

采用电磁仿真软件计算变压器的短路阻抗

曹会川, 边庆恺, 王亚静, 刘 涛, 陈军明, 吴文林

(保定保菱变压器有限公司, 河北 保定 071000)

摘要: 介绍了一种采用电磁场建模仿真类软件通过储存的能量求解变压器短路阻抗的方法。将此方法与常规计算方法的结果进行对比, 证明其具有更高的准确性。同时, 利用这种计算方法可以解决一些常规解析计算方法难于计算阻抗的特型变压器或电抗器的设计及现场多绕组变压器在不同工况下运行时变压器阻抗的计算评估问题。

关键词: 变压器; 电磁场建模分析类软件; 能量; 短路阻抗

Using electromagnetic field simulation analysis software to calculate the short-circuit impedance of transformer

CAO Huichuan, BIAN Qingkai, WANG Yajing, LIU Tao, CHEN Junming, WU Wenlin

(Baoding Baoling Transformer Co., Ltd., Baoding 071000, China)

Abstract: A method by using electromagnetic field simulation analysis software which can calculate the transformer short-circuit impedance from stored energy is introduced. Comparing with the results of conventional calculation method, this method can obtain more accurate short-circuit impedance. Furthermore this method can not only be used to get the short-circuit impedance of special transformer or reactor, which is difficult to be obtained using conventional calculation method, but also be used to calculate and evaluate the short-circuit impedance of multi-winding transformer in different field running conditions.

Key words: transformer; electromagnetic field simulation analysis software; energy; short-circuit impedance

0 引言

对于变压器短路阻抗设计, 采用传统的解析计算方法并结合经验系数, 基本能够准确计算出短路阻抗, 可以满足工程设计的需求, 但由于变压器内部漏磁场受变压器线圈高度、幅向和漏磁面积等因素影响较大, 对于同种类型产品的不同的设计, 其经验系数也会有所差别, 只能通过大量实际产品的试验数据进行积累。

本文提出了一种采用电磁仿真软件对变压器的短路阻抗进行计算分析的方法, 从而更加精准地计算出变压器的短路阻抗。

1 建模分析软件简述

目前, 电磁场类的建模分析软件可选择的种类较多, 如Infolytica Magnet、Ansys、JMAG-Designer和Ansoft Maxwell等, 无论哪种软件, 均需要根据变压器实际尺寸建造模

型、定义材料、设定边界条件、剖分解析以及后处理，并得出所需的结果。

以下主要通过通过对一种双绕组变压器进行建模、短路阻抗计算来说明如何采用电磁仿真软件计算变压器的短路阻抗值。

2 变压器短路阻抗建模计算分析

以一台型号为SZ11-50000/110，电压比为 $(110 \pm 8 \times 1.25\%) \text{ kV}/10.5 \text{ kV}$ ，短路阻抗要求值为16.5%的双绕组有载调压变压器为例进行计算。

2.1 建造模型

图1为变压器内部结构示意图。

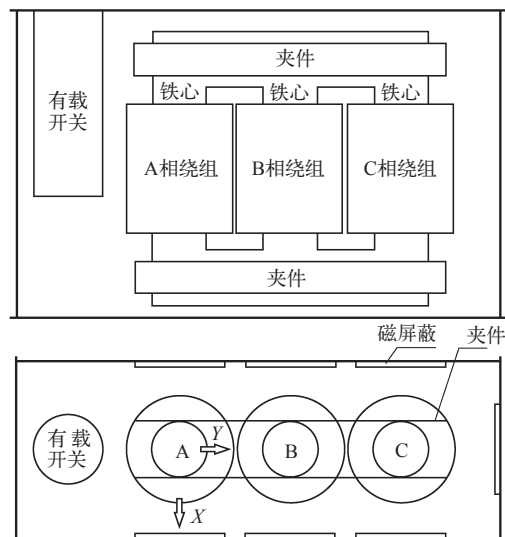


图1 变压器内部结构示意图

Fig. 1 Internal structure diagram of transformer

为了建立变压器磁场计算模型，必须确定如何建立模型。从图1可以看出，由于绕组上下部分铁轭的强导磁作用会导致变压器内部漏磁通分布在X、Y两个方向，其余位置介于X、Y两个方向之间。因此，在建模分析时主要对X（油箱侧）、Y（铁轭侧）两个方向的典型模型进行计算。

确定了建立的模型方案，再根据变压器内部铁心、线圈和油箱等的尺寸进行模型的绘制。本次计算采用轴对称模型，针对变压器的一相，按图1中X和Y方向所建造的模型如图2、

图3所示，图2和图3中以R轴为对称轴。

2.2 定义材料

图2、图3中，序号5~9、序号11~15为变压器线圈，其材料可定义为导体铜；序号1、序号10变压器夹件定义为钢材；序号3油箱定义为钢材；序号2铁心、序号4油箱磁屏蔽定义为硅钢片。由于磁场的计算与变压器内部非导磁介质无关，因此运行环境介质可以定义为空气。

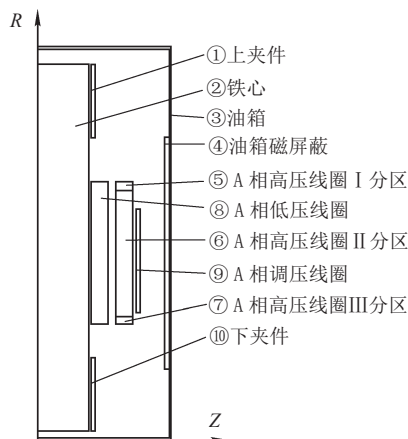


图2 X方向计算模型

Fig. 2 Calculation model in X direction

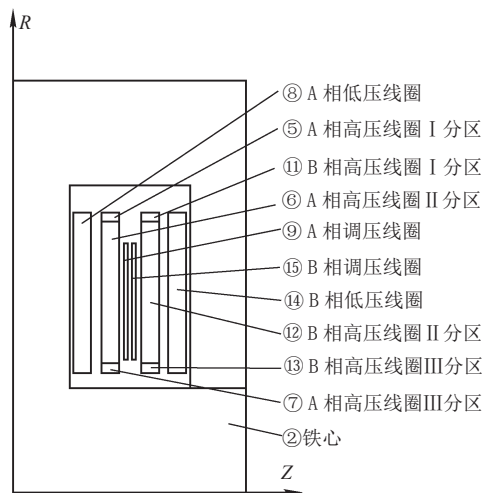


图3 Y方向计算模型

Fig. 3 Calculation model in Y direction

2.3 设定计算条件

如上所述，本文分析的SZ11-50000/110变压器，按变压器运行工况，在图2、图3模型中将运行工况的具体参数输入，从而确定磁场计

算的基础参数。

本文主要对变压器满容量以及高压最大、额定和最小分接三种工况下的参数进行计算，其中各线圈各个分区在三种分接情况下的具体参数如表1~表3所示，表1~表3中，序号5~9按图2、图3中线圈的序号表示。

表1 最大分接时线圈参数

Tab. 1 Coil parameters at maximum tapping

线圈序号	匝数/匝	电流/A	安匝数/A·匝
5	25.70	238.57	6 131.25
6	474.60	238.57	113 225.32
7	25.70	238.57	6 131.25
8	87.00	1 587.30	138 095.10
9	52.00	238.57	12 405.64

表2 额定分接时线圈参数

Tab. 2 Coil parameters at rated tapping

线圈序号	匝数/匝	电流/A	安匝数/A·匝
5	25.70	262.43	6 744.45
6	474.60	262.43	124 549.30
7	25.70	262.43	6 744.45
8	87.00	1 587.30	138 095.10
9	52.00	0.0	0.00

表3 最小分接时线圈参数

Tab. 3 Coil parameters at minimum tapping

线圈序号	匝数/匝	电流/A	安匝数/A·匝
5	25.70	291.59	7 493.86
6	474.60	291.59	138 388.60
7	25.70	291.59	7 493.86
8	87.00	1 587.30	138 095.10
9	-52.00	291.59	15 162.68

将以上线圈参数作为最重要的一部分计算条件输入至建立的模型中，同时将模型计算的电源频率、边界条件及后处理的参数设置妥当就可开始对模型进行磁场分析。

2.4 模型计算结果

通过电磁仿真分析软件的计算，可以得出以上三种运行工况下的变压器模型漏磁场的分布及储能结果。

图4为额定分接情况下图2、图3两个模型的漏磁通磁力线分布图。图5为额定分接情况下图2模型的储能计算结果。图6为额定分接情况下图3模型的储能计算结果。

同样可以得到最大、最小分接情况下的漏

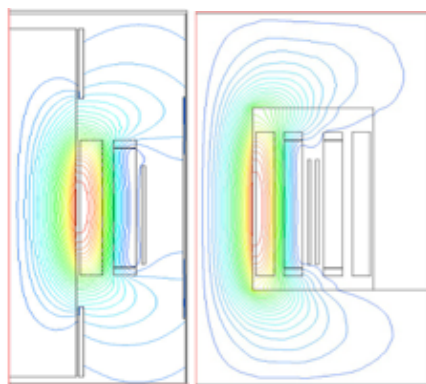


图4 额定分接情况下两个模型的磁力线分布图

Fig. 4 Distribution diagram of magnetic lines of two models at rated tapping

Pass	Triangles	Total Energy(J)	Energy Error(%)	Total
1	107	3.80060E+003	408040.6799	
2	147	4.06689E+003	15027.3317	
3	208	4.12264E+003	4199.7620	
4	291	4.15503E+003	1818.5714	
5	430	4.18430E+003	894.7255	
6	696	4.20106E+003	415.7392	
7	1195	4.20722E+003	165.1764	
8	1828	4.22038E+003	62.8728	
9	2849	4.22270E+003	33.3492	
10	4393	4.23041E+003	9.8162	
11	6600	4.22896E+003	3.5450	
12	9762	4.22660E+003	1.1653	
13	14394	4.23033E+003	0.3963	
14	21019	4.22938E+003	0.1337	

图5 额定分接情况下图2模型的储能计算结果

Fig. 5 The calculation results of energy storage of the model shown in Fig 2 for rated tapping

Pass	Triangles	Total Energy(J)	Energy Error(%)	Total P
1	120	3.87064E+003	210139.7031	
2	189	4.48809E+003	11570.7064	
3	270	4.50692E+003	512.3335	
4	398	4.51232E+003	21.8599	
5	548	4.49651E+003	6.2648	
6	867	4.51588E+003	1.5705	
7	1258	4.51591E+003	0.8132	
8	1774	4.51346E+003	0.3164	
9	2556	4.51408E+003	0.1279	
10	3745	4.51710E+003	0.0526	

图6 额定分接情况下图3模型的储能计算结果

Fig. 6 The calculation results of energy storage of the model in Fig 3 for rated tapping

磁通磁力线分布及储能计算结果，储能计算结果汇总如表4所示。

表4 最大、额定和最小分接工况下储能计算结果汇总

Tab. 4 Summary of energy storage calculation results under maximum, rated and minimum tapping conditions

(单位: J)

储能计算结果	图2模型	图3模型
最大分接	4 591.92	4 675.22
额定分接	4 229.38	4 517.10
最小分接	4 324.06	4 421.08

2.5 短路阻抗计算

如上所述,采用仿真分析软件已经计算出不同工况下的变压器储能情况,可以根据以下两个方程式对变压器感抗值进行计算。

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1)$$

$$X = 2\pi fL \quad (2)$$

式中, E 为储能能量, J; L 为电感量, H; I 为电流值, A; X 为感抗值, Ω 。

将式 (1) 代入式 (2), 可得

$$X = \frac{4\pi fE}{I^2} \quad (3)$$

变压器最大、额定和最小分接三种工况下高压侧参数,如表5所示。

表5 最大、额定和最小工况下高压侧参数汇总

Tab. 5 Summary of high voltage side parameters under maximum, rated and minimum working conditions

	线电压/kV	相电压 U/kV	相电流 I/A	$(U/I)/\Omega$
最大分接	121.00	69.86	238.57	292.83
额定分接	110.00	63.51	262.43	242.01
最小分接	99.00	57.16	291.59	196.03

将表5中的电流值和表4中的能量值代入式 (3), 可得出变压器最大、额定和最小工况下按图2、图3模型的感抗计算值,如额定分接情况下图2模型的感抗值计算为

$$\begin{aligned} X &= 4\pi fE/I^2 \\ &= (4\pi \times 50 \times 4\,229.38)/262.43^2 \\ &= 38.59\, \Omega \end{aligned} \quad (4)$$

其他各种工况下的感抗值计算汇总如表6所示。

表6 两种模型在最大、额定和最小工况下的感抗计算值

Tab. 6 Inductive reactance calculation value of two models under maximum, rated and minimum working conditions

工况	图2模型感抗值 X/Ω	图3模型感抗值 X/Ω
最大分接	50.69	51.61
额定分接	38.59	41.21
最小分接	31.95	32.67

那么,变压器高压侧的感抗标么值即为表6中计算出的感抗值欧姆值占表5中高压侧的 U/I 欧姆值的百分数,计算结果如表7所示。

变压器最大、额定和最小分接三种工况下最终的感抗结果值可以取图2模型和图3模型标么值计算结果的方均根值,即表7中图2模型、图3模型数据的方均根值,其计算结果见表7中感抗结果值。

表7 感抗标么值计算结果

Tab. 7 Calculation result of unit value of inductive reactance

工况标么值	图2模型标么值 (%)	图3模型标么值 (%)	感抗结果值 (%)
最大分接	17.31	17.63	17.47
额定分接	15.94	17.03	16.50
最小分接	16.30	16.67	16.48

对于本文分析的SZ11-50000/110变压器,由于变压器容量较大,变压器短路阻抗的电阻分量占比很小,可以忽略不计,因此认为表7中感抗结果值可以直接作为变压器的短路阻抗电压标么值。

2.6 计算结果分析

针对本台变压器实际产品,通过以上电磁场仿真分析软件分析并计算出的短路阻抗,采用常规解析方法配合经验系数计算出的计算结果和产品的实测结果偏差的对比如表8所示。

从表8可以看出,虽然常规的解析方法配合经验系数计算出的短路阻抗值与实测值已经非常接近,偏差仅有1.49%,但采用以上介绍的电磁场仿真计算方法得出的短路阻抗计算结果与产

表8 短路阻抗结果对比

Tab. 8 Comparison of short circuit impedance results

(单位: %)

工况	仿真算法		常规解析法		实测结果
	短路阻抗 计算值	偏差	短路阻抗 计算值	偏差	
最大分接	17.47	0.40	17.66	1.49	17.4
额定分接	16.50	0.60	16.84	1.45	16.6
最小分接	16.48%	0.0	16.70	1.21	16.5

品实测值更加接近, 偏差值达到了1%以下。

究其主要原因, 采用常规解析方法在线圈高度、线圈幅向和主漏磁面积等结构尺寸影响下, 其漏磁场的分布是不同的, 尤其是线圈的端部横向漏磁的区别较大, 而采用的计算方法及公式却是相同的。因此对于每台变压器的设计, 该解析法计算过程中其经验系数受线圈高度、幅向大小等尺寸的影响, 计算短路阻抗时, 只能大量参考以往已经制作过的产品去找寻其经验系数的规律, 从而更好地指导变压器的短路阻抗计算。而采用电磁场仿真分析软件建模分析却能更加实际地反映出变压器内部的漏磁通情况, 从而得出更加准确的短路阻抗计算结果。

3 结束语

综上所述, 采用电磁场仿真软件可以更加准确地得到变压器的短路阻抗值, 对于常规的双绕组或三绕组变压器设计, 仍然可以依托常规解析法为其主要方法, 一旦出现产品的设计值和实测值偏离较大, 则可以借助以上的仿真软件进行分析, 作为判断产品是否存在问题的

一种方法。

在进行特型的变压器或电抗器的设计时, 在绕组的排列联结比较复杂(即漏磁通较为复杂)的情况下, 采用传统的解析方法计算的短路阻抗偏差值就会增大。为了保证该类产品的短路阻抗计算的准确性, 可以采用传统计算方法进行设计计算, 同时采用电磁仿真方法进行验证修正, 再次采用传统计算方法进行调整的方法流程进行设计计算, 从而使产品短路阻抗达到满意度。

同样, 以上仿真方法也可以解决多绕组变压器不同工况联合运行情况下对变压器短路阻抗的计算评估, 从而解决用户各种运行工况下的实际问题。

参考文献

- [1] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [2] 崔立君. 特种变压器理论和设计[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1995.
- [3] 刘广西. 变压器短路阻抗的能量法工程计算[J]. 变压器, 2016, 53(10): 13-15.

作者简介



曹会川

曹会川(1986-), 男, 高级工程师, 长期从事变压器的设计研发工作。

(收稿日期: 2018-07-11) **EA**