

# Research on the Modeling of Leakage Magnetic Field and Short-Circuit Force of Power Transformer's Short Circuit Fault

Xiaowei Xu<sup>1</sup>, Jinglin Wang<sup>1</sup>, Guochao Qian<sup>1</sup>, Dexu Zou<sup>1</sup>, Bingyang Li<sup>2</sup>, Chunyan Zang<sup>2</sup>, Bing Luo<sup>3</sup>, Fuzeng Zhang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Power Scientific Research, China Southern Power Grid, Kunming

<sup>2</sup>Institute of Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan

<sup>3</sup>National Engineering Laboratory for Ultra High Voltage Engineering Technology (Kunming, Guangzhou), Guangzhou

Email: [564644245@qq.com](mailto:564644245@qq.com)

Received: Oct. 1<sup>st</sup>, 2014; revised: Oct. 17<sup>th</sup>, 2014; accepted: Oct. 31<sup>st</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In recent years, the short-circuit fault of power transformer occurred frequently and seriously affected the reliable operation of power grid. So it is necessary to analyze the short circuit performance of transformer windings in theory. This paper has taken a three-phase three limb transformer of 220 kV for an example, and the 2-D transient axisymmetric electromagnetic field and 3-D electromagnetic field are both studied by ANSYS. The leakage magnetic field and the short-circuit force in each winding are both calculated and analyzed during three-phase short circuit. Then the distribution rules of them are concluded. By comparing the results of transformer winding's disintegration test, the analysis results are verified. The research conclusion may provide a reference to the analysis of the short-circuit fault of the power transformer.

## Keywords

Transformers, 2-D Axisymmetric, 3-D Model, Parametric, Short-Circuit Force

---

# 电力变压器短路故障的漏磁场及短路力的建模研究

徐肖伟<sup>1</sup>, 王景林<sup>1</sup>, 钱国超<sup>1</sup>, 邹德旭<sup>1</sup>, 李冰阳<sup>2</sup>, 臧春艳<sup>2</sup>, 罗兵<sup>3</sup>, 张福增<sup>3</sup>

<sup>1</sup>云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院, 昆明

<sup>2</sup>华中科技大学, 电气与电子工程学院, 武汉

<sup>3</sup>特高压工程技术(昆明、广州)国家工程实验室, 广州

Email: [564644245@qq.com](mailto:564644245@qq.com)

收稿日期: 2014年10月1日; 修回日期: 2014年10月17日; 录用日期: 2014年10月31日

## 摘要

近年来电力变压器短路故障频发, 严重影响电网可靠运行, 因此很有必要在理论上开展对电力变压器绕组的短路性能的研究。本文以一台较常见的三相三柱式独立绕组结构的220 kV电力变压器为例, 在ANSYS中分别建立了变压器整体结构的二维轴对称和三维模型, 计算变压器在三相对称短路情况下各绕组漏磁场和短路电动力, 并进行对比分析, 总结了漏磁密及电动力分布相应规律, 同时与变压器现场吊包解体检查的结果作对比, 验证了分析结果。本文的研究结论可为电力变压器短路故障研究提供一定参考。

## 关键词

变压器, 二维轴对称, 三维模型, 漏磁场, 电动力

## 1. 引言

随着电力变压器向高电压、大容量方向发展, 变压器短路时, 其短路冲击电流可达正常运行电流的几十倍, 并在绕组中产生过大的漏磁场, 引起变压器绕组中产生巨大的电动力, 轻则影响其绝缘和机械性能, 重则使线圈严重变形甚至使绕组烧毁, 这也对电力系统的稳定运行造成了极大隐患[1]-[3]。因此, 对电力变压器短路时仿真建模, 研究变压器短路时绕组漏磁密及电动力分布情况十分必要。

目前, 实际的复杂工程电磁场等问题分析一般是采用数值算法, 其中, 有限元法数值算法广泛应用于解决变压器短路故障分析。有限元数值算法中, 二维建模方法简单易行, 便于在产品设计中推广应用, 并且计算结果能够满足工程设计的要求。三维模型建模则更精确, 但所需计算时间较长, 对计算机性能要求较高。本文分别针对这两种建模开展研究, 并对变压器短路情况下的短路电动力进行了讨论。

## 2. 短路电流计算分析

鉴于三相短路计算是一切不对称短路计算的基础, 尽管三相对称短路故障发生几率小, 但是故障产生的后果最为严重[4] [5], 故本文主要分析三相对称短路。

### 2.1. 对称短路阻抗网络图

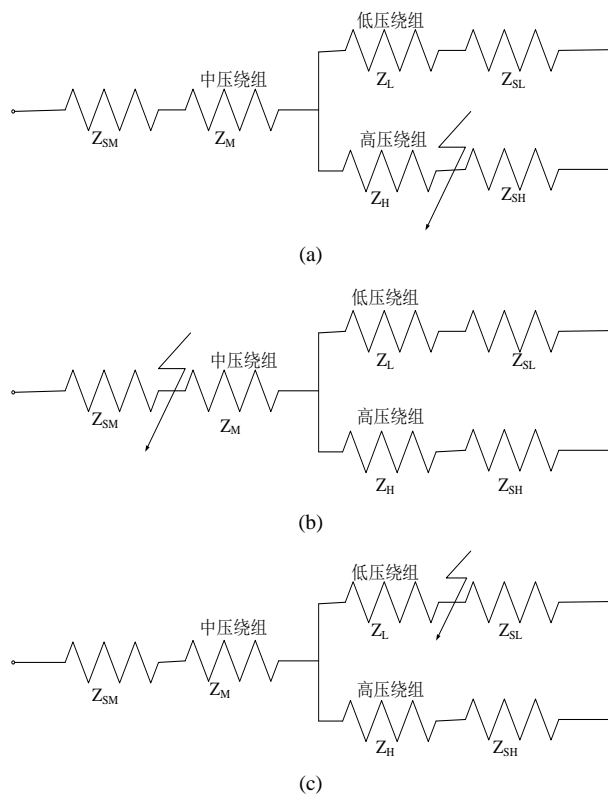
根据系统实际运行方式, 采用等值网络阻抗法计算 220 kV 三绕组变压器对称短路时的短路电流倍数, 如图 1 所示。其中, 高中低压侧均接入电源, 某一侧发生对称短路, 另两侧电源馈电。

图中,  $Z_{SH}$ 、 $Z_{SM}$ 、 $Z_{SL}$ ——分别为高压、中压、低压系统的系统短路阻抗, %;

$Z_H$ 、 $Z_M$ 、 $Z_L$ ——分别是高压绕组、中压绕组、低压绕组的短路阻抗, %。

### 2.2. 对称短路电流结果分析

由图 1 可分别计算得到各对称短路时绕组所受的稳态短路电流方均根值。变压器短路电流实际是瞬变的, 当电压波形过零的瞬间发生短路时, 瞬变短路电流在短路后第一个半周期达最大峰值, 为稳态短



**Figure 1.** Three-phase symmetrical short-circuit equivalent resistance circuit of transformer; (a) Three-phase symmetrical short-circuit equivalent resistance circuit of transformer’s high voltage side; (b) Three-phase symmetrical short-circuit equivalent resistance circuit of transformer’s medium voltage side; (c) Three-phase symmetrical short-circuit equivalent resistance circuit of transformer’s low voltage side

**图 1.** 对称短路等值阻抗网络图；(a) 高压侧对称短路等值阻抗；(b) 中压侧对称短路等值阻抗；(c) 低压侧对称短路等值阻抗

路电流方均根值的 $\sqrt{2}K$ 倍(此处 $K = 1.9$ ) [5]。

在额定分接下，对称短路时各绕组的短路电流最大峰值倍数如表 1 所示。

三绕组变压器对称短路时，高压绕组最大短路电流出现在高压侧对称短路；中压绕组最大短路电流出现在低压侧对称短路；低压绕组最大短路电流出现在低压侧对称短路；则低压对称短路时，绕组所受短路电流最严重，下面重点分析低压侧对称短路。

### 3. 仿真建模

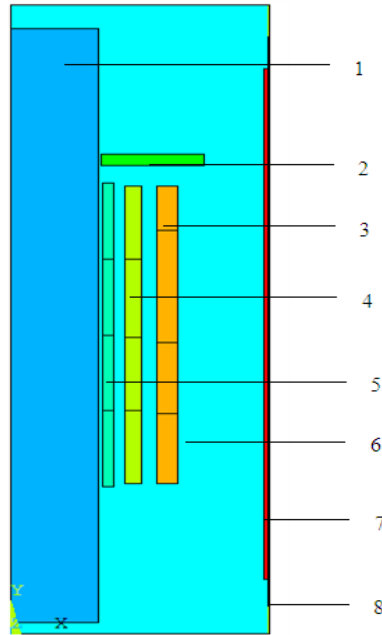
#### 3.1. 二维轴对称建模

所分析变压器为油浸式三绕组变压器，其铁心结构为三相三柱式，电压等级为 220/115/17.5 kV。根据变压器结构和磁路的对称，忽略各相绕组间的相互影响[6]-[8]，只对变压器剖面的一半进行建模，取其中一相进行分析，且假定各绕组分区内安匝平衡。

变压器的二维轴对称仿真模型，如图 2 所示。

在网格剖分时，对铁心和其周围的空气面等磁场变化较小的区域采用自由剖分的方法，对绕组及其主空道等磁场变化较大的区域采用映射剖分，这样可保证不同截面积的分区上具有不同的网格单元，此剖分方法即有效地节省了计算时间，同时也保证了计算的准确性。

变压器的漏磁场严格来说是三维时变场。为简化分析，目前大多学者认为可按静态场分析初步研究



1: 铁心及上下铁轭; 2: 压板; 3: 高压绕组; 4: 中压绕组; 5: 低压绕组; 6: 油; 7: 油箱内屏蔽层; 8: 油箱壁

Figure 2. 2-D axisymmetric simulation model of transformer  
图 2. 变压器的二维轴对称仿真模型

Table 1. The multiple of three-phase symmetrical short-circuit peak current  
表 1. 对称短路时绕组短路电流最大峰值倍数

| 短路类型    | 短路电流最大峰值倍数 |       |       |
|---------|------------|-------|-------|
|         | 低压绕组       | 中压绕组  | 高压绕组  |
| 高压侧对称短路 | 0.16       | 17.46 | 17.62 |
| 中压侧对称短路 | 9.20       | 27.81 | 18.61 |
| 低压侧对称短路 | 30.96      | 30.42 | 0.54  |

变压器短路时绕组特性[9] [10]。本文分别给各绕组分区线饼加载相应面电流密度，整个模型的外侧施加通量平行条件。

### 3.2. 三维建模

三维建模是取铁心柱的几何中心为坐标原点，根据结构对称性，除了建立铁心三个支柱外，还包括上下轭，高压绕组、中压绕组、低压绕组均对称分布在铁心支柱旁。在二维建模基础上需要补充的结构参数主要有：油箱的尺寸，上下轭的尺寸、心柱中心距等结构件间的相对几何距离。

需要说明的是，变压器油箱结构尺寸很大，是一个结构复杂的大型薄体结构，同时变压器结构及载荷的不对称性较大，故采用三维壳体单元建立变压器整体油箱的模型并计算。

变压器的三维仿真线型模型，如图 3 所示。

变压器的铁心和线圈为要求解区域，力求分析细致精确。此处采用扫掠划分，生成六面体单元。周围的油、屏蔽等结构，采用自由剖分，分析可以较为粗略。这样既提高运算速度、减小数据占用的空间，又能保证计算精度。同理，分别给各绕组分区线饼加载相应体电流密度，整个模型的外侧施加通量平行条件。

## 4. 计算结果与分析

### 4.1. 绕组漏磁场分布

利用提供的计算模型和方法,对 220 kV 变压器在低压侧对称短路时的额定分接绕组漏磁场进行计算与分析。变压器漏磁场二维分布如图 4~图 6 所示。

图 4 是  $t = 0.01\text{ s}$  时对称短路磁力线分布。分析漏磁通所流过的闭合路径,一部分漏磁通在绕组所占的部分空间闭合;一部分通过主空道再回到绕组所占的空间闭合;一部分通过绕组端部空间进入压板后再闭合;另一部分通过油箱壁内部的磁屏蔽和油箱闭合。三种对称短路下漏磁场分布上、下基本对称,并且在不同短路类型下,漏磁场分布发生变化。

根据图 5、图 6 的结果,辐向漏磁场峰值出现在绕组端部,而轴向漏磁场峰值出现在主空道中。

从图 7 和图 8 中可以看出,辐向及轴向平均磁密沿绕组高度分布是不均匀的,分布几乎是上下对称的,且轴向平均磁密值相对较大,但变化较小。所有绕组的辐向漏磁在端部最大,在绕组中部磁密最小,一直保持在零值附近。所有绕组的轴向漏磁方向在绕组高度约 1/4 和 3/4 处的线饼轴向磁密最大,中部一些线饼的轴向磁密略小,而在绕组上下端部处线饼的轴向磁密最小。低压侧对称短路时,低压绕组的辐

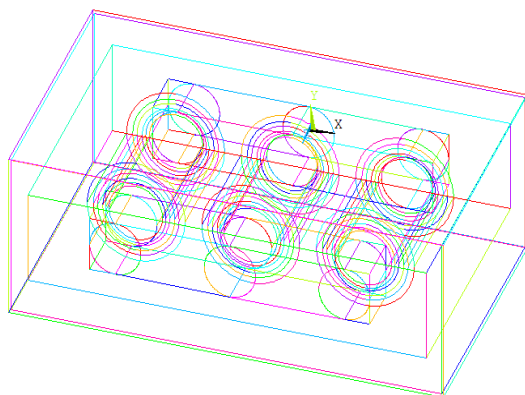


Figure 3. 3-D simulation model of transformer

图 3. 变压器的三维仿真线型模型

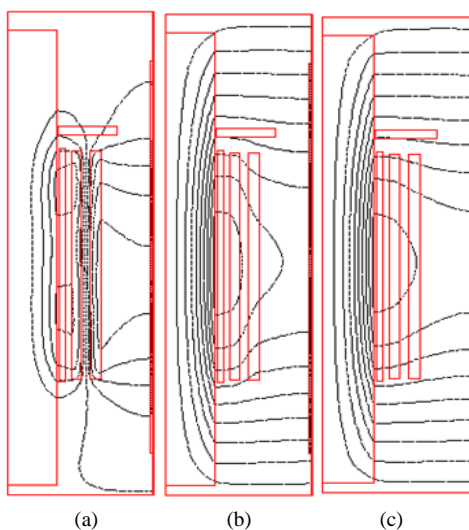


Figure 4. 3-D simulation model of transformer; (a) High voltage side; (b) Medium voltage side; (c) Low voltage side

图 4. 变压器的三维仿真线型模型; (a)高压对称; (b) 中压对称; (c) 低压对称

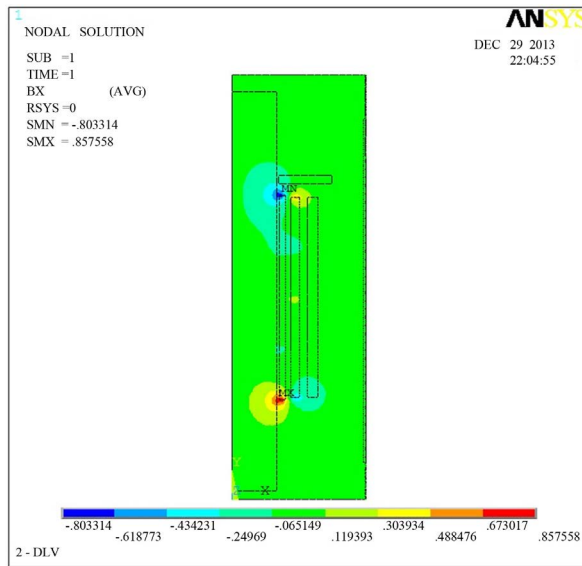


Figure 5. Axial magnetic field distribution of three-phase symmetrical short-circuit of transformer's low voltage side  
图 5. 低压对称短路轴向漏磁密分布

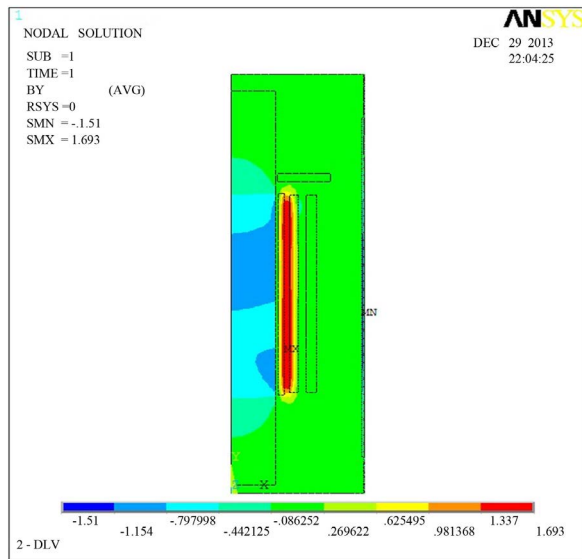


Figure 6. Radial magnetic field distribution of three-phase symmetrical short-circuit of transformer's low voltage side  
图 6. 低压对称短路径向漏磁密分布

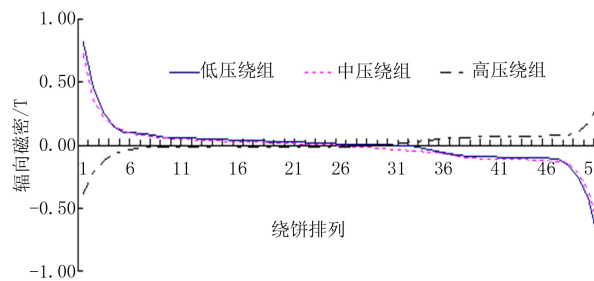


Figure 7. Average axial magnetic field distribution of three-phase symmetrical short-circuit of transformer's low voltage side  
图 7. 低压对称短路轴向平均漏磁密分布

向和轴向漏磁密均值是最大的。

### 4.2. 绕组电动力分布

根据洛伦兹力公式，单位长度线饼的辐向力和轴向力为：

$$F_{xi} = B_{yi} i_{ch} \quad (1)$$

$$F_{yi} = B_{xi} i_{ch} \quad (2)$$

式中， $B_{yi}$  和  $B_{xi}$  分别为突发短路时第  $i$  个线饼单元轴向和辐向漏磁通密度值， $i_{ch}$  为突发短路时短路电流峰值。

低压对称短路时对应各绕组电动力计算结果分别如图 9、图 10 所示。

根据图 9，绕组轴向力均在中部较小，趋近于零，随着向绕组两端的发展，轴向力逐渐增大，并在绕组的两端取得最大值，且整体受力对称，方向相反，均表现为轴向压缩线饼和垫块。

分析图 10 可知，绕组辐向力均在绕组近中部 1/4 和 3/4 处较大，而随着向绕组两端的发展，辐向力逐渐减小，且低压和中压绕组受力方向与高压绕组方向相反。

沿绕组高度，轴向力变化趋势与辐向漏磁密分布一致，辐向力变化趋势与轴向漏磁密分布一致。低压绕组所受辐向及轴向电动力均大于中压和高压绕组，说明低压绕组在对称短路中，最易发生形变。

### 4.3. 现场试验验证

由于试验条件的限制，通过对实际电力变压器的短路试验，来验证理论分析的结果不现实，本文通过与某 220 kV 电力变压器解体检查的相关结果进行对比，验证理论分析结果的正确性。

某 220 kV 变压器基本参数如表 2 所示。该变压器低压侧于 2007 年、2010 年发生对称短路各 1 次。2013 年，通过绕组变形检测试验已经测得绕组发生形变。根据对变压器的吊包解体检查，发现：

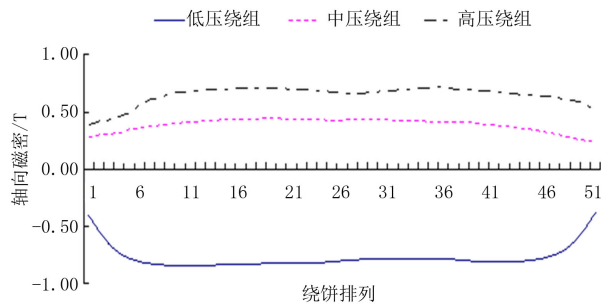


Figure 8. Average radial magnetic field distribution of three-phase symmetrical short-circuit of transformer's low voltage side  
图 8. 低压对称短路辐向平均漏磁密分布

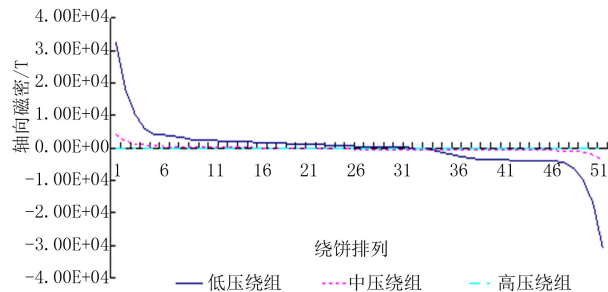


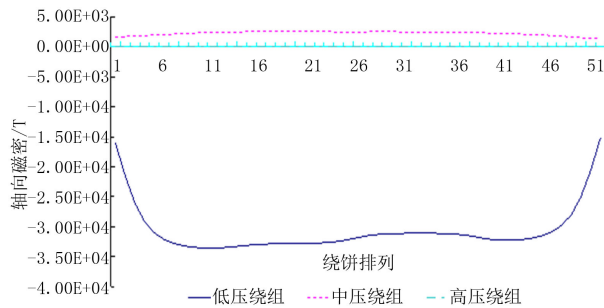
Figure 9. Axial magnetic force distribution of three-phase symmetrical short-circuit of transformer's low voltage side  
图 9. 低压对称短路轴向力分布

低压绕组发生形变最为明显，中上部发生辐向严重变形；  
 中压绕组局部发生轻微凹陷；  
 高压绕组也存在轻微形变，但形变较低压绕组和中压绕组不明显。

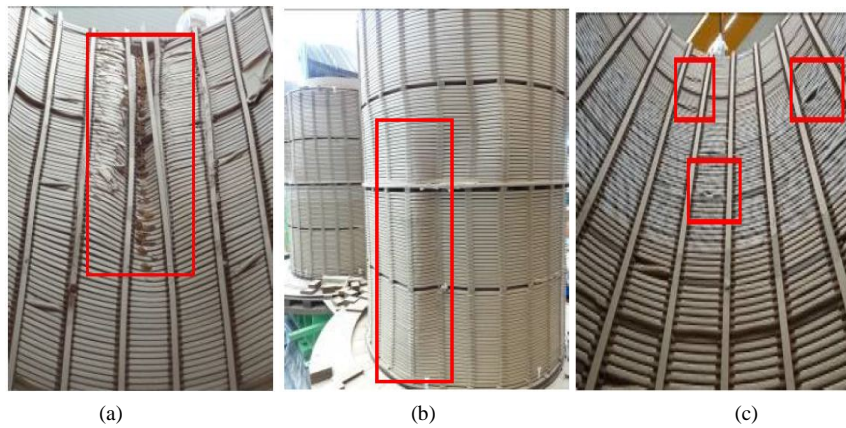
绕组形变情况如图 11 所示，图中红框画出的部分表示绕组发生形变的部位，这一结果验证了仿真的正确性。

**Table 2.** The basic parameters of a 220 kV transformer  
**表 2.** 某 220 kV 变压器基本参数

| 设备型号          |                         | SFPSZ11-120000/220 |          |
|---------------|-------------------------|--------------------|----------|
| 出厂日期          | 1999-1-1                | 投运日期               | 2000-1-8 |
| 额定电压和分接范围(kV) | 220 ± 8 × 1.25%/37/10.5 |                    |          |
| 额定电流(A)       | 315/1873/3299           |                    |          |
| 连接组别          | YN, yn0, d11            |                    |          |
| 空载损耗(kW)      | 76.7                    |                    |          |
| 负载损耗(kW)      | 402.7                   |                    |          |
| 短路阻抗HV~LV(%)  | 25.8                    |                    |          |
| 短路阻抗MV~LV(%)  | 8.97                    |                    |          |
| 短路阻抗HV~MV(%)  | 14.7                    |                    |          |



**Figure 10.** Radial magnetic force distribution of three-phase symmetrical short-circuit of transformer's low voltage side  
**图 10.** 低压对称短路辐向力分布



**Figure 11.** Winding deformation of 220 kV transformer; (a) Low voltage winding of transformer; (b) Medium voltage winding of transformer; (c) High voltage winding of transformer  
**图 11.** 某 220 kV 变压器绕组形变; (a) 低压绕组; (b) 中压绕组; (c) 高压绕组



## 5. 结论

通过对变压器的三相对称短路下绕组漏磁场、短路电动力的仿真计算以及对现场试验数据的分析,可以说明:当变压器发生对称短路时,变压器绕组轴向和辐向磁密分布不均匀,基本呈现上下对称分布,且三个绕组漏磁密分布趋势一致;辐向漏磁密在绕组两端出现最大值,在绕组中部出现最小值;轴向磁密在绕组约 1/4 和 3/4 高度处达到最大,且轴向磁密较辐向磁密大;在低压对称短路情况下,低压绕组所受的轴向力和辐向力较大,易发生形变。

## 基金项目

本文受特高压工程技术(昆明、广州)国家工程实验室 2014 年开放基金(项目号: NEL201413)和华中科技大学 2014 年度强电磁工程与新技术国家重点实验室开放基金(资助编号: 2014KF006)的支持。

## 参考文献 (References)

- [1] 金文龙, 陈建华, 李光范, 等 (1999) 全国 110 kV 及以上等级电力变压器短路损坏事故统计分析. *电网技术*, **6**, 21-25.
- [2] 施广宇, 蒋良胜 (2006) 电力变压器短路损坏分析. *福建电力与电工*, **1**, 3-6.
- [3] 姜益民 (2002) 变压器抗短路能力简析. *变压器*, **39**, 27-29.
- [4] (2008) 国家标准: GB1094.5-2008, 电力变压器. 中国标准出版社, 北京.
- [5] 乔静秋, 等 (1989) 三相突然短路时变压器电磁场的数值计算. *哈尔滨电工学院学报*, **2**, 127-135.
- [6] 韩芳旭, 李岩, 孙昕 (2010) 电力变压器漏磁场和短路阻抗计算. *变压器*, **10**, 9-12.
- [7] 王建民, 张喜乐, 翟元, 等 (2012) 大型变压器绕组漏磁场及短路力学性能的仿真分析. *电气制造*, **5**, 60-64.
- [8] Wang, H. and Butler, K.L. (2001) Finite element analysis of internal winding faults in distribution transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **16**, 422-428.
- [9] 徐勇, 周腊吾, 朱英浩, 等 (2003) 变压器漏磁场的分析. *变压器*, **9**, 1-3.
- [10] Hori, Y. and Okuyama, K. (1980) Axial vibration analysis of transformer windings under short circuit condition. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **99**, 443-451.