

# 龙羊峡电站发电机新型主保护技术性能论证

水电部西北勘测设计院 李振华

大型水轮发电机在设计制造中需要适当提高材料利用率，定子绕组电流密度相对增大，过热能力相对降低。为减小定子铁芯槽电流，改善定子绕组端部振动，基于水轮发电机极对数多的条件，因而定子绕组可设计成每相由多个分支绕组并联。单机容量愈大，并联支路数愈多。在发电机定子绕组中性点侧，常规的联结方式是将中性引线按三相分别引出，接成双“Y”，以满足装设纵差保护和横差保护电流互感器的要求，这样，必然使发电机定子机座上环形布置着密集的引线层，引线层不仅增大了发电机的制造高度，而且由于各层间电流的趋肤效应、临近效应，以及散热条件不良，将使引线、汇流排发热，严重时将影响机组出力，威胁机组安全运行。例如刘家峡机组因定子引线及汇流排发热造成绝缘烧焦、焊锡熔化的问题长期无法妥善解决，迫使五号机将额定容量由30万千瓦改为26.5万千瓦，降出力运行。

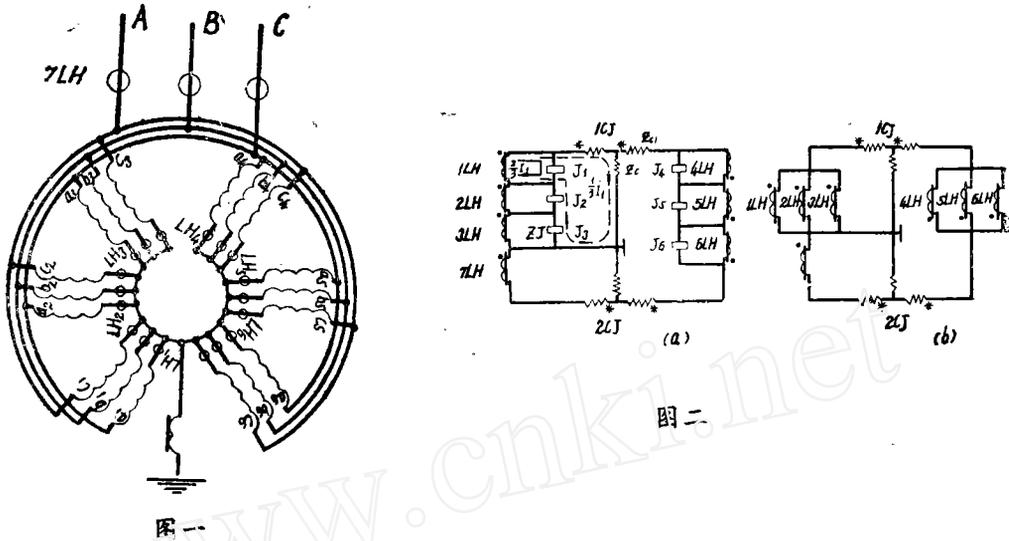
显然，要发展容量更大的水轮发电机组，妥善解决发电机引线发热的问题是刻不容缓的。

龙羊峡32万千瓦水轮发电机，定子绕组每相有六个并联分支绕组，在发电机的设计制造中，改变了将绕组中性引线分相引出后接成双“Y”的常规结构方式，而是仅在定子机座上设置了一个环形引线，各分支绕组中性点侧从定子槽中出线后就地直接联于环上，不再沿定子机座周向绕行。由于定子绕组在槽内的排列位置是使每相的每一分支绕组中性点引出线两侧必然与其它两相的一个分支绕组中性引线相邻，因而在正常满负荷运行时，中性点侧环形引线上的最大电流只有六分之一额定电流。同时，由于各分支绕组中性引线不再沿定子机座绕行，因而机座上引线层数大大减少，所余出口侧引线之间距离可以适当增大，引线层间通风散热条件改善，临近效应减小，这样即能有效地解决定子引线的发热问题。发电机定子绕组的这种结构形式，即所谓“中性点小电流引出结构”。（见图一）

发电机采用中性点小电流引出结构后，不仅解决了定子引线的发热问题，降低了发电机的制造高度，而且简化了结构，便于制造、维护。但明显的问题是：作为反应发电机内部各种短路故障的主保护一纵差、横差保护再无法按常规接线方式构成，因而，研究适用于多分支绕组、中性点小电流引出发电机的主保护装置，则是能否使这类大容量发电机组得以发展的关键。

在龙羊峡发电机组继电保护的设计实践中，根据大量的真机工业试验、试运所积累

的资料，对可能构成多分支绕组、中性点小电流引出大容量发电机的主保护装置的两种新型接线方案——“串联”方案和“并联”方案（见图二a、b）进行了初步探讨，现对两种接线方案的技术性能作如下分析。



### 新型差动保护工作原理的分析方法

在串联方案接线中，发电机中性点侧电流互感器变比按  $K_c = \frac{1}{6} I_e / 5^4$  选择。对于龙羊峡发电机， $K_c = 2500^4 / 5^4$ ，发电机出口侧电流互感器变比为： $K = 15000^4 / 5^4$ 。电流继电器阻抗  $Z_J = 4 \Omega$ 。差动继电器工作绕组阻抗为  $Z_{c1} = 0.051 \Omega$ ，每侧制动绕组阻抗为  $Z_{c2} = 0.076 \Omega$ 。

将上述参数代入图二（a）中，列出回路方程求解可得：

$$\text{当 } \frac{Z_J}{\frac{1}{2} (Z_{c1} + Z_c)} \geq 65 \text{ 时,}$$

差动继电器两侧电流互感器中的电流流入对侧电流继电器中的分量小于该侧电流的  $\frac{1}{100}$

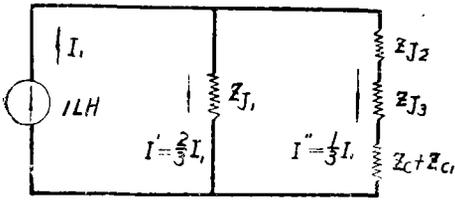
在龙羊峡发电机差动保护的具体接线中，

$$\frac{Z_J}{\frac{1}{2} (Z_{c1} + Z_c)} = \frac{4 \Omega}{0.0635 \Omega} = 63, \text{ 基本满足上述条件, 故可认为差动}$$

继电器两侧电流互感器二次侧电流不影响对侧电路中的电流分佈。

电流互感器作为电流源，其内阻很大，因此， $Z_{LH} \gg Z_J \gg (Z_c + Z_{c1})$ 。

当发电机中性点侧某一电流互感器中有电流存在时，其二次回路等值电路如图三。



图三

注意到： $Z_{J1} = Z_{J2} = Z_{J3}$

$$\text{则有： } Z_{J1} \approx \frac{1}{2} (Z_{J2} + Z_{J3} + Z_c + Z_{c1})$$

故等值电路中各支路电流为：

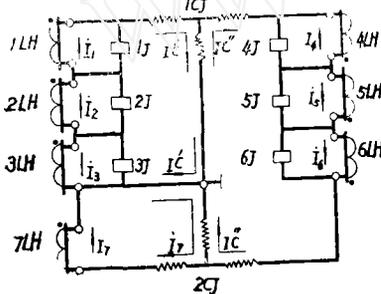
$$I' = \frac{2}{3} I_1, \quad I'' = \frac{1}{3} I_1$$

即互感器二次侧电流有  $2/3$  流经与本

互感器 (LH) 对应并联的电流继电器 (J) 中，另  $\frac{1}{3}$  电流则流经本组中另两只电流继电器及差动继电器的工作绕组和一侧制动绕组。(见图二 (a)) 这一电流分配关系，是应用迭加原理分析串联接线方案工作原理的基本条件。〔6〕

在发电机正常带负荷运行或在保护范围外部发生短路故障时，由于发电机同一相中各分支绕组的电流相等，故各互感器二次侧电流有效值均相等，即：

$$\dot{i}_1 = \dot{i}_2 = \dot{i}_3 = \dot{i}_4 = \dot{i}_5 = \dot{i}_6 = \dot{i}_7$$



图四

根据接线中各 LH 的极性，可以确定各电流互感器二次电流的正方向如图四所示。

运用迭加原理，可求得各电流继电器中的电流为：

$$I_{J1} = \frac{2}{3} \dot{i}_1 - \frac{1}{3} \dot{i}_2 - \frac{1}{3} \dot{i}_3 = 0$$

同理： $I_{J2} = I_{J3} = I_{J4} = I_{J5} = I_{J6} = 0$

故各电流继电器 1~6 J 均不会动作。

1、2、3 LH 送入 1CJ 的电流为：

$$I'_{c1} = \frac{1}{3} \dot{i}_1 + \frac{1}{3} \dot{i}_2 + \frac{1}{3} \dot{i}_3 = \dot{i}_1$$

4、5、6 LH 送入 1CJ 的电流为：

$$I''_{c1} = \frac{1}{3} \dot{i}_4 + \frac{1}{3} \dot{i}_5 + \frac{1}{3} \dot{i}_6 = \dot{i}_1$$

1CJ 制动电流 (考虑到  $2W_{c1} = W_c$ ) 为：

$$I_{zd} = \frac{1}{2} (I'_{c1} + I''_{c1}) = \dot{i}_1$$

1CJ 两翼电流在差动绕组中的电流和为：

$$I_{c1} = I'_{c1} - I''_{c1} = \dot{i}_1 - \dot{i}_1 = 0 = \dot{i}_{c1}$$

即差动继电器 1 CJ 工作电流为 0。

同理, 2CJ 制动电流为:

$$I_{zd} = \frac{1}{2} (I_C^{\prime} + \dot{I}_7) = \dot{I}_4$$

2 CJ 差动绕组中电流为:

$$I_{dz} = I_{C2} = \dot{I}_7 - I_{C''} = 0$$

因而, 在正常运行及外部短路时, 两差动继电器均不动作。

在并联方案接线中, 发电机中性点侧 LH 的变比按:  $K_P = \frac{1}{6} I_{(A)} / \frac{5}{3} A$  选择,

对于龙羊峡机组,  $K_P = 3000 A / 2 A$ , 其它参数同前。二次接线等值电路图如图五。

在发电机正常带负荷运行或在保护范围外发生短路时, 按 LH 在线路的极性联结方式, 将二次电流代入原理图中可得:

1、2、3 LH 送入差动继电器中的电  
流:

$$I_{C'} = \dot{I}'_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 = 3 \dot{I}'_1 = \dot{I}_1$$

4、5、6 LH 送入差动继电器中的电流:

$$I_{C''} = \dot{I}'_4 + \dot{I}'_5 + \dot{I}'_6 = 3 \dot{I}'_4 = \dot{I}_4$$

对差动继电器 1 CJ, 有:

$$\text{动作电流: } I_{dz} = I_{C'} - I_{C''} = 3 \dot{I}'_1 -$$

$$3 \dot{I}'_4 = 0$$

$$\text{制动电流: } I_{zd} = \frac{1}{2} (I_C^{\prime} + I_C^{\prime\prime}) = \dot{I}_1$$

因发电机出口侧 LH<sub>7</sub> 变比与中性点侧 LH<sub>1~6</sub> 的变比不同, 故有:

$$\dot{I}_7 = 3 \dot{I}'_1 = 3 \dot{I}'_2 = \dots = 3 \dot{I}'_6$$

对差动继电器 2 CJ, 有:

$$\text{动作电流: } I_{dz} = I_C^{\prime\prime} - \dot{I}_7 = 0$$

$$\text{制动电流: } I_{zd} = \frac{1}{2} (I_C^{\prime\prime} + \dot{I}_7) = \dot{I}_4$$

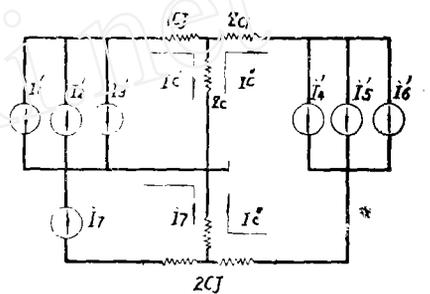
所以, 在正常运行和外部短路时, 差动继电器 1 CJ、2 CJ 均可靠制动, 这与前述串联方案的结论相同。

多次工业试验证明: 只要正确选择互感器的暂态饱和倍数, 当保护区外发生各种类型的短路故障时, 两种接线中的差动继电器均能可靠不误动。

由于两种接线方案中发电机中性点侧电流互感器的变比不同, 即:

$$K_C = \frac{1}{6} I_{(A)} / 5 A$$

$$K_P = \frac{1}{6} I_{(A)} / \frac{5}{3} A$$



图五

$$\text{令: } \frac{K_C}{K_P} = \frac{\frac{1}{6} I_c^{(A)} / 5^A}{\frac{1}{6} I_c^{(A)} / \frac{5}{3}^A} = \frac{1}{3} = K_B$$

$K_B$ 称为变比折算系数。

在使用标么值或一次电流有名值代入两种接线方式的原理图中比较保护装置的工况时，应对流经并联方案差动继电器的电流量乘以变比折算系数 $K_B$ 。

## 两种接线方案对各种短路故障的反应能力

为了分析保护接线在发电机处于最小运行方式下对各种短路故障的反应能力，设发电机在事故发生前为空载额定工况，且未与系统并列。

给定BCD—25型比率制动式差动继电器动作电流：

$$1 \text{ CJ: } I_{C1.dz} = 0.1 I_{c.2} \approx 0.5^A$$

$$2 \text{ CJ: } I_{C2.dz} = 0.3 I_{c.2} \approx 1.5^A$$

制动系数：

$$K_{zd} = 0.6$$

给定电流继电器动作电流：

$$I_{J.dz} = 0.1 I_{c.2} \approx 0.5^A$$

### (1) 匝间短路

当每相并联支路数 $n = 6$ ，发电机处于空载，在A相第一分支绕组内发生匝间短路时，故障电流分布情况如图六。

图六中： $\dot{I}_H$ ——短路匝内的短路环流。

$\dot{I}_{G1}$ ——健全分支绕组送入故障分支绕组的总故障电流。

$\dot{I}_{G2} \sim \dot{I}_{G4}$ ——各健全分支绕组电流。

$$\dot{I}_{G1} = \sum_{i=2}^6 \dot{I}_{Gi}$$

为定性讨论问题，设各健全分支绕组电势及电抗完全相等，即：

$$\dot{I}_{G2} = \dot{I}_{G3} = \dot{I}_{G4} = \dot{I}_{G5} = \dot{I}_{G6} = I_G$$

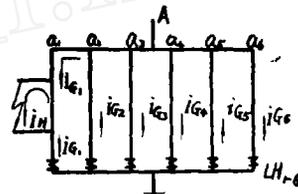
故  $\dot{I}_{G1} = 5 \dot{I}_G$

将上述电流代入两种差动原理接线图中进行比较：

(A)、串联方案

各继电器中电流：

$$I_{J1} = \frac{2}{3} \dot{I}_{G1} + \frac{1}{3} \dot{I}_{G2} + \frac{1}{3} \dot{I}_{G3} = 4 I_G$$



图六

$$I_{J2} = I_{J3} = \frac{1}{3} \dot{I}_{G1} + \frac{2}{3} \dot{I}_{G2} - \frac{1}{3} \dot{I}_{G3} = 2 I_G$$

$$I_{J4} = I_{G5} = I_{G6} = \frac{2}{3} \dot{I}_{G4} - \frac{1}{3} \dot{I}_{G5} - \frac{1}{3} \dot{I}_{G6} = 0$$

$$I_C' = -\frac{1}{3} \dot{I}_{G1} - \frac{1}{3} \dot{I}_{G2} - \frac{1}{3} \dot{I}_{G3} = I_G$$

$$I_C'' = \frac{1}{3} \dot{I}_{G4} + \frac{1}{3} \dot{I}_{G5} + \frac{1}{3} \dot{I}_{G6} = I_G$$

差动继电器制动电流:

$$1CJ: \quad I_{zd} = \frac{1}{2} (I_C' - I_C'') = 0$$

$$2CJ: \quad I_{zd} = \frac{1}{2} I_C'' = \frac{1}{2} I_G$$

差动继电器工作电流:

$$1CJ: \quad I_{dx} = I_C' + I_C'' = 2 I_G$$

$$2CJ: \quad I_{dx} = I_C'' = I_G$$

(B)、并联方案

$$I_C' = K_B (\dot{I}_{G1} - \dot{I}_{G2} - \dot{I}_{G3}) = K_B (5 I_G - 2 I_G) = I_G$$

$$I_C'' = K_B \cdot 3 I_G = I_G$$

差动继电器中电流:

$$1CJ: \quad I_{zd} = \frac{1}{2} (I_C'' - I_C') = 0$$

$$I_{dx} = I_C' + I_C'' = 2 I_G$$

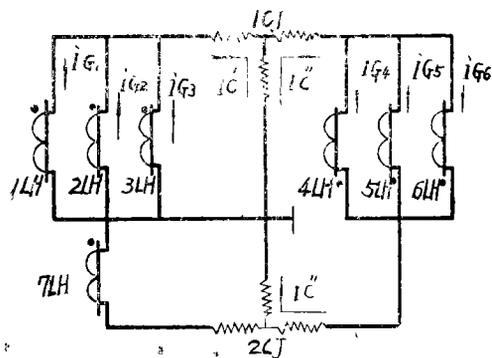
$$2CJ: \quad I_{zd} = \frac{1}{2} I_C'' = \frac{1}{2} I_G$$

$$I_{dx} = I_C'' = I_G$$

电流分布情况如图七所示。

由以上比较可知,在两种接线方案中差动继电器对匝间短路的反应能力完全相同,串联方案中与故障分支绕组对应的电流继电器的灵敏性比差动继电器好。

事实上,对于每一个具体的同步发电机,由于其定子绕组在定子槽内的分布情况各有差别,且当某一分支绕组内的部份绕组发生匝间短路时,短路环流  $\dot{I}_H$  及总故障电流  $\dot{I}_{G1}$  在电枢的部份位置上所产生的脉振磁场与主磁场叠加后,将使气隙合成磁场畸变,不再是对称的正弦磁场。此畸变后的气隙磁场,又会使它所涉及到的范围



图七

内其它相关分支绕组（包括非故障相中的相关分支绕组）的电势、电流发生变化，从而造成：

1) 故障相各健全分支绕组中送出的故障电流  $\dot{I}_{Gi}$  各不相同。

2) 非故障相中与故障绕组在几何位置上相邻的有关分支绕组将产生附加电势，从而使非故障相中各分支绕组的电势不再相等，分支绕组之间将产生环流。

当各健全分支绕组中的电流  $\dot{I}_{Gi}$  不相等时，两种接线方式中的差动继电器反应能力相同。现举630<sup>kW</sup>同步发电机试验数据为例，证明如下：

630<sup>kW</sup>同步发电机基本参数：

$$P_e = 630^{kW}, \quad u_e = 1000^V, \quad I_e = 404^A,$$

$$\cos\phi = 0.9, \quad n = 6, \quad (\text{并联支路数})$$

$$X_d = 0.938, \quad X_d'' = 0.174$$

差动保护用电流互感器参数：

$$\text{中性点侧：} 1 \sim 6 \text{ LH, } K_p = 300^A / 5^A, \text{ B级。}$$

$$\text{出口侧：} 7 \text{ LH, } K = 600^A / 5^A, \text{ D级。}$$

继电器整定值：

$$I_{1c.0.7z} = 0.5^A, \quad I_{2c.0.7z} = 1.5^A, \quad K_{zd} = 0.6$$

短路状况：A相第一分支绕组20%匝数短路，短路前机端电压  $u = 0.6ue$ 。（由于试验发电机与主变低压侧联接，有主变空载励磁电流  $\dot{I}_7$  流经7 LH。）A相短路电流分布情况如表1。

表1

| A相互感器序号                | 1     | 2    | 3     | 4     | 5     | 6    | 7     |
|------------------------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| 一次电流 (A)               | 115   | 21   | 15.7  | 22    | 24.3  | 38.4 | 6.4   |
| 串联方案 LH二次<br>电流计算值 (A) | 5.75  | 1.05 | 0.785 | 1.1   | 1.215 | 1.92 | 0.053 |
| 并联方案<br>LH二次电流 (A)     | 1.917 | 0.35 | 0.26  | 0.367 | 0.405 | 0.64 | 0.053 |

将表1中电流代入串联方案原理图中求解（忽略  $\dot{I}_7$ ），可得：

$$I_c' = \frac{1}{3} \times 5.75 - \frac{1}{3} \times 1.05 - \frac{1}{3} \times 0.785 = 1.307^{(A)}$$

$$I_c'' = \frac{1}{3} \times 1.1 + \frac{1}{3} \times 1.215 + \frac{1}{3} \times 1.92 = 1.412^{(A)}$$

差动继电器中电流，

$$1CJ, \quad I_{zd} = \frac{1}{2} (1.412 - 1.307) = 0.054^{(A)}$$

$$I_{dz} = I'_c + I''_c = 2.717A$$

$$I_{dz}/I_{zd} = \frac{2.717A}{0.054A} > 0.6, \text{ 继电器将动作。}$$

$$2 \text{ CJ: } I_{zd} = -\frac{1}{2} \times 1.412 = 0.706A$$

$$I_{dz} = I'' = 1.412A, \text{ 继电器将不动。}$$

将表1中电流代入并联方案原理图中求解(忽略 $\dot{I}_7$ )，可

得:

$$I_{c'} = 1.917 - 0.26 - 0.35 = 1.307A$$

$$I_{c''} = 0.367 + 0.405 + 0.64 = 1.412A$$

差动继电器中电流:

$$1 \text{ CJ: } I_{zd} = -\frac{1}{2} (1.412 - 1.307) = 0.053A$$

$$I_{dz} = I_{c'} + I''_c = 2.719A$$

$$I_{dz}/I_{zd} = 2.719A/0.053A > 0.6, \text{ 1 CJ动作。}$$

$$2 \text{ CJ: } I_{zd} = -\frac{1}{2} \times 1.412 = 0.706A$$

$$I_{dz} = I''_c = 1.412A, \text{ 2 CJ不动作。}$$

并联方案试验实测值:(录波图G13)

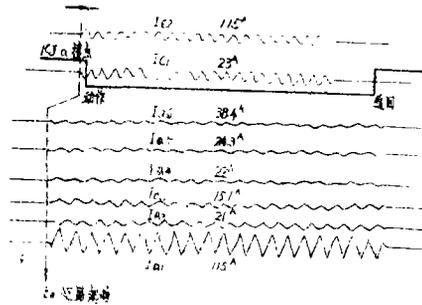
$$1 \text{ CJ: } I_{dz} = 2.3A, \text{ 已动作。}$$

$$2 \text{ CJ: } I_{dz} = 1.15A, \text{ 未动作。}$$

A相各分支绕组故障电流波形及差动继电器差动绕组工作电流波形如图八。

由以上分析可知,对于匝间短路,无论短路匝数及位置如何,两种接线方案中差动继电器的反应能力相同。

若不计及匝间短路时电枢绕组中的故障电流对气隙合成磁场的影响,则非故障分支电流的实用计算公式为:(3)



图八

$$I_G = \frac{\alpha E_f}{n(n-1)X_d'' \left\{ \frac{1}{n-1} + (1-\alpha)^2 \right\}} \quad (1)$$

又知1CJ动作电流为 $I_{dz} = 2I_G$ ,求得:

$$E_f = \frac{nX_d''}{2\alpha} I_{dz}(n-1) \left\{ \frac{1}{n-1} + (1-\alpha)^2 \right\} \quad (2)$$

根据式(2)作出的 $E_f = f(\alpha)$ 曲线,可求出在发电机电势 $E_f = E_{..f}$ 时保护的死区。

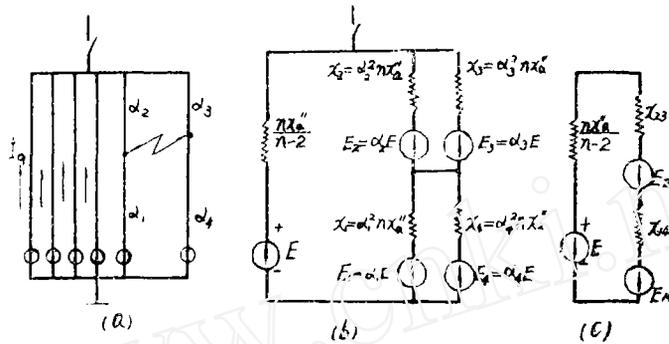
试验和计算分析表明:对于龙羊峡机组,当1CJ动作定值取为 $0.5A$ 时,串联、并

联两种接线方案中差动继电器对发电机定子绕组匝间短路都有6.5%的死区。

### (2) 同相不同分支绕组之间短路

分析证明, 在图九(a)中, 当 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 数值均较小时, 诸分支电流互感器中的电流也较小, 对差动继电器的可靠动作最不利。

为求取故障相各分支绕组内故障电流的大小, 根据戴维南定理将故障相作等值变换, 如图九(b)、(c)所示:



图九

求解图九电路可得:

$$X_{23} = \frac{\alpha_2^2 \cdot \alpha_3^2}{\alpha_2^2 + \alpha_3^2} n X_d'' \quad (3)$$

$$X_{14} = \frac{\alpha_1^2 \cdot \alpha_4^2}{\alpha_1^2 + \alpha_4^2} n X_d'' \quad (4)$$

$$E_{23} = \frac{\alpha_2^2 \alpha_3 + \alpha_3^2 \alpha_2}{\alpha_2^2 + \alpha_3^2} \cdot E \quad (5)$$

$$E_{14} = \frac{\alpha_1^2 \alpha_4 + \alpha_4^2 \alpha_1}{\alpha_1^2 + \alpha_4^2} \cdot E \quad (6)$$

每一健全分支绕组中的故障电流:

$$I_G = \frac{E - E_{23} - E_{14}}{\frac{n X_d''}{n-2} + X_{23} + X_{14}} \cdot \frac{1}{n-2} \quad (7)$$

绕组 $\alpha_1$ 中的电流:

$$I_{*1} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_4) E - (n-2) \alpha_4^2 n X_d'' I_G}{(\alpha_1^2 + \alpha_4^2) n X_d''} \quad (8)$$

绕组 $\alpha_4$ 中的电流:

$$I_{*4} = \frac{(\alpha_4 - \alpha_1) E - (n-2) \alpha_1^2 n X_d'' I_G}{(\alpha_1^2 + \alpha_4^2) n X_d''} \quad (9)$$

龙羊峡发电机有关参数:

$$n = 6, \quad E = 1.0, \quad X''_d = 0.2114$$

设 A 相第一支路对第二支路短路, 短路后各绕组匝数比为:

$$\alpha_1 = 0.85, \quad \alpha_2 = 0.15, \quad \alpha_3 = 0.05, \quad \alpha_4 = 0.95$$

根据 (3) ~ (9) 式求得:

$$X_{23} = 0.002854, \quad X_{14} = 0.509$$

$$E_{23} = 0.06, \quad E_{14} = 0.894$$

$$I_0 = 0.01386, \quad I_{z1} = -0.079, \quad I_{z4} = 0.02386$$

注意到前述计算方法中, 各分支 CT 变比为机端 CT 变比的 1/6, 则对于串联方案, 各分支绕组电流互感器二次电流标么值为:

$$\dot{i}_1 = 6 I_{z1} = -0.474$$

$$\dot{i}_2 = 6 I_{z4} = 0.1436$$

$$\dot{i}_3 = \dot{i}_4 = \dot{i}_5 = \dot{i}_6 = 6 I_0 = 0.08316$$

故有:

$$I'_c = \frac{1}{3} (\dot{i}_1 + \dot{i}_2 + \dot{i}_3) = 0.0824$$

$$I''_c = \frac{1}{3} (\dot{i}_4 + \dot{i}_5 + \dot{i}_6) = 0.083$$

差动继电器中电流:

$$1 \text{ CJ: } I_{zd} = 0, \quad I_{dz} = 0.166$$

$$2 \text{ CJ: } I_{zd} = 0.0415, \quad I_{dz} = 0.083$$

对于并联方案, 互感器二次电流:

$$\dot{i}_1 = 6 K_B \cdot I_{z1} = -0.158$$

$$\dot{i}_2 = 6 K_B I_{z4} = 0.0477$$

$$\dot{i}_3 = \dot{i}_4 = \dot{i}_5 = \dot{i}_6 = 6 K_B I_0 = 0.0277$$

差动继电器中电流:

$$1 \text{ CJ: } I_{zd} = 0, \quad I_{dz} = 0.166$$

$$2 \text{ CJ: } I_{zd} = 0.0415, \quad I_{dz} = 0.083$$

对照可知, 两种结线方案中, 差动继电器中的电流完全相同, 动作情况亦应相同。

630<sup>kV</sup>同步发电机同相不同分支绕组之间短路试验举例: (发电机参数同前)

短路状况: 发电机空载, A 相第一分支绕组对第二分支绕组短路, 短路匝数比为:

$$\alpha_1 = 0.8, \quad \alpha_2 = 0.2, \quad \alpha_3 = 0.4, \quad \alpha_4 = 0.6$$

试验电压: 0.65u。

保护为并联方案结线, LH 变比:  $K_p = 300^A / 5^A$ , 继电器定值:

$$I_{C1.dz} = 1.0A \quad I_{C2.dz} = 1.8A \quad K_{zd} = 0.6$$

按前述计算方法求得:

$$X_{23} = 0.0344, \quad X_{14} = 0.241$$

$$E_{23} = 0.156, \quad E_{14} = 0.437$$

$$I_C = 0.0266, \quad I_{a1} = 0.0862, \quad I_{a4} = -0.193$$

A相各分支绕组故障电流有名值:

$$\dot{I}_{A1} = 34.8A \quad \dot{I}_{A2} = -78A$$

$$\dot{I}_{A3} = \dot{I}_{A4} = \dot{I}_{A5} = \dot{I}_{A6} = 10.8A$$

若采用串联方案, 则各LH二次电流及继电器电流:

$$\dot{I}_1 = 0.517, \quad \dot{I}_2 = -1.157$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_4 = \dot{I}_5 = \dot{I}_6 = 0.159$$

$$I'_C = -0.16, \quad I''_C = 0.159$$

继电器工作电流:

$$1CJ: I_{dz} = I''_C - I'_C = 0.319$$

$$2CJ: I_{dz} = 0.159$$

由于二次侧基准电流有名值为  $\frac{404A}{6} \times \frac{5A}{100A} = 3.366A$ , 将继电器差动绕组工作

电流归算为有名值:

$$1CJ: I_{dz} = 0.319 \times 3.366^A = 1.074^A$$

$$2CJ: I_{dz} = 0.159 \times 3.366^A = 0.535^A$$

1CJ应动作, 2CJ应不动作。

在并联方案各LH二次侧电流及继电器内的电流:

$$\dot{I}_1 = K_B \cdot 6 I_{a1} = 0.172A$$

$$\dot{I}_2 = K_B \cdot 6 I_{a4} = -0.386$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_4 = \dot{I}_5 = \dot{I}_6 = K_B \cdot 6 I_C = 0.0536$$

$$I'_C = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = -0.16$$

$$I''_C = \dot{I}_4 + \dot{I}_5 + \dot{I}_6 = 0.16$$

$$1CJ: I_{dz} = 0.32 \quad I_{zd} = 0$$

$$2CJ: I_{dz} = 0.161 \quad I_{zd} = 0.0805$$

由于二次基准电流为  $3 \times \frac{1}{6} \times 404 \times \frac{5}{300} = 3.366A$ , 归算为有名值:

$$1CJ: I_{dz} = 0.32 \times 3.366 = 1.08A, \text{应动作。}$$

$$2CJ: I_{dz} = 0.16 \times 3.366 = 0.542A, \text{应不动。}$$

并联接线方案计算值与试验测量值的比较如下。

各分支绕组电流:

表2

| 分支绕组序号       | 1    | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    |
|--------------|------|-----|------|------|------|------|
| 计算值 (A)      | 34.8 | -78 | 10.8 | 10.8 | 10.8 | 10.8 |
| 示波图F13测值 (A) | 31.5 | -67 | 10   | 11   | 15.9 | 13   |

差动继电器差动绕组工作电流:

表3

| 差动继电器      |                         | 1 CJ<br>( $I_{dz}$ ) | 2 CI<br>( $I_{dz}$ ) |
|------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| 计算值 (A)    |                         | 1.08                 | 0.542                |
| 试验值<br>(A) | 由支路电流推算                 | 1.1                  | 0.76                 |
|            | 示波图 F <sub>13</sub> 测量值 | 1.08                 | 0.707                |
|            | 继电器接点工况                 | 已动作                  | 未动                   |

由以上计算值与试验值比较可知:

- ①再次证明同相不同分支绕组之间短路时, 故障电流造成的气隙合成磁场畸变, 使各健全分支绕组送出的故障电流不等。
- ②证明前述分支之间短路的计算方法能初步满足工程计算要求。
- ③并联方案的试验中, 两差动继电器工作绕组内电流的分布与计算值相近, 证明运用叠加原理求解新型差动保护接线中电流分布的方法是可行的, 因而也就证明了串、并两种接线方案对分支绕组之间短路故障的反应能力相同。

### (3)、相间短路

多分支绕组发电机内部发生相间短路故障时, 对于三相各个分支绕组内故障电流的分布情况, 目前尚无可供工程实用的计算方法。但在比较两种接线的差动保护性能的问题时, 我们可以认为:

- ①在发电机内部, 无论发生两相或三相短路时, 绝对多数情况是不对称短路, 多分支绕组尤其是这样。
- ②对于任何一种相间短路, 故障相中各分支绕组的故障电流总有一个对应的数值。如每相为六个分支绕组的发电机, 每一相中总有一组对应的故障电流  $\dot{I}_{1-6}$ , 将各相的

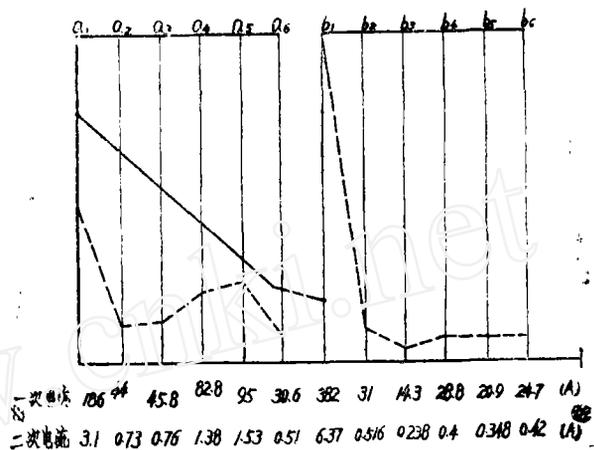
$i_{1..6}$  代入差动保护原理接线中，按前述方法求解，即可得到差动保护对该相间短路故障的反应能力。

既然(1)、(2)部份的分析已证明两种差动接线方案对一相中同一组故障电流的反应能力相同，则无论相间短路是对称的或是不对称的，无论每相各分支绕组中的电流分布如何错综复杂，只要按前述方法分别将每一相中各分支绕组的故障电流代入原理图中进行计算，总可得到两种差动接线中1CJ、2CJ的工作电流完全相等的结论。

现在应进一步证明的问题，仅是这种计算方法所得结论与实际短路时继电器的工作是否吻合。

举630kw同步发电机两相短路为例：

发电机参数及互感器参数、保护定值同前例，差动保护为并联接线方案。发电机未与系统并列。A相第一分支80%绕组对B相第一分支20%绕组发生金属性突然短路，(百分数指对中性点而言。)试验电压 $u_F = 0.65u_c$ ，示波图G<sub>25</sub>。



图十

各分支绕组及LH二次电流分布见图十所示。(试验测量值)

并联接线方案A、B两相差动继电器内工作电流分布及继电器动作情况见表4；

表 4

| 继电器                                    | 1CJ <sub>a</sub> | 2CJ <sub>a</sub> | 1CJ <sub>b</sub> | 2CJ <sub>b</sub> |
|--|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 计算值 (A)                                | 1.17             | 3.42             | 5.52             | 1.33             |
| 试验测量值 (A)                              | 1.37             | 3.08             | 5.6              | 1.11             |
| $(I_{测} - I_{计}) / I_{计} \times 100\%$ | 17               | -9.9             | 1.45             | -16.5            |
| 继电器动作情况                                | 动                | 动                | 动                | 动                |

计及测量误差(包括互感器测量误差和示波图测量误差)，由以上发电机内部短路时的试验值和计算值比较说明：用于计算并联接线方案差动保护中电流分布的方法是可行的。因此，对照本文前一部份对串、并联两种接线的分析情况，也同时说明在发电机内

部发生相间短路时，两种结线方案中差动继电器反应能力相同。

## 工程应用设计

串联结线方案中，电流继电器有以下一些功能：

- 1、能反应气隙偏移。
- 2、对匝间短路有较高的灵敏度，且能反映具体的故障分支绕组。
- 3、也能反应某些相间故障。

实用意义：

1、龙羊峡发电机定子为波绕组，每一分支绕组分布在定子总槽数的74%范围内，因此，当发电机发生气隙偏移时，电流继电器反应能力不强。且因发电机为刚性机座，发生稳定的位移性不对称气隙偏移的可能性不大。同时，由于每一分支绕组分布范围很宽，即使继电器指示出故障分支绕组，对检修的意义也不大。

2、串联结线方案在丹江口电站二号机上进行工业试运行中，当保护范围外发生三相短路时，电流继电器曾经误动作。

3、电流继电器数量太多（龙羊峡电站仅用于发故障信号时，每台机须用18只；若同时用于跳闸和信号，则每台机须36只。）将使二次结线甚为复杂，同时每台机多增设一面保护屏，对运行、维修不便。

据考察、美国大古力61.5万瓩水轮发电机采用串联结线方案差动保护后，每个分支绕组中性点侧电流互感器二次侧对应联接两只定值不同的电流继电器，高定值用于跳闸，低定值用于发故障信号。三相差动保护结线中共有60只电流继电器，占屏三面。每当机组启动带负荷后，由于定子铁芯温度在渐升过程中造成的气隙变化使该电流继电器发生误动，致使在运行初期带负荷的30分钟内不得不将电流继电器出口解除。

在我国，串联方案曾做过两次工业试验和一次工业试运；并联方案只进行过一次工业试验，但将历次试验综合评价，并联方案在630kw发一变组中三相同时进行了近百次各种性质不同的短路试验，其故障考验机率并不比串联方案少。

综合以上分析，可以认为：两种新型差动保护方案，都能构成实用的多分支绕组、中性点小电流引出发电机的主保护，它们对发电机内部各种短路事故的反应能力相同。鉴于并联方案的结线简单明晰，少用数十只电流继电器，它所用电流互感器，在外部短路的暂态过程中，其暂态特性比较易于满足要求，因此，在龙羊峡发电机的主保护施工设计中，采用了并联结线的新型差动保护方案。

### 参考文献：

- 〔1〕《晶体管型保护继电器原理》 清华大学等编
  - 〔2〕《大型机组继电保护理论基础》 王维俭 侯炳鑫 编
  - 〔3〕《电力系统》 南京工学院主编
- （下转第30页）

置不需要做修改。

2：相位比较法测量振荡中心电压不受运行方式变化、阻抗角不均匀、电势不相等因素的影响，可以紧紧跟踪振荡中心电压。

3：这种方法不仅可用于系统稳定控制装置中，也可用于监视系统电压崩溃，需要监视系统功角的保护装置中。

4：在用微机实现的系统稳定控制装置中，相位比较法测振荡中心电压方法更为简单、补偿角更便于调整。

本文曾蒙冯载生老师热情指导，谨此致谢。

---

(上接第23)

(4) 《多支路发电机新型继电保护系统的工业试验》 李蒙 《继电器》

1979年1期

(5) 《电力系统继电保护》 天津大学

(6) 《龙羊峡电站32万千瓦发电机及发电机—变压器新型主保护的设计与分析》

李振华《电站设备自动化》82—1

(7) 《龙羊峡电站发电机—变压器组新型大差动保护试验报告》

西北勘测设计院 东方电机厂 1982.7

---

(上接封三页)

号送入译码器，使之译码打印。在时间打印完了之后，第2片5G658的“9”端输出，使 $HF_1$ 为“1”， $HF_2$ 为“0”。则下一循环，打印“空格”、“百位”、“拾位”、“个位”。每一个循环打印完了之后，均把5G658清零，且把RS触发器置零。这样，须待打印地址与测点地址相符之后，TC为“1”，开始下一个测点打印。 $YF_1$ 处加入停机的信号，是保证打印机处于停机状态时没有干扰信号进入计数器的输入端，从而引起字头的晃动。

输出功放电路是使送到打印机的控制信号具有一定的驱动能力。

自调自检电路使打印系统在不与主机发生联系的情况下，可以独立进行调试。当在运行中出现故障时，也可以脱离主机，方便地进行检查。

ZYD—50综合运动装置打印系统稳定可靠，抗干扰能力较强，调试、维修方便。以国内某电厂三个月的运行记录表明，在三个月昼夜连续运行的情况下，除打字机本身有几次轻微的错位、发卡等故障，电路本身未发现任何故障。可以代替厂站操作人员每天繁重的抄表任务。