基于ANSYS的大型电力变压器外绕组辐向稳定性分析

针对大型电力变压器的辐向失稳现象，以一台220 kV/120 MV·A双绕组变压器为例进行分析。运用ANSYS有限元软件对内绕组出口处发生三相对称短路工况下外绕组的辐向短路电磁力进行计算，同时建立外绕组的三维力学模型，用瞬态分析法求取循环载荷下的位移变形量，并对实例变压器外绕组的辐向稳定性进行校核，证实该变压器绕组在辐向短路电磁力的作用下是稳定的。

李祎春　刘文里／哈尔滨理工大学电气与电子工程学院
霍　霖　李　慧／国电怀安热电有限公司

李祎春／硕士研究生

关键词/Keywords
大型电力变压器·
外绕组·
有限元法·
辐向短路电磁力·
辐向稳定性·

0　引言

变压器突发短路工况下的电磁力问题随着变压器容量的增加而越发尖锐，绕组短路电磁力的准确计算与稳定性的详细分析是变压器制造业急需攻破的课题之一[1-2]。大量的事故分析表明，辐向失稳是大型变压器失稳的主要形式，据统计其占所有失稳状态的90%以上。辐向失稳会引起变压器绕组变形，甚至出现匝绝缘破裂而导致匝间短路[3]。

迄今为止，众多学者已对变压器绕组辐向稳定性问题进行了深入的研究，并取得了令人瞩目的骄人业绩。文献[4]对变压器的低压绕组建立了二维动力学模型，运用屈曲分析的方法来分析绕组的辐向稳定性。文献[5]提出了绕组辐向稳定性分析的大位移几何非线性理论。文献[6]以弹簧－质量模型与应力为依据对变压器绕组的稳定性进行了评估。

上述研究成果对变压器的研究与设计具有指导性意义，为后来学者的理论研究奠定了坚实基础，但目前工程中多采用二维有限元方法对绕组辐向稳定性进行分析，准确度方面尚存在些许不足。故本文以ANSYS有限元软件为平台，建立外绕组的三维力学模型，利用瞬态分析法求出外绕组（高压绕组）循环载荷下的非线性位移变形量，并对实例变压器外绕组分别进行力与位移的辐向稳定性校核。

1　辐向短路电磁力计算与校核

1.1　辐向短路电磁力计算

本文以一台220 kV/120 MV·A双绕组变压器为例，应用“场－路耦合”原理，在变压器内部采用磁场，外部采用电路参数连接。通过ANSYS有限元软件，对变压器建立内绕组（低压绕组）出口处发生三相对称短路的二维有限元模型，同时计及线饼实际结构、油道尺寸、绕组绕制方式及短路电流非正弦瞬变等因素，实例变压器二维有限元模型如图1所示。

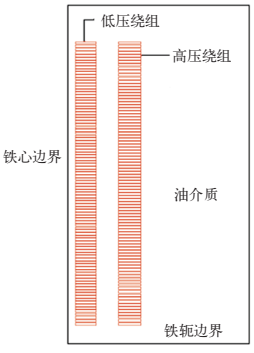


图1　变压器有限元模型

对实例变压器的分析过程作如下假设[7]。

中国知网　https://www.cnki.net

1）将变压器的漏磁场视作二维非线性场。

2）忽略绕组导线涡流去磁的影响。

3）将金属导体的电导率视作常数，铁磁材料的磁导率趋于无穷。

4）忽略铁心对绕组漏磁场的影响。

绕组区域自由度为矢量磁位***A***、电流为***CURR***和电动势降为***EMF***，非导电区油的自由度为矢量磁位***A*** [7]。

实例变压器主要参数如下表所示。

表　变压器主要参数

主要项目	参数值	
额定容量/MV·A	120	
额定电压比/kV	(230±8×1.25%)/69	
联接组别	YNd11	
铁心半径/mm	414	
绕组	内绕组	外绕组
绕组型式	连续式	内屏连续式
内半径/mm	450	620
外半径/mm	555	733
绕组段数	98	92

运用ANSYS有限元软件中的谐波分析法求得实例变压器的短路阻抗值为13.95%，与实测值14.05%的误差为－0.712%，符合工程要求，说明可以运用所建立的模型进行后续的计算与分析。

短路电流峰值随时间变化曲线如图2所示。

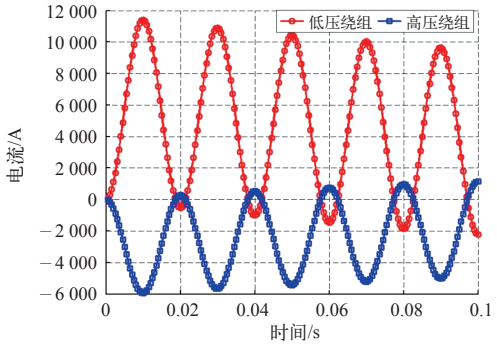


图2　短路电流峰值随时间变化曲线

图2中高、低压绕组的短路电流峰值分别为11 422.9 A和－5 936.3 A，故稳态短路电流倍数分别为11.37和11.38，两值近似相等。

变压器内的磁力线分布如图3所示，可见内、外绕组间的主漏磁空道处磁力线最为稠密，沿绕组竖直方向，中部磁力线近乎平行于内、外绕组，而上、下两端部磁力线弯曲严重，故在绕组的两端部可以将漏磁分解为轴向漏磁与辐向漏磁[8]。

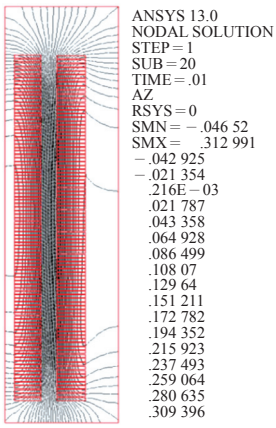


图3　磁力线分布图

图4为短路电流峰值最大（即t＝0.01 s）时，外绕组各线饼上轴向漏磁分布情况，可知此时外绕组第46号线饼上轴向漏磁最大，第92号线饼上轴向漏磁最小。

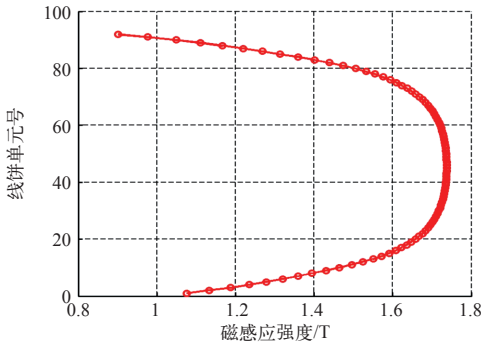


图4　外绕组轴向平均漏磁分布曲线

t＝0.01 s时外绕组各线饼上的辐向短路电磁力分布情况如图5所示，最大值亦出现在第46号线饼上，为76.915 kN/m，分别提取外绕组第1、46和92号线饼上辐向短路电磁力随时间变化情况，并绘

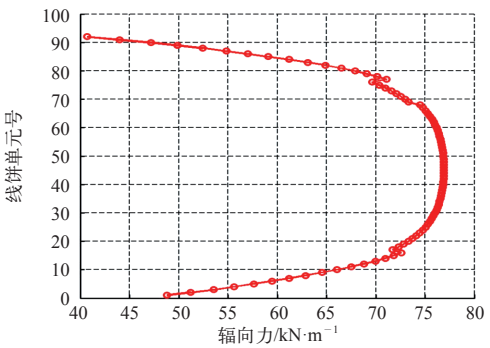


图5　外绕组辐向短路电磁力分布曲线

中国知网 https://www.cnki.net

制成曲线如图6所示[9-10]。

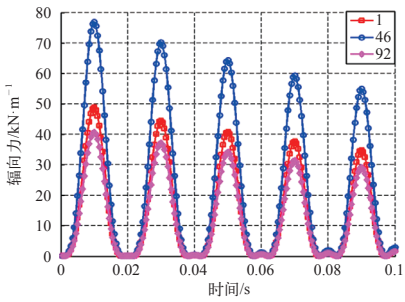


图6 外绕组辐向短路电磁力随时间变化曲线

1.2 辐向短路电磁力校核

绕组辐向失稳平均临界应力公式为[11]

$$F_B = \frac{E\left(\frac{x}{2}\right)^y n^{1.5} b^3 t\left(m^2-1\right)}{12R^3}\times 10^3 \qquad (1)$$

式中，F_B为辐向失稳临界力，kN/m；E为绕组导线弹性模量，即1.225×10^5 MPa；x为每根组合导线内并联导线根数；y为经验系数，即1.4；n为线饼中组合导线根数；b为单根导线辐向宽度，m；t为单根导线轴向厚度，m；m为绕组有效支撑数，即实际撑条数的1/2；R为外绕组的平均半径，m。

将外绕组导线规格 $\mathrm{ZB}-0.3/1.35\frac{3\times1.4\times12.5}{6.35\times13.9/13.76}/2''$ 代入式（1）可求得外绕组辐向失稳临界应力为100.255 kN/m，大于实例变压器辐向短路电磁力的最大值，且安全系数为1.303，故在76.915 kN/m辐向短路电磁力作用下外绕组是稳定的。

2 外绕组位移变形量计算与校核

2.1 外绕组位移变形量计算

利用ANSYS有限元软件的BEAM189模块对外绕组进行建模[12-13]，建模过程中所涉及到的实例变压器参数均按照实际结构给定且在建模时忽略撑条的影响[14]。外绕组的三维模型如图7所示。

变压器二次侧短路工况下，短路电流峰值、变压器内部漏磁场均为随时间变化的非线性量，由于$F=BIL$，故绕组线饼上所承受的辐向短路电磁力亦是一个随时间变化的非线性量，因而在进行外绕组三维力学模型饼力加载时应使用上文所

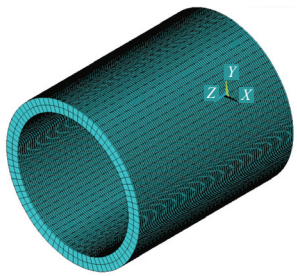


图7 外绕组三维模型

提取的辐向短路电磁力的值，并应用APDL语言对其进行加载，加载后的模型如图8所示。

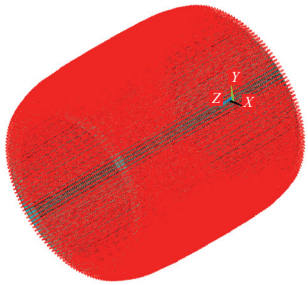


图8 加载载荷后外绕组三维模型

载荷加载完成之后采用瞬态分析法求解，在求解过程中需打开非线性选项。求解之后的绕组位移变形云图如图9所示。显而易见，位移变形量在外绕组中部最大、上下两端最小。外绕组最大位移变形量出现在第46号线饼上，该线饼上的位移最大值为0.211 mm；最小位移变形量出现在第1号线饼上，该线饼上的位移最大值为0.120 mm。用ANSYS中的Time Hist postpro提取此两线饼上的位移变形量随时间变化情况，并绘成曲线如图10所示，该图显示位移变形量随时间变化趋势与辐向短路电磁力随时间变化趋势近似相同，说明所建

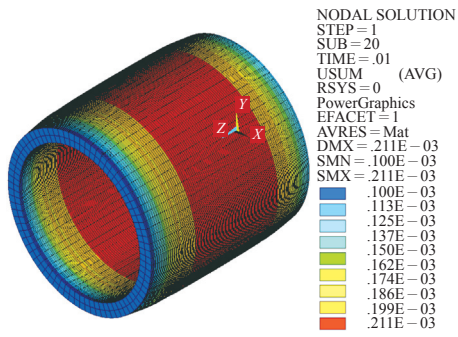


图9 外绕组位移变形云图

中国知网 https://www.cnki.net

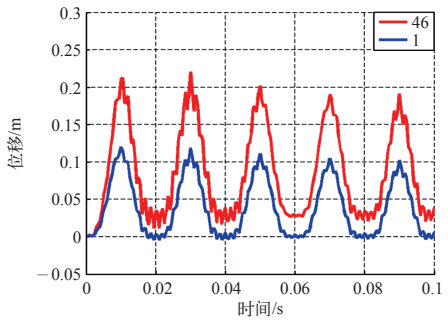


图10 位移变形量随时间变化曲线

立的三维立体模型是正确的[3]。

图11为外绕组第46号线饼上位移变形量随时间及辐向短路电磁力的变化情况，显而易见位移变形量呈非线性变化，且其值是从零到一确定数值间的循环变化，说明该线饼上的导线自始至终均为弹性变形，未发生塑性变形。

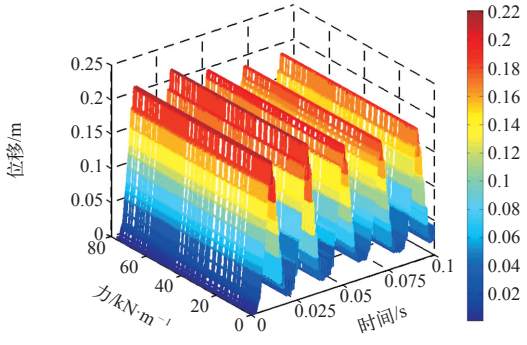


图11 位移变形量随时间与辐向短路电磁力变化曲面

2.2 外绕组位移型变形量校核

绕组导线临界位移变形量公式为[14]

$$\Delta \leqslant \frac{24\sigma_{sav} I_0}{F_r t_v} \tag{2}$$

式中，σ_{sav}为辐向短路电磁力作用下绕组导线的拉应力，kg/cm^2；I_0为绕组极惯性矩，mm；F_r为绕组辐向短路电磁力，N；t_v为单根导线辐向宽度，mm。

辐向短路电磁力作用下绕组导线的拉应力公式为[15]

$$\sigma_{sav} = \frac{12.8K_d K_I (I_N N) I_N R\rho}{m_b n_b H_d S} \times 10^{-3} \tag{3}$$

式中，I_N为额定相电流，A；N为每相额定匝数；K_I为稳态短路电流倍数；R为外绕组平均半径，cm；ρ为洛氏系数；n_b为并联导线根数；m_b为绕组中并联分支数；H_d为绕组有效高度，cm；S为每根导线横截面积，cm^2；K_d为短路电流冲击倍数，可由文献[1]中表9-5查得，本文取1.8。

普通导线的极惯性矩的公式为[14]

$$I_0 = \frac{n_r w_v t_v^3}{12} \tag{4}$$

式中，n_r为线饼内并联导线根数；w_v为单根导线轴向厚度，mm。

将外绕组导线数据代入式（2）～式（4）可得外绕组临界位移变形量为1.802 mm，该值大于外绕组三维力学模型所求得的位移变形量0.211 mm，说明位移变形量符合工程要求。

3 结束语

本文以一台220 kV/120 MV·A大型双绕组变压器为例，分别建立二维、三维力学模型，求得辐向短路电磁力和绕组位移变形量，并通过对力和位移的校核来分析低压绕组出口处发生三相对称短路时绕组的辐向稳定性。

1）对实例变压器应用有限元方法建立二维“场－路耦合”模型，求出外绕组的最大辐向短路电磁力为76.915 kN/m（第46号线饼上），并对其进行辐向稳定性校核，安全系数为1.303，说明外绕组在辐向短路电磁力作用下稳定性良好。

2）以ANSYS有限元软件为平台建立实例变压器的三维力学模型，应用瞬态分析法求得循环载荷下的位移变形量为0.211 mm（第46号线饼上），并对其进行辐向稳定性校核，可知外绕组在辐向短路电磁力作用下稳定性良好。

3）通过对变压器外绕组在短路电磁力作用下力与位移的辐向稳定性分析可知两结论均表明变压器外绕组在辐向短路电磁力的作用下具有良好的辐向稳定性。

参考文献

[1] 路长柏．电力变压器理论与计算 [M]．沈阳：辽宁科学技术出版社，2007：241-281.

[2] Hyunmo A，Jiyeon L，Joongkyoung K，et al. Finite element analysis of short-circuit electron-Agnetic force in power transformer [J]. IEEE

中国知网 https://www.cnki.net

Transactions on Power Electron.，2011，47 (3)：1267-1272.

[3] 李航．大容量变压器绕组辐向稳定性分析 [D]．哈尔滨：哈尔滨理工大学，2015.

[4] 闫振华，马波，马飞越，等．220 kV电力变压器短路动力学性能分析 [J]．高压电器，2014，50 (3)：79-87.

[5] 梁振光，王春成，唐任远，等．采用大位移几何非线性理论的变压器低压绕组辐向稳定性研究 [J]．变压器，2002，39 (10)：1-5.

[6] 刘军，张安红．电力变压器绕组短路动稳定能力的仿真与评估 [J]．变压器，2012，49 (6)：14-25.

[7] 于怀金，刘文里，王录亮．电力变压器绕组轴向短路力的研究 [J]．黑龙江电力，2011，33 (4)：260-264.

[8] 刘晓丽，刘文里，王明．基于“场-路”耦合法的电缆变压器轴向短路电磁力计算 [J]．黑龙江电力，2008，30 (1)：7-10.

[9] 王录亮，刘文里，李阳阳，等．电力变压器绕组辐向短路电动力计算 [J]．变压器，2012，49 (2)：1-5.

[10] 王东林，彭永龙，赵峰．电力变压器绕组短路电动力计算 [J]．中国电力教育，2011 (6)：144-145.

[11] 谢毓城．电力变压器手册 [M]．北京：机械工业出版社，2003：173-179.

[12] 蒋春松，孙浩，朱一林，等．ANSYS有限元分析与工程应用 [M]．北京：电子工业出版社，2012：301-387.

[13] 张洪才．ANSYS14.0工程实例解析与常见问题解答 [M]．北京：机械工业出版社，2013：153-381.

[14] 白永刚，刘文里，吴明君，等．自耦变压器串联绕组辐向稳定性分析 [J]．黑龙江电力，2014，36 (1)：42-45.

[15] 姜山．电力变压器绕组变形的受力分析 [D]．北京：华北电力大学，2012.

（收稿日期：2015－09－15）EA

全新改版

色彩丰富 凸显主题

2016《电气应用》以鲜明色彩和新颖版式呈现精彩内容，力求赏心悦目。

栏目设置 独具风格

坚持继承与开拓并举，以丰富内涵充实经典栏目，持续深化面对面、专家访谈、EA经理人等栏目，密切关注电气技术的发展和应用。

专家点评 精辟深刻

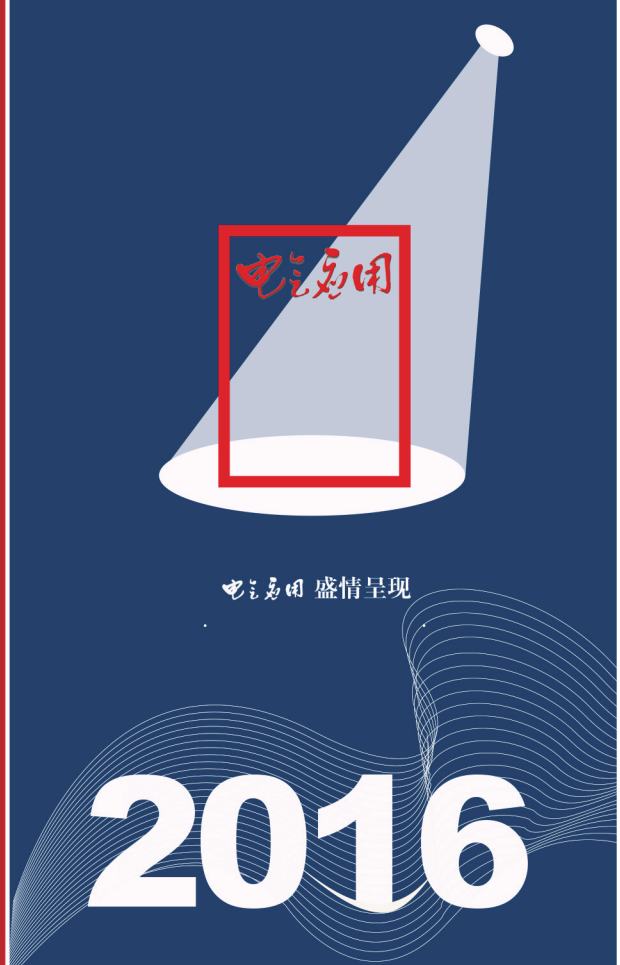
每期都将围绕一个热点话题，隆重推出一场专题讨论的盛宴，共邀知名专家、产品用户和生产厂家汇聚一堂，针对焦点问题作出评析。

行业案例 生动丰富

关注电力、建筑、石化和冶金等电气行业应用，以典型深刻的案例分析、方案设计构建技术互动的空间，促进应用经验交流。

国内邮发代号：82-341 国外发行代号：M1409

每期定价：15.00元 全年定价：360.00元



中国知网 https://www.cnki.net