

电力变压器三维瞬态漏磁场及电动力仿真分析

穆 龙¹, 陈伯根¹, 蔡 锋¹, 吴丽明¹, 杜国安², 兰 生²

(1. 国网许继集团福州天宇电气有限公司, 福州 350000; 2. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福州 350108)

摘 要:为了分析变压器绕组在短路冲击下的瞬态磁场及瞬态电动力特性,依据变压器绕组的漏磁场理论和短路电动力的计算原理,利用计算电磁场的有限元分析软件,以1台SSZ11-50000/110三绕组电力变压器为研究对象,建立了变压器绕组的仿真模型和短路计算方程,进行了变压器瞬态漏磁场和瞬态短路电动力计算仿真分析。在变压器高中运行方式的中压侧绕组出现接地短路故障时,计算出绕组瞬态漏磁场,以及绕组轴向、辐向瞬态短路电动力的分布规律。仿真结果表明,绕组在短路过程中,漏磁场、电动力分布与时间和空间有关,并均在 $t=0.01\text{ s}$ 时刻出现最大值。在任意时刻下,轴向磁感应强度,两侧小,中间大;中压和高压绕组之间的辐向磁感应强度近似为“ Λ ”形。铁芯窗内侧与铁芯窗外侧绕组的辐向电动力的分布规律不同,辐向电动力铁芯窗内侧比铁芯窗外侧数值大。绕组轴向电动力,近似中心对称分布,均表现为两侧电动力数值最大,靠近绕组中部最小。此研究为防止变压器绕组变形和改进设计提供参考。

关键词:电力变压器;三相短路;瞬态电动力;有限元仿真

DOI:10.15938/j.jhust.2021.05.014

中图分类号: TM41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2021)05-0104-10

Simulation and Analysis of 3D Transient Leakage Magnetic Field and Electromotive Force of Power Transformer

MU Long, CHEN Bo-gen, CAI Feng, WU Li-ming, DU Guo-an, LAN Sheng

(1. State Grid Corporation Xu Ji Group Fuzhou Tianyu Electric Company Limited, Fuzhou 350000, China;

2. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to analyze the transient magnetic field and transient electrodynamic characteristics of transformer windings under short-circuit impact, according to the theory of leakage magnetic field of transformer windings and the principle of calculation of short-circuit electrodynamics, using the finite element analysis software for calculating electromagnetic fields, a SSZ11-50000/110 the three-winding power transformer is the research object, the simulation model and short-circuit calculation equation of the transformer winding are established, and the simulation analysis of the transient leakage magnetic field and transient short-circuit electromotive force of the transformer is carried out. When the medium-voltage side winding of the transformer high-medium operation mode has a ground short-circuit fault, the transient leakage magnetic field of the winding and the distribution law of the axial and radial transient short-circuit electromotive force of the winding are calculated. The simulation results show

收稿日期: 2020-04-26

基金项目: 国家电网公司科技项目(00101947); 国家自然科学基金(51977112).

作者简介: 穆 龙(1983—), 男, 硕士, 工程师;

陈伯根(1977—), 男, 学士, 高级工程师.

通信作者: 杜国安(1993—), 男, 硕士研究生, E-mail: 1543151240@qq.com.

that during the short-circuit process of the winding, the leakage magnetic field and the electromotive force distribution are related to time and space, and all appear at the maximum value at $t=0.01$ s. At any time, the axial magnetic induction intensity is small on both sides and large in the middle; the radial magnetic induction intensity between the medium-voltage and high-voltage windings is approximately “Λ” shaped. The distribution law of the radial electrodynamic direction of the windings on the inner side of the iron core window and the outer side of the iron core window is different. The axial electromotive force of the winding is approximately symmetrically distributed in the center, and the electromotive force on both sides is the largest, and the smallest is near the middle of the winding. This study provides a reference for preventing transformer winding deformation and improving design.

Keywords: power transformer; three-phase short circuit; transient electrodynamic; finite element simulation

0 引 言

电力变压器是电力系统中重要的设备,由于电力系统的短路电流过大、绕组设计不合理等原因,不同型号的变压器多次出现绕组扭曲、变形、松散、导线折断等结构损坏的情况。目前,变压器绕组检修周期长、检修难度大,给电力系统的运行维护工作造成极大困难,因此有必要从变压器绕组设计的初始阶段对绕组进行抗短路能力设计^[1-2],降低变压器绕组事故率。变压器绕组变形的机理复杂,提升变压器绕组的抗短路能力,需要加强对绕组在短路条件下的短路电动力研究,并根据电动力的分布规律,有针对性的改善结构强度,显得十分重要。

国内外研究人员对于电力变压器短路电动力已经做了大量研究。闫振华等运用有限元对变压器电磁-结构耦合计算,并运用动力学原理,研究短路电磁力作用下的低压绕组机械强度及变形过程^[3]。Ahn等搭建三维有限元模型,利用了短路电流作为直接激励,计算了变压器绕组的电动力分布和动态形变量^[4-5]。刘文里等利用 ANSYS 有限元软件计算了绕组电动力,建立低压绕组的单层结构模型,结合屈曲分析方法分析了低压绕组的辐向稳定性^[6-7]。刘军等使用有限元计算和理论计算的方法,对不同型号的变压器的抗短路能力和绕组的稳定性进行理论校核,并总结了变压器绕组稳定性的理论校核方法^[8-10]。赵志刚等计算了变压器磁场,并把理论计算结果与 220 kV 变压器的突发短路试验结果作对比,分析了变压器低压绕组辐向宽度、导线尺寸、撑条等对变压器抗短路能力的影响^[11]。李德波等计算了变压器三相短路的情况下,绕组的瞬态轴向力和辐向力,得出了绕组最大时刻的电磁力分布规律^[12-13]。张海军等利用有限元方法分析绕

组累积变形的机理,计算了变压器绕组在多次累积冲击下的变压器绕组结构变化特点^[14-15]。王丰华等使用有限元方法,分析不同预紧力、材料等因素影响绕组轴向的振动特性,并利用实验验证了相关理论^[16-18]。汲胜昌等利用 ANSYS 软件对变压器绕组在稳态运行条件下的振动特性进行了仿真计算,并将结果同实测数据进行对比验证,分析了绕组轴向振动特性随其预紧力、温度、老化程度而变化的趋势^[19]。

上述文献的成果为研究绕组稳定性和抗短路能力提升提供大量理论指导。然而,其中,一部分文献用二维有限元模型计算短路电动力的大小,着重研究绕组的结构动力学问题,校核电磁力大小。另外一部分文献,利用变压器三维模型仿真,将绕组用圆筒代替,未对绕组、铁芯进行细化,计算精度较低。并且,一部分研究集中于分析计算变压器绕组某一时刻的短路电动力和漏磁场的分布规律,或结合力学的基本理论,分析绕组某一时刻的稳定性特性。在实际的短路过程中,绕组的状态是不断变化的。由于绕组中短路电流的快速变化,短路电动力和漏磁场也是变化的,在整个短路过程中,短路电动力对绕组的影响是短路电动力在时间和空间下共同作用的结果。研究绕组的动态力和动态磁场的分布规律,了解绕组磁场和电动力在空间和时间上的分布规律,对研究和分析绕组结构强度变化有一定的参考意义。

本文利用 1 台 SSZ11-50000/110 的三相变压器为计算实例,根据绕组的几何参数,把绕组 1 层分为 1 个线饼,其中,高压绕组分为 74 个线饼,线圈总匝数为 518 匝,中压绕组分为 92 个线饼,线圈总匝数 184 匝;同时,也充分考虑了变压器实际铁芯的构造,对铁芯进行分层三维建模,分析了变压器绕组轴向和辐向不同空间位置的瞬态漏磁场和不同线饼轴

向和辐向瞬态电动力分布规律。

1 变压器漏磁场和电动力计算

1.1 绕组漏磁场计算原理

在短路情况下,变压器的短路电流迅速增加,短路电流的幅值是额定电流的数十倍,当变压器中流过负载电流时,会在绕组及其周围产生磁通,一般把在绕组及其周围产生的磁通称为漏磁通。变压器漏磁场是一个含有多介质、非线性的三维瞬态涡流场问题,工程计算一般引入了矢量磁位 $\mathbf{A}$ 和标量电位 Φ ,由 Maxwell 方程组,并引入库仑规范,推出计算变压器绕组的瞬态磁场方程式^[20]:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla \times (\nu \nabla \cdot \mathbf{A}) + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla \Phi - \mathbf{J}_s &= 0 \\ \mathbf{J}_s &= 0, \nabla \cdot (\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla \Phi) = 0 & (V_1 \text{ 部分}) \\ \sigma &= 0 & (V_2 \text{ 部分}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为矢量磁位, $\text{T} \cdot \text{m}$; Φ 为标量电位, V ; σ 为电导率, S/m ; ν 为磁阻率, m/H ; V_1 为涡流区; V_2 为非涡流区; $\mathbf{J}_s$ 为源电流。

当忽略导体区涡流时,电流密度 $\mathbf{J}_s$ 和导体总电流 i 有如下关系:

$$\mathbf{J}_s = \frac{n_c}{S_c} i(t) \mathbf{h} \quad (2)$$

式中: S_c 为绕组截面积; n_c 为绕组匝数; $\mathbf{h}$ 为绕组切向的单位矢量。

为保持系数矩阵的对称性,引入函数 φ , 使

$$\varphi = \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (3)$$

对整个求解域进行离散化可以得到三维瞬态涡流场的总体矩阵方程为:

$$[\mathbf{M}] \frac{\partial}{\partial t} \{\mathbf{A}_\Phi\} + [\mathbf{K}] \frac{\partial}{\partial t} \{\mathbf{A}_\Phi\} - [\mathbf{C}] \{\mathbf{I}\} = 0 \quad (4)$$

式中: $[\mathbf{M}]$, $[\mathbf{K}]$, $[\mathbf{C}]$, $\{\mathbf{I}\}$ 分别为各部分总体系数矩阵; $\mathbf{A}_\Phi$ 为矢量磁位及函数, 即

$$\mathbf{A}_\Phi = \{\mathbf{A}_x, \mathbf{A}_y, \mathbf{A}_z, \Phi\}^T \quad (5)$$

其中, $\mathbf{A}_x$, $\mathbf{A}_y$, $\mathbf{A}_z$ 分别为矢量磁位 $\mathbf{A}$ 在空间上的 x 、 y 、 z 3 个方向的分量。

求解域内任何节点的矢量磁位值 $\mathbf{A}_\Phi$, 利用公式 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}_\Phi$ 求解域内圆柱坐标系下轴向磁密 B_z 、辐向磁密 B_r 及模值 B :

$$\left. \begin{aligned} B_z &= \frac{1}{r} \frac{\partial(r\mathbf{A}_\Phi)}{\partial r}, B_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial(r\mathbf{A}_\Phi)}{\partial z} \\ B &= \sqrt{B_z^2 + B_r^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r\mathbf{A}_\Phi)}{\partial r}\right)^2 + \left(-\frac{1}{r} \frac{\partial(r\mathbf{A}_\Phi)}{\partial z}\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

1.2 短路电流的计算

变压器出口处发生三相短路时,短路电流值最大,此时绕组的电动力最大,进行变压器短路电动力计算,应按照变压器出现最严重的三相短路情况考虑。由于变压器的相间的对称性,变压器绕组的瞬态短路电流的计算原理相同,仅取三相中的一相进行分析。当变压器的二次侧发生短路时,等效电路图如图 1 所示,根据电路的原理,写出以电流为变量的微分方程:

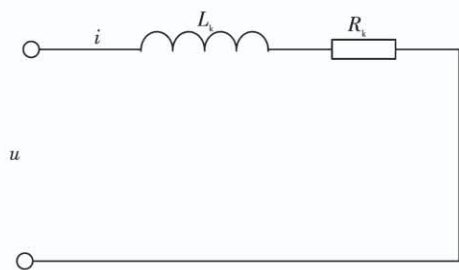


图1 变压器绕组等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of Transformer winding

$$u = U_m \sin(\omega t + \alpha_0) = L_k \frac{di}{dt} + iR_k \quad (7)$$

$$i = \frac{U_m}{Z_d} [\sin(\omega t + \alpha_0 - \alpha_d) - \sin(\alpha_0 - \alpha_d) e^{-\frac{R_k}{L_k} t}] \quad (8)$$

其中, U_m 为电压的峰值; 电压的初相角 α_0 ; L_k 为一、二次侧的绕组的等效电感 $L_k = \frac{X_k}{\omega}$; 一、二次侧的等效电阻 R_k ; Z_d 为短路阻抗; α_d 为阻抗相位角, $\alpha_d = \arctan \frac{\omega L_k}{R_k}$ 。

由于 $R_k < \omega L_k$, $\alpha_d = \frac{\pi}{2}$, 则可以作

$$i = \frac{U_m}{Z_d} [\cos \alpha_0 e^{-\frac{R_k}{L_k} t} - \cos(\omega t + \alpha_0)] \quad (9)$$

由式(6)可得, 当 $\alpha_0 = 0$ 时, 短路电流 i 的最大值 i_m :

$$i_m = \frac{U_m}{Z_d} [e^{-\frac{R_k}{L_k} t} - \cos \pi] = \sqrt{2} K I_k \quad (10)$$

式中: I_k 为对称短路电流有效值; K 为短路电流最大值与对称短路电流幅值之比

$$K = 1 + e^{-\frac{R_k \pi}{L_k \omega}} \quad (11)$$

也称为短路电流冲击系数。

1.3 电动力计算

在短路情况下,变压器绕组的漏磁场和短路电流的共同作用下,在某个时刻,根据磁势平衡原理,高中压侧的电流方向相反,绕组的短路电流在轴向产生磁感应强度 B_z ,在绕组内部短路电流的作用下,产生辐向的短路电动力 F_r ,使得中压绕组在短路电动力作用下向内压缩;高压绕组在短路电动力作用下向外拉伸。绕组的短路电流在辐向产生磁感应强度 B_r ,在绕组内部短路电的作用下,产生轴向的短路电动力 F_z ,使得高、中压绕组均受到两端向内的挤压力,示意图如图 2 所示。

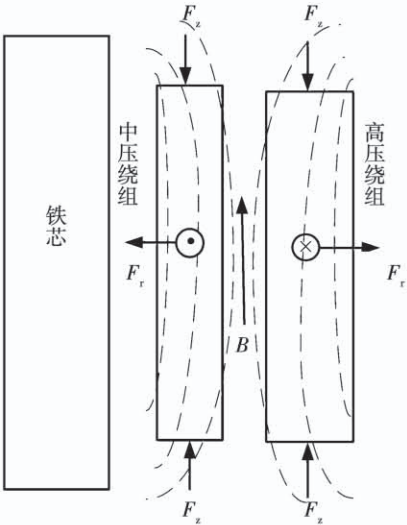


图 2 变压器绕组在磁场中受力的示意图
Fig. 2 Schematic diagram of transformer windings subjected to forces in a magnetic field

根据电动力计算原理,绕组受力方向通常分为辐向分量和轴向分量,由式(6)可推出(12)式,分别得到绕组辐向分量 F_r 和轴向分量 F_z :

$$\left. \begin{aligned} F_r &= \int_V J_r B_z dV \\ F_z &= \int_V J_z B_r dV \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: F_r 、 F_z 分别为辐向和轴向电动力; J_r 为电流密度; V 表示绕组线饼载流导体的体积。

转换到直角坐标系下,洛伦兹力的 3 个分量和合力如式(13):

$$\left. \begin{aligned} F_x &= (J_y B_z - J_z B_y) V \\ F_y &= (J_z B_x - J_x B_z) V \\ F_z &= (J_x B_y - J_y B_x) V \\ F &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: J_x, J_y, J_z 为各方向电流密度; B_x, B_y, B_z 为各方向磁感应强度; F_x, F_y, F_z 为各方向电动力。

2 仿真的实例分析

2.1 仿真模型建立

本文以 1 台型号为 SSZ11-50000/110 电力变压器为例,考虑高中运行方式下,三相电力变压器的各相对称,为了简化计算,只考虑三相中的 B 相,并根据表 1 电力变压器的结构参数、表 2 电力变压器的电气参数,建立三维的有限元仿真模型,如图 3 所示。电力变压器有限元模型的高压、中压绕组用套筒式组合,高压、中压绕组由线饼叠加而成;铁芯用硅钢片分层叠加,在不改变几何尺寸的前提下,适当减少层数。

为了减少有限元仿真的计算量,研究做出了如下假设:

- 1) 不考虑变压器的油箱、油道的影响,绕组外部用油介质区域代替;
- 2) 不考虑变压器绕组垫块、压板、夹件、撑条,保留线饼与线饼的间隙;
- 3) 由于变压器三相对称,故只对其中一相建模,并忽略绕组相间的影响。

表 1 电力变压器的结构参数			
Tab. 1 Structural parameters of power transformers			
	高压	中压	低压
铁芯柱直径/mm	690	690	690
铁芯窗口高度/mm	1 300	1 300	1 300
铁轭厚度/mm	624	624	624
铁芯窗口宽度/mm	750	750	750
线饼内半径/mm	548.50	445.50	362.00
线饼辐向宽度/mm	90.50	66.00	60.50
垫块的厚度/mm	1.50	1.50	2.00
垫块的宽度/mm	50	30	30
垫块的数量/个	20	20	20

表 2 电力变压器的电气参数			
Tab. 2 Electrical parameters of power transformers			
	高压	中压	低压
额定容量/kVA	50 000	50 000	50 000
额定电流/A	262.40	749.80	2 749.30
短路阻抗 Z_d /%	10.24	18.41	6.46

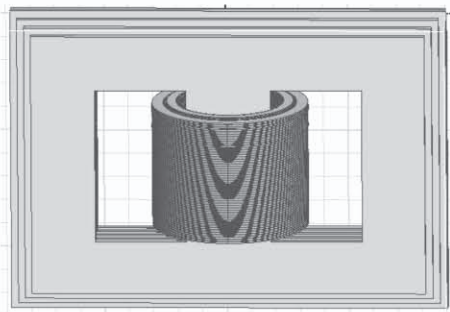


图 3 变压器的有限元模型图

Fig.3 FEM model of the transformer

在仿真计算过程中,高压绕组侧加载电压,中压绕组侧短路,低压绕组侧开路,三相三绕组模型简化为了 1 个三相双绕组变压器,仿真只涉及到计算高压、中压绕组的短路电动力和磁场。仿真的激励是通过公式(10)计算而得到的高、中压绕组的短路电流 i_{h-k} 、 i_{m-k} ,其表达式分别为式(14)、(15):

$$i_{h-k}(t) = 3\,624.5(-\cos(100\pi t) + e^{-13.89t}) \tag{14}$$

$$i_{m-k}(t) = -9\,924.8(-\cos(100\pi t) + e^{-13.89t}) \tag{15}$$

由式(14)、(15)可得到短路电流波形如图 4 所示,当 $t=0.01\text{ s}$ 时,高压、中压绕组的电流都达到最大值,高压绕组电流的最大值 6 804.5 A,是额定电流的 25.9 倍,中压绕组电流的最大值是 -18 630.5 A,是额定电流的 24.8 倍,高、中压电流方向相反,符合磁势平衡原理,证明短路电流的计算值可靠。

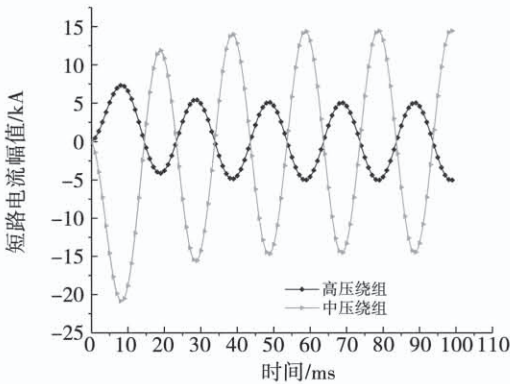


图 4 变压器绕组短路电流图

Fig.4 Short-circuit current diagram of transformer winding

计算模型的材料属性主要设置绕组铜的电导率、铁芯的磁化特性曲线、绕组所处空间的介质特性等。其中,变压器的铁芯采用冷轧硅钢片 35DQ151,

绕组铜线的电导率 $2.10 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$,变压器油介质的相对介电常数为 2.20,其他材料参数根据设计参数选取。

磁场计算过程中,网格的质量决定了计算的准确性。ANSYS Maxwell 有自适应剖分和手动剖分两种形式,本文采用自适应剖分,对不同模块控制网格的最大边长进行剖分。其中,高压、中压绕组最大网格边长为 3 mm,铁芯最大网格边长为 5 mm,变压器油介质所在空间区域的最大边长为 10 mm,自适应的网格总数量为 10 305 263 个,能量迭代误差变化率为 1.30%,网格总体质量较好。

2.2 漏磁场计算结果

利用 ANSYS Maxwell 进行有限元瞬态磁场仿真,从仿真结果中,取 $t=0.01\text{ s}$ 的磁感应强度计算结果如图 5 所示。由于绕组所在空间油介质的作用,绕组的磁感应强度相对于铁芯的磁感应强度较小,绕组中的磁感应强度分布比较均匀,其平均值为 1.36 T。

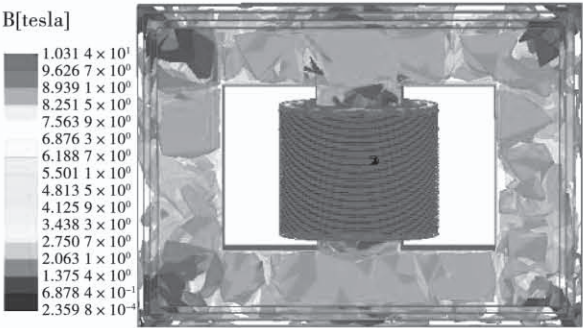


图 5 变压器磁感应强度分布图

Fig.5 Distribution of Transformer magnetic induction intensity

为了区分绕组不同方向的磁场分布,把变压器磁场分布方向主要分为轴向和辐向两个方向。如图 6 所示,沿着高压、中压绕组轴向分别选取路径 S_2 、 S_1 ,计算相应绕组瞬态磁场分布如图 7 和图 8 所示。高压、中压绕组的轴向瞬态磁场,二者与电动力的波形相似,第一个峰值是频率为 f 的暂态周期分量,并随时间逐渐衰减,第二个峰值是频率为 $2f$ 稳态周期分量,并随时间逐渐增大。在不同时刻下,由于绕组的端部有辐向漏磁分量,使相应的轴向漏磁分量变小,导致绕组轴向磁场近似为“梯形”分布,数值不同。

按示意图 5 所示,选取高压、中压绕组的辐向选取两个路径 S_3 、 S_4 ,路径 S_3 、 S_4 穿过绕组和绕组中的气隙,利用有限元求解该路径下的磁感应强度分布

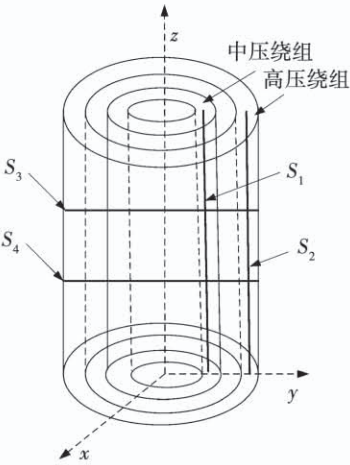


图 6 高、中压绕组磁场路径示意图

Fig. 6 Schematic diagram of magnetic path of high voltage and medium voltage windings

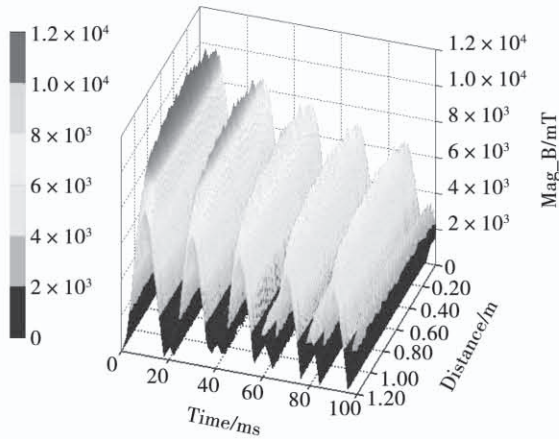


图 7 高压绕组轴向磁感应强度分布图
Fig. 7 Axial magnetic induction intensity distribution diagram of high voltage winding

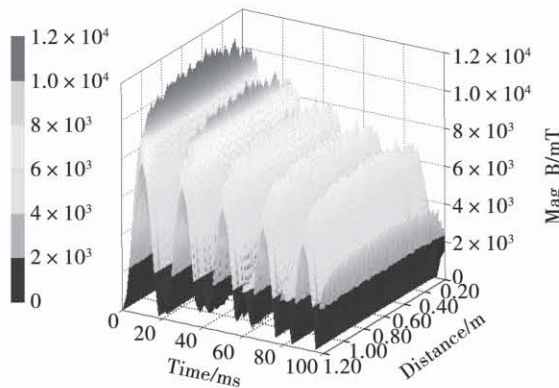


图 8 中压绕组轴向磁感应强度分布图
Fig. 8 Axial magnetic induction intensity distribution diagram of medium voltage winding

规律如 9、10 所示。

对比图 9 和图 10，路径距离为 0 ~ 200 mm 和 1 200 ~ 1 400 mm 的位置出现最大值，由于 S_3 、 S_4 路径穿过绕组之间的空道，最大值出现在空道，近似为“ Δ ”形，中压绕组磁感应强度从内侧到外侧逐渐增大，高压绕组磁感应强度从内侧到外侧磁场强度逐渐减小。其中，中压绕组外侧和高压绕组内侧磁场强度最大，相应绕组电动力最大。

同一时刻下， S_3 、 S_4 路径下辐向磁感应强度均呈对称分布，两个绕组之间的空道中的辐向磁感应强度最大；同时，由于中压绕组中间的空道位于绕组与铁芯、气隙的空间之中，磁阻大，辐向磁感应强度分布平均，总体分布始终最小。

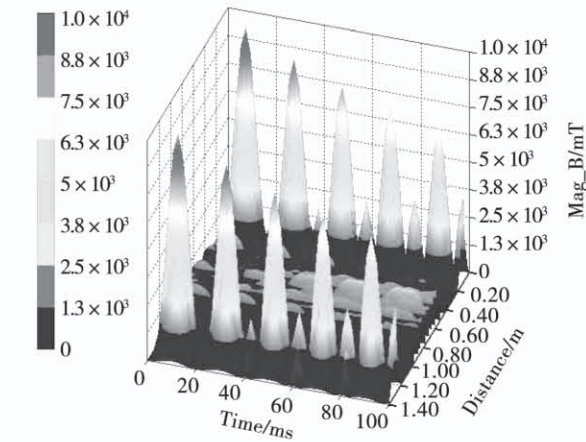


图 9 S_3 路径下绕组辐向磁感应强度分布图
Fig. 9 Distribution of radial magnetic induction intensity of winding under S_3 path

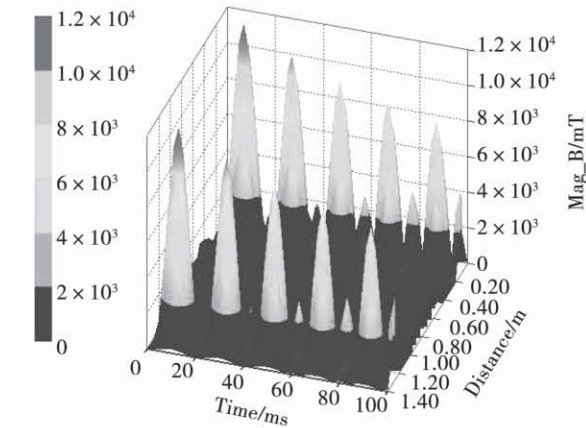


图 10 S_4 路径下绕组辐向磁感应强度分布图
Fig. 10 Distribution of radial magnetic induction intensity of winding under S_4 path

2.3 瞬态短路电力的分布

通常情况下,考虑到继电保护设备在故障发生0.1 s左右动作,本文计算的瞬态绕组短路电动力的大小仅考虑0.1 s范围内的波形变化情况。为了便于区分不同位置的短路电动力波形,本文将高压绕组的74个线饼分别标记为1号、2号、…、74号,将中压绕组的92个线饼分别标记为1号、2号…、92号,得到6种不同种类的时间-线饼-电动力三维分布图。

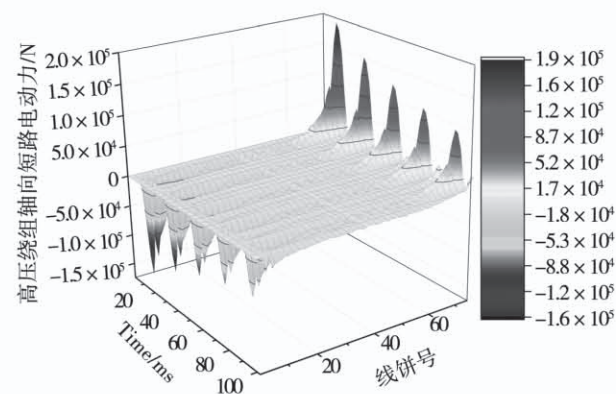


图11 高压绕组轴向短路电动力分布图

Fig. 11 Axial short-circuit electromotive force distribution diagram of high voltage winding

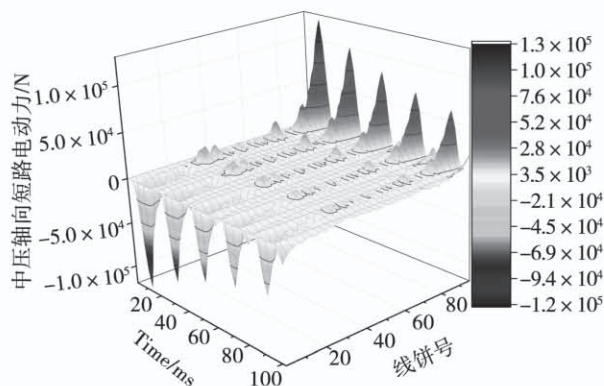


图12 中压绕组轴向短路电动力分布图

Fig. 12 Axial short-circuit electromotive force distribution diagram of medium voltage winding

图11、图12分别是高、中压绕组轴向短路电动力的分布图,轴向电动力的方向对应图5中z轴方向,瞬态电动力变化规律与磁感应强度变化趋势一致,变化的频率相同,分布规律相似,均在 $t = 0.01$ s达到最大值,随后出现衰减。当 $t = 0.01$ s,高压绕组和中压绕组电动力出现最大值,高压绕组的最大短路电动力为 1.920×10^5 N,中压绕组的最大短路电动力 1.250×10^5 N。同一时刻下,高、中压绕组两

端至中部绕组线圈的轴向电动力,呈现逐渐减小的趋势,靠近绕组中间附近位置数值相差较小。其中,高压绕组1~10号、60~74号线饼和中压绕组1~20号、80~92号线饼轴向电动力较大,方向相反,近似呈中心对称分布,轴向电动力从两侧向中间挤压绕组,与上述原理分析相符合。

变压器绕组辐向电动力的计算,考虑对应图5所示的 x 、 y 两个不同方向。其中, x 轴方向靠近相邻绕组铁芯窗口的内侧, y 轴方向垂直于铁芯窗口的外侧, x 、 y 方向的合力共同作用于绕组,使绕组内径扩大或缩小。图13、图14分别选取高、中压绕组靠近铁芯窗内侧的 x 轴辐向电动力,高压绕组辐向最大短路电动力是 1.66×10^5 N,中压绕组的辐向最大短路电动力是 -1.1×10^5 N。整个短路过程中,高压绕组和中压绕组的辐向电动力总是中间部位大,两侧小,二者方向相反,高压绕组辐向电动力方向为正,向外侧拉伸,中压绕组辐向电动力方向为负,向内侧压缩。

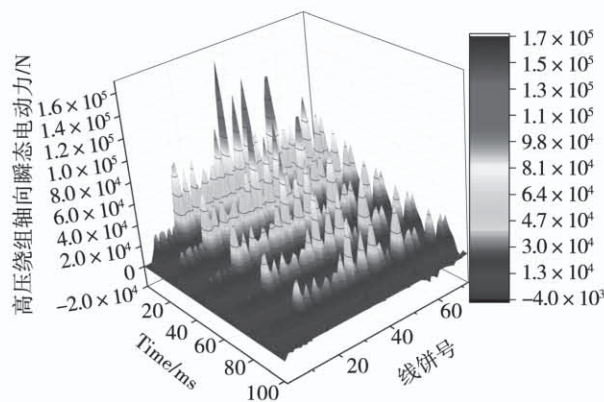


图13 高压绕组x轴方向辐向电动力分布图

Fig. 13 Radial electrodynamic distribution of x-axis of high voltage winding

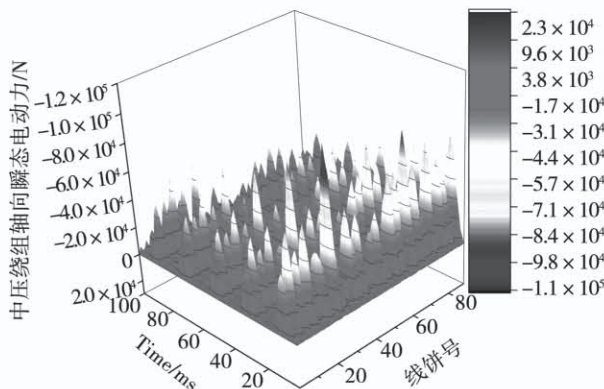


图14 中压绕组x轴方向辐向电动力分布图

Fig. 14 Radial electromotive force distribution diagram of x-axis of medium voltage winding

图 15、图 16 分别选择靠近高、中压绕组的铁芯窗外侧的 y 轴方向进行分析, y 轴方向的辐向电动力方向并不完全一致向内或者向外, 辐向电动力的数值相比铁芯窗内侧绕组更小。其中, 高压绕组 y 轴方向辐向电动力整体方向为负, 靠近中间位置的 20~40 号线饼的电动力方向为正; 中压绕组 y 轴方向辐向电动力整体方向为正, 部分线饼电动力方向为负。绕组的不同线饼, 不同辐向存在拉伸力或压缩力的同时作用, 绕组辐向合力作用方向不同, 在轴向力的同时作用下, 绕组受到倾斜向上或向下的合力, 增加绕组发生扭转变形的可能。

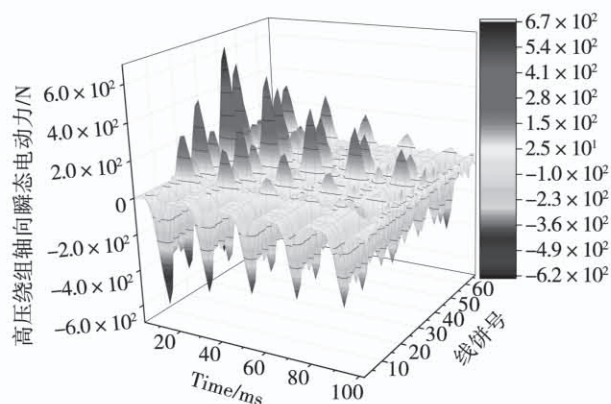


图 15 高压绕组 y 轴方向辐向电动力分布图

Fig. 15 radial electrodynamic distribution of y -axis of high voltage winding

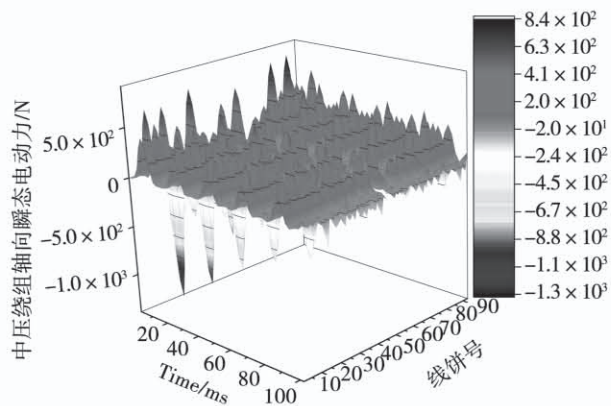


图 16 中压绕组 y 轴方向辐向电动力分布图

Fig. 16 Radial electromotive force distribution diagram of y -axis of medium voltage winding

如图 17、图 18 所示, 高压绕组 1~20 号、60~74 号线饼所受的短路电动力合力较大, 此区域最大短路电动力为 1.930×10^5 N; 中压绕组 10~20 号、80~92 号线饼受到的短路电动力合力较大, 此区域最大短路电动力 1.250×10^5 N。1~20 号、60~74 号、

10~20 号、80~92 号均靠近绕组的两侧, 两侧电动力最大, 向中间挤压绕组, 辐向电动力向内或向外拉伸, 加剧绕组变形。当绕组受到的合力越大, 整体的形变越严重, 绕组越容易出现塑性形变。

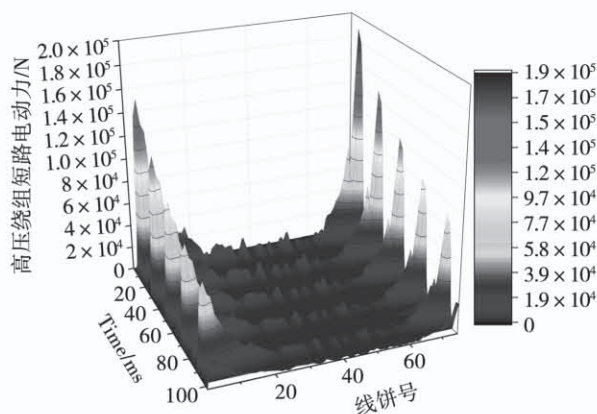


图 17 高压绕组合力图

Fig. 17 Resultant force of high voltage winding

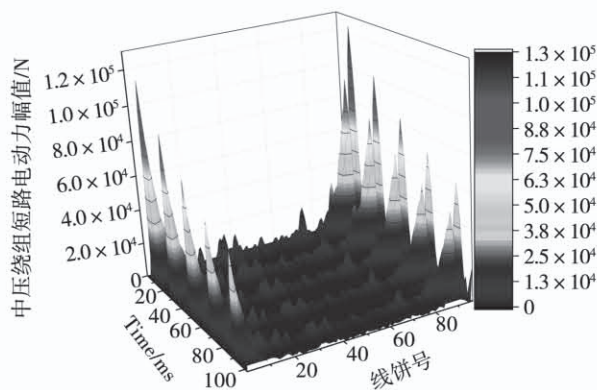


图 18 中压绕组合力图

Fig. 18 Resultant force of medium voltage winding

在整个短路电流衰减的过程中, 高压和中压的瞬态合力保持衰减趋势, 两侧的电动力平缓衰减, 波形相似, 绕组中间部位均数值最小。从绕组电动力分布规律可知, 两侧电动力较大, 中间电动力较小, 两侧向中间挤压绕组, 在轴向和辐向的共同作用下, 高、中压绕组中间部位容易出现凸起、凹陷故障。从提升绕组的抗短路能力角度考虑, 绕组的薄弱区域应该避免绕组的导线上下换位、更换强度更好的撑条、施加合适的预紧力等措施, 使绕组的整体抵抗短路电动力的能力提高。

3 结 论

本文研究了电力变压器绕组在三相接地短路条件下, 绕组瞬态漏磁场和瞬态短路电动力的分布规

律。通过使用 ANSYS Maxwell 有限元仿真软件,并结合一台 110 kV 电力变压器作为仿真实例,分析得到时间-线饼号-电动力和时间-线饼号-磁感应强度分布规律图。仿真结果显示:

1) 绕组的同一线饼,变压器绕组的瞬态磁感应强度的频率和瞬态电动力的频率相同,且绕组轴向和辐向之间的电动力、磁场相对独立,数值大小不同,波形变化规律基本相似。

2) 在任意时刻下,轴向磁感应强度在绕组两侧数值小,在绕组中间磁感应强度数值大;中压绕组辐向磁感应强度从内侧到外侧逐渐增大,高压绕组辐向磁感应强度从内侧到外侧磁场强度逐渐减小,高压和中压绕组之间的空道磁场强度最大,铁芯与绕组之间的空道磁场平均分布,数值较小。

3) 短路过程中,绕组的的不同线饼,靠近铁芯窗内侧 x 轴方向的辐向电动力,高压方向为正,绕组向外拉伸,中压绕组方向为负,向内压缩;绕组的的不同线饼,靠近铁芯窗口外侧 y 轴方向的辐向电动力的方向不完全相同,有正有负,部分线饼的电动力出现最大值。高压和中压 x 轴方向的辐向电动力比 y 轴方向的辐向电动力大,应该加强绕组 x 轴方向的强度。

4) 高压和中压绕组轴向短路电动力频率相同,波形变化趋势相似,任意时刻绕组轴向电动力近似中心对称分布,高压和中压绕组均表现为两侧电动力数值最大,靠近绕组中部最小。

5) 当 $t = 0.01$ s,随着短路电流出现最大值,其轴向和辐向的瞬态短路电动力、瞬态漏磁场数值均为最大值,此时电动力对绕组的垫块、撑条的考验巨大。

上述研究的结论,对于研究绕组轴向和辐向稳定性以及绕组的形变情况,有一定的借鉴意义。

参 考 文 献:

- [1] 张春红,周腊吾,李中祥,等.一起 500kV 事故变压器短路强度计算与分析[J]. 变压器,2016,53(3): 1.
ZHANG Chunhong, ZHOU Lawu, LI Zhongxiang, et al. Calculation and Analysis of Transformer Short-circuit Strength in a 500kV Accident [J]. Transformer, 2016, 53(3): 1.
- [2] 宋云东,周志强,张文广,等.一起变压器绕组严重变形缺陷分析[J]. 变压器,2019,56(8): 79.
SONG Yundong, ZHOU Zhiqiang, ZHANG Wenguang, et al. Analysis of a Serious Deformation Defect of a Transformer Winding [J]. Transformer, 2019, 56(8): 79.
- [3] 闫振华,马波,马飞越,等. 220kV 电力变压器短路电动力学性能分析[J]. 高压电器,2014(3): 79.

- YAN Zhenhua, MA Bo, MA Feiyue, et al. Short-circuit Electrodynamics Performance Analysis of 220kV Power Transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2014(3): 79.
- [4] 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.
- [5] ZHANG H, YANG B, XU W, 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.
- [6] 兰生,胡忠平,廖福旺,等. 短路电动力对变压器低压绕组辐向稳定性的研究[J]. 电机与控制学报,2018,22(5): 19.
LAN Sheng, HU Zhongping, LIAO Fuwang, et al. Research on Short-circuit Electromotive Force on the Radial Stability of Transformer Low-voltage Windings [J]. Journal of Electrical Machines and Control, 2018, 22(5): 19.
- [7] 刘文里,唐宇,李赢,等. 电力变压器高压绕组辐向稳定性评估[J]. 哈尔滨理工大学学报,2016,21(4): 90.
LIU Wenli, TANG Yu, LI Ying, et al. Radial stability Evaluation of High-voltage Windings of Power Transformers [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2016, 21(4): 90.
- [8] 刘军,张安红. 电力变压器绕组短路动稳定能力的仿真和评估[J]. 变压器,2012(6): 14.
LIU Jun, ZHANG Anhong. Simulation and Evaluation of Short-circuit Dynamic Stability of Power Transformer Windings [J]. Transformer, 2012(6): 14.
- [9] 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.
ZHENG Hanbo, ZHAI Jinqian, LI Zhe, et al. Evaluation of Radial Short-circuit Withstand Capability of Inner Windings of Large Power Transformers [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 154.
- [10] 王鹤许. 电力变压器抗短路能力校核方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学,2013.
- [11] 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.
ZHAO Zhigang, LI Guangfan, LI Jinzhong, et al. Analysis of Short-circuit Withstand Capability of Large Power Transformers Based on Finite Element Method [J]. High Voltage Technology, 2014, 40(10): 3214.
- [12] 李德波,张波,臧春燕,等. 电力变压器绕组短路瞬态受力分析[J]. 高压电器,2019,55(1): 87.
LI Debo, ZHANG Bo, ZANG Chunyan, et al. Transient Stress Analysis of Short-circuit Windings of Power Transformers [J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2019, 55(1): 87.
- [13] 刘凡,姚成果,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.
LIU Fan, YAO Gengcheng, CHEN Ling, et al. Short-circuit Electrodynamics Analysis of Power Transformer Windings Based on Finite Element Method. [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2016, 53(4): 113.

- [14] 张海军, 王曙鸿, 李姗姗, 等. 多次短路下电力变压器绕组变形累积效应分析[J]. 变压器, 2018, 55(2): 37.
ZHANG Haijun, WANG Shuhong, LI Shanshan, et al. Analysis of Cumulative Effect of Power Transformer Winding Deformation under Multiple Short Circuits [J]. Transformer, 2018, 55(2): 37.
- [15] 张博, 李岩. 多次冲击条件下的大型变压器绕组辐向失稳[J]. 电工技术学报, 2017, 32(z2): 71.
ZHANG Bo, LI Yan. Radial Instability of Large Transformer Windings under Multiple Shock Conditions [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(z2): 71.
- [16] 王丰华, 杨毅, 何苗忠, 等. 应用有限元法分析变压器绕组固有振动特性[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(4): 51.
WANG Fenghua, YANG Yi, HE Miaozhong, et al. Analysis of Natural Vibration Characteristics of Transformer Windings with Finite Element Method [J]. Journal of Electrical Machines and Control, 2018, 22(4): 51.
- [17] 李洪奎, 李岩. 不同预紧力下变压器绕组轴向振动模态分析[J]. 电机与控制学报, 2010(8): 101.
LI Hongkui, LI Yan. Modal Analysis of the Axial Vibration of Transformer Windings under Different Preload Forces [J]. Journal of Electrical Machines and Control, 2010(8): 101.
- [18] 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): 243.
WANG Fenghua, DUAN Ruochen, GENG Chao, et al. Research on the Vibration Characteristics of Power Transformer Windings Based on the “Magnetism-Mechanical” Coupling Field Theory [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2016, 36(9): 243.
- [19] 汲胜昌, 张凡, 钱国超, 等. 稳态条件下变压器绕组轴向振动特性及其影响因素[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3178.
JI Shengchang, ZHANG Fan, QIAN Guochao, et al. Axial Vibration Characteristics And Influencing Factors of Transformer Windings under Steady-state Conditions [J]. High Voltage Technology, 2016, 42(10): 3178.
- [20] 梁振光, 唐任远. 大型变压器三维瞬态涡流场场路耦合模型[J]. 电工技术学报, 2003(5): 17.
LIANG Zhengguang, TANG Renyuan. Three-dimension-alTransient Eddy Current Field-circuit Coupling Model for Large Transformers [J]. Transactions of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2003(5): 17.

(编辑:温泽宇)