

## 电力变压器辐向承受短路能力的校核计算

郭 健<sup>1</sup> 金承祥<sup>2</sup> 李 宁<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016; 2. 中电电气集团, 扬中, 212211)

**摘要:**基于平衡状态分枝型失稳理论,将有限元模型的单元刚度矩阵和静态结构分析得到的预应力矩阵相结合,建立了计算单匝导线屈曲变形的特征方程。通过屈曲分析,可以得到变压器线圈的辐向极限力及不同极限力作用下的屈曲形态。本文对几起变压器内线圈的辐向抗短路能力进行了校核计算,试验证明了本文所提方法的合理性。在此基础上,对影响线圈辐向稳定性的因素进行了研究。结果表明,增大导线尺寸和保证撑条的有效支撑都可以提高线圈的辐向稳定性。其中,增大导线的辐向厚度对改善绕组稳定性的效果最明显。

**关键词:**电力变压器;辐向稳定性;分枝型失稳理论;屈曲分析;有限元方法

中图分类号:TM41

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2013)02-0239-06

## Check Calculation of Radial Withstand Short-Circuit Ability for Power Transformer

Guo Jian<sup>1</sup>, Jin Chengxiang<sup>2</sup>, Li Ning<sup>2</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. China Electric Equipment Group, Yangzhong, 212211, China)

**Abstract:** The finite element stiffness matrix and the prestressed matrix of static structure are combined to establish critical loading formulas of the single turn model. Based on the bifurcation instability theory, the whole stability of the transformer winding is analyzed by buckling method, so as to get the buckling critical loads and displacement. The algorithm is verified by numerical examples. At the same time, the influence factors of stability are studied. Results indicate that the winding's ability of radial resisting short-circuit can be effectively improved by increasing the wire gauge size and the number of spacers.

**Key words:** power transformer; radial stability; bifurcation instability theory; buckling analysis; finite element method

近年来,随着电力系统和变压器容量的日益增长,变压器事故时有发生,且有增长的趋势。内绕组的辐向失稳破坏已成为短路事故的主要原因,是抵抗短路冲击电力的最薄弱环节<sup>[1-2]</sup>。因此,探求变压器内线圈抗短路能力的理论校核方法、研究影响线圈抗短路能力的因素并采取有效措施提高线圈稳定性具有重要的工程价值<sup>[3-8]</sup>。

在变压器线圈承受短路能力的校核计算方面,极限力的确定是其核心。最新的 IEC 标准和国家

标准推荐导线辐向实际弯曲应力应不大于  $0.9\sigma_{0.2}$ <sup>[9-10]</sup>,中国现行的一些变压器手册以绕组应力不大于 160 MPa 作为设计标准<sup>[11-12]</sup>。但是,从近些年来电力变压器损坏后的解体检查分析来看,绕组辐向失稳时导线中的平均极限应力值并不存在固定的许用值,这些事故多是由于绕组在短路力作用下不能保持绕组整体结构的完好性造成的<sup>[12]</sup>。因此,以绕组结构的整体稳定性校核线圈的抗短路能力更切合实际。在这方面,文献[13~

基金项目:江苏省博士后科研(0902038C)资助项目;江苏省科技攻关(BA2006066)资助项目。

收稿日期:2012-04-09;修订日期:2012-10-14

通信作者:郭健,男,博士,讲师,E-mail:nuaaeelab-gj@nuaa.edu.cn。

14]基于大位移非线性理论计算变压器绕组的辐向稳定性取得很好的效果,但收敛性及计算时间成为制约该方法推广的障碍。若仅关心结构的临界载荷,则采用平衡状态分枝型失稳理论即可<sup>[15]</sup>。该理论认为当载荷达到一定数值时,如果结构的平衡状态发生质的变化,则结构发生失稳。这种失稳的临界载荷可以通过分枝平衡状态的屈曲分析进行计算<sup>[16]</sup>。

本文基于平衡状态分枝型失稳理论,针对变压器内线圈承受辐向力时导线中存在的“应力均衡”现象,建立了计算导线应力的单匝有限元模型。结合单元预应力矩阵和单元刚度矩阵组成屈曲分析的特征方程,进而得到线圈的辐向极限力及不同极限力作用下的屈曲形态。通过将线圈受到的实际辐向力与屈曲分析得到的极限力进行比较来判断线圈的抗短路能力。在此基础上,对影响线圈的屈曲形态及辐向稳定性的因素进行了研究,最后通过实例分析来验证本文所提方法的合理性。

## 1 变压器辐向稳定性的屈曲分析模型

### 1.1 单匝导线应力计算有限元模型

绕组在短路情况下,沿辐向各导线所受到的电磁力是不同的,最里层的导线受力最大,最外层导线受力最小,但里层导线的变形要受到外层导线的压缩。因此,里层导线辐向力的一部分会转移到外层导线,使外层导线应力增大,里层导线应力减少,这种现象称为“应力均衡作用”<sup>[17]</sup>。在保证绕组导线紧密绕制工艺的要求下,绕组沿辐向所有导线的变形和应力趋于相同。因此,在进行应力计算时可等效认为每匝导线受到了相同的短路力,进而选取一匝建立有限元模型进行辐向稳定性分析。

对于换位导线,由于每匝导线由多股导线并绕组成,因此在建立单匝模型时应根据换位导线的形式加以区别,若为非自粘性换位导线,则取一股导线建立模型;若为自粘性换位导线,则取一匝建立模型。

图1为线圈应力计算的有限元模型,取线圈一边的中间一匝建立模型,其内表面相应的位置建立撑条,撑条与铁心或绝缘筒的接触面施加约束,在导线的外表面上加载辐向短路力载荷。每匝导线外表面受到的短路力载荷可通过式(1)得到

$$P = \frac{F_r}{Nn\pi Db} \quad (1)$$

式中: $N$ 为线圈匝数; $n$ 为非自粘性换位导线每匝

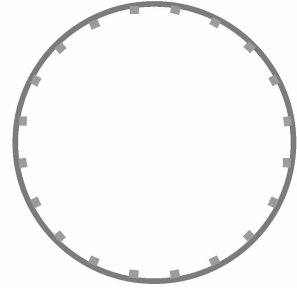


图1 单匝导线应力计算有限元模型

股数,对于普通导线及自粘性换位导线, $n=1$ ;  $D$ 为线圈平均直径; $b$ 表示导线宽度; $F_r$ 为线圈受到的最大辐向力,可以通过变压器发生故障时记录到的最大短路电流推算得到<sup>[18]</sup>,也可以采用文献[19~21]所提方法进行计算。

### 1.2 屈曲分析控制方程

导线在辐向力作用下的位移求解方程满足

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{P}\} \quad (2)$$

式中: $[\mathbf{K}]$ 为单元的刚度矩阵; $\{\mathbf{P}\}$ , $\{\mathbf{u}\}$ 分别为单元的压力矢量、位移矢量矩阵,其中

$$[\mathbf{K}] = \int_{\Omega} [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] ds \quad (3)$$

式中: $[\mathbf{B}]$ 表示应变位移矩阵; $[\mathbf{D}]$ 为应力应变矩阵。

将式(2)求得的位移 $\{\mathbf{u}\}$ 代入式(4),从而可以得到单元的应变,进而求得导线所受到的应力。

$$\{\boldsymbol{\epsilon}\} = [\mathbf{B}]\{\mathbf{u}\} \quad (4)$$

$$\{\boldsymbol{\sigma}\} = [\mathbf{D}]\{\boldsymbol{\epsilon}\} \quad (5)$$

发生短路时,导线应能承受最大短路力的冲击而保持结构稳定。结构稳定分析就是求解结构从稳定平衡过渡到不稳定平衡的临界载荷和失稳后的屈曲形态。它的特征方程具有下列形式<sup>[22]</sup>

$$[\mathbf{K}] + \lambda[\mathbf{S}] = 0 \quad (6)$$

式中: $\lambda$ 表示比例因子特征值; $[\mathbf{S}]$ 为单位压力作用下根据应力状态计算得到的初始应力矩阵,即预应力矩阵。单位压力作用下的应力状态可根据式(2, 4, 5)得到。

通过求解式(6)可解得一系列的特征值 $\lambda$ ,将第 $i$ 个特征值代入式(7),可以得到相应的变形模态,即结构失稳的屈曲模态

$$([\mathbf{K}] + \lambda_i[\mathbf{S}])\{\mathbf{u}\} = 0 \quad (7)$$

对于普通导线和非自粘性换位导线,以最小的特征值 $\lambda_{\min}$ 作为变压器结构稳定所能承受的临界压力,则整个线圈所能承受的最小极限辐向力满足式(8)

$$F_{cr} = \lambda_{\min} Nn\pi Db \quad (8)$$

对于自粘性换位导线,由于组成每匝导线的各股之间并不能理想地粘合。按单匝模型进行稳定性分析时,粘合度对线圈所能承受的最小极限辐向力  $F_{cr}$  的影响可以根据自粘性换位导线实测得到的惯性矩与理想粘合时惯性矩的比值进行修正。

$$F_{cr} = \frac{I'}{I} \lambda_{\min} N n \pi D b \quad (9)$$

式中: $I'$ 为实测得到的惯性矩<sup>[23]</sup>;  $I$ 为单匝导线理想粘合对应的惯性矩,通过式(10)得到

$$I = \frac{1}{12} a b^3 \quad (10)$$

### 1.3 线圈辐向失稳校核方法

承受辐向压缩短路力的绕组内径多处的撑条处于完全失效的支撑状态,这是导致绕组辐向失稳的主要原因之一。器身装配时为将绕组顺利地套在铁心柱上,必须留有一定的套装间隙;这就意味着很难保证每一根撑条都能够处于完全有效的支撑状态<sup>[12]</sup>。因此,在进行变压器辐向短路力校核时,认为线圈的有效支撑数为实际撑条的一半,以此建立有限元模型计算绕组所能承受的极限辐向力。

将整个线圈所能承受的最小极限辐向力  $F_{cr}$  与实际受到的辐向短路力  $F_r$  进行比较:当  $F_{cr}$  小于  $F_r$  时,则认为短路时线圈将失稳;当  $F_{cr}$  大于  $F_r$  并留有一定裕度时,则认为线圈辐向具有抗短路失稳的能力。

## 2 变压器辐向稳定性校核计算

对文献[18]提到的一台发生辐向失稳的变压器的内绕组进行稳定性分析。表 1 列出了该变压器相应的参数。

表 1 模型参数

$r/\text{mm}$	$m$	$a \times b/(\text{mm} \times \text{mm})$	$F_r/\text{MN}$	$N$
421	16	1.7 × 8.5	9.4	2 112

图 2 是当导线受到最大短路力时变形云图。可以看出,导线的最大变形出现在两个撑条的中间。通过对线圈进行屈曲分析,可以得到导线的极限辐向力(8.0 MN)及不同辐向力作用下的屈曲模态(图 3)。可以看出,导线实际受到的辐向力(9.4 MN)超出了维持导线结构稳定的极限力,此为导致该变压器辐向失稳的主要原因。另外,线圈在极限力(8.0 MN)作用下的屈曲形态为“强制翘曲”,而在大于极限力的短路力作用下,绕组周围一处或几处的导线向内严重变形,多余长度的导线从撑条

的个别部位突出,表现为“自由翘曲”。

图 4 为考虑裕度的情况下,即有效支撑为实际撑条数一半时,不同辐向力作用下的屈曲模态,此时,线圈所能承受的极限力下降很多。因此,在变

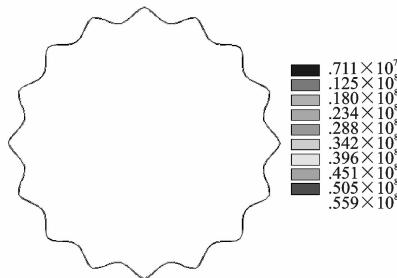


图 2 导线变形及应力分布图

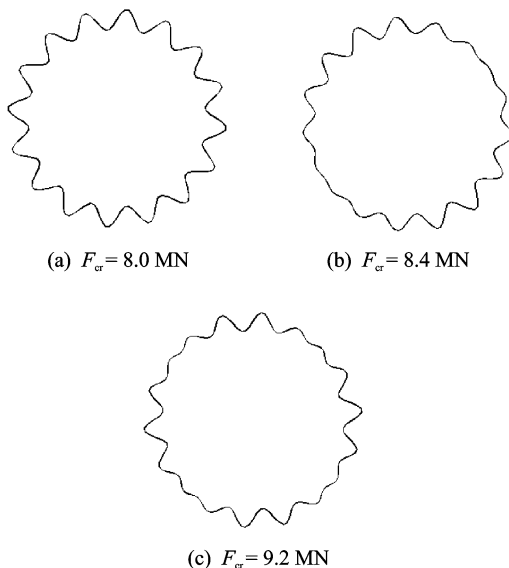


图 3 不同辐向力作用下的屈曲模态

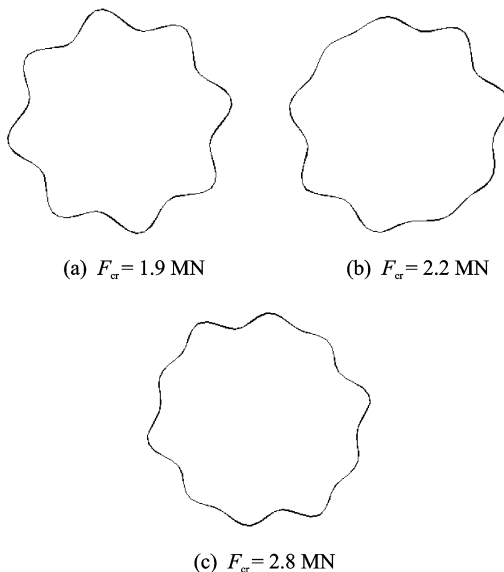


图 4 一半撑条有效支撑时的屈曲模态

压器设计过程中,必须保证撑条的有效支撑。另外,绕组在临界极限力作用下仍然表现为“强制翘曲”,而大于临界极限力时的变形表现为“自由翘曲”。

### 3 影响变压器辐向稳定性的因素

为了提高变压器辐向抗短路能力,本文对撑条数  $m$ 、线圈的平均半径  $r$  和导线线规 ( $a \times b$ ) 对线圈辐向极限力的影响进行了研究。图 5(a) 为不同撑条数时线圈所能承受的辐向极限力。可以看出,极限力随着撑条数的增加近似呈线性增加趋势。图 5(b) 为不同线圈的半径所对应的辐向极限力,  $K_r$  表示半径改变的比例。可以看出,半径越大极限力越小,线圈也愈加不稳定。图 5(c, d) 为不同导线尺寸所对应的辐向极限力,其中  $K_a$ 、 $K_b$  分别表示导线厚度改变的比例和导线宽度改变的比例。可以看出,增加导线的尺寸,可以提高线圈的辐向稳定性,而增加导线的辐向厚度对提高线圈稳定性的效果最为明显。

除了上述主要因素外,影响变压器辐向稳定性的还包括导线绕制的松紧度、绝缘材料的性能缺陷等,由于这些工艺因素具有分散性,对稳定性的影响很难量化。此时,在校核新产品的辐向稳定性时,就需要引入对比性评估机制。对比性评估方法就是以一台实际运行满足辐向稳定性的变压器为参考,根据本文所提方法计算其辐向极限力  $F_{cr}$ ,并根据式(11)得到辐向稳定性参考裕度。

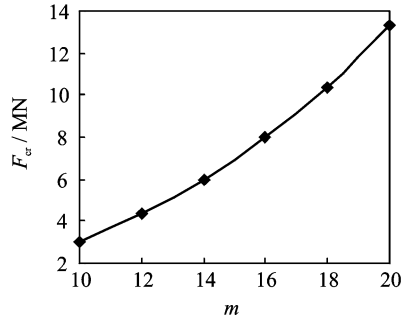
$$K_{ref} = \frac{F_{cr}}{F_c} \quad (11)$$

按照相同的方法,可以得到被校核变压器的稳定性裕度  $K_{act}$ ,被校核变压器与参考变压器具有相同或相似制造工艺。若被校核的变压器的辐向稳定性预度  $K_{act}$  大于参考预度  $K_{ref}$ ,则满足辐向稳定性要求。否则,不能满足要求。

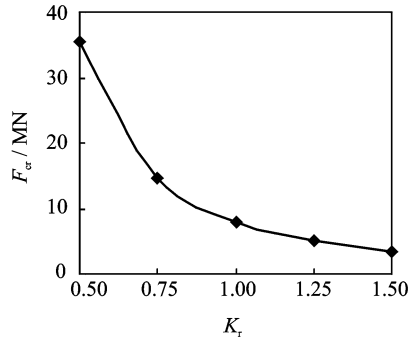
### 4 实验验证

为了验证本文所提方法的正确性,对文献[18]所提的几起变压器内线圈的机械稳定性进行了理论校核,表 2 列出了这几起变压器内线圈发生辐向失稳事故和未发生失稳实例的研究结果。

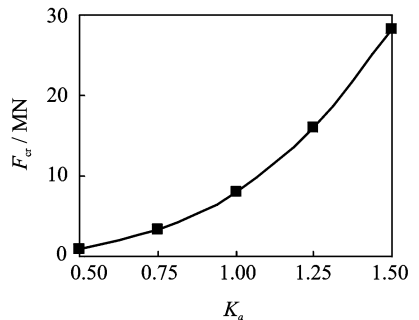
(1) 对于 1# 和 2# 变压器,在撑条完全有效支撑情况下,计算得到的极限力已经小于实际受到的短路力,若考虑撑条没有完全支撑的影响,其辐向极限力将更小。从第 3 节影响线圈辐向稳定性的因素来看,撑条数过少和线规的辐向厚度过小是该



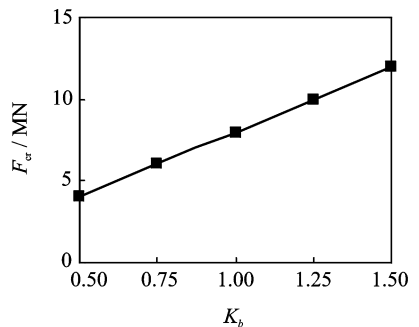
(a) 不同撑条数对辐向极限力的影响



(b) 不同线圈半径对辐向极限力的影响



(c) 导线厚度对辐向极限力的影响



(d) 导线宽度对辐向极限力的影响

图 5 不同因素对辐向力的影响

变压器失稳的主要原因。

(2) 对于 3# 和 4# 变压器,当撑条完全有效支撑的情况下,所承受的辐向力要小于极限力,但若计及器身装配裕度,按一半撑条有效支撑进行校核,极限力将不能保证线圈在短路时的稳定性。此

表2 几起变压器的机械失稳及校核

变压器序号	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>
$F_r/MN$	9.4	28.2	46.9	19.9	5.2	5.9
$r/mm$	421	523	675	530	678	468
$N$	2 112	2 408	8 352	2 520	4 608	1 690
$m$	16	20	36	28	28	32
$a \times b/(mm \times mm)$	1.70 × 8.5	2.12 × 10.6	1.80 × 6.7	2.36 × 12.5	1.60 × 10	4.25 × 13.2
$F_{cr}/MN$	8.00	23.53	82.13	102.12	22.20	1 920.70
$F'_{cr}/MN$	1.93	5.41	14.52	18.05	4.94	143.72
$F''_{cr}/MN$	1.97	5.46	14.17	17.72	4.92	121.74
实际失稳状态	失稳	失稳	失稳	失稳	无失稳	无失稳

时,通过提高线圈的辐向厚度可以改善线圈辐向抗短路能力。

(3)对于5#变压器,线圈受到的实际短路力略大于按一半撑条有效支撑时计算得到的极限力,再结合4#变压器实际发生失稳的情况,说明计算极限力小于实际短路力,线圈不一定发生辐向失稳,因为一半撑条有效支撑本身具有一定的概率性。但作为变压器辐向稳定性评价及设计原则,应保证极限力大于短路力,并留有一定的裕度。

(4)对于6#变压器,由于导线线规尺寸较大,同时又有较多的撑条支撑,导线受到的辐向力远远小于极限力且留有足够的裕度,从而保障了其辐向的稳定性。

(5)本文还基于极值点失稳<sup>[24-25]</sup>,采用大位移几何非线性理论对一半撑条有效支撑时的临界力 $F'_{cr}$ 进行了计算,其计算结果 $F'_{cr}$ 与采用屈曲分析得到的临界辐向力 $F''_{cr}$ 较接近,但与本文所提方法相比,非线性方法对网格精度、载荷步长的要求较高,且收敛时间较长。

## 5 结 论

本文基于平衡状态分枝型失稳理论,建立了校核电力变压器辐向稳定性的有限元模型,采用屈曲分析方法,以线圈的有效支撑数为实际撑条的一半进行变压器线圈临界极限力及屈曲形态计算。通过对几起变压器内线圈的机械稳定性进行校核,证明了本文方法的合理性,分析结果表明:

(1)内线圈在临界极限力作用下,线圈受压缩,导线受到弯曲应力向内过度弯曲,表现为“强制翘曲”,而在大于临界极限力的作用下,绕组周围一处或几处的导线向内严重变形,多余长度的导线从撑条的个别部位突出,表现为“自由翘曲”。

(2)增大导线尺寸、保证撑条的有效支撑都可以有效提高线圈的辐向稳定性。其中,增大导线的

辐向厚度对提高绕组抗短路能力的效果最明显;另外,过大的绕组半径也是导致线圈不稳定的一个主要因素。因此,变压器设计过程中,在保障各电磁性能的前提下应尽量做到减小线圈半径、增大导线尺寸和增加撑条数。

## 参考文献:

- [1] 王梦云. 2002—2003年国家电网公司系统变压器类设备事故统计与分析(一)[J]. 电力设备, 2004, 44(10):32-49.  
Wang Mengyun. Faults statistics and analysis for equipments of transformer's type in SG system in 2002—2003(I)[J]. Electrical Equipment, 2004, 44(10):32-49.
- [2] 王梦云. 2002—2003年国家电网公司系统变压器类设备事故统计与分析(二)[J]. 电力设备, 2004, 45(11):11-25.  
Wang Mengyun. Faults statistics and analysis for equipments of transformer's type in SG system in 2002—2003(II)[J]. Electrical Equipment, 2004, 45(11):11-25.
- [3] 王世山,汲盛昌,李彦明. 电缆绕组变压器短路时线圈轴向稳定性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2):166-170.  
Wang Shishan, Ji Shengchang, Li Yanming. Study on axial stability in condition of short-circuit for power transformer using xlpe insulated cable windings [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2):166-170.
- [4] 王赞基,唐起超,刘秀成. 电力变压器内部短路故障对短路电抗的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21):15-21.  
Wang Zanji, Tang Qichao, Liu Xiucheng. Effects of internal short circuit faults on short circuit reactance of power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21):15-21.
- [5] Barzegaran M R, Mirzaie M, Akmal A. Investigating short-circuit in power transformer winding with

- quasi-static finite element analysis and circuit-based model[C]// 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. New Orleans; IEEE Power & Energy Soc, 2010(4):1-8.
- [6] Gopalakrishna S, Kumar K, George B, et al. Design margin for short circuit withstand capability in large power transformers [C]// 8th International Power Engineering Conference. [S. l.]; IEEE, 2007(12): 1262-1267.
- [7] Li H K, Li Y, Sun X. Analysis of three-phase power transformer windings forces caused by magnetic inrush and short-circuit currents [C]// 2009 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. Chengdu, China; IEEE, 2009(9):233-236.
- [8] Faiz J, Ebrahimi B M, Noori T. Three- and two-dimensional finite-element computation of inrush current and short-circuit electromagnetic forces on windings of a three-phase core-type power transformer [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008,44(5):590-597.
- [9] 中国国家标准化管理委员会. GB 1094.5—2008 电力变压器第5部分:承受短路的能力[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [10] International Electrotechnical Commission. IEC 60076.5—2006 power transformer part 5: Ability to withstand short circuit[S]. Switzerland; IEC, 2006.
- [11] 王宝珊. 变压器设计手册[M]. 沈阳:沈阳出版社, 2009:84-86.
- [12] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2003:172-178.
- [13] 梁振光,王春成,唐任远. 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.  
Liang Zhenguang, Wang Chuncheng, Tang Renyuan. Research on radial stability of transformer low-voltage winding using large deformation geometric nonlinear theory [J]. Transformer, 2002, 39(10):1-5.
- [14] 曹志军,胡家忻,巨建民. 大容量变压器线圈短路状态下非线性稳定性与动力稳定性[J]. 大连铁道学院学报, 2003, 24(2):31-35.  
Cao Zhijun, Hu Jiaxin, Ju Jianmin. Study of nonlinear and dynamic stabilities of large power transformer coils under short-circuit condition [J]. Journal of Dalian Railway Institute, 2003, 24(2):31-35.
- [15] 王世山,寇晓. 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.  
Wang Shishan, Kou Xiao. The study of radial buckling properties on inner winding of power transformer [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(1):1-3.
- [16] 崔德刚. 结构稳定性设计手册[M]. 北京:航空工业出版社, 1996:1-12.
- [17] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京:中国电力出版社, 2003:265-268.
- [18] 万达. 浅谈大型电力变压器内线圈的机械失稳[J]. 江苏电力技术, 1998(1):17-20,21.
- [19] Lee J Y, Ahn H M, Kim J K. Finite element analysis of short circuit electromagnetic force in power transformer[C]// The 12th International Conference on Electrical Machines and Systems. Tokyo, Japan; IEEE Industry Application Soc, 2009(11):15-18.
- [20] Strac L, Kelemen F, Zarko D. Analysis of short-circuit forces at the top of the low voltage U-type and I-type winding in a power transformer[C]//13th International Power Electronics and Motion Control Conference. Poznan, Poland; Poznan University, 2008(9): 855-858.
- [21] Kulkarni S V, Kumbhar G B. Analysis of short circuit performance of split-winding transformer using coupled field-circuit approach[C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL; IEEE Power Engn Soc, 2007(6):2244.
- [22] 赵世林,李德源,黄小华. 风力机塔架在偏心载荷作用下的屈曲分析[J]. 太阳能学报, 2010, 31(7):901-906.  
Zhao Shilin, Li Deyuan, Huang Xiaohua. Buckling analysis of wind turbine tower under eccentric loading [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2010, 31(7):901-906.
- [23] 万达,廖和安. 热粘合换位导线弯曲性能的实验分析[J]. 变压器, 2010, 47(5):19-25.  
Wan Da, Liao Hean. Test analysis of bending characteristic of thermal bonding interleaved conductor [J]. Transformer, 2010, 47(5):19-25.
- [24] 朱菊芬,初晓婷. 一种改进的弧长法及在结构后屈曲分析中的应用[J]. 应用数学和力学, 2002, 23(9): 961-967.  
Zhu Jufen, Chu Xiaotin. An improved arc-length method and application in the post buckling analysis for composite structure [J]. Applied Mathematics and Mechanic, 2002, 23(9):961-967.
- [25] 赵丽滨,尤丽平,张建宇. 反作用轮密封罩结构抗屈曲设计计算及试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(12):1464-1468.  
Zhao Libin, You Liping, Zhang Jianyu. Numerical and experimental research on buckling design of reaction-wheel's sealed cowling structure[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(12):1464-1468.