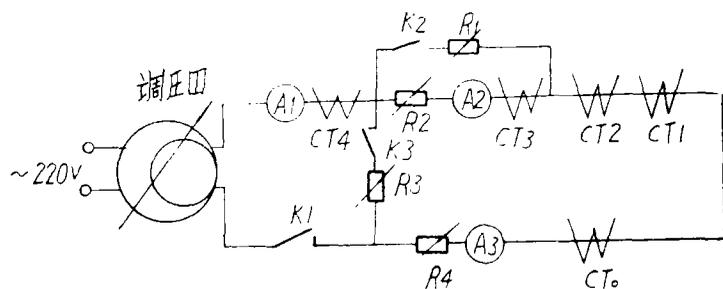
采用无大电流中性点引出线的继电保护方案的特点之一是,使用许多装在发电机内部的小电流互感器代替一组大电流互感器组成所需要的保护,由于其使用特点具有下列的要求:

- 1.要求电流互感器的体积小,便于在发电机内部安装。
- 2.要求电流互感器能带较大欧姆数的负载而且要求波形好。只有电流互感器的负载欧姆数较大时才能使保护回路的电流按过电流继电器的阻抗分配。根据具体情况要求电流互感器的额定负载为 $10\Omega$ 左右,波形失真小于 $30\%$ ,而且互感器在 $10$ 倍额定电流时不饱和。为达到上述要求建议采用付边额定电流为 $1$ 安的电流互感器,这样不论对带高阻抗负载的能力来说,还是减小互感器的体积来说都是有利的。
- 3.电流互感器的比误差及角误差应不低于国家标准的有关规定。电流互感器的铁心应为C级。
- 4.电流互感器应做成穿心式,它的绝缘主要靠发电机线棒本身的绝缘承担,互感器可以做成 $500$ 伏耐压等级的。这样可以在保证安全的前提下尽量缩小电流互感器的体积。
- 5.必须注意发电机内部磁场对电流互感器的干扰影响。

### (四) 模拟试验

为了验证本文介绍的保护回路一般工作原理及保护回路内各支路电流的分布情况。了解模拟故障时保护动作的情况,同时也为了试验各继电器阻抗对保护支路电流分配的影响,并考查通用的低欧姆负载电流互感器在并接高欧姆数负载时电流波形畸变的情况,对发电机定子四支路的保护电路进行了模拟试验。

试验中用同一个原边电流保证各电流互感器原边电流的同相,用分流电路来调节各电流互感器的电流,其线路为图十二所示



图十二 模拟试验线路图

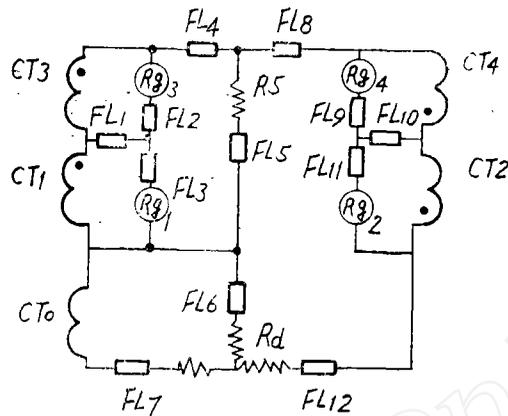
图中 $CT_0$ ，代表出线电流互感器。 $CT_1 \sim CT_4$ 代表各支路电流互感器，各互感器均用HL-1型互感器0.2级，0.2级，使用变比15/5。

$R_1 \sim R_4$ 为可调电阻， $A_1 \sim A_3$ 为量测电流表。各电流互感器的付边接线图如图十三。

在二次各分支路中接有分流器 $FL_1 \sim FL_{12}$ 用以测量各分支路的电流

继电器 $R_d$ 同BCH-2型差动继电器，工作绕组的阻抗，5 A时 $X = 0.28 \Omega$ 。

$$R = 0.04 \Omega$$



图十三 保护二次接线图

继电器 $R_s$ 和 $R_1$ ，根据现有条件选用DL-11/10(2.5 A~10 A)，工作绕组 $X = 0.0131 \Omega$ ， $R = 3.087 \Omega$ 。

1. 正常状态时各支路电流及 $R_s$ 阻抗的影响。

当 $CT_1 \sim CT_5$ 的原边电流为10安时， $CT$ 付边电流应为 $10/3$ 安=3.33安，当 $R_{s1} \sim R_{s4}$ ，不串电阻及串3  $\Omega$ ，5  $\Omega$ ，10  $\Omega$ 时各电流的分配值如表一，用 $I_1$ 代表 $FL_1$ 测量的电流， $I_{12}$ 代表 $FL_{12}$ 的电流。

表一

	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$I_7$	$I_8$	$I_9$	$I_{10}$	$I_{11}$	$I_{12}$
计算值	0	0	0	3.33	0	0	3.33	3.33	0	0	0	3.33
$R_{s1} \sim R_{s4}$ 不串电阻	0	0.6	0.6	2.57	0.257	0.77	3.08	2.31	0.77	0	0.77	2.44
$R_{s1} \sim R_{s4}$ 各串3 $\Omega$ 电阻	0	0	0	3.2	0	0	3.3	3.3	0	0	0	3.6
$R_{s1} \sim R_{s4}$ 各串5 $\Omega$ 电阻	0	0	0	3.4	0	0	3.4	3.3	0	0	0	3.4
$R_{s1} \sim R_{s4}$ 各串9 $\Omega$ 电阻	0	0	0	3.4	0	0	3.3	3.4	0	0	0	3.3

由表一数据可见当 $R_{s1} \sim R_{s4}$ 的阻抗和 $R_s$ 和 $R_1$ 的阻抗相差不多时，不能保证电流的分配规律是理想的。当 $R_{s1} \sim R_{s4}$ 各串3  $\Omega$ 以上电阻时则只有 $I_4$ ， $I_8$ ， $I_{12}$ ， $I_7$ 电流在流通，反映纵差的 $I_6$ 和横差的 $I_5$ 都为另，反映各小环继电器 $R_{s1} \sim R_{s4}$ 的电流 $I_2$ ，

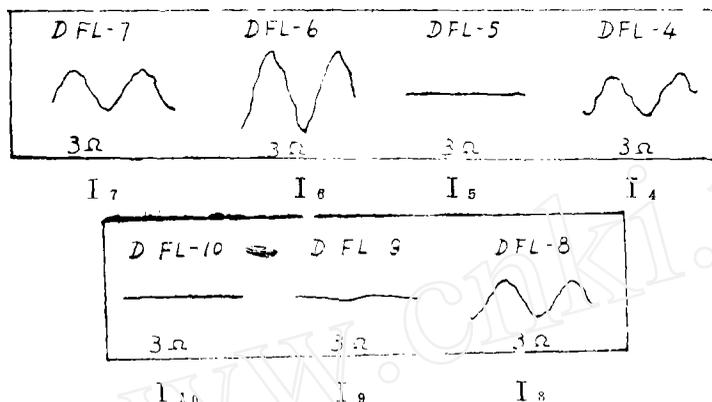
$I_3, I_4, I_2$ 也都为另,说明各继电器均不动作,由表一的数据说明了各支路电流的分配情况是和本文的分析相一致的。

### 2. 模拟纵差保护动作

当 $CT_1 \sim CT_4$ 的原边电流为15安,  $CT_0$ 反相也为15安时差动继电器动作。动作时的各电流值如表二所示。示波图第一组表明各支路电流之波形。

表二  $CT_1 \sim CT_4$ 的原边电流为15安,  $CT_0$ 反相

	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$I_7$	$I_8$	$I_9$	$I_{10}$	$I_{11}$	$I_{12}$	
$R_{R1} \sim R_{R4}$ 各串3Ω电阻	0	0.067	0.133	4.6	0	8.5	4.2	4.5	0.067	0	0.067	4.6	示波图
$R_{R1} \sim R_{R4}$ 各串9Ω电阻	0	0	0	4.9	0	7.9	3.4	5.6	0	0	0	4.9	



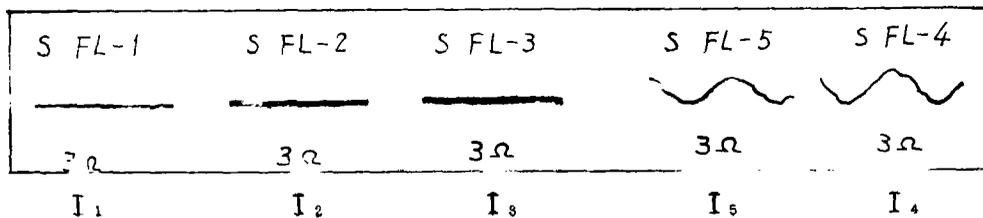
示波图第一组,纵差动作时之电流波形( $R_1 \sim R_4$ 各串3Ω电阻)由表二的数据和示波图验证了对纵差保护动作的基本分析。

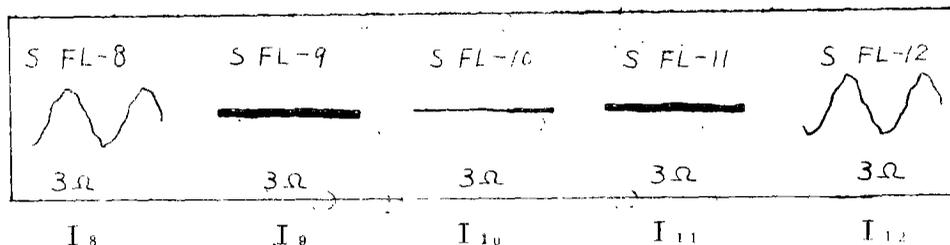
### 3. 模拟横差保护动作

以下列数据模拟横差保护的情况: $CT_1, CT_3$ 原边的电流为5安。 $CT_2, CT_4$ 的原边电流为10安,  $CT_0$ 的原边电流为5安。当 $R_{R1} \sim R_{R4}$ 串不同的电阻时其各支路的电流如表三,其中 $R_{R1}$ 串接3Ω电阻时的示波图如第二组:

表三

	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$I_7$	$I_8$	$I_9$	$I_{10}$	$I_{11}$	$I_{12}$
计算值	0	0	0	1.67	1.67	1.67	1.67	3.33	0	0	0	3.33
$R_{R1} \sim R_{R4}$ 各串9Ω电阻	0	0	0	1.8	1.7	1.8	1.8	3.4	0	0	0	3.4
$R_{R1} \sim R_{R4}$ 各串3Ω电阻	0	0	0	1.8	1.3	1.6	1.6	3.2	0.13	0	0.13	3.1
$R_{R1} \sim R_{R4}$ 各串2Ω电阻	0	0	0	1.8	1.5	1.5	1.7	3.1	0.13	0.1	0.2	3.1





示波图第二组  $R$  电阻为串  $3 \Omega$  时的电流波形

从表三和第二组示波图可知实测值和计算值基本接近，只有大环中电流  $I_8, I_{12}$  较大，电流互感器的负载并不太重。流过纵差，横差电流  $I_5, I_9$  相差很小，两者可能同时动作。

#### 4. 模拟一支路故障的横差保护

调节各电阻  $R_1 \sim R_4$  使  $CT_4$  的原边电流为 10 安 其余  $CT_1, CT_2, CT_3, CT_0$  均为 5 安，实测数据和计算数据列于表四：

表四

	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$I_7$	$I_8$	$I_9$	$I_{10}$	$I_{11}$	$I_{12}$
计算值	0	0	0	1.67	0.83	0.83	1.67	2.5	0.83	1.67	0.83	2.5
$R_{s1} \sim R_{s4}$ 各串 $9 \Omega$ 电阻	0	0	0	1.85	0.3	3.2	1.7	1.9	0.37	0.73	0.37	1.9
$R_{s1} \sim R_{s4}$ 各串 $5 \Omega$ 电阻	0	0	0	1.8	0.3	0.4	1.8	2.2	0.4	1.26	0.73	2.1
$R_{s1} \sim R_{s4}$ 各串 $3 \Omega$ 电阻	0	0	0	1.9	0.5	0.5	1.8	2.5	0.67	1.6	1.06	2.4
$R_{s1} \sim R_{s4}$ 各串 $2 \Omega$ 电阻	0	0	0	1.65	0.6	0.7	1.65	2.4	0.67	1.74	1.06	2.45

从表四的数据看，当两组电流不平衡时  $R_{s1} \sim R_{s4}$  所串电阻值愈大时误差反而增大，这一情况在模拟气隙偏移时也出现。这个约束条件就限制了  $R_s$  阻抗不能过份的增大。当然电流互感器的参数性能也限制了  $R_s$  的范围。

#### 5. 模拟气隙偏移状况

当两组支路互感器电流不平衡时，测量了各支路的电流及互感器饱和的情况，现分几种条件说明

(1) 模拟纵差动作同时  $CT_2, CT_4$  不平衡状况， $I_{CT1}, I_{CT3}$  为 5 安， $I_{CT0}$  为 5 安反相， $I_{CT2}$  为 2 安， $I_{CT4}$  为 8 安。 $R_{s1} \sim R_{s4}$  各串  $3 \Omega$  电阻，数据如表五

表五

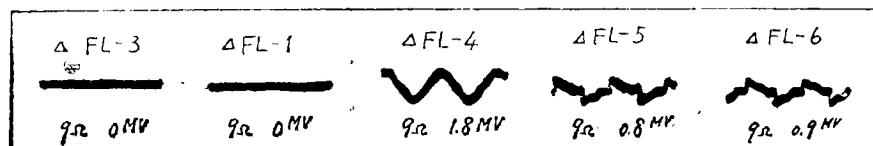
	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$I_7$	$I_8$	$I_9$	$I_{10}$	$I_{11}$	$I_{12}$
计算值	0	0	0	1.67	0	3.3	1.67	1.67	1.0	2.0	1.0	1.67
$R_{s1} \sim R_{s4}$ 各串 $3 \Omega$ 电阻	0	0	0	1.7	0	3.2	1.6	1.6	0.93	1.93	1.13	1.6

(2) 模拟一支路不平衡， $I_{CT1}, I_{CT3}, I_{CT0}$  均为 5 安， $I_{CT2}$  为另， $I_{CT4}$  为 10 安。串接不同电阻时的数据，及计算值列于表六，此时出现互感器的饱和，计算值和实测值

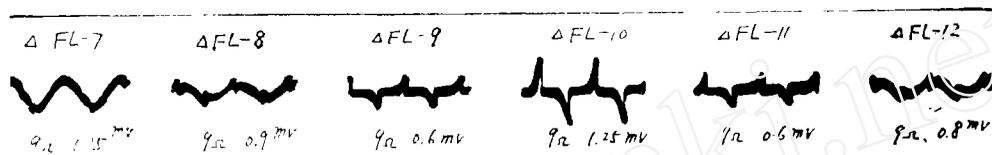
相差较大。其饱和时的波形图如示波图第三组，第四组。

表六

	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$I_7$	$I_8$	$I_9$	$I_{10}$	$I_{11}$	$I_{12}$
计算值	0	0	0	1.67	0	0	1.67	1.67	1.67	3.3	1.67	1.67
$R_{s1} \sim R_{s4}$ 各串 $9 \Omega$ 电阻	0	0	0	1.8	0.8	0.9	1.75	0.9	0.4	0.84	0.4	0.8
$R_{s1} \sim R_{s4}$ 各串 $3 \Omega$ 电阻	0	0	0	1.6	0.6	0.6	1.6	1.3	1.2	2.4	1.35	1.2
$R_{s1} \sim R_{s4}$ 各串 $2 \Omega$ 电阻	0	0	0	1.75	0.4	0.4	1.75	1.4	1.4	2.77	1.5	1.4

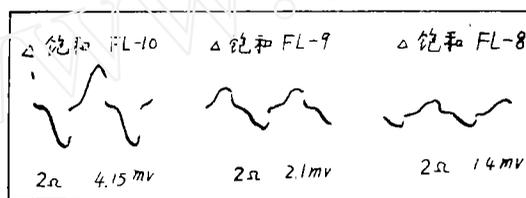


$I_3$        $I_1$        $I_4$        $I_5$        $I_6$



$I_7$        $I_8$        $I_9$        $I_{10}$        $I_{11}$        $I_{12}$

示波图第三组， $R_s$ 各串  $9 \Omega$  电阻时之CT饱和图形



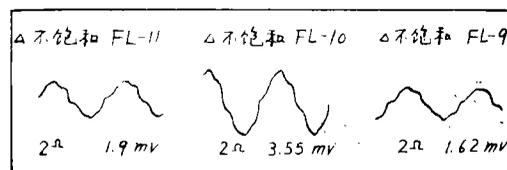
$I_{10}$        $I_9$        $I_8$

示波图第四组， $R_s$ 串  $2 \Omega$  电阻时之CT饱和图形

表七所示为  $CT_1$ ,  $CT_3$ ,  $CT_6$  原边电流为 5 安,  $CT_2$  为 1 安,  $CT_4$  为 8.4 安,  $R_s$  串  $2 \Omega$  电阻时之实试数据:

表七

	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$I_7$	$I_8$	$I_9$	$I_{10}$	$I_{11}$	$I_{12}$
计算值	0	0	0	1.67	0.1	0.1	1.67	1.57	1.23	2.47	1.23	1.57
$R_{s1} \sim R_{s4}$ 各串 $2 \Omega$ 电阻	0	0	0.1	1.7	0.1	0.2	1.75	1.55	1.22	2.37	1.27	1.55



$I_{11}$        $I_{10}$        $I_9$

示波图第五组, CT不饱和时的图形

比较表五, 表六, 表七, 示波图第三组, 第四组, 第五组, 可知当任意一组电流互感器不平衡时, 气隙偏移指示继电器 R<sub>0</sub>中及各小支路中流过较大的电流, 电流互感器的负载较大时将出现饱和现象, 各回路中的电流也将畸变, 因而破坏了原设计的工作状态, 表七的数据说明只要电流波形不畸变, 计算值和实测值就很接近。综上所述可知, 原定的试验目的基本达到。

## 结 论

1. 大容量水轮发电机要求有比较完善的保护, 其中定子多支路的具有制动特性的横差保护, 气隙偏移保护及一般的发电机纵差保护等都是必要的。为此必须在每条发电机定子支路装一个电流互感器。

大古力发电机组的小电流中性点引出线结构可以解决我国同类型发电机引线的发热问题, 具有较大的优点。

2. 建立在叠加原理基础上的分析及整定计算, 经过模拟试验已经定性的和部分定量的得到了验证, 说明:

发电机的纵差保护和现在使用的纵差保护没有区别。

发电机的横差保护具有较高的灵敏度, 而且保护的更广泛, 能满足大型机组保护的要求。

发电机定转子气隙偏移保护与发电机的结构有很大关系, 需要针对具体的机组定保护方案, 建议首先做到气隙偏移时发报警信号。

所有上述几种保护都仍须进一步做深入的定量分析及试验工作。

3. 现有的过电流继电器及电流互感器很难满足上述继电保护的要求, 希望试制新型的动作值低, 持续电流较大, 高阻抗的电流继电器和体积小、容量较大、能带高阻抗负载的电流互感器等元件。

参加本课题工作的还有陈陈, 钱洪钧, 刘云, 袁长河, 平秀生, 高长发, 宋振平等同志。本文承清华大学王维俭老师审阅, 特此表示感谢。

## 参 考 文 献

1. “大古力第三电站61.5万千瓦安水轮发电机的电气与机械设计特点”  
(美) F. J. HORN等 “国外大电机” 1976. 5. 6 期
2. “PROCEEDINGS OF THE AMERICAN POWER CONFERENCE  
VOLUME 31
3. “电力设计手册” 第2卷
4. “电机内的电磁场问题” “哈尔滨电工学院”
5. “水轮发电机定子铁心的磁振动” “华中工学院”