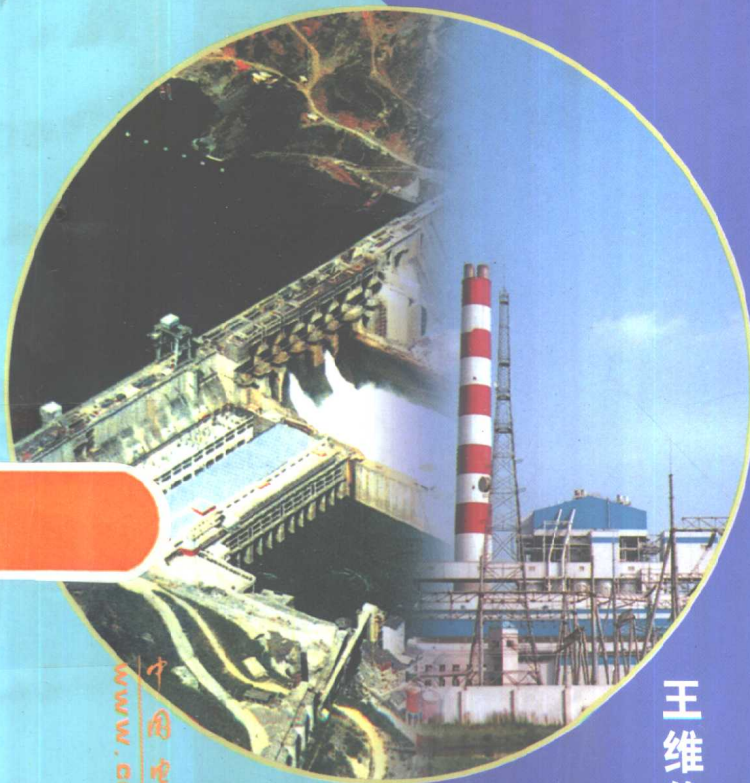


发电机变压器继电保护整定算例

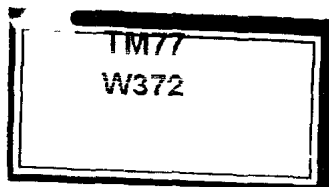
王维俭 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



187647



发电机变压器继电保护整定算例

王维俭 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

中华人民共和国电力行业标准 DL/T 684—1999《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》已出版发行，它对发电机和变压器继电保护的定值整定工作必将起到规范化的作用。本书是为配合上述导则的推广应用而编写的。

本书根据我国一个大型火电厂和一个大型水电厂的实际情况，按照它们已配置的发电机变压器继电保护装置和上述导则的要求，完成保护定值的整定计算工作，以便发电厂和变电所的有关技术人员能有所借鉴。第一章介绍国产 650MW、20kV 汽轮发电机，750MVA、 $515 \pm 2 \times 2.5\%$ /20kV 升压变压器和厂用变压器的微机型继电保护装置 (WFB-100) 的定值整定工作。第二章介绍 550MW、18kV 水轮发电机，642MVA、550/18kV 升压变压器和厂用变压器、励磁变压器的微机型继电保护装置 (GTUPS) (均为引进设备) 的定值整定工作。

本书可供电力系统继电保护运行、设计、调试、工作人员及有关技术管理人员阅读，亦可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

发电机变压器继电保护整定算例/王维俭编著. —北京: 中国电力出版社, 2000. 10

ISBN 7-5083-0344-X

I. 发… II. 王… III. IV.

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1998) 第 0000 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

黎园印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2000 年 7 月第一版 2000 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 32 开本 4.5 印张 98 千字

印数 0001—5000 册 定价 8.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

前 言

为了促进中华人民共和国电力行业标准 DL/T 684—1999《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》(以下简称《导则》)的正确应用,本书结合一座大型火力发电厂(单机 650MW、20kV)和一座水力发电厂(单机 550MW、18kV)的实际设备情况,按照《导则》的原则意见,进行了发电机、变压器(包括升压变压器、厂用变压器、励磁变压器)继电保护的全套整定计算工作。本书在编写过程中,得到了二滩水电开发有限责任公司领导的重视和技术人员的密切合作、许昌继电器研究所主设备保护研究室和华东电力设计院有关同行的大力配合,使本书能早日与读者见面,在此对上述单位和有关同志深表谢意。

由于作者水平所限,错误和不当之处在所难免,恳请读者不吝指正。

为了本书能尽快出版,清华大学电机工程与应用电子技术系孙宇光和桂林两位博士生拨冗审阅了书稿,并对一些复杂的计算数据作了繁重的审核工作,对他们认真严谨的工作态度,表示由衷的感谢!

作者 **王维俭**

2000年5月于北京

目 录

前言

第一章 大型汽轮发电机变压器继电保护定值整定

第一节	原始资料	1
第二节	发电机和变压器内部故障计算	2
第三节	发电机内部故障主保护之一——比率制动式完全纵差保护	3
第四节	发电机内部故障主保护之二——标积制动式完全纵差保护	7
第五节 ^①	发电机不完全纵差保护	9
第六节	纵向基波零序电压保护	16
第七节	故障分量负序方向保护	20
第八节 ^①	高灵敏单元件横差保护	22
第九节 ^①	三元件裂相横差保护	26
第十节	定子绕组单相接地保护	32
第十一节	励磁回路接地保护	42
第十二节	低励失磁保护	45
第十三节	失步保护	49
第十四节	发电机转子表层负序过负荷 (负序电流反时限)保护	51

^① 所讨论的发电机未装设这些保护, 但为整定计算的充分全面, 增设此 3 种保护。

第十五节	变压器纵差保护	54
第十六节	其他异常运行保护	60
第十七节	发电机变压器后备保护	66

第二章 大型水轮发电机变压器继电保护定值整定

第一节	原始资料和基本参数	69
第二节	发电机标积制动式完全纵差保护	70
第三节	发电机标积制动式不完全纵差保护	72
第四节	主变压器纵差保护 (一)	79
第五节	主变压器纵差保护 (二)	84
第六节	厂用高压变压器纵差保护	85
第七节	励磁变压器纵差保护	88
第八节	高灵敏双元件横差保护	88
第九节	后备阻抗保护	93
第十节	定子绕组单相接地保护 (一)	94
第十一节	定子绕组单相接地保护 (二)	100
第十二节	主变压器后备接地保护	105
第十三节	发电机失磁保护	106
第十四节	发电机失步保护	114
第十五节	自并励发电机后备过流保护	118
第十六节	异常工况保护	123

附录 A	汽轮发电机定子绕组在定子槽中 的分布	130
附录 B	发电机定子绕组内部故障分析 计算用原始资料	133
附录 C	失步保护中功角 δ 的近似测量	136
参考文献	138

第一章

大型汽轮发电机变压器 继电保护定值整定

第一节 原始资料

1. 发电机 QFSN-650-2 (水、氢、氢)

$U_n = 20\text{kV}$; $I_n = 20873\text{A}$; $P_n = 650\text{MW}$; $\cos\varphi_n = 0.9$; $I_{fd0} = 1480\text{A}$; $I_{fdn} = 4503\text{A}$; $X''_d = 0.222$ (饱和值) 0.241 (不饱和值); $X'_d = 0.326$ (不饱和值); $X'_q = 0.474$ (不饱和值); $X_d = 2.335$ (不饱和值); $X_q = 2.276$ (不饱和值); $X_2 = 0.220$ (饱和值); $p = 1$; $a = 2$; $\delta = 93\text{mm}$; $D_1 = 1316\text{mm}$; $Z_1 = 42$; 转子分度数/齿数 = $48/32$ 。

其他为内部短路分析用的资料, 详见附录 B。

2. 主变压器

$S_n = 3 \times 250\text{MVA}$; $515 \pm 2 \times 2.5\%/20\text{kV}$; $U_k\% = 13.5\%$; YN, d11。

3. 常规岛厂用变压器

$S_n = 42/21 - 21\text{MVA}$; D, y, y; $20^{+3}_1 \times 2\%/6.3\text{kV}$; $U_k = 0.14$ 。

4. 核岛厂用变压器

$S_n = 50/25 - 25\text{MVA}$; $20^{+3}_1 \times 2\%/6.3\text{kV}$; D, y, y; $U_k = 0.16$ 。

5. 高压备用厂用变压器

$S_n = 31.5 \text{ MVA}$; $220 \pm 8 \times 1.25\% / 6.3 \text{ kV}$; YN, y ; $U_k = 0.0835$ 。

6. 系统接线 (图 1-1)、电流互感器和中性点接地方式

该厂发电机变压器主接线如图 1-1 所示, 图中同时表达了主要保护用电流互感器的配置和发电机中性点接地方式。

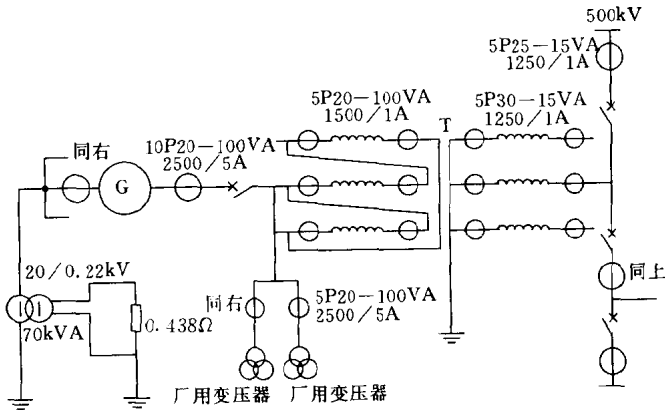


图 1-1 系统接线图

7. 系统等值电抗 (包括升压变压器)

给定机端三相最小短路电流 7.166, 又知 $X'_d = 0.222$, 发电机供给电流为 $1/0.222 = 4.5$, 所以等值系统最大电抗为 $1/(7.166 - 4.5) = 0.375$ ($S_B = 722 \text{ MVA}$)。

第二节 发电机和变压器内部故障计算

发电机定子绕组内部故障计算分两种运行方式, 即

- 1) 单机 (不并网) 空载, $I_{fd} = I_{fd0}$;
- 2) 并网运行, 额定负载, $I_{fd} = I_{fdn}$ 。

每种运行方式下进行 5 种内部短路计算：

(1) 同相不同分支间匝间短路(无同相同分支匝间短路)2 种,其中一种是短路匝数最少的;另一种是短路匝数最多的。

(2) 不同相间的相间短路 3 种,其中包含最少短路匝数的。

对额定负载的运行方式,增加一个分支开焊的故障。

变压器内部故障计算尚在研究中。

第三节 发电机内部故障主保护之一—— 比率制动式完全纵差保护

1. 保护功能

对发电机定子绕组及其端部引线的相间短路有灵敏的保护作用,但对定子绕组的同相匝间短路和分支绕组开焊故障毫无反应。

2. 定值整定 (图 1-2)

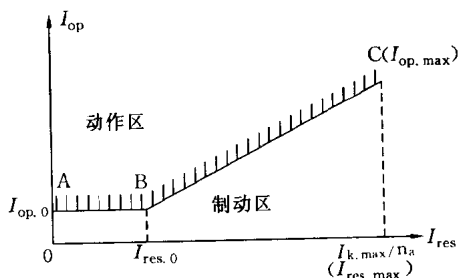


图 1-2 比率制动特性

(1) 最小动作电流 $I_{op,0}$ 。

纵差保护的两侧电流互感器均为 10P20-100VA、25000/5A,这类互感器在额定二次负荷(100VA,实际要比

100VA 小得多)下,当一次电流小于 $1.2 \times 25000 = 30000(\text{A})$ 时(发电机额定电流为 20873A),误差不超过 $\pm 3\%$,因此选取 $I_{\text{op.0}} = 10\% I_n / n_a$ (n_a ——互感器变比),即 $I_{\text{op.0}} = 20873 \times 0.1 \times 5 / 25000 = 0.42 (\text{A})$ 。

(2) 制动特性拐点电流 (最小制动电流 $I_{\text{res.0}}$)。

按互感器的误差特性,当一次电流大于 30000A 时,误差开始大于 $\pm 3\%$,就要求有制动特性。

实际取比率制动特性拐点为 20873A,即

$$I_{\text{res.0}} = 20873 \times 5 / 25000 = 4.2 (\text{A})$$

(3) 最大制动系数 $K_{\text{res.max}}$ 和折线 \overline{BC} 的斜率 S 。

发电机机端三相短路时有最大外部短路电流 $I_{\text{k.max}}$ 为

$$I_{\text{k.max}} = 1 / X_d'' = 1 / 0.222 = 4.5$$

即

$$I_{\text{k.max}} = 4.5 \times 20873 = 93929(\text{A})$$

$I_{\text{k.max}}$ 是互感器一次额定电流 25000A 的 3.76 倍,已知该互感器为 10P20-100VA,所以即使二次负荷有 100VA (实际远小于 100VA),一次电流达 $20 \times 25000 = 500000 (\text{A})$ 时误差也不超过 10% ,今最大外部短路电流还不到 100000A,而且两侧互感器完全同型,差动回路不平衡电流不可能达到 $I_{\text{k.max}} / n_a$ 的 10% ,即最大不平衡电流 $I_{\text{unb.max}}$ 为

$$I_{\text{unb.max}} \leq 0.1 \times K_{\text{cc}} \times 93929 \times 5 / 25000 = 0.94 (\text{A})$$

式中:互感器同型系数 $K_{\text{cc}} = 0.5$ 。

选取

$$I_{\text{op.max}} = K_{\text{rel}} K_{\text{ap}} I_{\text{unb.max}} = 1.5 \times 2 \times 0.94 = 2.82 (\text{A})$$

式中 K_{rel} ——可靠系数, $K_{\text{rel}} = 1.3 \sim 1.5$;

K_{ap} ——周期分量系数, $K_{\text{ap}} \approx 2$ 。

且有 $I_{\text{res.max}} = I_{\text{k.max}} / n_a = 93929 \times 5 / 25000 = 18.8 (\text{A})$

$$\text{则} \quad K_{\text{res. max}} = I_{\text{op. max}} / I_{\text{res. max}} = 0.15$$

因此有比率制动特性的斜率 S 为

$$\begin{aligned} S &= (I_{\text{op. max}} - I_{\text{op. 0}}) / (I_{\text{res. max}} - I_{\text{res. 0}}) \\ &= (2.82 - 0.42) / (18.8 - 4.2) = 0.164 \end{aligned}$$

应该注意到所选用的 P 级互感器没有考虑暂态工况下的误差问题。众所周知，外部短路时一定伴随暂态非周期分量电流，后者将使互感器易于饱和，其误差不再限于 $K_{\text{ap}} \times 10\%$ ，两侧互感器虽然同型，但决非在暂态特性上保持一致。为此实取

$$S = 0.30$$

3. 灵敏度校核

按继电保护规程，采用发电机孤立运行、机端两相金属性短路电流来校验纵差保护灵敏度，实际上这是不必要的，因为比率制动式纵差保护在机端两相短路时（ \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 正向定义为穿越性）有

$$\text{差动电流 } I_d = |\dot{I}_1 - \dot{I}_2| = |\dot{I}_1| \quad (\text{发电机单机空载, } I_2 = 0)$$

$$\text{制动电流 } I_{\text{res}} = \frac{1}{2} |\dot{I}_1 + \dot{I}_2| = \frac{1}{2} |\dot{I}_1|$$

而纵差保护的动作为

$$\begin{aligned} I_{\text{op}} &= I_{\text{op. 0}} + S(I_{\text{res}} - I_{\text{res. 0}}) = 0.1 + 0.3(0.5|\dot{I}_1| - 1) \\ &= 0.15|\dot{I}_1| - 0.2 \end{aligned}$$

$$\text{因此有} \quad K_{\text{sen}} = I_d / I_{\text{op}} = |\dot{I}_1| / [0.15|\dot{I}_1| - 0.2]$$

$$\text{今 } I_1 = 0.866 / 0.222 = 3.9 \quad (I_K^{(2)} = 0.866 I_K^{(3)})$$

$$\text{则} \quad K_{\text{sen}} = 3.9 / (0.15 \times 3.9 - 0.2) = 10.1 \gg 2$$

所以采用比率制动式纵差保护时，机端两相金属性短路一定灵敏动作，用不到作灵敏度校核。但是当发电机定子绕组发生相间短路时，送入纵差保护的发电机中性点侧相电流

比率制动式完全纵差保护(单机空载)

表 1-1

定子绕组内部故障的类型	A 相				B 相				C 相			
	$I_d(A)$	$I_{res}(A)$	$I_{op}(A)$	K_{sen}	$I_d(A)$	$I_{res}(A)$	$I_{op}(A)$	K_{sen}	$I_d(A)$	$I_{res}(A)$	$I_{op}(A)$	K_{sen}
	同相不同 支路间的 匝间短路	0	0	2084.9	0	0	2084.9	0	0	0	2084.9	0
相间短路	a1分支14.29%对 a2分支42.86%处	0	0	2084.9	0	0	2084.9	0	0	2084.9	0	0
	a1分支85.71%对 a2分支57.14%处	0	0	2084.9	0	0	2084.9	0	0	2084.9	0	0
	a1分支14.29%对 c1分支71.43%处	27171	13585	2084.9	13.03	0	2084.9	0	27171	13585	2084.9	13.03
	a1分支42.86%对 c1分支100.0%处	18457	9228.7	2084.9	8.853	0	2084.9	0	18457	9228.7	2084.9	8.853
a1分支57.14%对 a1分支中性点处	36731	18365	2084.9	17.62	0	2084.9	0	36731	18365	2084.9	17.62	

注 $I_{op}=0.1, I_n=2084.9A$.

比率制动式完全纵差保护(故障前在额定负载下联网运行)

表 1-2

定子绕组内部故障的类型	A 相				B 相				C 相			
	$I_d(A)$	$I_{res}(A)$	$I_{op}(A)$	K_{sen}	$I_d(A)$	$I_{res}(A)$	$I_{op}(A)$	K_{sen}	$I_d(A)$	$I_{res}(A)$	$I_{op}(A)$	K_{sen}
	同相不同 支路间的 匝间短路	0	12294	2084.9	0	0	25589	3506.8	0	0	20594	2084.9
相间短路	a1分支14.29%对 a2分支42.86%处	0	26856	3886.9	0	19611	2084.9	0	0	14004	2084.9	0
	a1分支85.71%对 a2分支57.14%处	0	26856	3886.9	0	19611	2084.9	0	0	14004	2084.9	0
	a1分支14.29%对 c1分支71.43%处	1.20E+5	25161	3378.5	35.49	0	10231	2084.9	0	1.20E+5	26164	32.59
	a1分支42.86%对 c1分支100.0%处	1.15E+5	11872	2084.9	55.33	0	8940.8	2084.9	0	1.15E+5	20805	55.33
a1分支57.14%对 a1分支中性点处	1.38E+5	41832	8379.8	16.41	0	12891	2084.9	0	1.38E+5	38991	7527.4	18.27
一支路 开焊	0	39754	7756.3	0	0	31476	5273	0	0	13022	2084.9	0

和机端三相电流不一定很大，特别是根据发电机定子绕组在定子铁心上的分布、绝缘损坏形成相间短路、短路匝数很少且位于中性点侧附近时，两侧短路电流相位可能呈现外部短路穿越性电流相位特征，是有可能拒动的。因此对于这种巨型汽轮发电机组有必要作深入的内部短路分析，并计算相应的灵敏系数。

4. 发电机定子绕组内部故障及纵差保护灵敏度计算

为了确切了解发电机内部故障（包括相间、匝间短路和分支绕组开焊），可使用清华大学电机系开发的“多回路分析”软件^①，根据该电机定子同槽上下层线棒的实际分布，对上下层线棒间绝缘损坏时发生的各种短路作如下短路计算和灵敏度分析，结果如表 1-1 和表 1-2 所示。

从以上计算结果可清楚地知道：

(1) 比率制动式完全纵差保护对定子绕组内部相间短路灵敏度很高。

(2) 这种保护方案对定子绕组的同相匝间短路（同槽上下层线棒属同相的槽数约占总槽数之半）和分支开焊故障不起保护作用，完全证实理论上的看法。

第四节 发电机内部故障主保护之二——

标积制动式完全纵差保护

1. 标积制动式（完全）纵差保护原理

差动电流

^① 为普及发电机内部短路计算方法，该软件将向社会开放，可委托清华大学电机系代为计算，或要求转让软件。

$$I_d = |\dot{I}_1 - \dot{I}_2|$$

制动电流

$$I_H = \sqrt{I_1 I_2 \cos \alpha}$$

当 $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时, $\cos \alpha > 0$, $I_H \neq 0$; 当 $90^\circ < \alpha < 270^\circ$ 时, $\cos \alpha < 0$, 此时令 $I_H = 0$, 即无制动, 保护动作与否完全决定于 I_d 是大于还是小于 $I_{op.0}$ 。

纵差保护的動作电流 I_{op} 为

$$I_{op} = S(I_H - I_{H0}) + I_{op.c}, \text{ 当 } I_H > I_{op.0}/S$$

式中 S ——图 1-3 中直线 BCE 的斜率, 一般 $S = 0.25$ 。

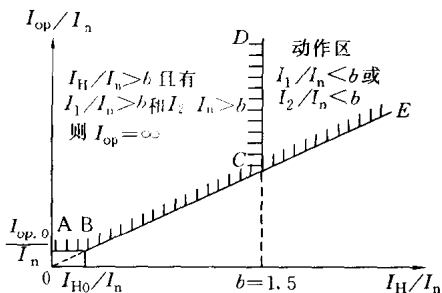


图 1-3 标积制动式纵差保护动作特性

一般情况下, 外部短路时两侧电流相位差 α 的 $\cos \alpha > 0$, 制动电流 I_H 很大, 差动电流 I_d (不平衡电流) 很小, 保护可靠不动作。如果外部短路电流非常大, 电流互感器严重饱和, 这时只要有 $I_H/I_n > b$ 、 $I_1/I_n > b$ 和 $I_2/I_n > b$, 动作特性改成 ABCD, 即 $I_{op} = \infty$, 保护绝不误动。若 $b = 1.5$, 意即 $I_H > 1.5I_n$ 、且 $I_1 > 1.5I_n$ 和 $I_2 > 1.5I_n$ 时, 不管互感器是否饱和, 保护已可靠制动, 所以这种保护对电流互感器要求不高, 完全不需要采用 TP 级互感器, 不必担心在外部短路的暂态过程中, 由于互感器的饱和, 使不平衡电流 (差动电流) 增大、制动电流 (I_1 和 I_2 二次电流) 减小而造成保护误动。

在定子绕组内部短路（特别是极对数多、每相并联分支多的水轮发电机）时，虽然大多数情况下有 $\cos\alpha < 0$ ，从而制动电流 $I_H = 0$ ，保护灵敏动作；但是在个别情况下，内部短路时可能有流出电流，出现 $\cos\alpha > 0$ 的特例， $I_H \neq 0$ ，且 $I_H > 1.5I_n$ ，如果流出电流 I_2 大于 $1.5I_n$ （另一侧短路电流 I_1 也大于 $1.5I_n$ ），则纵差保护动作电流 $I_{op} = \infty$ ，保护势必拒动。问题的关键在于：当定子绕组内部短路且有流出电流 I_2 ($\cos\alpha > 0$) 时，同时出现 $I_2 > 1.5I_n$ 的可能性有多大？我们已经发现水轮发电机内部故障时存在这种可能性，为此而重新整定 b 值，使之不出现 $I_2 > bI_n$ ，但是迄今为止，尚未发现大型汽轮发电机有这种情况。

2. 标积制动式（完全）纵差保护的定值

- (1) $I_{op.0} = 0.10I_n$ ，即 $I_{op.0} = 0.42A$ 。
- (2) $S = 0.25$ （同意 ABB 公司推荐数据）。
- (3) $b = 1.5$ （同意 ABB 公司推荐数据）。

3. 灵敏度校核

机端两相金属性短路时的灵敏度免校，因为这时 $\cos\alpha < 0$ ， $I_H = 0$ ，保护灵敏动作。

第五节 发电机不完全纵差保护

一、问题的提出

前面讨论的完全纵差保护只反应相间短路，根本不能保护匝间短路和分支绕组开焊。

二、不完全纵差保护的定义和基本概念

如图 1-4，互感器 TA1 和 TA2 组成发电机不完全纵差保

护，它与完全纵差保护的差别仅在于中性点侧互感器不反应全相电流，对于每相两并联分支的汽轮发电机，TA1只反应一相电流的50%。

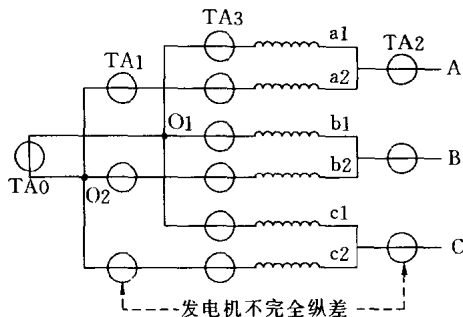


图 1-4 发电机不完全纵差保护

完全纵差保护在发电机定子绕组匝间短路（或分支开焊）时，无论短路匝电流多大，纵差保护两侧电流恒相等，差动电流理论上为零，纵差保护一定不动作。

不完全纵差保护则不然，当定子绕组同相不同分支（例如 a1 与 a2 之间）发生匝间短路，或同相同分支（例如 a1 分支）发生匝间短路，或者分支（例如 a1）开焊，或者不同相分支间发生相间短路（例如 b1 与 c1 之间短路）时，不完全纵差保护均可能灵敏动作。a1、b1、c1 三个分支没有接互感器，纵差保护如何反应它们的故障？这是因为依靠各分支绕组之间的互感，使装互感器的 a2、b2、c2 诸分支有互感电动势，在 TA1 中流过感应电流，后者促成不完全纵差保护动作。

三、不完全纵差保护的定值整定

与传统的完全纵差保护一样，也有两种不完全纵差保护，即比率制动式和标积制动式，分述如下。

1. 比率制动式不完全纵差保护的定值

与第三节之2基本一致，但应考虑不完全纵差保护两侧互感器可能不同型，因为机端互感器变比为 $I_n/5A$ 或 $I_n/1A$ ，中性点侧互感器变比则为 $0.5I_n/5A$ 或 $0.5I_n/1A$ ；对于微机保护，也可统一采用 $I_n/5A$ 或 $I_n/1A$ ，然后由软件调平衡。

当比率制动式纵差保护的两侧互感器不同型时，保护定值为

(1) $I_{op.0} = 10\%$ ，即 $I_{op.0} = 0.42A$ 。因为在负荷状态下，互感器的不同型不会造成不平衡电流的额外增大。

(2) $I_{res.0} = 4.2A$ ，不变。

(3) 考虑两侧互感器不同型， $K_{cc} = 1$ ，则有

$$I_{op.max} = 5.64A, K_{res.max} = 0.30$$

$S = (5.64 - 0.42) / (18.8 - 4.2) = 0.358$ (实取 $S = 0.40$)

2. 标积制动式不完全纵差保护的定值

(1) $I_{op.0} = 0.1I_n/n_a$ ，即 $I_{op.0} = 0.42A$ 。

(2) $b = 1.5$ 。

(3) $S = 0.25$ 。

四、比率制动式不完全纵差保护在内部故障时的灵敏度

比率制动式(分支1)不完全纵差保护灵敏度如表1-3和表1-4所示。

从表1-3和表1-4可知，比率制动式不完全纵差保护对匝间短路、相间短路均有很高的灵敏度，特别是在额定负荷条件下一个支路开焊故障时，不完全纵差保护也能灵敏动作。当然比率制动式纵差保护对互感器有较高的要求，以免在外部短路暂态过程中产生误动作。