

大型电力变压器内绕组辐向失稳过程分析

低压绕组的辐向失稳是导致变压器绕组损坏的主要原因，为了准确地分析变压器短路工况下绕组的辐向稳定性，利用扁拱理论提出了内绕组在辐向失稳过程中可能经历的四个过程。在失稳阶段运用MAGNET有限元软件，建立变压器实际结构的三维有限元模型，计算出低压绕组的辐向短路电磁力；并应用ANSYS有限元软件建立多弹支模型，分别采用线性和非线性屈曲分析的方法对变压器内绕组在承受短路电磁力时辐向屈曲临界载荷值进行了对比分析，并提出了跳跃失稳的概念以及可能发生跳跃失稳的条件，为分析大容量变压器内绕组稳定性提供了一定的参考依据。

王雄博 刘文里 李祎春 荣佳星/哈尔滨理工大学

0 引言

变压器低压绕组出口处突发短路时，绕组会承受巨大短路电磁力而发生形变。如果绕组的最大相对变形大于1.5%~2%时，匝绝缘易出现破裂而引起匝间短路。长期现场事故表明，低压绕组辐向失稳是造成大型变压器损坏的重要原因^[1]，因此低压绕组辐向稳定性的分析就显得十分重要。

许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，文献[2]建立了变压器的二维模型来计算辐、轴向短路电磁力，相邻撑条之间采用圆拱模型分析绕组辐向稳定性。文献[3]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[4]对实例变压器辐向稳定性进行了大量分析计算，并应用屈曲分析方法研究绕组的稳定性。

上述研究成果对变压器设计与制造具有指导意义，为后来学者的研究奠定了扎实的基础，但尚有问题存在。对于变压器短路电磁力的计算，目前多采

用二维有限元方法，准确度尚显不足；在对绕组模型的建立上，很多学者将相邻撑条之间的导线看作是直线或圆拱，但由于大型电力变压器具有撑条数目较多、矢跨比较小等特点，故在分析时采用扁拱模型更符合实际结构。本文使用MAGNET软件建立变压器的三维有限元模型，计算出低压绕组出口处发生三相对称短路时内绕组的辐向短路电磁力，用ANSYS软件建立绕组多跨弹支模型并求其屈曲载荷临界值。依据扁拱理论分析了内绕组在辐向失稳过程中所经历的过程及其特点。通过分析变压器内绕组的失稳过程以提升变压器绕组抗失稳能力。

1 计算原理

1.1 “场—路”耦合原理

“场—路”耦合方法，是在变压器的内部采用磁场，而在外部采用电路参数连接^[5]的方法。通过此方法可求解出低压绕组出口处发生短路时的电磁特性，且根据结构和励磁的不同，可模拟变压器不同工况时的电磁特性，外部电路如图1所示。

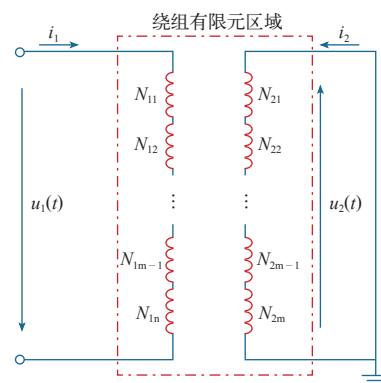


图1 “场—路”耦合分析模型

关键词/Keywords

大型电力变压器 ·
内绕组 ·
屈曲分析 ·
扁拱理论 ·
失稳 ·

1.2 扁拱的基本方程^[6]

扁拱是指矢跨比小于0.1的拱，曲率极小。在力学分析时，不能忽略轴向应变，因此不能应用于拱轴的不可压缩理论，在理论模型上的基本方程、变形方程都要作相应的转化，扁拱的平衡方程为

$$\begin{cases} \frac{dQ}{ds} - \frac{N}{\rho} + p_r = 0 \\ \frac{dN}{ds} + p_s = 0 \\ \frac{dM}{ds} - Q = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中， Q 为法向力； N 为切向力； M 为转矩； ρ 为曲率半径； p_r 为辐向载荷； p_s 为轴向载荷； ds 为微元的弧长。

则相应的变形方程为

$$\varepsilon = \frac{du}{ds} - \frac{\omega}{\rho} \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{d\omega}{ds} \quad (3)$$

$$K = \frac{d^2\omega}{ds^2} \quad (4)$$

式中， ε 为应变； u 为切向位移； ω 为辐向位移； φ 为转角。同时引入单位长度的扭转角 K ，便可得到其稳定方程为

$$EI \frac{d\omega^4}{dx^4} + p \frac{d\omega^4}{dx^4} = q + \frac{N}{R} \quad (5)$$

式中， I 为惯性矩； E 为弹性模量。

2 内绕组失稳过程分析

本文以一台220 kV/180 MV·A三绕组大型电力变压器为例进行内绕组的失稳过程的分析。变压器具体参数如下表所示。大型电力变压器一般撑条数目较多，文中所选用的模型为28根撑条。每两根撑条之间的中心角为12.85°，满足矢跨比小于0.1的条件，因此选用扁拱模型更能贴近实际。本文将整个内绕组可能发生的失稳过程分为以下四个阶段进行研究。

表 变压器主要参数

主要项目	参数值
额定容量/MV·A	180/180/60
电压比/kV	(220±8×1.25%)/121/38.5
联结组别	YNyn0d11
短路阻抗(%)	LV-MV 8
铁心外径/mm	902
低压绕组内径/mm	952
低压绕组外径/mm	1 039
导线规格	ZB-0.45 $\frac{2.8 \times 7.5}{3.25 \times 7.95}$ /12"
撑条根数	28
绕组型式	单螺旋

2.1 稳定阶段

稳定阶段又包含弹性阶段和弹塑性阶段。当绕组所受短路电磁力载荷在绕组允许的弯曲应力之内时，则属于弹性阶段。这一阶段的特点是当变压器绕组上的电磁力消失后，绕组的形变可自动恢复，形变量极小，属于小变形理论研究范围。若变压器短路电磁力超过绕组的弹性阶段，即进入弹塑性阶段，此时由于整体形变量依旧很小，因此仍可用小变形理论进行分析^[7]。

利用ANSYS有限元软件并采用多线性随动强化曲线输入铜的应力应变曲线如图2所示^[8]，由于仅研究小变形下弹性与塑性的关系，因此本文对于弹性部分的研究仅加载20%的短路电磁力。电磁力较小情况下的弹塑性变形如图3所示。由图3可以看出，在短路电磁力极小的情况下，仅出现弹性变形而不伴随塑性变形；当力大于480 N时，则会出现弹性变形和塑性变形共存的现象，只是此阶段弹性及塑性形变量极小，故不易察觉。而随着短路电磁力的逐渐增大，其弹性及塑性变形将

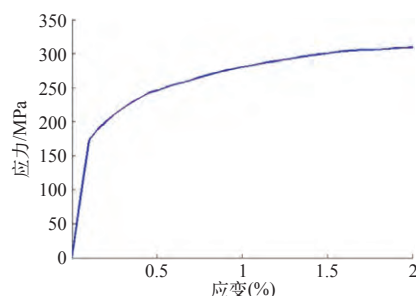


图2 铜的应力应变曲线

一直共存，且塑性变形量和弹性变形量均逐渐增大，两者差值略微增加。但由于此部分的弹塑性变形均较小，对于变压器绕组的变形影响不大，因此研究此部分仅为说明绕组的塑性变形在很小的外部载荷下就可以产生。

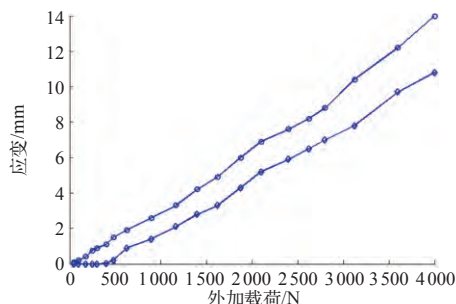


图3 电磁力较小情况下的弹塑性变形

2.2 失稳阶段

变压器绕组发生失稳的过程是极其复杂的，其形式和产生的原因也是多种多样的^[9]。可分为以下两种情况：①由于产品本身设计时对承受短路电磁力作用的绕组稳定性计算不充分，常为变压器绕组短路时所产生的视在压缩应力值，虽然没有超过导体材料的名誉屈服极限，但是却超过了线饼辐向失稳的平均临界应力值，从而有可能造成绕组在短路电磁力作用下的辐向失稳；②绕组多次承受短路电磁力时，在多次短路过程中变压器的导线已经达到塑性变形阶段，绕组产生了累积变形，同时轴向的垫块也发生了位移，导致一部分撑条处于无效支撑或者不完全支撑状态，绕组失稳几率增加。

(1) 用有限元法计算短路电磁力

由上表中参数可知，中-低运行时的短路阻抗为8%，短路阻抗最小，突发短路时所产生的短路电流最大，所承受的短路电磁力也就最大，因此取中-低运行时的绕组受力情况进行分析。

以“场-路”耦合原理为基础，运用MAGNET并以绕组线饼为单位，计及线饼的实际结构、相对位置与铁心的实际尺寸，建立变压器中-低运行的三维模型如图4所示。

对实例变压器的建模与分析进行如下假设^[10]：

1) 由于变压器三相对称，故只对其中一相建

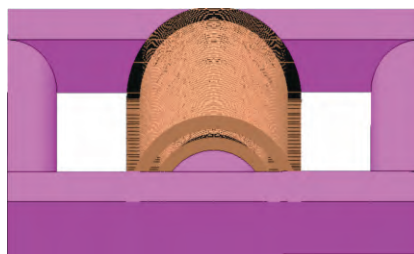


图4 变压器三维有限元模型

模，忽略绕组相间的影响。

2) 忽略变压器夹件、拉板的影响。

3) 忽略绕组导线的涡流去磁作用。

利用上述模型和自编程序计算出低压绕组出口处发生三相对称短路时内绕组每饼的短路电磁力，如图5所示。可以看出内绕组上半部分最大电磁力出现在131饼处为18 606 N，下半部分最大电磁力出现在44饼处为18 716 N，由此可见短路电磁力在绕组的轴向方向上的最大值分别在距绕组顶端的1/4处和3/4处。

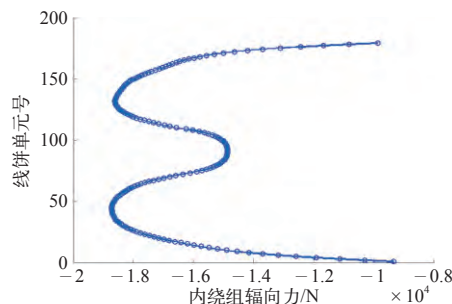


图5 内绕组的短路电磁力分布

(2) 计算失稳临界载荷值

建立变压器绕组低压绕组第44号线饼三维力学模型，如图6所示。

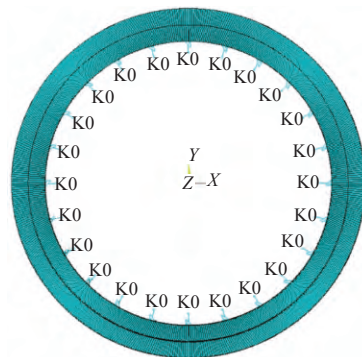


图6 多跨弹支模型

分别利用线性小位移和非线性大位移方法求其屈曲载荷临界值,要注意在采用大位移法时需分步加载,并且要设定足够多的载荷子步,以保证其收敛性^[11]。采用两种方法求取的临界屈曲载荷值曲线如图7、图8所示,由图可知,用小变形线性理论分析出的临界载荷值为42 120 N,安全系数为2.25。若采用大位移非线性理论进行分析,临界载荷为30 360 N,安全系数为1.62。由此数据的对比可得出:大型电力变压器内绕组失稳临界值的计算采用大变形理论更安全可靠。

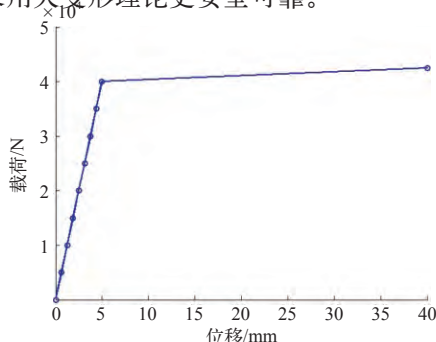


图7 采用线性法分析时的临界载荷曲线

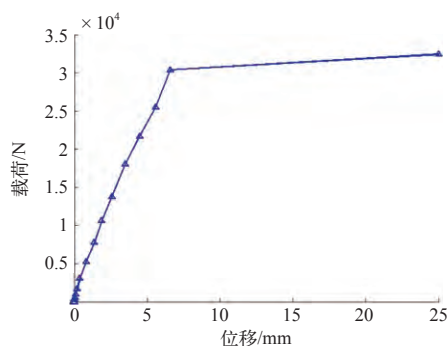


图8 采用非线性法分析时的临界载荷曲线

2.3 跳跃失稳

(1) 理论计算

在变压器承受短路电磁力的过程中,部分绕组由于累积变形或初始缺陷导致其结构发生了较大的变化^[12],如部分支撑完全失效或轴向发生较大位移时,绕组的局部绕组将有可能发生跳跃失稳,由于扁拱模型不能忽略其轴向载荷,当突起的导线位移量达到一定值时,绕组将有可能进入跳跃失稳阶段,如图9所示。

将相邻撑条之间的导线看为扁拱,在均匀分

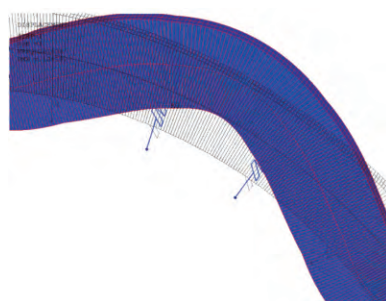


图9 跳跃失稳的示意图

布载荷作用下,由于轴向变形的关系,拱会突然跳跃到虚线的状态,如图10所示。下面就扁拱这一屈曲特点作简要分析。 q

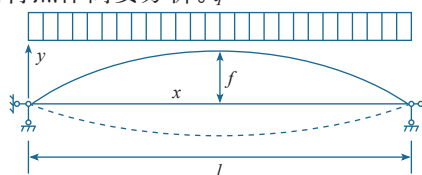


图10 扁拱受力示意图

当有载荷时的变形曲线方程为

$$y = f(1-u) \sin \frac{\pi x}{l} \quad (6)$$

$$u = \frac{5ql^4}{384Elf} \quad (7)$$

式中, u 为载荷大小的无量纲; l 为绕组的惯性矩; f 为挠度。

在水平支座产生水平推力 H 后的变形公式为

$$y = f \frac{(1-u)}{(1-\alpha)} \sin \frac{\pi x}{l} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{H}{P_{cr}} = \frac{Hl^2}{\pi^2 EI} \quad (9)$$

式中, α 为水平推力与欧拉载荷的比值; $1/(1-\alpha)$ 为坐标 y 的增大系数。

$\Delta l = y_2 - y_1$ 为扁拱在受辐向载荷情况下向上的位移量,则

$$\Delta l = \frac{Hl}{EA} = \frac{1}{2} \int_0^l y_1'^2 dx - \frac{1}{2} \int_0^l y_2'^2 dx \quad (10)$$

积分后可得到结果

$$(1-u)^2 = (1-m\alpha)(1-\alpha)^2 \quad (11)$$

对式(11)求解,可能存在一个解亦可能存

在三个解, 设

$$f_1 = (1-u)^2 \quad (12)$$

$$f_2 = (1-m\alpha)(1-\alpha)^2 \quad (13)$$

其中

$$m = \frac{4I}{Af^2} \quad (14)$$

f_1 与 f_2 的图像如图11所示, 当 $m \geq 1$ 时, f_1 、 f_2 有且只有一个交点, 即有唯一解, 此时绕组处于稳定状态, 不会发生辐向失稳; 当 $m < 1$ 时, 可知 f_2 为 α 的3次函数, 故 f_1 、 f_2 有三个交点, 此时绕组可能发生辐向失稳。可见当 $m = 1$ 时为分界点。

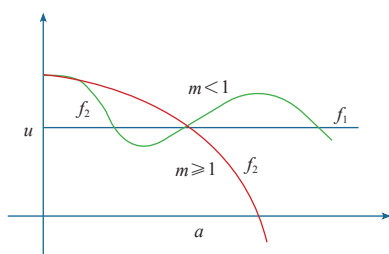


图11 绕组跳跃失稳与 m 的关系曲线

对于一台已投产的变压器, 其绕组的几何尺寸固定时, 其截面积 A 与惯性矩 I 已为定值, 则挠度 f 为影响绕组是否发生跳跃失稳的主要参数, 当 f 突起达到一定数值时, 模型将会发生跳跃失稳。

(2) 实例分析

当绕组的几何尺寸固定时, 其中 $I = ba^3/12$ 、 $A = ab$, 可将式(14)改写为

$$m = \frac{a^2}{3f^2} \quad (15)$$

式中, I 为导线惯性矩; a 为单根裸导线宽度; b 为单根裸导线高度。

本例中 m 与挠度 f 的关系如图12中实线所示,

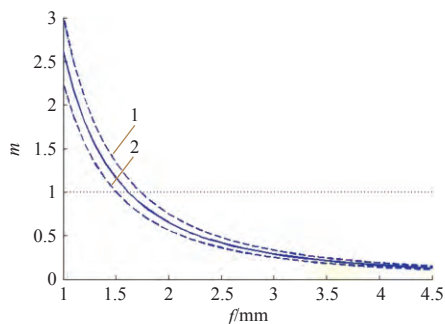


图12 绕组辐向宽度不同时挠度 f 与 m 的关系

与 $m = 1$ 点相交处为跳跃点, 即当挠度为1.61 mm时出现跳跃失稳。增加导线辐向尺寸得到曲线1, 减少导线辐向尺寸得到曲线2, 分别与 $m = 1$ 相交, 由其交点位置可知, 提高导线辐向尺寸可增加挠度的数值, 以保证稳定性。

由挠度式(7)可知, 挠度的大小与载荷大小、绕组惯性矩尺寸、绕组跨度以及绕组弹性模量有关, 在变压器确定的情况下, 绕组惯性矩、绕组弹性模量是固定的, 因此本文从载荷大小及绕组支撑跨度两方面讨论。

当载荷不变时, 式(7)可改写为

$$f = \beta l^4 \quad (16)$$

式中, β 为由恒定载荷、惯性矩及弹性模量所确定的系数。

由式(16)可知, 挠度正比于跨度的4次方。如图13所示, 绕组的挠度随着支座的跨度增大而增加, 在本例中若其他条件不变, 当支座跨度大于191 mm, 即一根撑条完全失效状态时, 其挠度会大于1.61 mm出现跳跃失稳。

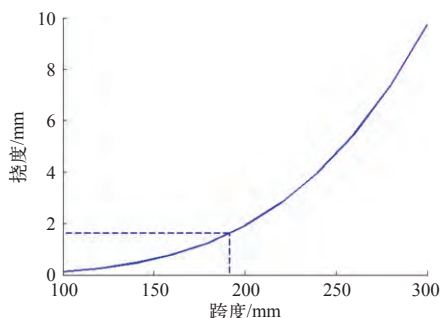


图13 支座跨度与挠度 f 的关系

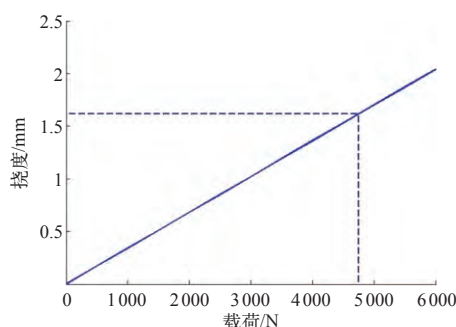
当跨度不变时, 式(7)可改写为

$$f = \gamma q \quad (17)$$

式中, γ 为由恒定跨度、惯性矩及弹性模量所确定的系数。

由式(17)可知, 挠度正比于载荷。如图14所示, 绕组的挠度随着外加载荷的增大而增加, 在本例中若其他条件不变, 当外加载荷大于4 755 N时, 其挠度会大于1.61 mm出现跳跃失稳。

由以上分析可知大型电力变压器设计时, 在满足涡流损耗、散热等的条件下, 适当地增加导线的辐向尺寸可提高绕组稳定性, 同时由于挠度

图14 载荷与挠度 f 的关系

与跨度的4次方成正比,故支座的直线距离对跳跃失稳也有一定的影响,在设计时应给予重视。

2.4 重新稳定阶段

绕组如果进入重新稳定阶段后,在形变上将不会再有大的变化,理论上所有绕组都是向内凹曲的,但是绕组在整个变形过程中,由于部分绕组在屈曲时将导致绕组部分的变形,极可能破坏匝绝缘发生匝间短路,因此一般情况下绕组在未进入重新稳定之前就已经发生短路故障,因此此阶段不作为重点研究内容。

3 结束语

本文以一台220 kV/180 MV·A大型电力变压器为例,应用MAGNET软件建立三维有限元模型并计算变压器的短路电磁力。建立绕组的多跨弹支模型,依据跨距比较小的特点采用扁拱理论分析了内绕组辐向失稳的四个过程。同时提出了绕组发生跳跃失稳的可能性以及发生的条件,并分析提高绕组稳定性的方法。

1) 短路电磁力在绕组的轴向方向上的最大值分别在距绕组顶端的1/4处和3/4处,最大辐向短路电磁力为18 710 N。

2) 对于大型电力变压器绕组的失稳临界值的计算,采用大变形理论更安全可靠。

3) $m=1$ 为绕组平衡稳定的分界点,且挠度为影响绕组是否发生跳跃失稳的主要参数,适当增加导线辐向尺寸可提高绕组稳定性。

参考文献

- [1] 姜益民. 变压器运行中短路损坏的常见部位及原因分析[J]. 变压器, 2005, 42(4): 35.
- [2] 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.
- [3] 李洪奎. 大型电力变压器绕组短路强度与稳定性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 刘古岷, 张若晞. 应用结构稳定计算[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 257-287.
- [7] 叶先磊, 史亚杰. ANSYS工程分析软件应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 270-285.
- [8] 尚晓江, 邱峰, 赵海峰. ANSYS结构有限元高级分析方法和范例应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 314-329.
- [9] 王晓莺, 王建民. 变压器故障与监测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 145-160.
- [10] 王录亮. 电力变压器绕组短路力计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
- [11] 蒋春松, 孙浩, 朱一林. ANSYS有限元分析与工程应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 302-328.
- [12] 王世山, 寇晓, 刘家奇. 电力变压器内线圈径向屈曲特性的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(1): 1-3.

(收稿日期: 2015-12-30) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告