

干式空心电抗器匝间短路的分析与计算

罗 兵

(桂林五环电器制造有限公司, 广西 桂林 541004)

摘要:本文对干式空心电抗器发生匝间短路的原因进行了分析,原因主要归纳为5种:局部过热、过电压、振动、绝缘弱点或老化、局部放电等。并针对几种故障情况,进行具体原因的分析判断。为了量化分析匝间短路后变化显著的物理量,以电流为变量列出匝间短路后的电路方程组,给出一种用于计算电感的公式,编程序计算了电抗器在不同位置发生匝间短路时短路电流的大小,计算结果表明,总回路电流几乎不变,总回路有功电流变化显著;短路位置在不同支路时,在中间(最少匝数所在之处)的变化最大,在最外层的稍小,在最里层的最小;短路位置在同一支路时,在中间的变化最大,在顶端的变化最小。最后通过试验验证了计算结果的正确性。

关键词:干式空心电抗器;匝间短路;电感;Bartky变换;短路电流;有功电流;有功功率

Analysis and Calculation of Inter-turn Short Circuit in Dry-type Air-core Reactor

LUO Bing

(Guilin Wuhan Electric Equipment Manufacture Co., Ltd, Guilin 541004, China)

Abstract: This paper analyzes the causes of inter-turn short circuits in dry-type air-core reactors, which are mainly summarized into five types: local overheating, overvoltage, vibration, insulation weakness or aging, and partial discharge, etc. And for several fault conditions, specific cause analysis and judgment are carried out. To quantitatively analyze the physical quantities that change significantly after inter-turn short circuits, the circuit equations after inter-turn short circuits are listed with current as the variable, and a formula for calculating inductance is given. A program is written to calculate the magnitude of the short-circuit current when inter-turn short circuits occur at different positions of the reactor. The calculation results show that the total loop current almost remains unchanged, while the total loop active current changes significantly; when the short-circuit position is in different branches, the change is the largest in the middle (where the minimum number of turns is located), slightly smaller in the outermost layer, and the smallest in the innermost layer; when the short-circuit position is in the same branch, the change is the largest in the middle and the smallest at the top. Finally, the correctness of the calculation results was verified through experiments.

Key words: dry-type air-core reactor; inter-turn short circuit; inductance; Bartky transformation; short-circuit current; active current; active power

1 引言

近些年,电网中的干式空心电抗器发生匝间短路的故障已是屡见不鲜,然而,目前空心电抗器所配置的保护装置却难以及时切除故障设备,致使故障相起火燃烧,燃烧到一定程度后导致金属熔化滴落、烟火扩大,最后发展成相对地短路或相间短路(叠装时),或发展到大面积短路或断路致使电流陡增,电流增大到过流保护的動作閾值后保护才能动作,此时,不仅电抗器本身已严重损坏,其引起的大火甚至危及到邻近设备的安全运行。如果故障刚开始时被值班人员及时发现,手动切除即可隔离故障设备;如果故障发生在无人值守的变电站,故障设备难以被发现并切除,就极有可能引发火灾。因此,在目前还没有更好的保护装置的情况下,进一步提高空心电抗器的质量和运维水平,保障其不发生匝间短路就显得非常重要,而要提高产品质量和运维水平,有必要对匝间短路的具体原因进行分析,以便有的放矢,采取相应的改进措施。文[1]对绝缘的热老化特性进行了研究,指出绝缘老化对匝间短路的影响,并未具体分析引起绝缘热老化的原因;文[2-3]对电抗器受潮或进水后对绝缘的影响进行了分析,未对引起受潮或进水的原因进行具体分析;文[4-8]分析了过电压的产生以及对匝间绝缘的影响,在实践中如何判别是否过电压并未涉及。为此,本文进一步对引起过热、受潮、过热等的具体原因展开分析,并对匝间短路后电流的变化进行解析求解,以寻求匝间短路后电抗器显著变化的特征量,将其作为监测量可提高保护装置的灵敏度和可靠性。

2 匝间短路的原因分析

正常情况下,两线匝之间有绝缘隔开,绝缘的电阻很大,以下分析几种影响匝间绝缘强度致其电阻变小

的情况：

(1)局部过热。局部过热的原因有：

1)电抗器温升设计裕度小、不均衡。电抗器最热点温度易受环境等散热条件的影响,如果遇上气道积灰过厚、被异物堵塞、烈日暴晒、谐波等,导致电抗器局部最热点温度达到绝缘材料的耐热等级,时间一长,运行高温必然加速绝缘热老化;

2)设计时选取支路过多或分数匝过大或计算精度不够,导致某支路电流过大,温度过高;

3)制造过程中,由于工艺、工装设备所限,造成匝数、尺寸等偏差过大,从而引起某支路过流过热;

4)运行过程中引出线因外力折断,打破电流原有平衡系统,造成电流重新分布不均衡;

5)电抗器表面有裂缝、密封不好。如果玻璃丝束缠绕时搭接不够,造成缝隙或纯树脂薄层,在长期热胀冷缩的作用下表面产生裂纹,导致潮气或雨水浸入匝间,绝缘被水侵蚀受损,另外,绝缘电阻变小,产生泄露电流,增加热量致使绝缘热老化。

(2)过电压。正常情况下,电抗器能承受一定的雷电过电压和操作过电压,但如果过电压频繁发生,长期累积效应必然损伤匝间绝缘。不管是正常或强制“切断”电流而产生的过电压,还是触头发生重燃、弹跳等产生的过电压,操作过电压产生的本质原因是:电磁能量在电抗器和电容中产生振荡。正是这种振荡难于监测得到,目前,如果没有设备能记录下来,在现场还是难于判别是否存在过电压,大多情况下只能结合具体情况定性分析;

(3)振动。通电时,电抗器线圈中的导线通过电流并产生磁场,导线受到交变电磁力的作用而产生振动,这种振动是固有的,其幅值并不大,有谐波时,幅值会增大不少。当导线固定不牢有松动时,电磁力使线匝相互摩擦,长期摩擦致使匝间绝缘损伤;另外,如果引出线布置不合理容易受到振动影响,长期反复的过大振动也会导致引出线疲劳损伤直至折断,造成电流重新分布不均衡;

(4)绝缘弱点或老化。绝缘材料在制造过程中,当工艺一致性不够、分散性较大时,绝缘材料便产生了弱点,如果弱点在前期检测不出来,在后期运行中又受各种不利因素的影响,最终会导致弱点损坏;

(5)局部放电。目前,由于干式空心电抗器星形架等结构的不规整,以及电抗器本体体积较大,电抗器难于在真空状态下浇注成型,其线圈都是湿法缠绕固化成型,因此,相比于干式变压器,电抗器线圈中的微小气泡会多一些,气泡越多,局部放电的可能性越大。但干式空心电抗器也有有利的一面,它的各个支路是并联的,层与层之间的电压为零;而且匝数较多,匝与匝之间的电压一般小于干变;并且线圈对地的距离较远,对地的场强也就小一些。而干变的层间电压要比空抗的大得多,层与层之间最容易发生局部放电。由此可见,空抗的气泡虽然是多一些,局部放电的可能性大一些,但运行时的层间电压、匝间电压、对地场强均比干变的小,所以空抗的局放量并不一定大于干变的局放量;当然,这只是笔者的定性分析,因为空抗没有二次绕组,加上目前试验设备容量不够,线圈加不上足够高电压,所以并未获得空抗局放量的实测数据。不过,有关空抗因为局部放电而损毁绝缘的情况却也鲜有报道,这似乎也说明了空抗局部放电的影响是很小的。但是,即使难以检测空抗的局部放电量,仍需要在线圈绕制时采取相应措施,尽可能减少空气混入树脂中或排除气体,对提高空抗的绝缘强度总是有益的。

实际上,发生匝间短路的原因可能有上述的一种或几种,需要根据故障的现象、位置、时间等进行具体分析,其中,局部过热的概率应是最高的,因为好多因素都会造成局部过热,概率最低的当属局部放电。以下对几种匝间短路的情况进行一些简要分析:

(1)匝间短路的位置在电抗器的下半部。由于烟囱效应,电抗器本身下半部的温度比上半部的温度低。如果温度高的地方没问题反而温度低的地方有问题,说明本身的温度不造成影响或影响很小,最可能的原因是过电压,如果有下列情况之一:故障发生在投切后一小段时间内,或平时投切次数频繁,或投切开关是真空断路器(35kV系统),或避雷器动作计数器已动作,或电抗器两端间的过压装置已动作,或故障录波器记录的波形有异常等,则基本上可判定是过电压引起;如果证明确实没有过电压,则要考虑到表面可能有裂缝、密封不好,潮气或雨水浸入匝间,泄露电流增大导致过热而损伤绝缘;如果证明确实没有裂缝,则要考虑到振动磨伤绝缘了,这可通过噪声或围栏、地面振动或振动仪等进行判断;如果振动正常,则匝间绝缘有弱

点或老化的可能性就最大了；

(2)匝间短路的位置在电抗器的最内包封的最内表面或最外包封的最外表面。由于最内表面或最外表面的散热条件相对较好,因此过热的影响不是主要的,考虑到这两个表面淋雨或受潮以及积污的可能性较大,发生沿面放电导致匝间绝缘损伤的概率也较大,观察电抗器表面有否爬电痕迹就可容易判别。如果没有发生沿面放电,则可按过电压、裂缝、振动、绝缘弱点逐步判断；

(3)匝间短路的位置在电抗器顶端往下约 200mm 处。因为此处通常是电抗器最热的区域,过热损伤绝缘是最大可能的,通过比较颜色变化即可容易判别,过热有可能是本身就存在,也可能是断线、进水、谐波等引起的；

(4)匝间短路的位置在电抗器的调匝环。调匝环一般置于电抗器最下端,散热条件最好,过热的情况几乎没有。因为调匝环往往不和本体一起固化成型,故其牢固程度要逊于本体,如果调匝环固定不牢靠,其受振动的长期作用而磨损绝缘的可能性最大。其次,也由于调匝环处在线圈的首末端,其受雷电或操作过电压的冲击也最大,当然,由于调匝环是后期增加的,因此其存在裂缝、绝缘弱点的可能性也较大；

(5)匝间短路的位置在电抗器的上半部。此处发生匝间短路的可能性最大,因为过热的概率较大,如果再加上过电压、裂缝、振动、绝缘弱点、谐波等的影响,至少有两种以上的因素共同作用,必然加速绝缘的老化直至击穿。

以上只是针对故障位置进行简单分析,实际上,需要结合故障现象和故障时间综合考虑,才更容易确定故障的真正原因。

3 匝间短路发生后的电流变化

为了找到空心电抗器发生匝间短路后变化显著的物理量,根据空心电抗器的结构(空心电抗器的线圈有串联和并联两种结构,本文以常用的并联为例),可画出匝间短路后电抗器的等效电路,如图 3-1 所示,以电流为例,可列出下面的方程组,然后在计算机上编程进行求解,可定量分析匝间短路发生后电流的变化。

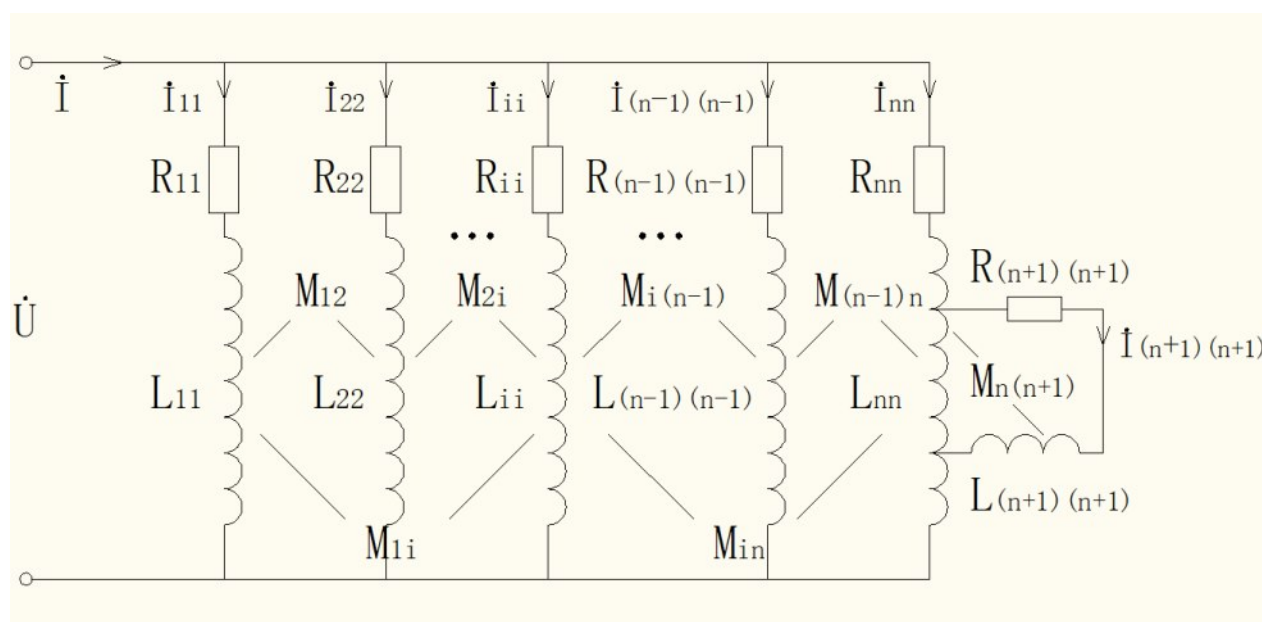


图 3-1 匝间短路后电抗器的等效电路

Figure 3-1 Equivalent Circuit of Reactor after Inter-turn Short Circuit

短路后：

$$\begin{aligned} (j\omega L_{11} + R_{11})\dot{I}_{11} + j\omega M_{12}\dot{I}_{12} + \cdots + j\omega M_{1(n-1)}\dot{I}_{1(n-1)} + j\omega M_{1n}\dot{I}_{1n} + j\omega M_{1(n+1)}\dot{I}_{1(n+1)} &= \dot{U} \\ j\omega M_{21}\dot{I}_{21} + (j\omega L_{22} + R_{22})\dot{I}_{22} + \cdots + j\omega M_{2(n-1)}\dot{I}_{2(n-1)} + j\omega M_{2n}\dot{I}_{2n} + j\omega M_{2(n+1)}\dot{I}_{2(n+1)} &= \dot{U} \\ \vdots & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \\ & \cdot \\ & j\omega M_{(n-1)1} \dot{I}_{(n-1)1} + j\omega M_{(n-1)2} \dot{I}_{(n-1)2} + \cdots + (j\omega L_{(n-1)(n-1)} + R_{(n-1)(n-1)}) \dot{I}_{(n-1)(n-1)} + j\omega M_{(n-1)n} \dot{I}_{(n-1)n} + \\ & j\omega M_{(n-1)(n+1)} \dot{I}_{(n-1)(n+1)} = \dot{U} \end{aligned}$$

$$j\omega M_{n1} \dot{I}_{n1} + j\omega M_{n2} \dot{I}_{n2} + \cdots + j\omega M_{n(n-1)} \dot{I}_{n(n-1)} + (j\omega L_{nn} + R_{nn}) \dot{I}_{nn} + j\omega M_{n(n+1)} \dot{I}_{n(n+1)} = \dot{U}$$

$$j\omega M_{(n+1)1} \dot{I}_{(n+1)1} + j\omega M_{(n+1)2} \dot{I}_{(n+1)2} + \cdots + j\omega M_{(n+1)n} \dot{I}_{(n+1)n} + (j\omega L_{(n+1)(n+1)} + R_{(n+1)(n+1)}) \dot{I}_{(n+1)(n+1)} = 0$$

式中:

$L_{11}, \cdots, L_{(n+1)(n+1)}$ —各支路自感

$M_{12}, \cdots, M_{(n+1)n}$ —各支路互感

$R_{11}, \cdots, R_{(n+1)(n+1)}$ —各支路电阻

$\dot{I}_{11}, \cdots, \dot{I}_{(n+1)(n+1)}$ —各支路电流(相量)

$\dot{U}$ —电抗器端电压(相量)

第 $n+1$ 为短路环, 作为一独立支路

对于已经制造完成的电抗器, 各支路的匝数、尺寸、电阻均为已知, 支路的自感、互感可利用下面的纽曼(Neumann)公式(已由三重积分变换为单积分), 通过 Bartky 变换或高斯-勒让德公式计算出来, 最后将各参数代入上式即可求出电流。

互感计算公式:^[9]

$$M = 2\pi\mu_0 n_1 n_2 (R_1 R_2)^{3/2} [Ci(R_1, R_2, z_1) - Ci(R_1, R_2, z_2) + Ci(R_1, R_2, z_3) - Ci(R_1, R_2, z_4)]$$

$$Ci(R_1, R_2, z) = \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{2\pi} \int_0^\pi \frac{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos \varnothing + Z^2}}{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos \varnothing} \sin^2 \varnothing d\varnothing$$

式中:

$$z_1 = h_1 + h_2 + s, z_2 = h_1 - h_2 + s, z_3 = -h_1 - h_2 + s, z_4 = -h_1 + h_2 + s$$

n_1, n_2 —两线圈单位长度的匝数

R_1, R_2 —两线圈的半径

h_1, h_2 —两线圈高度的一半, $2h_1 = 2h_2 = h$

s —两线圈之间的轴向中心距

需要注意的是, 当采用 Bartky 变换求解时, 分两种情况, 文献[10]给出了第 1 种情况 $R_1 \neq R_2$ 时的解法, 不过, 求解参数的公式不够直观, 求解第 2 种情况 $R_1 = R_2$ 时不够具体, 为此, 本文重新推导并经过验算正确, 给出公式如下:

1) $R_1 \neq R_2$ 时, $Ci(R_1, R_2, z)$ 变换为如下标准形式:

$$\begin{aligned} Fi(R_1, R_2, z) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} (A \sin^2 \theta + B \cos^2 \theta + C \frac{\sin^2 \theta}{q^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta}) \frac{1}{\sqrt{K \cos^2 \theta + \sin^2 \theta}} d\theta \\ q &= \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2}, K = \frac{(R_1 - R_2)^2 + z^2}{(R_1 + R_2)^2 + z^2}, A = \frac{(R_1 + R_2)^2 - 2z^2}{6\sqrt{R_1 R_2} \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + z^2}}, B = -\frac{(R_1 - R_2)^2 + z^2}{6\sqrt{R_1 R_2} \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + z^2}}, \\ C &= \frac{z^2}{2\sqrt{R_1 R_2} \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + z^2}} \end{aligned}$$

2) $R_1 = R_2$ 时, $Ci(R_1, R_2, z)$ 变换为如下标准形式:

$$\begin{aligned} Fi(R_1, R_2, z) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} (A \sin^2 \theta + B \cos^2 \theta) \frac{1}{\sqrt{K \cos^2 \theta + \sin^2 \theta}} d\theta \\ q &= \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2}, K = \frac{(R_1 - R_2)^2 + z^2}{(R_1 + R_2)^2 + z^2}, A = \frac{(R_1 + R_2)^2 + z^2}{6\sqrt{R_1 R_2} \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + z^2}}, B = \frac{z^2}{3\sqrt{R_1 R_2} \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + z^2}} \end{aligned}$$

且当 $2h_1=2h_2=h, s=0$ 时, 即自感计算时,

$$L=4\pi\mu_0n_1n_2(R_1R_2)^{3/2}\left[\text{Fi}(R_1,R_2,h)-\frac{2}{3\pi}\right]$$

$\text{Fi}(R_1,R_2,z)$ 的解法可参考文献^[10]。

实际上, 匝与匝之间最初是有绝缘的, 匝与匝之间的金属导体并非直接接触, 匝间短路是在匝间绝缘损坏之后发生的, 最开始匝间是经过电阻或电弧短路, 最后演变成金属性短路。不管是经过电阻短路, 还是金属性短路, 皆可用上述方程式计算电流, 只需将电阻代入不同的值即可。本文假设发生了匝间金属性短路, 分几种情况进行计算, 结果如下表:

由上表的计算结果可知:

表 3-1 空心串联电抗器匝间短路前后的电流

Table 3-1 Current before and after inter-turn short circuit of air-core series reactor

电抗器容量													
100kvar, 包封数		短路前		中间短路					顶端短路				
5, 支路数 19, 第 1 至第 17 支路匝数逐渐减少, 第 17 支路匝数等于第 18 的, 第 19 支路匝数增加, 第 19 支路外径最大		总回路电流/A	总回路有功电流/A	短路环电流/A		总回路电流/A		总回路有功电流/A		短路环电流/A		总回路电流/A	
				短路后		短路后		变化率%		短路后		变化率%	
				短路后	变化率%	短路后	变化率%	短路后	变化率%	短路后	变化率%	短路后	变化率%
短路发生位置	第 1 支路	314.2	8.1	210.1	314.2	0	10.201	25.9		114.5	314.2	0	8.724
	第 2 支路	314.2	8.1	212.4	314.3	0.03	10.268	26.8		122.2	314.3	0.03	8.817
	第 3 支路	314.2	8.1	214.3	314.3	0.03	10.329	27.5		128.9	314.3	0.03	8.906
	第 10 支路	314.2	8.1	395.5	314.5	0.1	13.564	67.5		257.8	314.4	0.06	10.419
	第 11 支路	314.2	8.1	395.9	314.5	0.1	13.629	68.3		264.1	314.4	0.06	10.558
	第 12 支路	314.2	8.1	395.7	314.5	0.1	13.678	68.9		267.5	314.4	0.06	10.648
	第 13 支路	314.2	8.1	503.6	314.7	0.16	15.62	92.8		315.7	314.4	0.06	11.054
	第 14 支路	314.2	8.1	502.2	314.6	0.13	15.654	93.3		319.6	314.4	0.06	11.16
	第 15 支路	314.2	8.1	500	314.6	0.13	15.66	93.3		323	314.4	0.06	11.256
	第 16 支路	314.2	8.1	482.7	314.5	0.1	15.595	92.5		323.9	314.4	0.06	11.472
	第 17 支路	314.2	8.1	479.1	314.5	0.1	15.554	92		321.6	314.4	0.06	11.457
	第 18 支路	314.2	8.1	474.2	314.5	0.1	15.469	91		318.8	314.4	0.06	11.429
	第 19 支路	314.2	8.1	467.9	314.5	0.1	15.341	89.4		312.3	314.4	0.06	11.324

表 3-2 空心并联电抗器匝间短路前后的电流

Table 3-2 Current before and after inter-turn short circuit of air-core shunt reactor

		短路前		中间短路					顶端短路				
电抗器容量 20000kvar, 包封数 17, 支路数 40, 第 1 至第 36 支路匝数逐渐减少, 第 36 至第 40 支路匝数逐渐增加, 第 40 支路外径最大		总回路电流/A	总回路有功电流/A	短路环电流/A	总回路电流/A	总回路有功电流/A	短路环电流/A	总回路有功电流/A	短路环电流/A	总回路电流/A	总回路有功电流/A	短路环电流/A	总回路有功电流/A
				短路后	短路后	变化率%	短路后	变化率%	短路后	短路后	变化率%	短路后	变化率%
短路发生位置	第 1 支路	990.7	3.312	1316	991	0.03	8.38	153	764.6	990.7	0	5.025	51.7
	第 2 支路	990.7	3.312	1320	991	0.03	8.431	155	779.7	990.8	0.01	5.098	53.9
	第 3 支路	990.7	3.312	1324	991	0.03	8.479	156	795.2	990.8	0.01	5.176	56.3
	第 20 支路	990.7	3.312	3148	992	0.13	19.924	502	1872.5	991.1	0.04	9.19	177
	第 30 支路	990.7	3.312	3722	992	0.13	25.06	657	2363.6	991.4	0.07	11.919	260
	第 31 支路	990.7	3.312	3716	992	0.13	25.061	657	2367.9	991.4	0.07	11.947	261
	第 32 支路	990.7	3.312	3892	992	0.13	26.269	693	2383	991.4	0.07	12.168	264
	第 33 支路	990.7	3.312	3884	992	0.13	26.245	692	2383.1	991.4	0.07	12.148	267
	第 34 支路	990.7	3.312	3829	992	0.13	26.029	686	2388.1	991.4	0.07	12.145	267
	第 35 支路	990.7	3.312	3819	992	0.13	25.981	684	2387.1	991.4	0.07	12.099	267
	第 36 支路	990.7	3.312	3754	992	0.13	25.61	673	2356.0	991.4	0.07	12.084	265
	第 37 支路	990.7	3.312	3742	992	0.13	25.54	671	2346.6	991.4	0.07	12.056	265
	第 38 支路	990.7	3.312	3659	992	0.13	24.95	653	2286.9	991.3	0.06	11.769	255
	第 39 支路	990.7	3.312	3643	992	0.13	24.83	650	2273.0	991.3	0.06	11.691	253
	第 40 支路	990.7	3.312	3627	992	0.15	24.71	646	2259.0	991.3	0.06	11.614	251

1) 不管短路发生在中间或顶端时,总回路电流、各支路电流的变化率均不超过 0.2%,几乎不变,而短路环电流很大,达到几百上千安培;总回路有功电流的变化率最大,其百分比通常从几十到几百,并联支路数越多,越靠近中间,变化越明显;

2) 对于同一支路,短路发生在中间时,短路环电流、总回路电流、总回路有功电流变化最大,在顶端时,其变化最小;

3) 对于不同的支路,通常情况下,从直径最小的支路开始,直到或临近最小匝数所在之处,直径越大,短路环电流、有功电流变化越大;而从最小匝数所在之处开始,直到最外层,直径越大,短路环电流、有功电流变化越小。简言之,在中间(临近最小匝数所在之处)的变化最大,在最外层的稍小,在最里层的最小。

从上面的结果也可以看出,正是由于电抗器的总电流变化微乎其微,其变化值达不到电抗器所配过流保护的動作值(整定值),保护自然不能动作。

另外,根据匝数、尺寸、电流也可算出磁场的分布,此处不再赘述。

4 试验

为了验证上述计算结果的正确性,以样机 CKDKL-10-100-5 的空心串抗进行了模拟试验。由于没有能够直接测量有功电流的仪表,考虑到有功电流与有功功率的换算关系,所以采用能测有功功率的功率计代替进行间接测量。另外,样机制作完成后,内部没有空间布置短路环,以及试验的破坏性,为了兼顾到试验的方便以及成本,拟在最外包封的外表面布置短路环。根据上述求解匝间短路电流的电路方程式,不管短路环是跟其它线匝连在一起,还是独立一回路,两者的求解方程式是相同的,不同的是,不同位置的短路环的尺寸、电感等参数是不同的,求解的结果自然不同,但从计算方法上来看,两者是完全相同的。换句话说,如果短路环在最外面时的计算结果经试验验证是正确的,说明所用的计算方法是正确的,那么用同样方法在短路环处于不同位置时(只是输入参数的大小不同而已)进行计算,得出的结果也应该是正确的。基于

此,本文采用试验方案如图4-1,在样机的最外包封的外表面的顶端或中间用导线绕紧一匝,线匝的两端串联空气断路器,通过空开的开断模拟匝间短路,试验接线如图4-2,图中,L:电抗器,T:调压器,W:功率计PA333H,0.1级,TA:电流互感器LMZ型0.5级,QF:空气断路器DZ47型C63,PA:数字万用表DM6266,短路环用铝导线 $\phi 3.8$,谐波源等。试验数据如表4.1

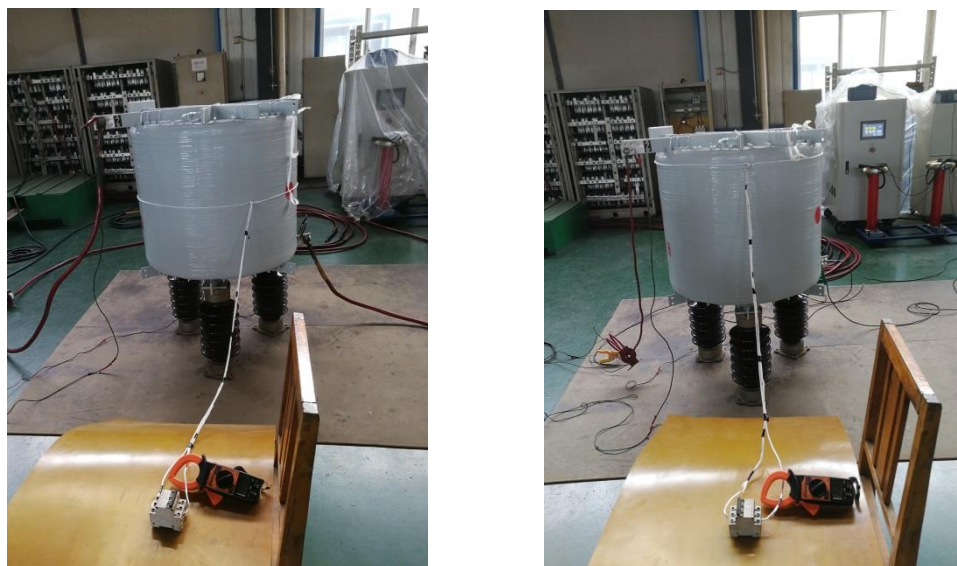


图4-1 空心串联电抗器匝间短路试验

Figure 4-1 Inter-turn short-circuit test of air-core series reactor

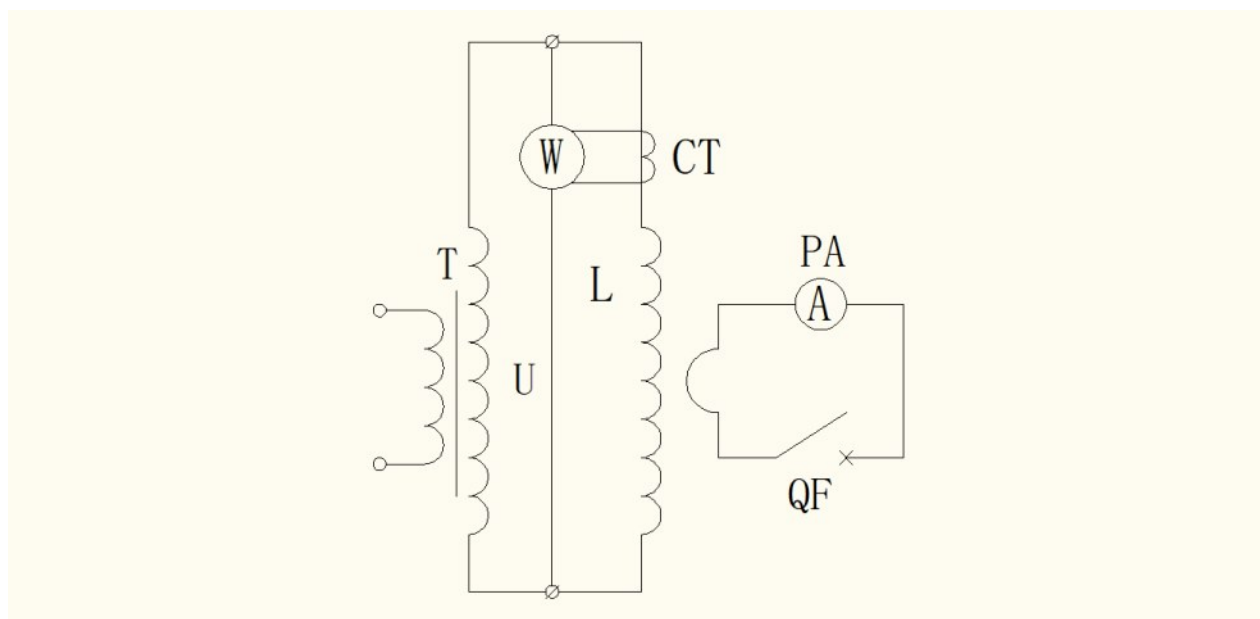


图4-2 匝间短路试验接线图

Figure 4-2 Inter-turn short circuit test wiring diagram

从表4-1可见,

1)测试时,不管是在中间或顶端短路时,总回路电流只有小数点位变化,几乎不变,所以表中只记录了一种数值,总回路电流的相对误差不超过0.2%;

2)短路前后,短路环电流的实测值对计算值的相对误差在工频下最大约7%、最小约2%,在趋势上吻合;在三倍频下相对误差最大约8%、最小约6%,在趋势上也吻合,但误差大一点;

3)短路前后,测出的有功功率的变化率与计算的有功电流的变化率相差较大,两者的最大偏差在工频下为38%-45.8%=-7.8%、在三倍频下为300%-396%=-96%,最小偏差在工频下为15.8%-17.4%=-1.6%、在三倍

表 4-1 空心串联电抗器匝间短路试验数据

Table 4-1 Test data of inter-turn short circuit of air-core series reactor

电抗器 CKDKGL-10-100-5,包封数 5,支路数 19,第 17 支路匝数最小,外直径 820mm		工频电流/A				三倍频电流/A			
		220 70%	252 80%	283 90%	315.5 100%	5.478	25.193	31.314	39.110
中间 短路	计算值	192.6	220.6	247.7	276.2	14.3	65.9	81.9	102.3
	短路环电流/A 实测值	195	223	251	279	15.3	71	88	110
	变化率%	1.2	1.1	1.3	1.0	6.99	7.74	7.45	7.53
	短路前	1.45	1.92	2.34	2.93	0.001	0.022	0.033	0.053
	总回路有功功率/kW 短路后	2.03	2.66	3.25	4.05	0.004	0.093	0.141	0.223
	变化率%	40	39	39	38	300	323	327	321
	短路前	5.915	6.775	7.609	8.484	0.051	0.236	0.294	0.367
	总回路有功电流/A(计算值) 短路后	8.626	9.881	11.096	12.373	0.253	1.163	1.446	1.806
	变化率%	45.8	45.8	45.8	45.8	396	393	392	392
	计算值	118.6	135.8	152.5	170	9.044	41.593	51.698	64.569
	短路环电流/A 实测值	126	144	160	179	9.6	44.1	54.5	68.2
	变化率%	6.24	6.04	4.92	5.29	6.15	6.03	5.42	5.62
顶端 短路	短路前	1.49	1.90	2.33	2.91		0.023	0.035	0.054
	总回路有功功率/kW 短路后	1.72	2.20	2.69	3.35		0.054	0.082	0.127
	变化率%	15.4	15.8	15.5	15.1		135	134	135
	短路前	5.915	6.775	7.609	8.484	0.051	0.236	0.294	0.367
	总回路有功电流/A(计算值) 短路后	6.943	7.953	8.931	9.959	0.131	0.603	0.75	0.937
	变化率%	17.4	17.4	17.4	17.4	157	156	155	155

频下为 135%-155%=-20%,造成偏差的主要原因是,(1)功率计测出的有功功率包括电阻损耗、导线的涡流损耗和环流损耗,而上述方法算出的有功电流只反映电阻损耗和环流损耗,并未计及导线本身的涡流损耗的影响。在有谐波时,涡流损耗造成的偏差更大,这种情况从上表也可以看出;(2)短路环是手工绕制的,其位置和形状与计算所设定的理想情况有偏差,再加上仪表的精度、读数误差、温度、导线电阻误差、试验环境周

边的金属导体或短路环等的影响,最终造成数值偏差较大。

尽管功率计测出的有功功率的变化率与计算的有功电流的变化率相差较大,但二者在趋势上是一致的,即在不同电压或电流、不同位置、不同频率的情况下的变化趋势是相同的,计算的结果能反映有功功率变化趋势,从这点上来讲,可认为上述的有功电流计算结果是正确的。因为没有计及涡流和各种误差的影响,才造成有功电流的计算值和实测值在量上有较大偏差。如果计及涡流损耗和各种误差的影响,对算法和结果进行修正,有望能缩小二者在量上的偏差,只不过这样将会使计算变得非常复杂。

5 结论

通过对空心电抗器匝间短路原因的分析,以及匝间短路发生后电流的计算结果,可得出:

- (1)局部过热造成匝间短路的概率应是最高,因为导致局部过热的因素最多;
- (2)匝间短路发生后,总回路电流几乎不变,而短路环电流很大,达到几百~几千安培;总回路有功电流的变化率最大,其百分比通常从几十到几百,并联支路数越多,越靠近中间,变化越明显;
- (3)对于同一支路,短路发生在中间时,短路环电流、总回路电流、总回路有功电流变化最大,在顶端时,其变化最小;
- (4)对于不同的支路,通常情况下,从直径最小的支路开始,直到或临近最小匝数所在之处,直径越大,短路环电流、有功电流变化越大;而从最小匝数所在之处开始,直到最外层,直径越大,短路环电流、有功电流变化越小。简言之,在中间(临近最小匝数所在之处)的变化最大,在最外层的稍小,在最里层的最小;
- (5)匝间短路电流的大小和分布,可以为以有功电流作为监测量的保护的整定值提供参考,其计算值(未计及导线的涡流损耗的影响)比实测值要大一些,在谐波下,两者相差更大,必要时,需作一些修正;
- (6)本文试验为单样机验证,结论仍需在容量、不同包封数、不同电压等级产品上进一步验证。

参考文献:

- [1] 彭翔,刘青松,邓军,等. 干式空心电抗器匝间绝缘热老化特性研究[J]. 变压器,2021,58(12):55-58
PENG Xiang, LIU Qing-song, DENG Jun, et al. Research on Thermal Aging of Turn-to-turn Insulation for Dry-type Air-core Reactors[J]. TRANSFORMER, 2021, 58(12):55-58
- [2] 李光茂,李晓,杜钢,等. 湿热老化对电抗器匝间过电压耐受特性的影响[J]. 高压电器,2022,58(6):98-103
LI Guangmao, LI Xiao, DU Gang, et al. Influence of Damp Heat Aging on Withstand Characteristics of Inter-turn Overvoltage of Reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6):98-103
- [3] 任宝林,贺俊杰,张建兴,等. 干式空心电抗器匝间绝缘故障分析及治理措施[J]. 电力电容器与无功补偿,2026,47(1):35-41
REN Baolin, HE Junjie, ZHANG Jianxing, et al. Analysis and Mitigation Measures for Inter-turn Insulation Faults in Dry-type Air-core Reactors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2026, 47(1):35-41
- [4] 王永勇,温祥龙,刘华,等. 关于干式空心并联电抗器烧损问题的研究[J]. 黑龙江电力,2003,25(6):423-428.
WANG Yongyong, WEN Xianglong, LIU Hua, et al. Burn-out of dry hollow parallel reactors[J]. Heilongjiang Electric Power, 2003, 25(6):423-428.
- [5] 于群英,金鑫,黄涛,等. 干式空心并联电抗器投切过电压现场测试与分析[J]. 吉林电力,2021,49(5):39-42
YU Qunying, JIN Xin, HUANG Tao, et al. Field Test and Analysis of Switching Overvoltage of Dry-type Air-core Shunt Reactor[J]. Jilin Electric Power, 2021, 49(5):39-42
- [6] 雷潇,廖文龙,白欢,等. 一起换流站直流滤波器干式电抗器过电压损坏分析[J]. 电瓷避雷器,2022(4):140-145
LEI Xiao, LIAO Wenlong, BAI Huan, et al. Fault Analysis of Dry -Type Air -Core Reactor of DC Filter in HVDC Substation Caused by Overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(4):140-145
- [7] 金佳敏,郑一鸣,陈宜斌,等. 采用断路器首端投切方式治理 35 kV 并联电抗器操作过电压[J]. 浙江电力,2017,36(10):55-58
JIN Jiamin, ZHENG Yiming, CHEN Yibin, et al. Switching Overvoltage Control of 35 kV Shunt Reactor by Head End Switching of Breaker[J]. ZHEJIANG ELECTRIC POWER, 2017, 36(10):55-58
- [8] 赵红玉,张曦,弋东方,等. 引起电抗器故障的操作过电压原因分析及解决方案[J]. 供用电,2010,27(4):51-53.

- ZHAO Hongyu, ZHANG Xi, YI Dong fang, et al. Reason Analysis and Solutions of Switching Overvoltage Caused Reactor Faults[J]. DISTRIBUTION & UTILIZATION, 2010, 27(4): 51-53.
- [9] 夏天伟, 闫英敏, 曹云东. 干式空心电抗器电感的计算[J]. 变压器, 1997, 34(2): 15-20.
- Xia Tianwei, Yan Yingmin, Cao Yundong. The Inductance Calculation of Dry-Type Air-Core Reactor[J]. TRANSFORVER, 1997, 34(2): 15-20.
- [10] 魏新劳, 麻森. 多层并联空心电力电抗器磁场的解析计算方法[J]. 变压器, 1993, (2): 12-15.