

基于时域有限元法的电缆终端电场分析

宫瑞磊, 刘 博, 肖风良, 化兆祥, 王兆珉

(山东泰开高压开关有限公司技术开发部, 山东 泰安 271000)

摘要: 基于后退欧拉法和变分原理推导了非线性的时域有限元电场计算方程。利用时域有限元方法分析了含不同应力控制管时的电缆终端电场分布。分析结果表明, 采用由电容性和非线性电阻性材料复合绝缘结构的应力控制管时, 电缆终端的电场分布最为均匀。

关键词: 电缆终端; 非线性; 时域有限元方法; 应力控制管

中图分类号: TM247; TM151

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2010)08-0048-04

Analysis of Cable Terminations Based on Time-domain Finite Element Method

GONG Rui-lei, LIU Bo, XIAO Feng-liang, HUA Zhao-xiang, WANG Zhao-min

(R&D Development, High-volt Switch Co., Ltd., Taikai Electric Group, Tai'an 271000, China)

Abstract: Nonlinear electric field time-domain finite element equation is deduced based on the backward Euler method and the variation principle. A comparison of the electric field distribution in a cable termination with several different stress control tubes is presented. The conclusion shows that the electric field distribution in a cable termination equipped with a stress control tube comprising a capacitive and a nonlinear resistive material is the most uniform.

Key words: cable termination; nonlinear; time-domain finite element method; stress control tube

0 引言

电力电缆是电网中的主要元件。电力电缆通过终端结构连接在一起, 终端的电场分布极不均匀。解决电缆终端电场的不均匀分布通常采用增绕终端处的绝缘及应力锥, 使终端处的等效半径增大, 从而减小电缆终端绝缘外屏蔽处的最大场强。大多数情况下, 增绕绝缘由人工来完成, 容易造成介质分界面处存在气隙, 由于分界面处轴向电场的存在, 可能造成沿介质分界面的放电, 在绝缘介质的表面产生电痕, 最终导致绝缘破坏。文[1]中论述了在增绕绝缘中加悬浮电极的办法来改善应力锥处轴向场强的分布, 采用悬浮电极后, 电场分布有所改善。标准的应力锥剖面图为一双对数曲线^[2-3]。在实际工程中, 双对数曲线较难实现, 并且应力锥所占空间大、笨重, 在空间有限的情况下, 不便实现。文[4]计算了电缆终端使用热缩性的电阻材料来改善电场分布的特性; 文[5]计算了电缆终端使用非线性的电阻热缩性材料套管的电场分布, 终端电场的分布有所改善; 文[6]论述了电缆终端采用非线性电阻材料的应力控制管

来改善终端电场分布的方法, 重点对电阻材料的非线性给出了试验结果; 文[7]在文[6]的基础上, 分析了电缆终端应力控制管中使用非线性电阻材料的电场分布, 在控制电场中最大轴向场强时效果明显; 文[8]在不考虑终端电阻材料发热的情况下, 计算了电缆终端应力控制管中采用电导率大于 10^{-5} S/m 的电阻材料时的电场分布, 得到了较满意的电场分布结果; 文[9]在假定电容性的相对介电常数可以达到 3 000 的情况下, 计算了电缆终端应力控制管中含有电容性材料时对电场分布的影响, 提出了在电缆终端中使用高介电常数的介质能够改善电场分布特性。

含有非线性电阻材料的电缆终端的场域求解有多种不同的方法。文[5]使用了非线性电阻和线性电容的参数网络法, 计算结果的精度问题在文[8]中做了讨论; 文[6-9]都是基于有限元法对电缆终端的电场分布做了计算, 其中文[7]采用了伽辽金和后退欧拉法推导了场域中含有非线性电阻材料时的电场计算。笔者在文[7]和文[10]的基础上, 采用变分方法和后退欧拉法推导了非线性电场计算的时域有限元格式, 并利用时域有限元法分析了电缆终端含有不同应力控制管时的电场分布特性。

收稿日期: 2010-02-05; 修回日期: 2010-05-15

作者简介: 宫瑞磊(1979—), 男, 工程师, 现从事 550 kV 断路器和 GIS 设计研究。

1 非线性电场时域有限元的计算

1.1 准静态电场

在绝缘材料中,无空间电荷存在时,电位 φ 满足 Laplace 方程^[11]

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_i \nabla \varphi) = 0 \quad (1)$$

式(1)中, ε_i 是绝缘材料的相对介电常数。

在电阻性材料中,从 Maxwell 的电流连续方程出发

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial (\nabla \cdot \mathbf{D})}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

式(2)中, $\mathbf{J}$ 是传导电流密度; $\mathbf{D}$ 是电位移矢量; $\mathbf{J}$ 与 $\mathbf{E}$ 满足下式

$$\mathbf{J} = \gamma(E) \mathbf{E} \quad (3)$$

式(3)中, $\gamma(E)$ 为电导率,是电场强度 E 模值的非线性函数,因此电位 φ 满足非线性散射方程

$$\nabla \cdot [-\gamma(E) \nabla \varphi] = \frac{\partial}{\partial t} [\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_j \nabla \varphi)] \quad (4)$$

式(4)中, ε_j 是非线性电阻材料的相对介电常数。

1.2 非线性散射方程的时域有限元差分方程

为求解非线性电阻性材料中的电场分布,利用后退 Euler 法对式(4)进行离散处理^[6,10]

$$\nabla \cdot [-\gamma(E(t)) \nabla \varphi(t)] = \varepsilon_0 \varepsilon_j \frac{\nabla^2 \varphi(t) - \nabla^2 \varphi(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (5)$$

式(5)中, t 是时间; Δt 是时间步长,整理后得到

$$\nabla \cdot [-(\gamma(E(t)) + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_j}{\Delta t}) \nabla \varphi(t)] = -\varepsilon_0 \varepsilon_j \frac{\nabla^2 \varphi(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (6)$$

考虑两种材料情况,式(1)和(6)可写为

$$-\nabla \cdot [c(\varphi) \nabla \varphi] - f = 0 \quad (7)$$

$$\text{式(7)中, } c(\varphi) = \begin{cases} \varepsilon_0 \varepsilon_i & \text{绝缘材料} \\ \gamma(E(t)) + \varepsilon_0 \varepsilon_j / \Delta t & \text{非线性电阻性材料,} \end{cases}$$

$$f = \begin{cases} 0 & \text{绝缘材料} \\ -\varepsilon_0 \varepsilon_j \Delta^2 \varphi(t - \Delta t) / \Delta t & \text{非线性电阻性材料。} \end{cases}$$

电缆终端的电场分布呈轴对称,采用圆柱坐标系,则对应式(7)的变分问题

$$\begin{cases} F(\varphi) = \\ 2\pi \int_s \left(\int_0^E c(\varphi) \mathbf{E} \cdot d\mathbf{E} \right) r dr dz - 2\pi \int_s f(\varphi) r dr dz = \min \\ |\varphi| = \varphi_0 \end{cases} \quad (8)$$

相应的有限元方程为

$$\mathbf{K}(\varphi) \varphi = \mathbf{P}(\varphi) \quad (9)$$

式(9)中, $\mathbf{K}(\varphi)$ 为 $n \times n$ 阶的非线性刚度矩阵; φ 为 n 阶电位列向量; $\mathbf{P}(\varphi)$ 为 n 阶列向量。

2 实例分析

含有复合结构^[12-16]的应力控制管的电缆终端结

构示意图见图1。图1中 S_1 是电缆导体区域; S_2 是电缆主绝缘区域; S_3 是具有非线性电导率的电阻性材料的区域; S_4 是绝缘外屏蔽; S_5 是电容性材料的区域; S_6 是电缆终端周围的空气。

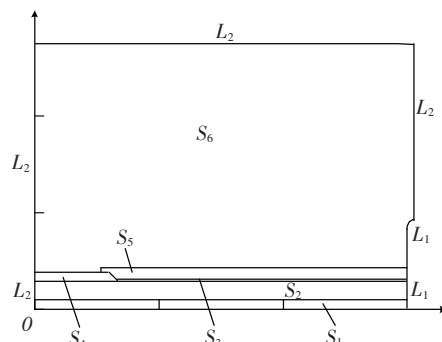


图1 电缆终端结构示意图

图1中,电缆导体上施加的电压是45 kV 正弦周期电压,电缆的外屏蔽接地, L_1 是一类边界条件, L_2 是二类齐次边界条件。

由于在电缆终端单独采用电容性材料制成的应力控制管时,工艺上很难消除电缆终端主绝缘表面与电容性物质之间的小气隙,在此不再讨论。下面分3种情况计算电缆终端的电场分布。

1) 电缆终端采用含有热缩性材料的应力控制管。

2) 电缆终端采用含有单一非线性电阻性材料的应力控制管, $\gamma(E)$ 与 E 的关系满足下式

$$\gamma(E) = \gamma_0 e^{\beta E} \quad (10)$$

式(10)中, γ_0 是材料的初始电导率,取 10^{-9} S/m; β 是材料的特性参数,一般取 2 mm/kV。该算例中采用的非线性电阻材料参数值在实际中可以得到,非线性半导体物质主要有碳化硅(SiC)、氧化锌(ZnO)、钛酸锶(SrTiO_3)和钛酸钡(ZnOBaTiO_3)等,具体可参考文[17]。

3) 电缆终端采用含有电容性材料和非线性电阻性材料组成的复合结构的应力控制管,电容性材料的相对介电常数是30,非线性电阻材料的电导率与电场强度的大小满足式(10), γ_0 和 β 的取值同上。

电压达到峰值时,等位线分布分别见图2、3、4。比较图2、3、4可看出,电缆终端采用单一非线性电阻性材料的应力控制管比采用热缩性材料的应力控制管时能有效地改善电缆终端处的电场分布,而采用非线性电阻材料与电容性材料的复合绝缘结构时,改善电场分布的效果最好。为了更明显地看出电场分布改善的情况,图5中给出了3种情况下沿电缆主绝缘表面处的电位分布,可以看出,电缆终端采用电容性和非线性电阻性材料的复合绝缘结构的

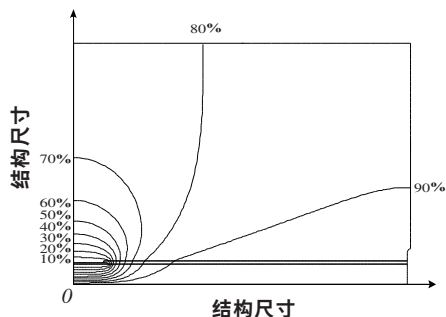


图2 采用热缩性材料的应力控制管的电缆终端的等位线图

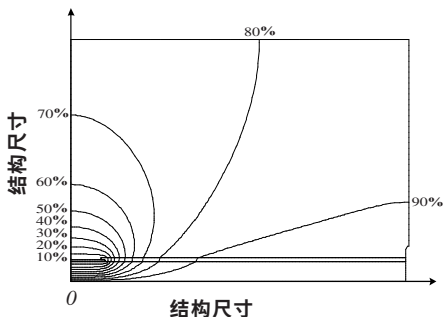


图3 采用单一非线性材料应力控制管的电缆终端的等位线图

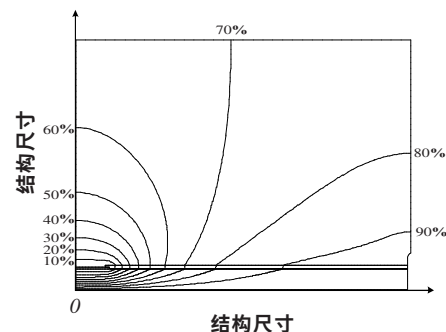
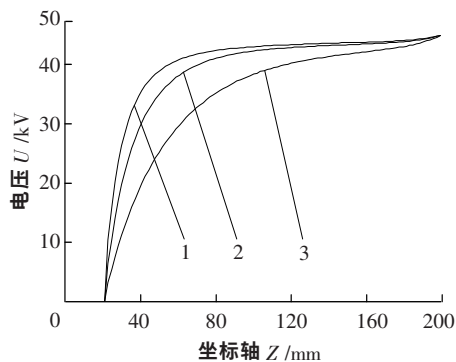


图4 采用电容性和非线性电阻性材料的复合结构的应力控制管的电缆终端的等位线图

应力控制管时,沿电缆终端主绝缘表面的电位分布变化最为平缓,由于电位曲线的斜率是电场强度的轴向分量,因此采用复合结构的应力控制管时,能有效地均匀终端主绝缘表面处的电场轴向分布;图6中给出了3种情况下沿电缆主绝缘表面处的电场强度模值分布,可以看出,采用复合结构的应力控制管和采用单一非线性电阻材料的应力控制管在改善终端主绝缘表面处的电场强度时,基本上是相同的。但对于不同材料的分界面处,多数情况下其轴向耐压值远小于径向的耐压值,因此对图5和图6分析可知,复合结构的应力控制管在改善终端主绝缘和其他介质分界面处的场强分布时具有较好的性能。图6中曲线1、2、3的说明同图5。

图7和图8分别是含有不同应力控制管的电缆终端与空气分界面处沿终端轴向的电位分布比较和电场强度模值的分布比较。可以看出,相同尺寸的电缆终端采用电容性和非线性电阻材料相复合的绝缘



1—含有热缩性材料应力控制管的电缆终端;2—含有单一非线性材料应力控制管的电缆终端;3—含有电容性和非线性电阻材料的复合结构的应力控制管的电缆终端。

图5 电缆终端主绝缘表面处的电位沿电缆轴向的分布曲线图

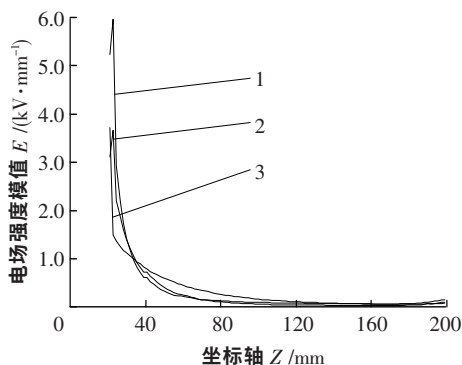


图6 电缆终端主绝缘表面处电场强度沿电缆轴向的分布曲线图

结构的应力控制管时,更能有效地降低电缆终端与空气分界面处的电场强度和轴向场强,减少沿电缆终端表面局部放电的可能性。图7、8中,曲线1、2、3的说明同图5。

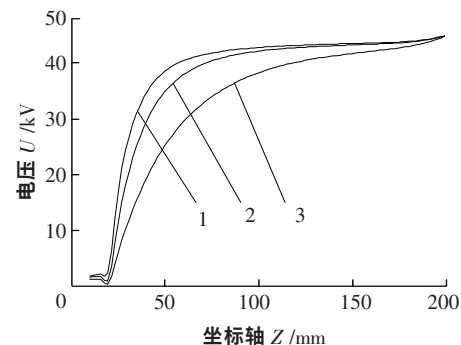


图7 电缆终端与空气分界面处的电位沿电缆轴向的分布曲线图

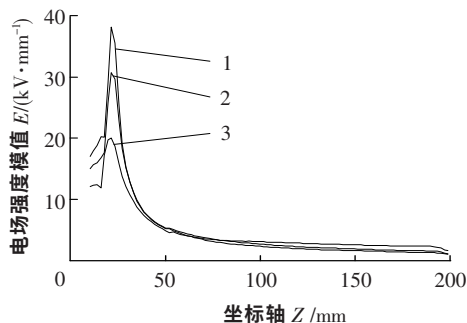


图8 电缆终端与空气分界面处的电场强度模值沿电缆轴向的分布曲线图

3 结语

在有限元方法的基础上,采用后退欧拉法和变分原理推导了非线性电场计算的时域有限元方程。并且利用其计算了含有不同材料的电场应力控制管的电缆终端的电场分布,对不同的电缆终端的电场分布进行了分析比较。比较说明,应力控制管采用电容性和非线性电阻性材料复合绝缘结构时能更好地改善电缆终端电场的分布。

参考文献:

- [1] KOO J Y, LEE H S, OH E J, et al. A Design and Characterization of Condenser Cone Used for the Sealing End of 154 kV of Power Cable[C]// Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Arlington, 1994: 512-517.
- [2] 刘子玉,王惠明. 电力电缆结构设计原理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
- [3] 卓金玉. 电力电缆终端结构中的应力锥电场数值分析和模拟实验研究[J]. 电工技术学报, 2000, 15(2): 15-19.
- [4] MACKEVICH P, HOFFMAN W. Insulation Enhancement with Heat-shrinkable Components Part III: Shielded Power Cable[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1991, 7(4): 31-40.
- [5] IUPO G, TUCCI V, FEMIA N, et al. Electric Field Calculation in HV Cable Terminations Employing Heat-shrinkable Composites with Non Linear Characteristic s[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials.Brisbane Australia, 1994: 278-281.
- [6] LUPO G, PETRARCA C, EGIZIANO L, et al. Numerical Evaluation of the Electrical Field in Cable Terminations

Equipped with Non Linear Grading Materials[C]//Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Atlanta, 1998: 585-588.

- [7] EGIZIANO L, TUCCI V. A Galerkin Model to Study the Field Distribution in Electrical Components Employing Nonlinear Stress Grading Materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(6): 765-773.
- [8] RIVENCE J P, LEBEY T. An Overview of Electrical Properties for Stress Grading Optimization[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(3): 309-318.
- [9] CARSTEA D, CARSTEA I. Numerical Simulation of Electric Field Distribution in Cable Terminations[C]//6th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service. Serbia & Montenegro, 2003: 479-482.
- [10] 盛剑霓. 电磁场数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [11] 尹克宁. 电场数值计算法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [12] LIU Ying, YANG Juan-juan, CAO Xiao-long. Application of Nonlinear Resistance and Capacitance Configuration in Ameliorating the Electrical Field Distribution[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Nagoya, 2003: 745-748.
- [13] 赵新卫, 贾永莲. 探析 10 kV 电容器支路电缆烧毁故障[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 3(2): 454-6.
- [14] 郭天兴, 吴俊丽. 有限元法在标准电容器电场计算中的应用[J]. 电力电容器, 2004, 25(1): 3-8.
- [15] 韩长伟, 夏建中, 戈兴茹, 等. 优化模拟电荷法在耦合电容器电场计算中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(2): 25-28.
- [16] 韩长伟, 李晓军, 马丽荣, 等. 电力电容器元件内部电场计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(6): 37-41.
- [17] 刘乐. 面向套管型电场集中问题的优化方法研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.

(上接第 47 页)

方案和改进方案的电气化铁道牵引供电系统仿真模型,通过对比仿真结果表明:笔者提出的改进型 V_V 牵引变压器较传统方案具有良好的谐波抑制效果,高压侧电流波形基本接近正弦波。

3)改进方案下的特征谐波滤波器接入母线电压为 10.5 kV,较传统方案下的接入母线电压为 27.5 kV 明显降低,可降低滤波器的成本。

参考文献:

- [1] 高志建. 三相 V_V 接线牵引变压器负序电流分析[J]. 变流技术与电力牵引, 2003(5): 8-11.
- [2] DENG Ming-li, WU Guang-ning, ZHANG Xue-yuan, et al. The Simulation Analysis of Harmonic and Negative Sequence with Scott Wiring Transformer[C]// IEEE CMD. Beijing, 2008: 513-516.
- [3] GAO Lin, XU Yong-hai, XIAO Xian-nin, et al. Analysis of Adverse Effects on the Public Power Grid Brought by Traction Power-supply System [C]// Canada Vancouver, BC: IEEE,

2008: 1-7.

- [4] 张弘, 宁康红, 虞海泓. 220 kV 三相 V_V 接线一体化牵引变压器的研究及应用[J]. 电力建设, 2008, 29(3): 22-28.
- [5] 谭秀炳. 交流电气化铁道牵引供电系统[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
- [6] 卢志海, 厉吉文, 周剑. 电气化铁路对电力系统的影响[J]. 继电器, 2004, 32(11): 33-36.
- [7] 唐敏, 李群湛, 贺建闽. 牵引变电所无功谐波综合补偿方案研究[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 47-52.
- [8] 瓦修京斯基 C B. 变压器的理论与计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [9] 李季, 罗隆福, 张志文, 等. 新型换流变压器谐波模型及其配套滤波装置设计[J]. 湖南大学学报, 2007, 34(9): 34-38.
- [10] 李勇, 罗隆福, 贺达江, 等. 新型直流输电系统典型谐波分布特性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 59-63.
- [11] 李勇, 罗隆福, 刘福生, 等. 变压器感应滤波技术的发展现状与应用前景[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 86-92.
- [12] 张志文, 刘福生, 熊芝耀. 多功能平衡变压器的谐波分析及计算[J]. 湖南大学学报, 1998, 25(1): 47-51.