

苏联电机技术

(电机一般问题分册)

东方电机厂

四川东方大电机研究所

苏联电机技术

（电机一般问题分册）

编辑：马国珩

审定：傅自清

前 言

苏联“电力”电机制造联合公司（ПЭО）的代表团曾于1988年2月访问哈尔滨电机厂及哈尔滨大电机研究所。访问期间，双方交换了科技出版物，我方赠给苏方历年出版的《大电机技术》，苏方赠给我方1960～1989年出版的第20～37期《电力文集》。

“电力”电机制造联合公司是苏联最著名的列宁格勒“电力”厂与科研院所、运行部门和高等院校于60年代实现横向联合的实体，几十年来，它为发展苏联电机工业并使其达到世界先进水平做出了重大贡献。

《电力文集》属于厂、公司内部的不定期出版物，不对外发行。在过去的30年期间，我国没有这种刊物的馆藏，这次苏联赠送的《电力文集》是国内唯一的版本。它的特点是文字简练，图文并茂，内容具体，实用性强。它全面而又真实地反映了苏联电机工业在科研、设计、制造、运行、试验等各个领域的经验，对我们很有参考价值。

现在，哈尔滨大电机研究所与四川德阳东方电机厂已将这些《电力文集》选译出版，书名是《苏联电机技术》，分为5个分册，即：①水轮发电机；②汽轮发电机；③交直流电机；④电机一般问题；⑤新工艺新材料。其中水轮发电机和电机一般问题2分册由东方电机厂负责翻译、出版及发行，其余3个分册由哈尔滨大电机研究所负责翻译、出版及发行。

《电机一般问题》分册在出版过程中，曾得到傅自清、熊家驹等各位专家的帮助，特在此表示衷心感谢。

由于我们水平有限，不妥之处在所难免，恳请读者批评指正，不胜感激。

目 次

同步电机绕组内部短路时电流的实用计算方法	
..... В.В.Домбровский (1)	
具有两条并联支路的二极汽轮发电机定子绕组中匝间短路时均衡电 流的计算方法.....	Г.М.Хуторецкий (11)
同步电动机在非正弦电源电压下的电流与转矩	М.В.Пронин等 (15)
水轮发电机短路时磁路的饱和	Г.Б.Гофман (20)
转子磁极不均匀配置的计算.....	Г.Б.Пинский (24)
凸极同步电机的电抗	Ю.Л.Цирлин (27)
隐极电机的保梯电抗.....	Г.М.Хуторецкий (33)
无负载同步电机的电抗研究.....	Ю.Л.Цирлин (39)
具有大气隙的汽轮发电机的差漏抗.....	Г.М.Хуторецкий (47)
大型电机定子绕组附加损耗的确定.....	А.А.Сорокина (50)
试验确定阻尼绕组中的电流和极靴中的附加损耗	Б.М.Гиндин等 (58)
水轮发电机通风计算的新方法.....	С.А.Владимирский等 (64)
增大凸极同步电机转子绕组冷却表面的方法	Я.Б.Финкельштейн等 (70)
TBB-1000-4y3型汽轮发电机定子绕组线棒发热的试验研究	П.В.Ошурков等 (75)

内冷绕组不稳定温度的研究.....	Э.И.Гуревич等	(79)
电机通风研究用的量热法流量计.....	Э.И.Гуревич等	(87)
电机的空气动力噪声及抑制方法.....	В.Н.Слита等	(91)
克拉斯诺雅尔斯克电站水轮发电机的电磁和发热试验		
.....	Б.М.Гиндин等	(98)
克拉斯诺雅尔斯克电站水轮发电机的振动状态研究		
.....	В.И.Брызгалов等	(104)
汽轮发电机的“不灵敏”转速计算.....	Н.А.Вековищева等	(109)
汽轮发电机和水轮发电机的非正常运行状态.....	Р.А.Лютер等	(114)

同步电机绕组内部短路时电流的实用计算方法

В.В.Домбровский

引言

绕组中的短路，是电机最常见的一种故障。分析这种故障并制定防护措施，在许多情况下是非常困难的，因为缺乏足够简便而可靠的计算故障绕组中短路电流的方法，特别是电机与大功率电网并联运行情况下的短路电流计算方法。

本文试图论述以精确计算故障绕组电抗为基础的普遍实用的内部短路电流计算方法，其基本理论已在近年来得到了深入的研究。

运行经验表明，与电网并联运行的电机绕组中的故障是最危险的。在这种情况下，绕组中至少可形成两个回路（图1）在短路

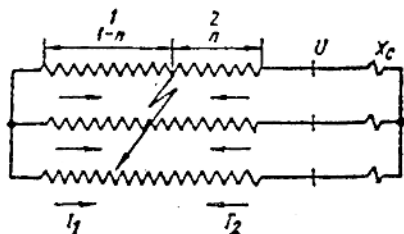


图1 与电网并联运行的同步电机绕组中的内部短路

瞬间与在短路之前存在于短路点上的电压接通。

这些回路中的短路电流方向相反，而绕组对全部短路电流而言或多或少呈无感双线系统。如果绕组中有数条并联支路且其中的一条中发生了短路，那末其余的并联支路就使电网的电抗分路，并对短路点馈电。在电机解列后，非故障支路继续起着电网的馈电作用，事故会持续到完全灭磁为止。

单独运行的电机绕组中的短路，可视为电网的电抗无限大的个别情况。

短路电流计算

解内部短路电流的方程，即可得到形式与机端短路电流表达式近似的短路点电流的表达式：

$$i_K = i_K'' e^{-\frac{1}{T}t} (i_K'' - i_K') e^{-\frac{1}{T}t} + (i_K' - i_K) e^{-\frac{1}{T}t} + i_{K\infty} \quad (1)$$

方程（1）所含的短路电流分量可如下确定：

各相中短路点对称分布时的三相短路

$$i_K'' = \frac{e_{10}}{x_{\Sigma d}''}, \quad i_K' = \frac{e_{10}}{x_{\Sigma d}'}, \quad i_K = \frac{e_{10}}{x_{\Sigma d}}, \quad (2)$$

故障相中短路点对称分布时的两相短路

$$i_K'' = \frac{\sqrt{3} e_{10}}{x_{\Sigma d}'' + x_{\Sigma(2)}''}, \quad i_K' = \frac{\sqrt{3} e_{10}}{x_{\Sigma d}' + x_{\Sigma(2)}'},$$

$$i_K = \frac{\sqrt{3} e_{10}}{x_{\Sigma d} + x_{\Sigma(2)}}, \quad (3)$$

一相对中性点短路或一相内部匝间短路

$$i_K'' = \frac{3e_{10}}{x_{\Sigma d}'' + x_{\Sigma(2)}'' + x_{\Sigma(0)}''},$$

$$i_K' = \frac{3e_{10}}{x_{\Sigma d}' + x_{\Sigma(2)}' + x_{\Sigma(0)}'},$$

$$i_K = \frac{3e_{10}}{x_{\Sigma d} + x_{\Sigma(2)} + x_{\Sigma(0)}}, \quad (4)$$

式中 e_{10} —— 短路点电压，可认为此电压与从绕组中性点到短路点的距离成比例，以绕组全部匝数的百分数表示， $e_{10} = (1-n)U$ ；
 $x_{\Sigma d}''$, $x_{\Sigma d}'$, $x_{\Sigma d}$, $x_{\Sigma(2)}''$, $x_{\Sigma(2)}'$, $x_{\Sigma(2)}$ —— 相对于超瞬态、瞬态和稳态及负序和零序电流时短路点的等效电路（图2）的等效电抗；

T_s , T'' , T' —— 相应电流分量的衰减时间常数。

如果绕组中没有并联支路，就用指数1表示属于短路点和电机中性点之间回路的各量，而用指数2表示属于短路点和机端之间回路的各量，即可得到全部等效电抗的下列表达式：

$$x_{\Sigma(i)} = \frac{x_{11(i)}(x_{22(i)} + x_{c(i)}) - x_{12(i)}^2}{x_{11(i)} + 2x_{12(i)} + x_{22(i)} + x_{c(i)}},$$

$$i = 1, 2, 0; \quad (5)$$

式中 x_{11} , x_{22} , x_{12} —— 回路1和回路2的内电抗和互电抗；

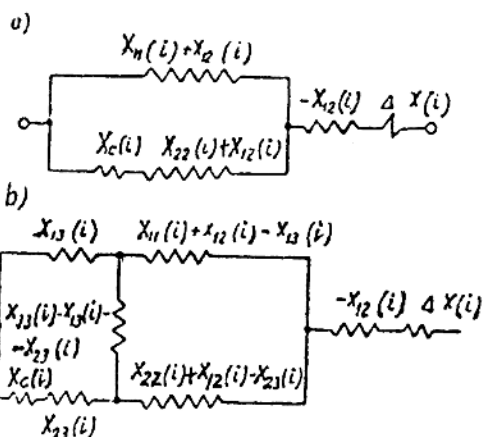


图2 同步电机绕组内部短路时的等效电路图

a——无并联支路的绕组；b——有数条并联支路的绕组

x_c —— 各种状态和不同相序电流时的电网电抗。

如果绕组中有数条并联支路且短路发生在其中的一条中，那么就如上所述，用指数1和2表示故障并联支路的回路，而用指数3表示非故障并联支路形成的回路，并引入下列符号：

$$\left. \begin{aligned} x_{11}^* &= x_{11} - \frac{x_{13}^2}{x_{33} + x_c}, \\ x_{22}^* &= x_{22} - \frac{(x_{23} + x_c)^2}{x_{33} + x_c}, \\ x_{12}^* &= x_{12} - \frac{x_{13}(x_{23} + x_c)}{x_{33} + x_c}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

即可得到与公式(5)近似的 $x_{\Sigma(i)}$ 的公式，该式中代替 x_{11} , x_{22} 和 x_{12} 的，将是利用公式(6)算出的 x_{11}^* , x_{22}^* 和 x_{12}^* 值。

电 抗

短路形成的定子绕组回路的电抗和互电抗，可利用表1的公式确定。主要的变量利

表 1 内部短路时电抗的实用计算公式

并联支路数	绕组型式	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}
a=1	任意 p 值的双层绕组和 p=1 的叠绕组	n(0.5	$\frac{n(x_{as} + x_{gs} + 0.2x_c) + n^2X}{n^2X}$	0	0	0
		n)0.5	$\frac{n(x_{as} + x_{gs} + 0.2x_c) + (2n-1)(x_{as} + x_{gs}) + n^2X}{n^2X}$			
	单层绕组	$\frac{(1-n)(x_1 - 0.5x_c) + (1-n)^2X}{(1-n)^2X}$	n(1-n)X	0	0	0
	双层叠绕组	$\frac{(1-n)(x_1 - 0.5x_c) + (1-n)^2X + \Delta x}{(1-n)^2X + \Delta x}$	$\frac{1}{2p}(x_{as} + x_{gs}) + n(1-n)X - \Delta x$	0	0	0
a=2	并联支路分布在异性磁极下的 p=1 双层叠绕组和波绕组	$\frac{2(1-n)(x_{as} + x_{gs}) + 0.2x_c + (1-n)^2X}{0.2x_c + (1-n)^2X}$	n(1-n)X	$2(x_{as} + x_{gs} + 0.2x_c) + X$	$\frac{2(1-n)x_{as} + (1-n)x_{gs}}{n}X$	$\frac{2(1-n)x_{as} + nX}{2n}$
	并联支路集中或分布在不同槽内的双层绕组	$\frac{a(1-n)(x_{as} + x_{gs}) + 0.2x_c + a(1-2n)(x_{as} + x_{gs}) + (1-n)^2X}{a(1-n)(x_{as} + x_{gs}) + 0.2x_c + (1-n)^2X}$	n(1-n)X	$\frac{a}{a-1}(x_1 - 0.8x_c) + X$	(1-n)X	nX
	单层波绕组	$\frac{a(1-n)(x_1 - 0.5x_c) + (1-n)^2X}{(1-n)^2X}$	n(1-n)X	$\frac{a}{a-1}(x_1 - 0.5x_c) + X$	(1-n)X	nX
	双层叠绕组	$\frac{a(1-n)(x_1 - 0.5x_c) + (1-n)^2X + \Delta x}{(1-n)^2X + \Delta x}$	$\frac{a}{2p}(x_{as} + x_{gs}) - \Delta x$	$\frac{a}{a-1}(x_1 - 0.5x_c) + X$	(1-n)X	nX
	多极数和在一组磁极范围内短路的 p=1 双层叠绕组	$\frac{a(1-n)(x_{as} + x_{gs}) + 0.5x_c + (1-n)^2X + \Delta x}{0.5x_c + (1-n)^2X + \Delta x}$	$\frac{an(x_{as} + x_{gs}) + n(1-n)X - \Delta x}{X - \Delta x}$	$\frac{a}{a-1}(x_1 - 0.5x_c) + X$	(1-n)X	nX

续表 1

电抗分量	符号	超瞬变	瞬变	稳态	负序	零序
与匝数二次幂成比例的电抗分量 ($k_c = 0.2 + 0.5$)	X	$x_d'' - x_1 + (1 - k_c)x_c$	$x_d' - x_1 + (1 - k_c)x_c$	$x_{ad} + (1 - k_c)x_c$	$x_2 - x_1 + (1 - k_c)x_c$	$\left(\frac{f}{f_p}\right)^2 \frac{x_{d1}}{20}$
固有槽漏抗	x_{sm}	$\frac{0.306}{f^2} \cdot \frac{AW_A}{\beta} \cdot \frac{l_1}{q} \left\{ \frac{5h_1 + h_2 + 12h_2}{2b_s} + \frac{\lambda_k}{2} \right\}$				
互感槽漏抗	x_{sm}	$\frac{0.306}{f^2} \cdot \frac{AW_A}{\beta} \cdot \frac{l_1}{q} \left\{ \frac{3h_1 - 3h_2 + 12h_2}{2b_s} + \frac{\lambda_k}{2} \right\} \frac{3\beta - 1}{2}$				$x_{sm} \frac{2(6\beta - 5)}{3\beta - 1}$
固有和交互差漏抗	x_{st} x_{sm}	$x_{st} = \frac{2x_g}{3\beta + 1} \quad x_{sm} = x_{st} \frac{3\beta - 1}{2}$				$x_{st}(6\beta - 5)$
定子绕组漏抗	x_1	$\frac{0.306}{f^2} \cdot \frac{AW_A}{\beta} \cdot \frac{l_1}{q} (3\beta + 1) \frac{F_s + \Delta_1 + 2h_k}{b_s} + x_c + x_g$				
端部漏抗	x_c	$\frac{0.306}{f^2} \cdot \frac{AW_A}{\beta} \cdot \frac{l_1}{q} \cdot 3.44(3\beta - 1)$				
差漏抗	x_g	$k_c x_{ad} \approx 0.078 \frac{AW_A}{AW_2} \left(\frac{1}{q} \right)^2$				
在一组磁极范围内短路时 磁场低次谐波引起的附加电抗	Δx	$\Delta x \approx (1.65\rho - 1)(1 - n)^2 1.5(x_d'' - x_1)$				

用回路 $1-(1-n)$ 和回路 $2-n$ 中的匝数,以绕组或并联支路总匝数的百分数表示。表1中所列的电抗是根据如下的设想算出的。

气隙中的磁场基波引起的电抗部分与匝数的二次幂成比例。绕组槽漏抗、齿顶漏抗和定子齿磁场谐波引起的电抗部分,与匝数的一次幂成比例(表1和图3)。绕组端部的电抗可以认为是与匝数的一次幂和二次幂成比例的两部分之和。

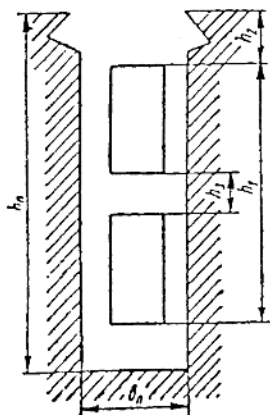


图3 槽漏抗计算

在双层绕组中,不同的回路在槽内会相互影响,而且两个回路位于同一些槽内的二极电机绕组和多极电机波绕组中的相互影响最大。在多极电机的双层叠绕组中,槽内的相互影响不大,而在单层叠绕组中,一般不存在槽内相互影响。

在多极电机的叠绕组中,还有一个特点是部分绕组磁场的低次谐波在气隙中引起附加电抗 Δx ,而低次谐波则是由于部分绕组没有分布在全部磁极下产生的。通常,磁场的低次谐波在很大的程度上被几乎所有的大型电机都有的转子阻尼绕组或转子的固有阻尼回路阻尼,因为这些谐波是不同步旋转的。所以只有在一个回路中匝数很少及电机

与之并联运行的电网的电抗较小时,才应考虑附加电抗 Δx 。磁场的低次谐波以同样的程度使叠绕组任意两部分的内抗增大而互抗减小,因此对于两个回路的等值电路图可以将它们放在公共支路中。

接入两个回路的公共支路的互抗为负号。这就首先可以对出线端和绕组内的短路采用同样的等效电路,其次可以在电路的回路中保持短路电流的方向自然相反。后一点着重说明两个回路与转子绕组的相互影响是相反的,因为两个回路中流的是反向电流。如果两个回路的磁势相等,方向相反,那末在转子绕组中就不会产生额外的电流,短路电流的周期性分量在非周期性分量衰减后立即等于稳定值。

时间常数

内部短路电流的稳定值一般与初始值相差很小,而电流周期性分量的衰减时间常数可能大于出线端短路时的值。

内部对称短路时的时间常数可如下确定:

$$T' = T'_{d0} \frac{x'_{11(d)}(x'_{22(d)} + x_c) - x'^2_{12(d)}}{x_{11(d)}(x_{22(d)} + x_c) - x^2_{12(d)}} \quad (7)$$

式中 T'_{d0} ——定子绕组开路时的励磁绕组时间常数。

如果考虑到电流的衰减率是下列特征方程的根,其余的时间常数可用类似的方法确定,特征方程为:

$$\left. \begin{aligned} x_{\Sigma}(p) + x_{\Sigma}(2) &= 0; \\ x_{\Sigma}(p) + x_{\Sigma}(2) + x_{\Sigma}(0) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

非对称短路

我们只分析了适用于各相电抗系统对称情况的方程和公式。但是，当各相中的短路点不对称分布时，实际上会发生两相和三相短路的情况。研究表明，当短路点分布明显不对称时，可以将这种情况等效到另一种短路，例如将三相短路等效到两相短路，或者将两相短路等效到一相短路，而在不对称不明显时，考虑到电流相差不大，可以象对完全对称的系统那样进行计算。当多极电机叠绕组各相的匝数相等，但在一对磁极范围内各相的始端按常规分布时，即出现特殊形式的不对称。这种不对称是由磁场的低次谐波和分数次谐波引起的。但是在这种情况下，三相短路的最大电流不超过电抗系统完全对称时的电流，并可以假定系统是对称的来进行计算。

短路电流的对称分量

确定短路点的电流后，即不难求出其对称分量 $i_{K(1)}$ 、 $i_{K(2)}$ 、 $i_{K(0)}$ 及这些分量在等效电路中的分布：

$$\left. \begin{aligned} i_{1(1)} &= i_{K(1)} \frac{x_{22(1)} + x_{12(1)} + x_{c(1)}}{x_1 + x_{c(1)}} \\ i_{2(1)} &= i_{K(1)} \frac{x_{11(1)} + x_{12(1)}}{x_1 + x_{c(1)}} \\ i &= 1, 2, 0, \end{aligned} \right\} (9)$$

然后将对称分量几何相加，确定电路各支路中的全电流 i_1 和 i_2 。

对于两相短路，

$$i_1 = \sqrt{i_{1(1)}^2 + i_{1(2)}^2 + i_{1(1)} i_{1(2)}},$$

$$i_2 = \sqrt{i_{2(1)}^2 + i_{2(2)}^2 + i_{2(1)} i_{2(2)}}. \quad (10)$$

如果电网和电机的中性点接地，或者一条并联支路中短路时，对于单相短路，

$$i_1 = i_{1(1)} + i_{1(2)} + i_{1(0)};$$

$$i_2 = i_{2(1)} + i_{2(2)} + i_{2(0)}. \quad (11)$$

如果电网的中性点未接地，对于无支路绕组一相中的匝间短路同样为：

$$i_1 = i_{1(1)} + i_{1(2)} + i_{1(0)};$$

$$i_2 = i_{2(2)} + i_{2(1)} + i_{2(0)}; \quad (12)$$

在后一种情况下，在非故障相中也将有如下的电流流过：

$$i_{1(b)} = i_{2(b)} = 0.5 i_{2(a)};$$

$$i_{1(c)} = i_{2(c)} = 0.5 i_{2(a)}. \quad (13)$$

当绕组的一条并联支路中短路时，故障支路各部分和非故障支路中的电流，可利用等效电路以同样的方法确定。

绕组中不同短路点的

短路电流计算

确定绕组各短路点的短路电流后，可以绘制这些电流与短路点位置的关系曲线。二极电机波绕组和叠绕组的这种关系曲线的特点是，局部最大值点在绕组中点。多极电机的叠绕组或单层绕组中短路时，无局部最大值点，而且短路电流一般小于双层波绕组中的值。

如果对无支路的绕组采用表 1 的公式，那末对 $n < 0.5$ 就可以足够近似地得到：

表 2 表达式 (14) 中的电抗分量

绕 组 型 式	L	M	N
双层波绕组	$x_{01} + x_{02} + 0.2x_c$ $\approx 0.6x_1$	$x_1 - x_2 + 0.8x_c$ $N_0 \approx 0$	$x_{01} + x_{02} \approx 0.25x_1$ $M_0 \approx 0$
单层波绕组	$x_1 - 0.5x_c$ $\approx 0.9x_1$	$x_1 - x_2 + 0.5x_c$	0
每个回路匝数多的双层叠绕组	$x_1 - 0.5x_c \approx 0.9x_1$	$x_1 - x_2 + 0.5x_c$	0
$(1-n) < \frac{1}{2p}$ 的双层叠绕组	同双层波绕组, 但对 x_{Σ} 须加 Δx		

$$x_{\Sigma(1)} = [L_1 n(1-n) - M_1 n^2] \frac{x_1}{x_1 + x_{c(1)}} + (1-n) \frac{x_1 x_{c(1)}}{x_1 + x_{c(1)}} - n(1-n) \frac{N x_{c(1)}}{x_1 + x_{c(1)}} \quad (14)$$

对于 $n > 0.5$, 代替方括号内第 2 项中的 n^2 , 应代入 $(1-n)^2$ 。

对于其他型式的绕组, 这些公式也是正确的, 只需改变 L 、 M 和 N 值 (表 2)。此外, 在叠绕组中, 当一个回路中的匝数少和 x_c 值不大时, 需要考虑 Δx 。

在 $x_c = 0$ 时, 所列公式更加准确。电路中电流对称分量可以如下求出:

$$\left. \begin{aligned} i_{1(1)} &= i_{K(1)} \frac{n x_1 + x_{c(1)}}{x_1 + x_{c(1)}} \\ i_{2(1)} &= i_{K(1)} \frac{(1-n) x_1}{x_1 + x_{c(1)}} \end{aligned} \right\} i = 1, 2, 0. \quad (15)$$

进一步简化, 可以在准确的公式基础上得到内部短路电流的近似算法, 其实质如下。

确定绕组始点、中点和终点三点的内部

短路电流。在这些点之间插入曲线, 或一次近似地划直线。对这三个点 (绕组出线端、中点和中性点) 可以推导出形式简单的公式, 公式中包括电机计算单中所含的不需要专门计算的为数不多的电抗。这些公式与确定机端短路电流的公式类似:

$$i_{K(2)} = \frac{U}{x_{\Sigma(1)}}, \quad i_{K(2)} = \frac{\sqrt{3}U}{x_{\Sigma(1)} + x_{\Sigma(2)}}, \quad i_{K(1)} = \frac{3U}{x_{\Sigma(1)} + x_{\Sigma(2)} + x_{\Sigma(0)}} \quad (16)$$

等效电抗可以利用表 3 确定, 表中的 x_n 为绕组的槽部漏电抗 (表 1 漏电抗第一项)。

利用近似算法可以确定短路电流与绕组中短路点位置关系曲线的性质, 并对最危险的各点进行精确的计算。

对内部短路电流计算方法进行了试验验证。试验结果 (表 4) 与计算数据颇为吻合。

(参考文献 3 种略)

艾力译自苏刊《电力文集》, 1964,

№23, 44—52

熊家驹校

表 3 内部短路电流初始值近似计算方法

并联支路数	短路部位	绕组型式	电机并网运行		
			$X_{\Sigma(1)}$	电网中性点接地	$X_{\Sigma(0)}$ 电网中性点隔离
a=1	绕组始点 (出线端)	所有型式绕组	$\frac{X_d X_c}{x_d + x_c}$	$\frac{x_0 x_{c0}}{x_0 + x_{c0}}$	x_0
	绕组中点	双层波绕组	$0.5 \left[x_{k(1)} + \frac{x_d x_c}{x_d + x_c} \right]$ $x_{k(1)} \approx \frac{x_a}{3\beta+1} \left(\frac{9\beta(1-\beta)}{3\beta+1} + 1 \right) + \frac{3x_c(1-\beta)}{3\beta+1} + 0.2x_c$	$0.5(x_{k0} + \frac{x_0 x_{c0}}{x_0 + x_{c0}})$ $x_{k0} \approx \frac{x_a}{3\beta+1} \left(\frac{9\beta(1-\beta)}{3\beta+1} + 1 \right) + \frac{3x_c(1-\beta)}{3\beta+1} + 0.2x_c$	$0.6x_i$
		单层波绕组	$x_{k(1)} = x_i \approx 0.5x_c \approx 0.9x_i$	$x_{k(0)} \approx x_{k(1)}$	$\frac{x_d}{x_{k(1)} + 40} \approx x_0$
		双层叠绕组	$x_{k(1)} \approx x_i - 0.5x_c + 2\Delta x \approx x_i$	$x_{k(0)} = x_0 + 2\Delta x$	$x_0 + 2\Delta x$
	绕组终点 (中性点)	双层绕组 单层绕组	$0.6x_i + 2pq\Delta x$ $x_i - 0.5x_c + 2pq\Delta x \approx 0.9x_i + 2pq\Delta x$	$x_{\Sigma(1)}$	$x_{\Sigma(1)}$
a	绕组始点 (出线端)	所有型式绕组	$\frac{1}{ax_d} \left[\frac{1}{n} + \frac{a-1}{n} + \frac{1}{x_c} \right]$	$\frac{1}{ax_0} \left[\frac{1}{n} + \frac{a-1}{n} + \frac{1}{x_{c0}} \right]$	x_0
	绕组中点		$0.5(x_{k(1)} + A_1 + \frac{B_1 C_1}{B_1 + C_1})$ $A_1 = \frac{(a-1)(x' - x_i)x_c}{x_i + (a-1)(x_d + x_c)}$ $B_1 = \frac{ax_c x_i}{x_i + (a-1)(x_d + x_c)}$ $C_1 = \frac{ax_i [ax_d + (a-1)x_c]}{x_i + (a-1)(x_d + x_c)}$	$\frac{x_0 [ax_{c0} + (a+1)x_{c0}]}{2(x_0 + x_{c0})}$	$\frac{a+1}{2} x_0$
	绕组终点 (中性点)	双层绕组 单层绕组	$a \cdot 0.5x_i + 2pq\Delta x$ $a \cdot 0.9x_i + 2pq\Delta x$	$x_{\Sigma(1)}$	$x_{\Sigma(1)}$

续表 3

并联支路数	短路部位	绕组型式	电机并网运行		电机与电网隔离运行			
			电流对称分量分布		$x_{\Sigma(0)}$	$x_{\Sigma(1)}$	电流对称分量分布	
			$i_1(0)$	$i_2(0)$			$i_1(0)$	$i_2(0)$
a = 1	绕组始点 (出线端)	所有型式绕组	$i_{k(0)} \frac{x_{d1}}{x_1 + x_{d1}}$	$i_{k(0)} \frac{x_1}{x_1 + x_{d1}}$	x_0	x_d	$i_{k(0)}$	0
	绕组中点	双层波绕组	$\frac{i_{k(0)} (1 + \frac{x_{d1}}{x_1 + x_{d1}})}{2}$	$\frac{i_{k(0)} (1 - \frac{x_{d1}}{x_1 + x_{d1}})}{2}$	$0.5x_d + 0.1x_1 + 0.4x_c \approx 0.5x_d + 0.2x_1$	$0.5x_d + 0.1x_1 + 0.4x_c \approx 0.5x_d + 0.2x_1$	i_{k1}	0
		单层波绕组			$0.4x_1 + 0.5x_d + 0.25x_c \approx 0.5x_d + 0.45x_1$	$0.4x_1 + 0.5x_d + 0.25x_c \approx 0.5x_d + 0.45x_1$	x_0	
		双层叠绕组			$\frac{x_d + x_1}{2} + 2\Delta x$	$\frac{x_d + x_1}{2} + 2\Delta x$	$x_0 + 2\Delta x$	
	绕组终点 (中性点)	双层绕组 单层绕组	$i_{k(0)}$	0	$0.6x_1 + 1pq\Delta x$ $0.9x_1 + 2pq\Delta x$	$x_{\Sigma(1)}$ $x_{\Sigma(1)}$	$i_{k(0)}$ $i_{k(0)}$	0 0
a	绕组始点 (出线端)	所有型式绕组	$i_{k(0)} \left[\frac{ax_1 + (a-1)x_{d1}}{ax_1 + (a-1)x_{d1}} \right] \frac{ax_1}{ax_1 + ax_1 + (a-1)x_{d1}}$	$i_{k1} \frac{ax_1}{ax_1 + ax_1 + (a-1)x_{d1}}$	x_0	x_d	$\frac{1}{a} i_{k(0)}$	$\frac{a-1}{a} i_{k(0)}$
	绕组中点		$\frac{i_{k1}}{2} (1 + \frac{B_1}{B_1 + C_1})$	$\frac{i_{k1}}{2} (1 - \frac{B_1}{B_1 + C_1})$	$\frac{a+1}{2} x_0$	$\frac{ax_{\Sigma(1)} + x_d}{2}$	$\frac{a+1}{2a} i_{k(0)}$	$\frac{a-1}{2a} i_{k(0)}$
	绕组终点 (中性点)	双层绕组 单层绕组	i_k	0	$a + 0.6x_1 + 2pq\Delta x$ $a + 0.9x_1 + 2pq\Delta x$	$x_{\Sigma(1)}$	$i_{k(0)}$	0

注: $x_{\Sigma(0)}$, A_1 , B_1 , C_1 的公式由 $x_{\Sigma(1)}$ 的公式将 x_d 换为 x_2 得出。通常总是可以假定 $x_{\Sigma(1)} = x_{k(1)}$, $x_{\Sigma(2)} \Delta x \approx \frac{1.65D-1}{4p^2q^2} 1.5(x_d - x_1)$ 。

表 4 试验数据摘要

1. 内部短路电流初始值

短路形式	电机型式		波绕组电机与无穷大功率电网并联运行										CM—1750—750 并网运行					Π C—1352—12A 与无穷大功率电网并联运行									
	1—n		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.25	0.5	0.75	1.0	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{15}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{13}{15}$	$\frac{9}{10}$	$\frac{29}{30}$			
	I ₁	P O	19 16 183 160	21.8 20 91 70	27 24 63 50	33.1 36 50.6 45.5	44 32 44 45.5	33.1 32 26 26	27 22 11.5 11.5	21.8 16 5.5 7.0	19 16 5.5 2.0	288 294 84 52	234 289 252 252	259 266 621 617	200 185 3100 2950	490 425 13.5 15	359 350 27.6 25.3	365 321 358 33.2	321 291 323 60	291 265 73 54	365 270 1455 1323	390 330 2040 2130	352 356 3280 3230	390 441 12500 11900			
三相	I ₁	P	15.5	18.7	23.3	31	38	31	23.3	18.7	15.5	232	236	225	177												
	I ₂	P O	15 167 109	17.5 78 52.5	20 54.5 38.5	28 43.5 37	39 38 39	30 26.5 23	18 10.5 10	16 4.7 4.9	15.5 4.7 1.9	210 75 75	220 210 203	203 203 445	2630 — —												
二相	I ₁	P										298	299	341	417												
	I ₂	P O										260 58 59	264 136 123	318 304 292	— 427 —												

2. 内部短路电流稳态值

短路形式	电机型式	CM-1750-750 并网运行					Π C-1352-12A 与无穷大功率电网并联运行										Π C-1352-12A 单独运行										C165/35-6 与电网隔离运行									
		1-n	0.25	0.5	0.75	1.0	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{15}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{15}{10}$	$\frac{9}{30}$	$\frac{29}{30}$	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{15}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{5}{6}$		
三相	I ₁		230	184	119	24.3	420	313	328	320	285	295	277	244	385	278	187	159	142	120																
	O		257	183	119	27	386	296	281	248	204	205	241	308	413	265	180	165	140	110																
	I ₂		72	163	262	390	13.4	24.5	38.2	58	59	1425	2050	3040	12150																					
	O		82	168	269	384	14.4	22.2	33.6	40	40.8	1013	1610	2680	11200																					
二相	I ₁		214	133	182	37.6	347	274	284	267	240	250	305	280	277	250	220	187	160	140																
	O		226	189	131	37	320	243	258	204	170	180	210	235	345	315	213	203	170	140																
	I ₂		67.5	196	334	600	13	20	77	47	50	1290	1735	2790	10050																					
	O		70.5	168	319	592	12	15	23.2	32.4	36	860	1302	2215	9230																					
单相	I ₁		275	254	256	233	424	330	358	335	287	285	338	360	453	362	258	256	230	194																
	O		248	241	280	-	397	308	321	230	225	235	236	240	424	380	295	280	245	205																
	I ₂		52	120	227	375	16	25	40	52	57	1435	2180	3220	12100																					
	O		45	108	225	-	14.4	22.4	37	44	47	1122	1818	2890	11520																					

具有两条并联支路的二极汽轮发电机

定子绕组中匝间短路时均衡电流的计算方法

Г. М. Хуторецкий

二极汽轮发电机的定子绕组常具有两条不能单独承担负荷的并联支路。在这种情况下，绕组的高电位端引出线可在发电机内部并联，而零电位端引出线则全部自发电机引出，这样，发电机将有 9 条引出线。

在两个星形绕组之间的零电位点连接线上设置横差保护，可监测绕组两条并联支路之间的均衡电流。在具有两条并联支路的汽轮发电机的实际运行中，可能发生的匝间短路实际上总是只有一匝短路，从而提出了正确整定横差保护值的问题。

在研究发电机内部短路，尤其是匝间短路时，由于在均衡电流值相对并不大时短路电流可达到很大的数值，人们首先关心的是短路匝中的电流。但是横差保护的正确工作决定于均衡电流，因此故障范围最终取决于均衡电流计算的正确性。

下面研究采用双层条式定子绕组和两条对称并联支路的二极汽轮发电机。

按电流值整定的横差保护应当保证对匝间短路具有必需的灵敏度，同时对不平衡电流应有充分的反应。

通常，均衡电流明显地小于短路匝中的短路电流，因此必须确信在最不利 的情况下，即在均衡电流最小情况下的横差保护电流整定值之正确性。显而易见，在事故过程

中，一条并联支路中的短路匝数越少，则相应的均衡电流也就越小。如果横差保护的动作电流整定值超过均衡电流值，则在发电机中相当于没有设置横差保护，从而匝间短路将不会被切除。在这种情况下，事故将发展成为相间短路，直至下一级的纵差保护动作而跳闸。假设匝间短路发生在定子绕组端部，则接地保护也不起作用。

下面取每槽有效导体数 $s_n = 2$ ，并联支路数 $a = 2$ ，研究汽轮发电机的空载状态，进一步考虑最典型的情况，即定子绕组短路 β 为：

$$\frac{2}{3} \geq \beta \geq 1.$$

当一条并联支路中出现匝间短路时，为了计算相对于均衡电流的槽漏抗和差漏抗，我们将研究图 1 所示的线棒在相带区域内的分布情况。均衡电流在并联支路中沿相反方向流动而闭合，因此在相带的上、下层线棒中，均衡电流的方向将是相反的。

为了计算槽漏抗，应当研究图 1 中所示的三个区段。相对于均衡电流的槽漏抗标么值 x_{cn} ，可以用对称负载的槽漏抗标么值 x_n 表示：