

高压电抗器匝间短路三维模型计算与分析

吴书煜¹, 马宏忠¹, 魏旭², 陈轩³, 许洪华⁴, 刘宝稳¹, 宋开胜¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210008;

3. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211102;

4. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 为了研究干式空心电抗器匝间短路电流、磁场和电动力随匝间短路故障位置变化的分布规律, 基于磁场-电路耦合电磁学理论, 建立了外电路约束条件下干式空心电抗器匝间短路故障的三维磁场-电路计算模型。采用有限元法计算正常状态下该模型的电感与各层电流, 将计算结果与解析法所得结果、实测数据进行对比, 验证了该模型的准确性。建立匝间短路故障模型, 精确计算匝间短路电流。研究表明: 当电抗器发生匝间短路故障时, 短路电流较正常电流急剧增加, 不同位置的匝间短路故障的短路电流呈现出端部向中心位置、内层向外层增大的趋势; 匝间短路故障处的磁场与电动力迅速增大, 短路层的磁场与电动力方向发生改变。

关键词: 干式空心电抗器; 匝间短路; 电感矩阵; 短路电流; 磁场; 电动力; 模型

中图分类号: TM 47

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.022

0 引言

干式空心电抗器(以下简称电抗器)作为电力系统主要感性元件, 因具有结构简单、运行维护成本低、线性度良好等优点, 广泛应用于限流、滤波、无功补偿和改善线路电压分布等方面^[1-4]。相关统计数据表明, 匝间短路故障已是电抗器的主要故障^[5]。一旦发生匝间短路故障, 短路处巨大的短路电流将使周围金属环路结构产生强大的环流^[6], 对电抗器绝缘造成极大的破坏, 严重时甚至烧毁电抗器^[7]。匝间短路电流是电抗器匝间短路故障最直接的表征, 是造成其他电力事故进一步发展的主要原因, 因此, 对电抗器匝间短路故障进行研究十分必要, 尤其是匝间短路电流。

目前, 针对电抗器匝间短路故障的研究主要集中于匝间绝缘试验及发生故障后的保护。匝间绝缘试验的方法较多, 其中广泛应用的是脉冲振荡电压法^[8]、匝间过电压法^[9]以及雷击冲击法^[10]等, 匝间短路故障保护方法包括测量阻抗法^[11]、等效电感法^[12]以及零序电压电流保护法^[13]等, 但这些方法往往都忽略了匝间短路电流最根本的短路现象。在电抗器投入现场运行前, 对其能承受的匝间短路电流进行预测是十分关键且必要的, 然而针对电抗器匝间短路电流的研究较少, 至今没有较好的计算方

法。一方面, 解析法模型建立困难^[14], 需要各种条件假设和参数设置, 计算量庞大, 难以获得电抗器匝间短路电感矩阵, 进而无法求取短路电流, 且影响匝间短路故障的因素较多, 解析法无法模拟各种情况, 求解计算结果误差大; 另一方面, 通过试验的方法获取电抗器匝间短路电流不仅需要耗费大量的人力和物力, 而且会对电抗器造成不可逆转的破坏。基于磁场-电路耦合的有限元计算方法使许多复杂的电磁问题得到了简化, 其在正确建模的基础上综合考虑各方面因素, 同时还可以分析发生匝间短路故障后磁场与电动力的变化规律, 具有直观性与准确性^[15]。基于上述分析, 建立了电抗器匝间短路故障三维有限元模型, 采用有限元法精确计算出匝间短路电流, 不仅避免了破坏性试验对电抗器的损坏, 而且为电抗器的运行维护、继电保护以及在线监测提供了必要的技术支持, 从而真正做到防微杜渐, 防患于未然。

本文以一台BKGL-2000/35型号的干式空心并联电抗器作为研究对象, 在建立电抗器匝间短路故障等效电路模型与电路方程的基础上, 通过求解匝间短路电感矩阵, 提出了一种基于有限元法的干式空心电抗器匝间短路故障三维磁场-电路耦合的计算方法。首先, 采用有限元法求解正常运行状态下的电感参数, 计算各层电流, 并将计算结果与解析法所得结果及实测电流进行对比, 验证了所提模型的准确性与可靠性; 在此基础上, 建立电抗器匝间短路故障模型, 计算匝间短路电感矩阵, 精确求解匝间短路电流; 最后, 针对不同位置的电抗器匝间短路故障, 详细分析了短路电流的分布规律以及磁场、电动力的变化情况。

收稿日期: 2018-03-24; **修回日期:** 2018-12-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577050); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B14022); 江苏省电力公司重点科技项目(J2018014)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577050), the 111 Project(B14022) and the Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Corporation(J2018014)

1 数学模型的建立

1.1 电感与磁场的计算

电抗器本体是由多个包封组成的,每个包封并联多层导线,每层导线又由多匝线圈绕制而成,整体结构为圆筒状。设电抗器有 N 个包封,每个包封并联 M_i 层导线,共有 $W = \sum_{i=1}^N M_i$ 层,因此,电抗器在物理结构上可以等效为 W 层并绕的线圈,在电路可以等效为 W 条电阻与电感并联的支路。

电抗器电感与磁场等效计算模型如图1所示。图中, r_i, r_j 为各层线圈绕制半径; H_i, H_j 为各层线圈绕制高度; θ 为空间任意待求点 P 与 Z 轴的夹角; $I_j dl$ 为每层线圈计算电流元。电抗器每层自感与互感可以等效为各层线圈的自感及各层线圈之间的互感,根据诺依曼公式与文献[16]共轴圆线圈互感计算方法,更为一般的电抗器各层线圈互感计算公式为:

$$M_{ij} = \int_0^{H_j} \int_0^{H_i} q \{ [1 + (\lambda')^2] K(k) - 2E(k) \} dz_i dz_j \quad (1)$$

$$q = (\mu n_i n_j \sqrt{r_i r_j}) / \lambda, (\lambda')^2 = 1 - \lambda^2$$

$$\lambda^2 = 4r_i r_j / [(r_i + r_j)^2 + (z_i - z_j)^2]$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 x} dx$$

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 x}} dx$$

$$k^2 = 4r_i^2 r_j^2 / L^2, L^2 = (r_i^2 + r_j^2) \beta + 2r_i^2 r_j, \beta^2 = r_i^2 + z_i^2$$

其中, μ 为铝导线的磁导率; n_i, n_j 为各层线圈匝数; $i \leq W; j \leq W; M_{ij} = M_{ji}$ 且 $i \neq j$ (当 $i = j$ 时,可计算自感 L_i); z_i, z_j 分别为线圈 i, j 的轴向高度。

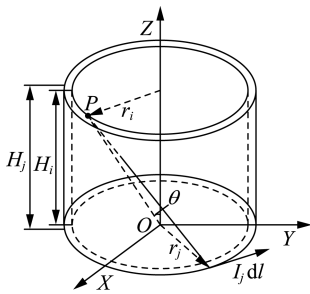


图1 电抗器电感与磁场等效计算模型

Fig.1 Equivalent calculation model of reactor inductance and magnetic field

根据文献[17]中圆环电流在空间产生磁场的计算方法,更为一般的电抗器通有逆时针层电流 I_j 在空间任意点 P 产生的叠加磁感应强度轴向分量 $B_h(i)$ 与径向分量 $B_r(i)$ 为:

$$\begin{cases} B_h(i) = \sum_{j=1}^W n_j \int_0^{H_j} (aE(k) + bK(k)) dz \\ B_r(i) = \sum_{j=1}^W n_j \int_0^{H_j} (cE(k) + dK(k)) dz \end{cases} \quad (2)$$

$$a = \frac{\mu_0 I_j (r_j^2 - r_i^2) e^{3/2}}{2\pi L \rho^2}, b = \frac{\mu_0 I_j e^{1/2}}{2\pi L}$$

$$c = \frac{\mu_0 I_j z (r_i^2 + r_j^2) e^{3/2}}{2\pi r_i L \rho^2}, d = \frac{-\mu_0 I_j z e^{1/2}}{2\pi r_i L}$$

$$\rho^2 = (r_i^2 + r_j^2) \beta - 2r_i^2 r_j, \beta^2 = r_i^2 + z^2$$

其中, μ_0 为真空磁导率; z 为线圈轴向高度。

根据安培定则和叠加定理判断磁感应强度轴向分量 $B_h(i)$ 与径向分量 $B_r(i)$ 的分布,当 $r_i > r_N$ (r_N 为轴向磁场方向发生改变的距离) 时,磁场方向将发生变化,径向分量不变,轴向分量改变。磁场分量分布示意图如图2所示,假设竖直向上为正方向,水平指向电抗器外侧为正方向。

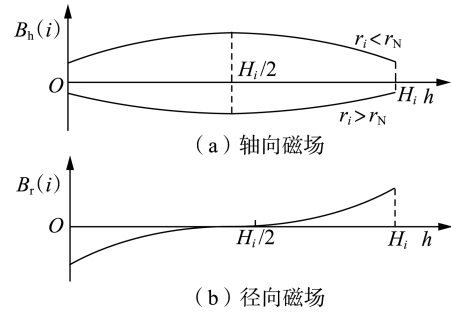


图2 磁场分量分布示意图

Fig.2 Distribution diagram of magnetic field component

1.2 电动力的计算

根据左手定则,径向磁场与电流相互作用产生轴向电动力,轴向磁场与电流相互作用产生径向电动力,受力分布与图2类似^[18]。任意一匝线圈的电动力大小为:

$$\begin{cases} F_h(i) = \left(\oint_{C_i} I_i dl \right) B_r(i) \\ F_r(i) = \left(\oint_{C_i} I_i dl \right) B_h(i) \end{cases} \quad (3)$$

其中, C_i 为第 i 匝线圈长度。

1.3 匝间短路故障等效电路模型

当电抗器发生匝间短路故障时,相当于短路层形成1个单独的短路匝,短路匝与各层线圈磁场交链感应出强电流,对外等效电压为0。理论上可以在不同位置发生任意匝的匝间短路故障,形成 V 个短路匝。

$$V = \sum_{i=1}^W n_i$$

匝间短路故障等效电路如图3所示。图中,电抗器等效为 W 条并联支路; $I_1, I_2, \dots, I_W$ 为各层线圈电流; $I_{W+1}, I_{W+2}, \dots, I_{W+x}$ 为匝间短路电流; $R_1, R_2, \dots, R_W$ 为各层线圈电阻; $R_{W+1}, \dots, R_{W+x}$ 为短路匝电阻; $M_{x,y} (x, y = 1, 2, \dots, W \text{ 且 } x \neq y)$ 为各层线圈之间的互感; $M_{1,W+1}, \dots, M_{W+x,W}$ 为各层线圈与短路匝之间互感; $M_{W+1,W+2}, \dots, M_{W+x,W+x-1}$ 为短路匝之间的互感; $L_1, \dots$

$L_2, \dots, L_W$ 为各层线圈自感; $L_{W+1}, L_{W+2}, \dots, L_{W+x}$ 为短

路匝互感。由此,支路电压方程组中出现 2^V-1 种情

况,其形式为:

$$\dot{U} = M\dot{I} \quad (4)$$

$$M = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & \cdots & j\omega M_{1,W} & j\omega M_{1,W+1} & \cdots & j\omega M_{1,W+x} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ j\omega M_{W,1} & \cdots & R_W + j\omega L_W & j\omega M_{W,W+1} & \cdots & j\omega M_{W,W+x} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ j\omega M_{W+1,1} & \cdots & j\omega M_{W+1,W} & R_{W+1} + j\omega L_{W+1} & \cdots & j\omega M_{W+1,W+x} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ j\omega M_{W+x,1} & \cdots & j\omega M_{W+x,W} & j\omega M_{W+x,W+1} & \cdots & R_{W+x} + j\omega L_{W+x} \end{bmatrix}_{(W+x) \times (W+x)}$$

$$I = [I_1 \cdots I_W \ I_{W+1} \cdots I_{W+x}]^T, U = [U_1 \cdots U_W \cdots 0 \cdots 0]^T$$

其中, $U_1 = U_2 = \cdots = U_{W-1} = U_W = U_N$, U_N 为额定相电压; M 为电感矩阵, $x \leq V$ 。计算电感矩阵,并将计算结果代入式(4),即可获得待求电流。

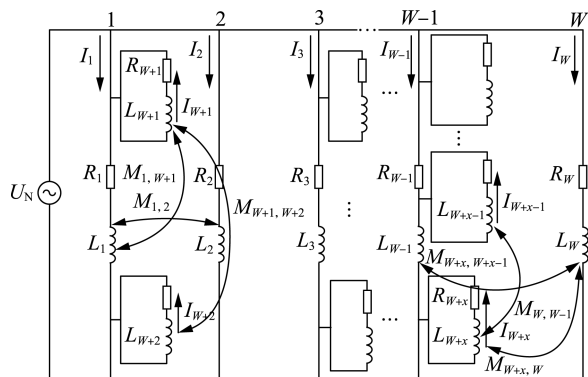


图 3 电抗器匝间短路故障等效电路模型

Fig.3 Equivalent circuit model of turn-to-turn short circuit fault of reactor

2 有限元三维模型的确立

2.1 磁场-电路耦合计算

电抗器各层线圈两端通有工频交流电压,磁场-电路耦合分析方法除满足麦克斯韦方程组外,在求解域内外的磁场满足泊松方程^[2]:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 A_\theta}{\partial r^2} + \frac{\partial A_\theta}{r \partial r} - \frac{A_\theta}{r^2} + \frac{\partial^2 A_\theta}{\partial z^2} = -\mu J \\ \frac{\partial^2 A_\theta}{\partial r^2} + \frac{\partial A_\theta}{r \partial r} - \frac{A_\theta}{r^2} + \frac{\partial^2 A_\theta}{\partial z^2} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, A_θ 为矢量磁势 A 的轴向分量; r, θ, z 分别为圆柱坐标系下的半径、角度和轴向坐标; J 为流经各层线圈与短路匝的电流密度。

各层线圈与短路匝的电路方程满足^[19]:

$$U_i = I_i R_i + \frac{d\Psi_i}{dt} \quad i = 1, 2, \dots, W+x \quad (6)$$

$$\Psi_i = n_i \int_{S_i} \nabla \times A_i dS = n_i \oint_{L_i} A_i dl \quad i = 1, 2, \dots, W+x \quad (7)$$

其中, Ψ_i, A_i 分别为各层线圈与短路匝的磁链、磁

势; ∇ 为哈密顿算子。

求解式(5)~(7),得到矢量磁势 A 的分布值,然后再通过转化处理得到电感、电流和磁感应强度等物理量。

2.2 电抗器结构及参数

本文研究的 BKGL-2000/35 型号的干式空心并联电抗器的主要参数如表 1 所示。该电抗器由 5 包封 20 层铝导线绕制而成,每个包封含有 4 层导线,包封之间采用引拔棒作为撑条,同时形成良好的散热通道,每层导线的首尾焊接在星型架上,并固定压实整个包封。

表 1 干式空心并联电抗器主要参数

Table 1 Main parameters of dry-type air-core shunt reactor

参数	参数值	参数	参数值
容量/kvar	2 000	额定电压/kV	35
电流/A	99	频率/Hz	50
内径/mm	2 012.4	外径/mm	2 342.7
高度/mm	1 800	绝缘等级	F
包封数	5	层数	20

2.3 电抗器匝间短路故障设定

本文以有限元三维模型为仿真对象,正常状态下的电抗器采用 20 层筒状结构代替。为模拟实际运行中经常发生的电抗器匝间短路故障,仿真将以电抗器单匝短路为主。电抗器匝间短路故障模型如附录中的图 A1 所示。在短路层设置一短路匝,短路层被分为 3 个部分,其中,上、下部分为短路层正常电流流经部分,中间部分为短路匝。为分析不同位置的匝间短路状况,每层按线圈绕制高度进行六等分,设置 7 种故障,从内层到外层、底部到顶部依次将匝间短路故障命名为 1-1、1-2、 $\dots$ 、1-7、 $\dots$ 、20-1、20-2、20-6、20-7。因匝间短路情况繁多,为简化计算,以电抗器的 1/4 模型为仿真对象。

2.4 模型假设

在建立电抗器匝间短路故障三维磁场-电路耦合模型的过程中,对物理模型进行如下假设:

a. 匝间短路仿真以层为单位,忽略包封、撑条和星型架等对电磁场的影响;

b. 映射激励为电流,且认为电流在线圈内均匀分布。

3 求解结果分析

在 SolidWorks 中建立电抗器匝间短路故障计算模型,并导入 Maxwell,通过求解器设定、激励添加、网格划分后完成计算。

3.1 电抗器匝间短路电流分析

计算电抗器匝间短路电流的关键在于求得匝间短路电感矩阵,利用解析法与有限元法分别计算了 BKGKL-2000/35 型号的干式空心并联电抗器的自感,计算结果如表 2 所示。由表 2 可知,采用解析法与有限元法计算的自感最大相差 2.3%,这说明通过有限元法计算电抗器电感有较高的精度,且在计算匝间短路电感矩阵时具有更大的优势,验证了模型的正确性。

表 2 计算电感比较

Table 2 Comparison of calculated inductances

层号	自感/mH		层号	自感/mH	
	解析法	有限元法		解析法	有限元法
1	752.980	768.195	11	675.141	685.763
2	750.833	762.944	12	678.232	684.856
3	748.330	759.370	13	679.141	692.864
4	740.489	753.452	14	694.773	701.474
5	704.302	713.432	15	692.502	695.873
6	699.879	710.960	16	692.298	699.145
7	698.115	708.140	17	723.388	729.843
8	695.125	707.131	18	727.139	732.650
9	680.150	695.681	19	726.879	737.485
10	678.757	687.371	20	730.333	743.029

为验证模型的准确性,将该电抗器各层电流的仿真计算结果与实测数据进行比较。电抗器正常状态的层电流可通过 EM 2016A 型钳形电流表(分辨率为 0.001 A)测得,为减小强磁干扰,测量时施加低电压(1 000V),并保证试验现场距电抗器中心 1.2D (D 为电抗器最大直径)范围内无金属闭合回路^[6]。采用逐层测量的方式,对电抗器施加测量电压,读取测量电流。采用式(8)将测得的各层电流 $I_{i,mes}$ 换算成额定电压下的实际电流。

$$\frac{U_N}{I_{i,actl}} = \frac{U_{mes}}{I_{i,mes}} \quad (8)$$

其中, $I_{i,actl}$ 为每层实际电流; U_{mes} 为施加的测量电压; U_N 为各层测量电压。

表 3 为电抗器正常状态下各层电流的仿真计算值与实测值的对比结果。由表 3 可以看出,由该仿真模型计算的电流与实际测量的电流非常接近,层电流最大误差在 1.5% 以内,总电流误差在 0.2% 以内,验证了该模型的准确性。

按照电抗器匝间短路的实际情况建立匝间短路模型,求取匝间短路电感矩阵,然后根据式(4)计算

表 3 正常状态层电流对比

Table 3 Comparison of layer currents in normal state

层号	电流/A		层号	电流/A	
	实测值	计算值		实测值	计算值
1	3.92	3.97	11	5.36	5.37
2	3.97	3.99	12	5.38	5.31
3	3.97	3.99	13	5.48	5.47
4	3.99	3.99	14	5.49	5.46
5	4.56	4.52	15	5.48	5.44
6	4.55	4.52	16	5.43	5.44
7	4.56	4.52	17	5.35	5.43
8	4.58	4.54	18	5.45	5.44
9	5.35	5.36	19	5.43	5.42
10	5.28	5.30	20	5.42	5.40

匝间短路电流,并将匝间短路电流进行轴向和径向对比。

各层不同位置的匝间短路电流分布如附录中图 A2 所示,匝间短路电流轴向对比和径向对比分别如图 4、5 所示。

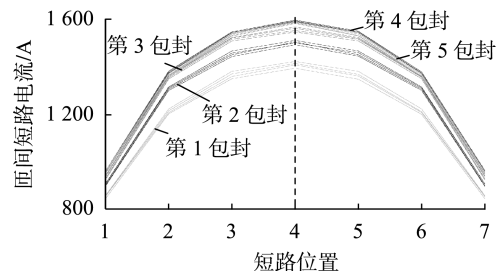


图 4 匝间短路电流轴向对比

Fig.4 Axial comparison of turn-to-turn short circuit currents

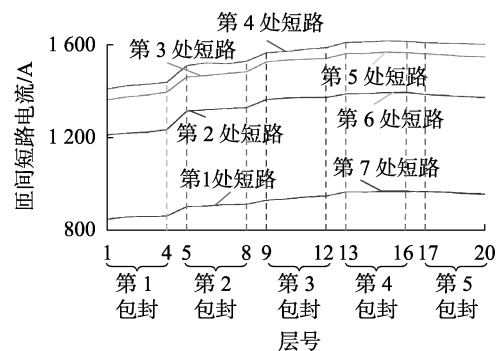


图 5 匝间短路电流径向对比

Fig.5 Radial comparison of turn-to-turn short circuit current

a. 由图 A2 可知,当电抗器发生匝间短路时,短路电流急剧增大,且关于中心位置对称,最大的匝间短路电流出现在故障 15-4 处,其值为 1 617.982 A,是其层电流的 295.3 倍、额定电流的 16.3 倍。

b. 由图 4 可知,轴向上,不同位置的匝间短路电流差别较大,匝间短路电流从端部向中心位置迅速增大,越靠近中心位置,匝间短路电流越大(电抗器高度的 1/2 处的匝间短路电流最大),但增大趋势逐渐减小。

c. 由图 5 可知,径向上,同一包封内的匝间短路电流相近,不同包封内的匝间电流有所差别,包封越

靠近外层,匝间短路电流越大。第1处和7处、第2处和6处、第3和5处的故障对称,匝间短路电流相近。第3、4、5包封的同一故障位置的匝间短路电流几乎相同,第4包封内的匝间短路电流比第5包封内的匝间短路电流大,第1包封内的匝间短路电流较其他包封相对较小。究其原因,当电抗器发生匝间短路故障时,短路处形成短路匝,短路电流 I_{W+x} 与短路匝包围穿过的磁通链 Ψ_{W+x} 关系为:

$$\Psi_{W+x} = \int_{S_{W+x}} \alpha d\Phi_{W+x} = L_{W+x} I_{W+x}$$

其中, α 为短路匝交链的电流匝数。在短路匝自感 L_{W+x} 相差不大的情况下,包围穿过的磁通链越大,匝间短路电流越大^[20],第15层中心位置处是电抗器磁感应强度最小处,内外侧磁场方向不同,包围穿过的磁通链最大,匝间短路电流最大。

因此,轴向上,中心位置处的匝间短路电流较大;径向上,外层短路电流较大。通过仿真还发现,匝间短路对短路层电流不会造成较大的影响。

3.2 磁感应强度与电动力分析

为了比较匝间短路前后磁场的变化情况,对电抗器正常状态下的磁场分布状况进行分析。附录中图A3为电抗器正常状态下的磁感应强度云图与矢量图,图6为电抗器正常状态下磁感应强度轴向与径向分布情况。

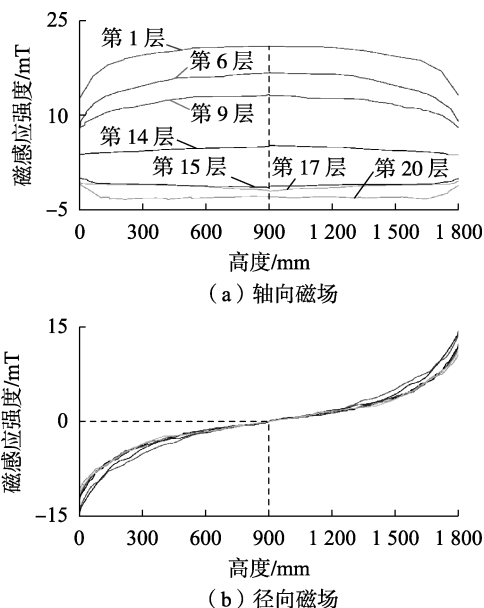


图6 正常状态下磁感应强度的轴向与径向分布

Fig.6 Axial and radial distributions of magnetic induction intensity in normal state

由图A3可知,正常状态下电抗器的磁场关于中心位置对称,最大磁感应强度为21.547 mT,位于第1包封的中心位置。由图6可知,径向上,磁感应强度差别不大,数值接近,方向一致,都是从两端向中心位置减小,在中心位置处近似为0;轴

向上,磁感应强度先增大后减小,但在数值上有明显差别,从第1层到14层依次减小,从第15层到20层反向增大,即从第15层开始,磁场方向发生改变,径向分量不变,轴向分量有180°的反转,此处,第15层线圈绕制半径 $r_{15} > r_N$,磁场方向轴向分量改变,与图2(a)的分析结果一致。这是因为磁感应强度是各层电流产生的磁场在空间各处叠加的结果,当线圈绕制半径大于某一距离时,磁场方向将发生改变。这也解释了发生匝间短路故障时第4包封匝间短路电流大于第5包封内的匝间短路电流的原因。

附录中图A4为1-1、20-4故障下的磁感应强度云图,图7为1-1、9-2、15-3、20-4故障下磁感应强度轴向与径向分布情况。由图A4可知,当发生匝间短路故障时,短路匝巨大的反向短路电流使原来的磁感应强度分布发生变化,磁感应强度最强点由内层变为匝间短路处,磁感应强度明显增大。此时,短路层磁场方向发生变化,径向磁场方向发生改变,如图7所示。

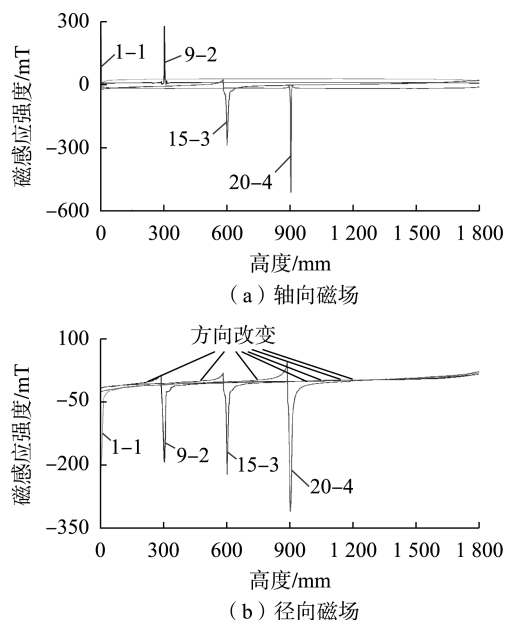


图7 匝间短路磁感应强度轴向与径向分布

Fig.7 Axial and radial distributions of magnetic induction intensity of turn-to-turn short circuit

正常状态下第6、15层的电动力密度矢量分布如附录中图A5所示,1-1、20-4匝间短路电动力密度矢量分布如附录中图A6所示。由图A5可知,正常状态下电抗器所受电动力使其有向外压紧的趋势,在中心位置处,电动力只有径向分量;从第15层开始,电动力方向发生改变,由向外压紧状态变为向内压紧状态,轴向分量不变,径向分量有180°的反转。总体而言,正常状态下电抗器所受电动力使其各层聚集变矮。当发生电抗器匝间短路时,由于电动力与电流平方成正比,短路处电动力较正常状态

明显增大,与磁场变化规律相似,短路层电动力方向亦发生变化,短路匝附近的轴向电动力方向发生改变,如图A6所示。此时电动力使电抗器趋于发散状态,由聚集变矮转为膨胀增大,导致使匝间绝缘遭到破坏,电抗器停止运行。

4 结论

本文根据实际干式空心电抗器建立了匝间短路三维仿真模型,在精确计算匝间短路电流的条件下得到了如下结论。

a. 当电抗器发生匝间短路时,短路电流迅速增大,方向与层电流方向相反。轴向上,短路电流从端部向中心位置呈现增大趋势;径向上,短路电流从内层向外层呈现增大趋势。

b. 第4包封第15层中心位置处有最大短路电流1 617.982 A,且第4包封的短路电流大于第5包封的短路电流,整个电抗器匝间短路电流变化区间为[847.024,1 617.882] A。即电抗器匝间短路存在最大短路电流点,其位置位于中心高度处且内外轴向磁场方向相反的层。

c. 通过计算匝间短路电流大小,一方面可用于分析短路位置对电抗器的影响,另一方面可对短路位置进行预测。

d. 磁场由中心位置的对称状态,转变为匝间短路处磁感应强度最大;电动力与磁场具有相似的变化规律,两者在短路处迅速增大,短路层因方向相反短路电流的存在,磁场与电动力方向发生改变。研究并利用磁场与电动力在匝间短路时的变化规律可进行匝间短路监测。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] LEITCH J D. Transactions of the American institute of electrical engineers[J]. IEEE Journals & Magazines, 1949, 68(1): 469-475.
- [2] 杜华珠,文习山,鲁海亮,等. 35 kV 三相空心电抗器组的磁场分布[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2858-2862.
DU Huazhu, WEN Xishan, LU Hailiang, et al. Magnetic field distribution around 35 kV three-phase air-core reactors[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2858-2862.
- [3] 赵文清,王强,牛东晓. 基于贝叶斯网络的电抗器健康诊断[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 40-43.
ZHAO Wenqing, WANG Qiang, NIU Dongxiao. Reactor health diagnosis based on Bayesian network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 40-43.
- [4] 杜建华,范玉辉. 干式空芯电抗器在铁路供电系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 1999, 19(1): 49.
DU Jianhua, FAN Yuhui. Application of dry-type air-core reactor in railway power supply system[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(1): 49.
- [5] 夏长根. 一起35 kV干式并联空心电抗器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(5): 43-45.
- [6] 陈超强,文习山,张孝军,等. 空芯电抗器磁场对周围设施影响的测试研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 19-26.
CHEN Chaoqiang, WEN Xishan, ZHANG Xiaojun, et al. Study and measurement on the influence of magnetic field of dry-type air-core reactor on adjacent metal loop and communication apparatus[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 19-26.
- [7] 廖敏夫,程显,翟云飞. 干式空心电抗器脉冲振荡匝间绝缘检测系统的仿真与试验[J]. 高电压技术, 2011, 37(6): 1343-1348.
LIAO Minfu, CHENG Xian, ZHAI Yunfei. Simulation and experiment on impulse oscillating turn-to-turn insulation test system of dry-type air core reactor[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1343-1348.
- [8] 江少成,戴瑞海,夏晓波,等. 干式空心电抗器匝间绝缘检测原理及试验分析[J]. 高压电器, 2011, 47(6): 67-71.
JIANG Shaocheng, DAI Ruihai, XIA Xiaobo, et al. Principle and analysis on inter-turn insulation detection of dry-type air-core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 67-71.
- [9] 骆晓龙,张良,王永红,等. 干式空心电抗器匝间绝缘试验方法有效性分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(1): 74-78.
LUO Xiaolong, ZHANG Liang, WANG Yonghong, et al. Analysis of the effectiveness of turn-to-turn insulation test methods for dry-type air-core reactors[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2014, 19(1): 74-78.
- [10] 张国兵,张文亮. 特高压交流输电系统中110 kV并联电抗器试验及匝间短路保护问题辨析[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 303-309.
ZHANG Guobing, ZHANG Wenliang. Discrimination on test and turn-to-turn short circuit protection of 110 kV shunt reactors in UHVAC transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 303-309.
- [11] 毕大强,王祥珩,王维俭. 基于测量阻抗变化的并联电抗器小匝间短路保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 57-60.
BI Daqiang, WANG Xiangheng, WANG Weijian. Measured impedance based on shunt reactor protection against small inter-turn fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 57-60.
- [12] 辛振涛,尹项根,杨经超,等. 基于等效电感的超高压并联电抗器匝间保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 73-75.
XIN Zhen tao, YIN Xianggen, YANG Jingchao, et al. A new principle of the parallel connection reactor inter-turn protection based on an equivalent inductance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 73-75.
- [13] 张芬芬,郑涛,刘连光. TCT式并联电抗器控制绕组匝间故障保护方案[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 135-141.
ZHANG Fenfen, ZHEGN Tao, LIU Lianguang. Protection schemes for control winding inter-turn faults of TCT-type shunt reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 135-141.
- [14] 张俊杰,刘兰荣,刘东升,等. 用场路耦合模拟变压器线圈部分短路故障电流的方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 65-70.
ZHANG Junjie, LIU Lanrong, LIU Dongsheng, et al. A method of simulating the fault current using field-circuit coupling for partially short-circuited transformer winding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 65-70.
- [15] NAKATA T, TAKAHASHI N. Direct finite element analysis of flux and current distributions under specified conditions[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1982, 18(2): 325-330.
- [16] 向裕民. 平行共轴载流圆线圈间的磁力计算[J]. 重庆大学学

- 报(自然科学版),1997,20(6):49-52.
- XIANG Yuming. Calculation of magnetic force between two parallel coaxial circular coils carrying currents[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition),1997,20(6):49-52.
- [17] 曾令宏,张之翔. 圆环电流的磁场以及两共轴圆环电流之间的相互作用力[J]. 大学物理,2002,21(9):14-16,41.
- ZENG Linghong,ZHANG Zhixiang. The magnetic field of a circular current loop and the interaction between two circular current loops[J]. College Physics,2002,21(9):14-16,41.
- [18] 刘宝稳,马宏忠,李凯,等. 大型变压器绕组轴向固有频率振动分布特性与实验分析[J]. 高电压技术,2016,42(7):2329-2337.
- LIU Baowen,MA Hongzhong,LI Kai,et al. Distribution characteristics and experimental analysis of natural frequency vibration of large transformer winding[J]. High Voltage Engineering,2016,42(7):2329-2337.
- [19] 潘超,王梦纯,蔡国伟,等. 变压器直流偏磁场路耦合计算中的磁化曲线拟合[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):49-52.
- PAN Chao,WANG Mengchun,CAI Guowei,et al. Magnetization curve fitting in field-circuit coupling computation for DC-biased transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):49-52.
- [20] 吴海涛,吕志宁,张浩,等. 并联电抗器运行异常分析及处理[J]. 电力自动化设备,2001,21(8):67-69.
- WU Haitao,LÜ Zhining,ZHANG Hao,et al. Research on the abnormality of parallel connective reactor[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(8):67-69.

作者简介:



吴书煜

吴书煜(1992—),男,山东莒南人,硕士研究生,主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断(E-mail:wusy010101@163.com);

马宏忠(1962—),男,江苏如皋人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断、磁悬浮承重技术、电力系统谐波分析(E-mail:huhmh@163.com)。

Calculation and analysis of three-dimensional model for turn-to-turn short circuit of high voltage reactor

WU Shuyun¹, MA Hongzhong¹, WEI Xu², CHEN Xuan³, XU Honghua⁴, LIU Baowen¹, SONG Kaisheng¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China;

4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: In order to study the distribution law of turn-to-turn short circuit current, magnetic field and electrodynamic force varying with the change of turn-to-turn short circuit fault position for dry-type air-core reactor, a three-dimensional magnetic-field-electric calculation model of turn-to-turn short circuit of dry-type air-core reactor under external circuit constraints is built based on the field-circuit coupling electromagnetism theory. The inductance and the current of each layer of the model in normal state are calculated by the finite element method. The calculated results are compared with the results gained by the analytical method and measured data to verify the accuracy of the model. The model of turn-to-turn short circuit fault is built to accurately calculate the turn-to-turn short circuit current. The study results show that when turn-to-turn short circuit fault of reactor occurs, the short circuit current sharply increases compared to the normal current; the short circuit current of turn-to-turn short circuit fault in different positions tends to increase from the end to the center and from the inner layer to the outer layer; the magnetic field and electrodynamic force in the position of turn-to-turn short circuit fault increase rapidly, and the directions of magnetic field and electrodynamic force in the short circuit layer changes.

Key words: dry-type air-core reactor; turn-to-turn short circuit; inductance matrix; short circuit current; magnetic field; electrodynamic force; models

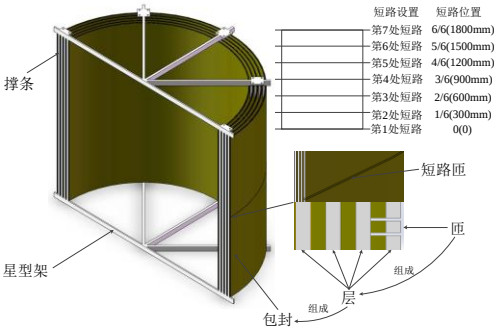


图 A1 电抗器匝间短路模型与故障设置

Fig.A1 Model and fault setting of turn-to-turn short circuit of reactor

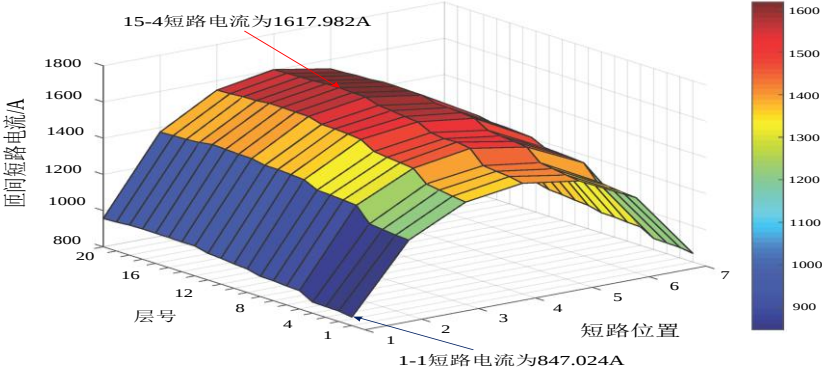


图 A2 不同位置的匝间短路电流分布

Fig.A2 Distribution of turn-to-turn short circuit current of different positions

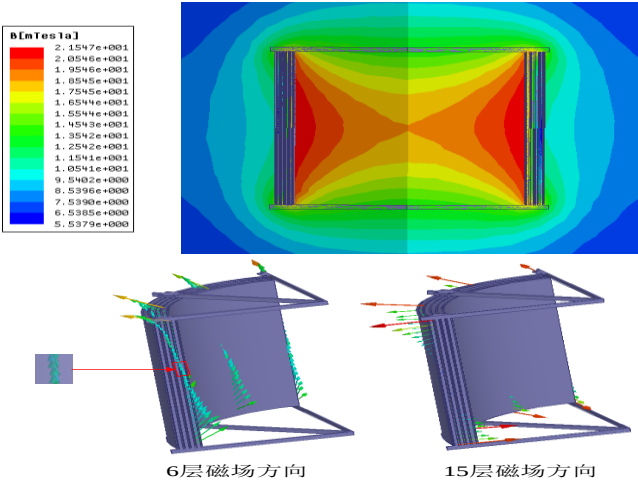


图 A3 正常状态下的磁感应强度云图与矢量图

Fig.A3 Magnetic induction intensity nephogram and vector diagram in normal state

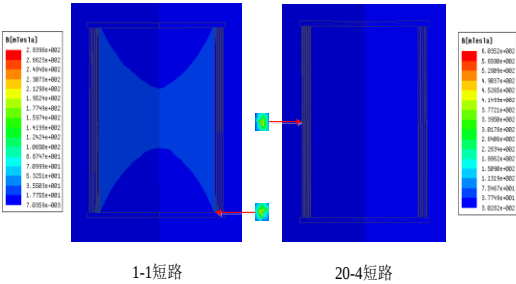


图 A4 匝间短路磁感应强度云图

Fig.A4 Magnetic induction intensity nephogram of turn-to-turn short circuit

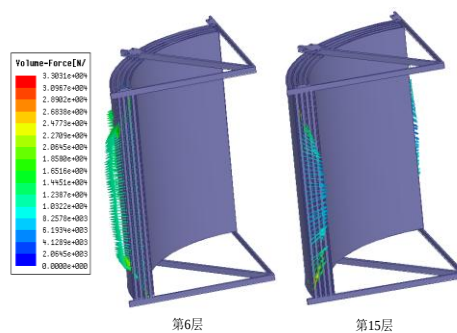


图 A5 正常状态电力密度矢量分布

Fig.A5 Electrodynamic force density vector distribution in normal state

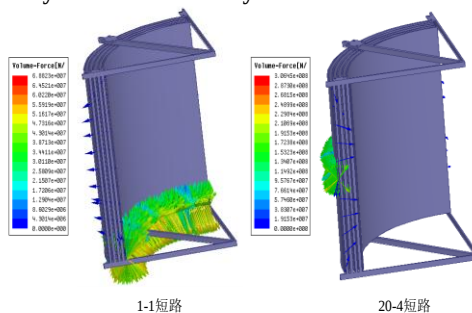


图 A6 匝间短路电力密度矢量分布

Fig.A6 Electrodynamic force density vector distribution of turn-to-turn short circuit