

# 基于磁—结构直接耦合动态分析变压器绕组变形的研究

王雪, 吴涛

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071000)

**摘要:** 在短路电流作用下, 变压器绕组会承受连续变化的巨大电磁力冲击, 过程中可能影响变压器稳定运行, 甚至遭受严重破坏。针对传统方法难以分析考虑和结构场相互影响下绕组变形动态过程的现状, 提出磁—结构直接耦合方法, 将其引入到对变压器绕组变形动态过程的研究。以一台 220 kV 典型变压器为例, 首先通过 ANSYS 磁—结构直接耦合方法, 分析了变压器的磁场和结构场耦合特性。然后, 针对系统故障实例, 分析了变压器绕组变形的动态过程。最后, 进一步针对故障实例中电流最大时刻, 对比静态场分析结果, 分析结论一致, 验证了方法的正确性。该研究为动态分析变压器绕组变形过程提供了一种有效的研究方法。

**关键词:** 变压器; 绕组变形; 有限元; 磁—结构; 直接耦合; 动态分析

## Dynamic deformation analysis of transformer windings based on magnetics-structure direct coupled-field

WANG Xue, WU Tao

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

**Abstract:** When transformer windings withstand the shock of continuous change of tremendous electromagnetic force under the impact of short circuit current, transformer may not stably operate and even suffer serious damage. In the light of present situation that the traditional method is difficult to analyze the dynamic process of winding deformation under the mutual influence of magnetic field and structure field, a method of magnetics-structure direct coupled-field method is presented, which is introduced to the dynamic analysis of the process of the transformer winding deformation. Firstly, the magnetic field and structure field coupling characteristics of the transformer are analyzed by ANSYS magnetics-structure direct coupled-field method for a typical 220 kV transformer. Then, in view of the short circuit fault example, the dynamic deformation process of the transformer windings is studied. Finally, in the case of the maximum current moment in the fault example, compared with the static field analysis results, the analysis results are consistent, and the correctness of the method is verified. This method may provide an effective research approach for dynamic analysis of transformer winding deformation process.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407075).

**Key words:** transformer; winding deformation; finite element; magnetics-structure; direct coupled-field; dynamic analysis

## 0 引言

变压器事故统计显示, 变压器发生短路故障时, 其抗短路能力不足是威胁变压器安全运行的主要因素<sup>[1-2]</sup>。目前, 变压器保护<sup>[3]</sup>和故障诊断<sup>[4]</sup>方案仍难以针对绕组变形提供有效保护。变压器在巨大短路

力冲击下, 可能造成绕组严重变形<sup>[5]</sup>, 如图 1 所示。早期对于变压器绕组抗短路能力的研究主要采用静态力<sup>[6-7]</sup>, 把线圈作为一个静止的整体, 不能考虑绕组变形的影响。近年来, 根据变压器的结构特点和数值解法的研究深入, 针对绕组短路变形问题的研究, 有限元已成为分析这类问题最有效的方法。大量学者主要将短路力和绕组变形独立研究。对于绕组短路力分析, 由于大多不能考虑绕组变形对受力的影响<sup>[8-12]</sup>, 实质上仍是一种静态的近似考虑; 也



图1 高压绕组变形

Fig. 1 Distortion of HV winding

有一些学者通过多次建模改变绕组结构<sup>[13]</sup>, 间接分析了绕组变形对短路力的影响, 但此方法不易考虑短路力的动态变化过程。对于绕组变形分析, 主要采用提取绕组短路力施加到相应的结构场<sup>[14-18]</sup>, 分析绕组形变量。近年来, 有少数学者采用磁-结构间接耦合的方法<sup>[19-20]</sup>, 通过顺序加载电磁场的计算结果到结构场, 分析了绕组变形过程。这些方法虽然都间接分析了绕组变形过程, 但仍忽略了短路过程中磁场和结构场间的动态相互影响。对于能够准确可靠地分析变压器绕组变形动态过程的方法, 还鲜有公开发表。

本文将磁-结构直接耦合的方法引入到对变压器绕组变形过程的研究, 实现了在同一模型下对磁场和结构场的同时求解, 动态地分析绕组变形过程, 解决了传统方法分析问题的近似性和复杂性。随着计算机解算能力的飞速提升, 仿真技术的日益完善, 磁-结构直接耦合的方法由于能够考虑多场间的相互影响, 在研究变压器绕组短路变形等复杂问题上提供了新的思路。

## 1 磁-结构直接耦合理论

在工程实际中, 物理环境通常非常复杂, 对于单一物理场的分析, 与实际仍有差距。耦合场分析能够考虑多个物理场之间的相互作用。

耦合场分析分为顺序耦合和直接耦合两大类。针对绕组变形过程分析, 由于变化的磁场和结构场间存在相互影响, 对于大形变过程的求解更是高度非线性的, 直接耦合的分析方法对于解耦合非线性问题更具优势。

为了准确分析变压器绕组变形过程, 考虑变压器短路故障过程中存在的磁场与结构场间的动态相互影响, 所以采用磁-结构直接耦合的方法, 可实现对该问题更准确的分析。

磁-结构直接耦合是将磁势矢量矩阵和位移矢量矩阵联立迭代求解, 数学方程如式(1)所示。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\mathbf{A}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{C} & 0 \\ 0 & \mathbf{C}^m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{A}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{K} & 0 \\ 0 & \mathbf{K}^m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{A} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F} \\ \Psi_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{A}$  为磁势矢量矩阵;  $\mathbf{U}$  为位移矢量矩阵;  $\mathbf{F}$  为电磁力矢量矩阵;  $\Psi$  为线圈磁链矢量矩阵;  $\mathbf{M}$  为质量矩阵;  $\mathbf{C}$  为阻尼矩阵;  $\mathbf{K}$  为刚度矩阵。

在 ANSYS 软件环境下, 采用磁-结构直接耦合方法, 单元类型只能选用磁-结构直接耦合单元, 如表 1 所示。

表 1 磁-结构直接耦合单元

Table 1 Magnetics-structure direct coupling elements

单元	单元类型	形状	维度	自由度
PLANE13	耦合场	四边形	二维	UX UY TEMP AZ
SOLID5	耦合场	六面体	三维	UX UY UZ TEMP VOLT MAG
SOLID98	耦合场	四面体	三维	UX UY UZ TEMP VOLT MAG

由于二维轴对称有限元模型在解析电磁领域已比较成熟, 因此本文采用在 ANSYS 中建立变压器二维轴对称有限元模型。选用 PLANE13 单元, 直接耦合位移和磁势自由度。载荷采用电流密度激励, 将电流转化为绕组线圈的等效电流密度, 电流的变化则体现为电流密度的变化。采用瞬态分析方法, 以时间历程定义各载荷步, 并多载荷子步缓慢加载, 以准确分析绕组变形的动态过程。

## 2 磁场和结构场耦合特性分析

### 2.1 变压器二维有限元模型

以一台型号为 SFP-200000/220 双绕组变压器为例, 结构参数如表 2 所示。

表 2 变压器结构参数

Table 2 Structural parameters of the transformer

参数	数值
铁心半径	440 mm
铁心高	3320 mm
油箱高	3500 mm
油箱宽	2400 mm
绕组高	2066 mm
低压绕组内/外径	473/574 mm
高压绕组内/外径	637/769 mm
低/高压绕组线饼	150/132
低/高压绕组匝数	74/(711/749/787)

本文以分析绕组幅向变形的动态过程为例, 阐述磁-结构直接耦合方法。合理简化变压器模型,

对于电磁场分析，以 A 相绕组为例，变压器运行于额定分接头状态，考虑绕组实际安匝分布，忽略压板、角环和支架等固体的影响；对于结构场分析，独立分析绕组幅向变形特性，施加绕组轴向位移约束，简化绕组为饼式分布模型。

变压器采用二维轴对称有限元模型，模型剖分及变压器内部磁力线分布分布，如图 2 所示。

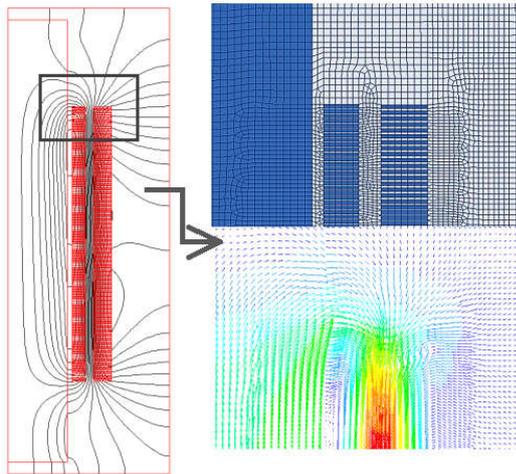


图 2 剖分和漏磁场

Fig. 2 Mesh generation and leakage magnetic field

如图 2 所示，模型共划分为 17 978 个单元，18 197 个节点。由于模型单元剖分将直接影响到计算精度。所以根据模型不同部位精细化程度的不同分区剖分，绕组及周围剖分精细，并控制网格形状。变压器绕组间漏磁场以轴向漏磁场为主，两侧递减，在绕组端部发生弯曲。

### 2.2 磁场和结构场耦合特性分析

为了分析短路故障过程中变压器内部漏磁场、电磁力和形变分布特性，以实际故障可能出现的最大短路电流为例，分析变压器磁场和结构场耦合特性。变压器电气参数如表 3 所示。

表 3 变压器电气参数

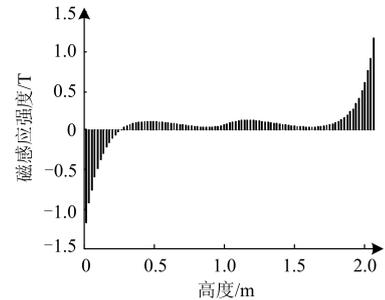
Table 3 Electrical parameters of the transformer

参数	数值
额定电压	13.8/242 kV
额定容量	200 MVA
空载损耗	160 kW
空载电流	0.8%
短路损耗	522 kW
短路阻抗	14%

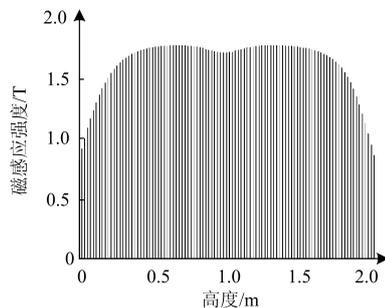
系统发生短路故障，一般以三相短路电流最大。模拟变压器低压侧接发电系统，高压侧出口发生三相金属性短路故障，高压侧短路电流最大峰值为 7.6 kA。以短路电流最大峰值时刻作为研究对象，分析

磁场和结构场耦合特性。

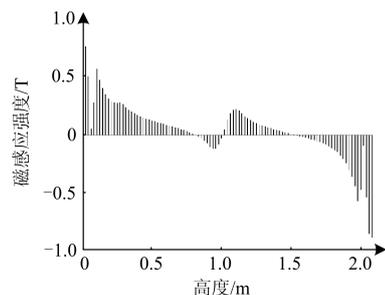
分别取高压和低压绕组中部路径，漏磁场分布如图 3 所示。



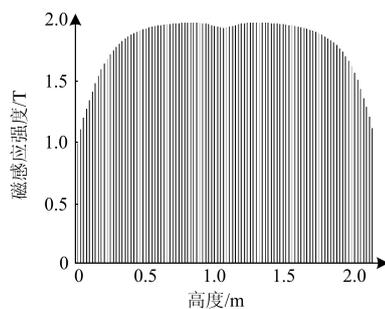
(a) 低压绕组幅向漏磁场分布



(b) 低压绕组轴向漏磁场分布



(c) 高压绕组幅向漏磁场分布



(d) 高压绕组轴向漏磁场分布

图 3 漏磁场分布图

Fig. 3 Leakage magnetic field distribution

由图 3 可以看出：无论高压和低压绕组，幅向漏磁场总体由中部向两端递增，轴向漏磁场由中部向两侧递减；由于绕组中部以轴向漏磁场为主，端部出现较大弯曲，轴向漏磁分量降低，幅向漏磁分量增加所致。低压绕组中部幅向漏磁场较小，且较

为平缓；由于一般铁心较高，低压绕组靠近铁心，且安匝分布较为均匀。高压绕组中部幅向漏磁场产生两个波峰，且发生反向；轴向漏磁场在高压和低压绕组中部均产生凹陷，靠近 1/3 和 2/3 处出现峰值；这主要是由于高压绕组安匝分布对漏磁场调节作用的影响。

高压和低压绕组电磁力和结构位移矢量分布如图 4 所示。

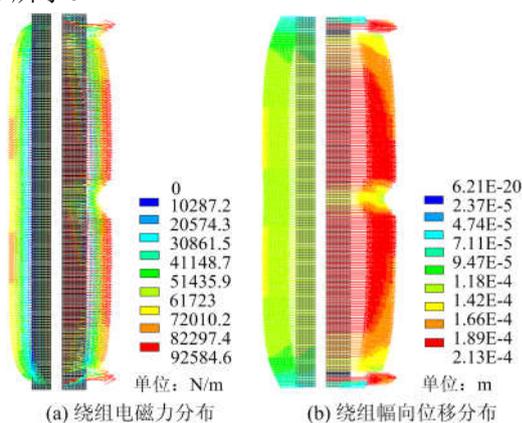


图 4 绕组电磁力和位移矢量分布图

Fig. 4 Electromagnetic force and radial displacement vector distribution of winding

高压和低压绕组幅向电磁力和等效应力梯度如图 5 所示。

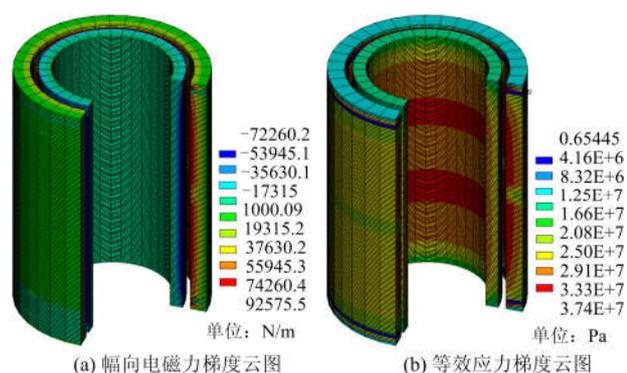


图 5 幅向电磁力和等效应力梯度云图

Fig. 5 Radial electromagnetic force and equivalent stress gradient

由图 4 和图 5 可以看出：高压和低压绕组分别受到方向相反的电磁力作用，见图 4(a)，并存在两个效果，一是使绕组向外扩张，二是使绕组由两端向中部挤压；低压绕组中部受力较为平滑；高压绕组受力在中部产生凹陷，绕组中部的两侧和端部调压绕组受力最大，这主要是由于绕组安匝分布的影响。幅向电磁力由绕组间空道向两侧递减，见图 5(a)。绕组幅向形变特性和受力分布，一致见图 4(b)。绕组的等效应力梯度见图 5(b)，低压绕组承受压缩

应力，高压绕组承受环拉应力，最大值为 37.4 MPa，低于绕组线圈强度校验的一般标准 140 MPa，幅向具有足够的安全裕度，所以一台工艺达标的变压器，在承受单纯幅向电磁力冲击时，绕组具有足够的安全裕度，一般不易发生幅向失稳。

### 3 短路故障绕组变形的动态过程

磁-结构直接耦合分析方法，可以准确地计算变压器内部参量的动态变化过程。以实际双电源系统为例，搭建 Matlab 仿真模型，如图 6 所示。

以系统发生典型发展性故障为例，分析短路故障过程中，变压器内部漏磁场、绕组幅向电磁力以及绕组变形的动态过程。故障设置在变压器高压侧

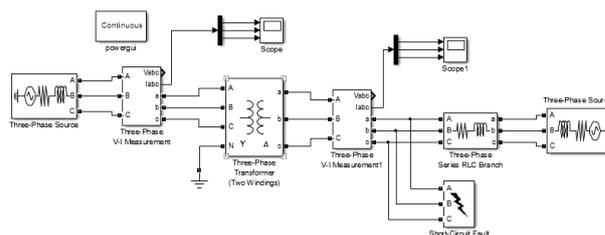


图 6 系统短路故障模型

Fig. 6 System short circuit fault model

出口，0 s 时刻突发 AB 两相短路故障，0.06 s 发展为三相短路故障，故障持续时间为 0.2 s，高压侧短路电流如图 7 所示。

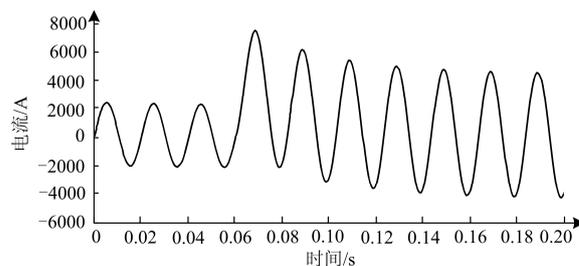


图 7 短路故障电流

Fig. 7 Short circuit fault current

变压器绕组间空道内绕组高度中间位置一点的轴向漏磁场动态变化，如图 8 所示。

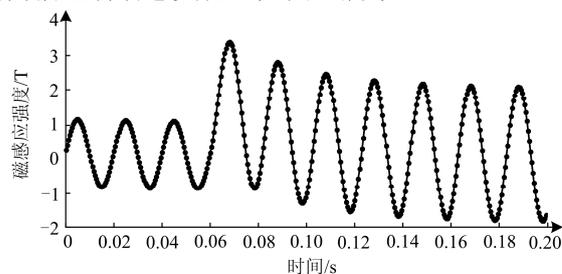


图 8 轴向漏磁场动态变化曲线

Fig. 8 Dynamic change of axial leakage magnetic field

高压绕组从上至下第 66 号线饼中部 13 713 个单元内的 14 257 个节点的电磁力动态变化, 如图 9 所示。

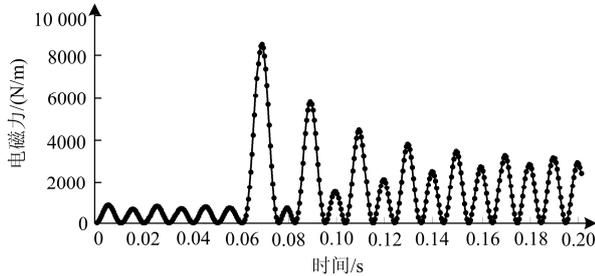


图 9 幅向电磁力动态变化曲线

Fig. 9 Dynamic change of radial electromagnetic force

高压绕组从上至下第 66 号线饼中部 14 257 个节点的幅向位移动态变化, 如图 10 所示。

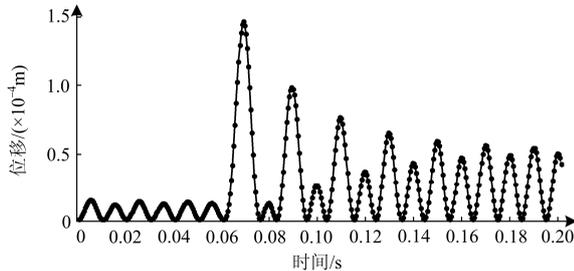


图 10 幅向位移动态变化曲线

Fig. 10 Dynamic change of radial displacement

由图 8 可以看出: 在短路电流作用下, 轴向漏磁场与短路电流具有同样的变化规律。由图 9 可以看出: 绕组承受的幅向电磁力为单侧振荡变化, 变化规律近似于漏磁场绝对值的平方关系。由图 10 可以看出: 在幅向力作用下, 绕组发生单侧受迫振动。这是由于绕组幅向振动的固有频率远远高于短路力频率, 绕组不易产生共振, 所以绕组在电磁力作用下单侧受迫振动, 变化规律类似于幅向电磁力的变化, 绕组未发生幅向失稳。

#### 4 对比静态场分析

经典电磁力理论计算载荷线圈所受电磁力的基础是毕奥—萨伐尔定律。在相同模型下, 采用经典静态场分析, 不考虑绕组变形, 对比第 3 节故障实例中电流最大时刻的分析结果。分别采用静态和动态方法对比分析绕组幅向电磁力分布, 如图 11 所示, 可以看出: 采用静态场与磁—结构直接耦合方法分析绕组幅向电磁力分布结果一致。

从左到右依次选取绕组中部相同位置的 6 个节

点, 进一步对比两种方法幅向电磁力计算结果, 如表 4 所示。

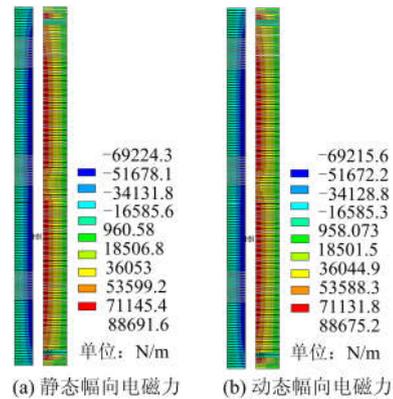


图 11 静态和动态幅向电磁力对比图

Fig. 11 Static and dynamic radial electromagnetic force contrast

表 4 节点幅向电磁力对比表

Table 4 Nodal radial electromagnetic force contrast

解算方法	节点序号					
	1	2	3	4	5	6
静态	-5237.6	-16 944	-30 056	27 105	19 442	6063.2
动态	-5237.0	-16 943	-30 055	27 095	19 432	6053.5

由表 4 可以看出: 对比相同位置节点幅向电磁力的数值, 可见最大误差仅为 0.16%。这是由于变压器在稳定条件下, 绕组幅向形变量甚小, 所以结构变形对漏磁场分布影响较小。静态场分析也可以认为是动态分析的特例, 符合理论认知, 也侧面验证了方法的正确性。

#### 5 结论

本文采用磁—结构直接耦合分析方法, 对一台 220 kV 典型变压器, 在 ANSYS 中建立了二维轴对称有限元模型, 以绕组幅向变形为例, 阐述了本方法在分析变压器绕组变形动态过程中的应用。首先, 本文分析了变压器短路过程中某一时刻的磁场和结构场耦合特性。然后, 以实际双电源系统发生典型短路故障为例, 分析了变压器内部漏磁场、绕组幅向电磁力和绕组变形的动态变化特性。最后, 对比磁—结构直接耦合和静态场分析结果, 绕组在仅发生小形变情况, 两种研究方法并无明显差异, 验证了方法的正确性。

本文将磁—结构直接耦合分析方法, 引入到对变压器绕组变形动态过程的研究, 解决了难以分析考虑磁场和结构场相互影响下绕组变形过程的难

题。在同一模型下实现了更准确地分析,降低了分步分析磁场和结构场的复杂性和近似性。此方法的引入也为设计和优化变压器绕组结构,以及变压器事故预测、安全评估、事故追忆等众多领域的研究,提供了一种新思路。

### 参考文献

- [1] 金文龙, 陈建华, 李光范, 等. 全国 110 kV 及以上等级电力变压器短路损坏事故统计分析[J]. 电网技术, 1999, 23(6): 70-77.  
JIN Wenlong, CHEN Jianhua, LI Guangfan, et al. Statistics and analysis on power transformer damages caused by short-circuit fault in 110 kV and higher voltage classes[J]. Power System Technology, 1999, 23(6): 70-77.
- [2] 王梦云, 凌愨. 大型电力变压器短路事故统计与分析[J]. 变压器, 1997, 34(10): 12-17.  
WANG Mengyun, LING Min. Statistics and analysis on short-circuit faults of large power transformers[J]. Transformer, 1997, 34(10): 12-17.
- [3] 兰生, 张小钊. 基于多判据的变压器差动保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 125-131.  
LAN Sheng, ZHANG Xiaofan. A transformer differential protection method based on multi-criterion[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 125-131.
- [4] 公茂法, 张言攀, 柳岩妮, 等. 基于 BP 网络算法优化模糊 Petri 网的电力变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 113-117.  
GONG Maofa, ZHANG Yanpan, LIU Yanni, et al. Fault diagnosis of power transformers based on back propagation algorithm evolving fuzzy Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 113-117.
- [5] 赵志刚, 李光范, 李金忠, 等. 基于有限元法的大型电力变压器抗短路能力分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3214-3220.  
ZHAO Zhigang, LI Guangfan, LI Jinzhong, et al. Analyzing the short-circuit withstanding ability of large power transformer based the FEM method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3214-3220.
- [6] 陈闰琪. 变压器线圈短路强度计算综述[J]. 变压器, 1974, 21(5): 1-19.  
CHEN Langqi. Summary of calculation of transformer coil short circuit strength[J]. Transformer, 1974, 21(5): 1-19.
- [7] TANG Yunqiu, QIAO Jingqiu, XU Zihong. Numerical calculation of short circuit electromagnetic forces on the transformer winding[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1990, 26(2): 1039-1041.
- [8] AHN H M, LEE J Y, KIM J K, et al. Finite-element analysis of short-circuit electromagnetic force in power transformer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1267-1272.
- [9] 徐永明, 郭蓉, 张洪达. 电力变压器绕组短路电动力计算[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(5): 36-42.  
XU Yongming, GUO Rong, ZHANG Hongda. Calculation of electrodynamic force with winding short-circuit in power transformers[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(5): 36-42.
- [10] 郑含博, 翟进乾, 李哲, 等. 大型电力变压器内绕组辐向抗短路能力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 154-158.  
ZHENG Hanbo, ZHAI Jinqian, LI Zhe, et al. An assessment of ability to withstand radial short circuit of large power transformer inner windings[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 154-158.
- [11] 刘凡, 姚陈果, 陈凌, 等. 基于有限元法电力变压器绕组的短路电动力分析[J]. 电测与仪表, 2016, 53(4): 113-117.  
LIU Fan, YAO Chenguo, CHEN Ling, et al. Short-circuit force analysis of power transformer winding based on finite-element method[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2016, 53(4): 113-117.
- [12] 李金辉. 超高压电力变压器绕组短路电磁力的计算与分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
LI Jinhui. Calculation and analysis of short-circuit windings electromagnetic force on the ultra-high voltage transformers[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [13] FEYZI M R, SABAHI M. Finite element analyses of short circuit forces in power transformers with asymmetric conditions[J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2008: 576-581.
- [14] ZHANG Haijun, YANG Bin, XU Weijie, et al. Dynamic deformation analysis of power transformer windings in short-circuit fault by FEM[J]. IEEE Transactions on

- Applied Superconductivity, 2014, 24(3): 1-4.
- [15] 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.
- LI Hongkui. Study of short-circuit strength and stability of windings in large power transformer[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [16] 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.
- JIANG Shan. Stress analysis of transformer winding deformation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [17] 郭健, 林鹤云, 徐子宏, 等. 用有限元方法分析电力变压器绕组轴向稳定性[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 209-212.
- GUO Jian, LIN Heyun, XU Zihong, et al. Analysis of axial stability of power transformer windings using finite element[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 209-212.
- [18] AHN H M, OH Y H, KIM J K, et al. Experimental verification and finite element analysis of short-circuit electromagnetic force for dry-type transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 819-822.
- [19] 王丰华, 段若晨, 耿超, 等. 基于“磁-机械”耦合场理论的电力变压器绕组振动特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2555-2562.
- WANG Fenghua, DUAN Ruochen, GENG Chao, et al. Research of vibration characteristics of power transformer winding based on magnetic-mechanical coupling field theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2555-2562.
- [20] 王楠, 刘宝成, 臧春艳, 等. 基于磁-结构耦合场的变压器绕组形变分析[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 94-100.
- WANG Nan, LIU Baocheng, ZANG Chunyan, et al. Analysis of transformer winding deformation based on magnetics-structure coupled-field[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 94-100.
- 
- 收稿日期: 2016-08-16; 修回日期: 2017-01-09
- 作者简介:
- 王 雪(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制;
- 吴 涛(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制。E-mail: 627810708@qq.com
- (编辑 姜新丽)