

文章编号:1000-582X(2006)09-0038-06

特快速暂态下变压器线圈的集中参数混合模型*

陈伟根,胡金星,王有元

(重庆大学 电气工程学院 高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400030)

摘要:由于GIS中开关的投切产生的特快速暂态过电压对变压器的绝缘危害极大,为了有效仿真线圈中的快速暂态过程,提出了一种以单匝中并联导线为单元支路和以2段线匝为单元支路相结合的集中参数混合线圈模型.基于准静态电磁场,拓扑网路的大小和参数与变压器的结构和特性有关,网络中的电感和电容等参数是无源和线性的,但它们与传播电磁波的介质有内在的联系.给出了参数的计算方法.通过对模型的仿真分析得到了线匝之间的电位梯度,为线圈的绝缘设计提供了依据.

关键词:特快速暂态;混合模型;准静态;线圈

中图分类号:TM861

文献标识码:A

气体绝缘组合电器(GIS, Gas Insulated Switchgear)中隔离开关的分合闸过程中形成快速暂态过电压(Very Fast Transient Over-voltage).当变压器通过套管、架空线或电缆直接或间接地与GIS相连时,VFTO将作用在变压器线圈上,对变压器绝缘形成危害.目前,一般认为VFTO中的2种情形将有可能损害变压器的绝缘:

1)陡波前阶跃冲击电压(ns级),将在线圈中形成极不均匀的电压分布,大部分电压降落在入波端的3~4段线饼上,电位梯度极大.

2)由电容较大的外部装置引起的低频谐振(振频0.1~10 MHz),有可能引起线圈中局部电磁振荡,产生过电压^[1-4].

要分析上述2种情形对变压器的影响,由于在如此高的频率下的空间波长已经远远小于传统线圈暂态模型单元支路的线段的长度,所以传统的单饼或双饼线匝的等效电路已经不够准确了.而且由于其假设的前提条件是在1段或2段线匝内,电压是线性分布的,故它们无法去计算匝间的过电压.必须应用波过程理论来分析其影响,关键参数是线匝的波阻抗、匝间的传播时间和反射,显然这是非常困难的.对此,国内外做过大量工作,也得到很多不同的模型.清华大学王赞基教授^[5]提出了多传输线分布参数模型和双饼线匝的集中参数模型相结合的混合模型,能够较好地解决匝间振荡,但多传输线分布参数模型对纠结式线圈很难实现,而且模型中的电压源的计算不是很准确.文献^[6]中

提到段间详尽模型迭加 m 个段内的黑匣子模型的混合线圈模型,很好地解决了同一线圈中采用不同结构型式(如纠结和连续饼式)的问题,但是特高频的起始电压是基于高频下的计算结果,黑匣子模型与段间模型没有电磁上的联系.日本学者Yoshikazu Shibuya等^[7]提出在传统的集中参数模型的基础上,提出以匝对匝的集中参数为基础的匝间集合模型,其以单匝为基础的参数计算非常准确,但为了减少计算时间的多匝集合模型,没有考虑实际的线圈是有多导线并联绕制的,而且多采用纠结式结构,单匝间的并联导线所处的几何位置不同,则其电容和电感值不同.

根据实际的变压器线圈结构特点,基于前人的研究成果,笔者提出了一种以单匝中的并联导线为支路和以2段线饼为支路的集中参数混合电路模型来近似模拟线圈中的波过程,网路的大小和参数与变压器的结构和特性有关,准静态条件,磁场相互独立,没有电磁波传播,但 L 和 C 等参数与传输电磁波的介质有内在的联系.单线单匝模型可以准确识别导线在线圈中的几何位置,从而得到正确的参数计算值,结合2段模型可以减少仿真计算时间.对以2段线饼为基本支路的模型在截波冲击电压进行了仿真分析.所得的线圈入波端的电压波形与实测的电压波形基本相近.

1 拓扑网络的参数计算

1.1 电感

在快速暂态冲击的作用下,由于涡流电流的作用,

* 收稿日期:2006-05-10

作者简介:陈伟根(1967-);男,浙江绍兴人,重庆大学教授,博士,博士生导师,主要从事电气设备在线监测与诊断技术,新型电工传感器原理及智能化测量仪器,高电压测量及数字化技术等研究.

可以近似认为铁心、其它非受冲击的线圈的端子是接地的。

笔者给出的电感和电容的计算都是与频率无关的, 只与线圈的结构和尺寸有关。在计算变压器线圈电感时, 可以采用无铁轭导磁率为有限值的无穷长铁心柱模型较为合理, 这是由于一方面高压出线多在线圈中部, 对于这部分需要着重进行暂态分析的中部线圈而言铁心柱可以近似看作无限长; 另一方面由于快速暂态作用时, 非作用线圈为短路线圈的存在, 铁心中的感应电流使得铁心中的总磁通为零, 铁轭存在与否的影响不大。因此变压器线圈的电感可以用一个空气电感模型再加上一个可以调节的激磁电感得到, 激磁电感用来反映铁心中的磁通量。以一匝为基本单元的改进电感模型表达式如下:

$$L_{nm} = L_{0nm} + \lambda_{nm}(\mu_r), \quad (1)$$

式中的 L_{0nm} 为线圈的空气电感, 分为自感和互感, 变压器线匝一般为矩形, 其空气自感和互感的计算如下:

$$L_i = \mu_0 N^2 \pi R_i \left[\frac{1 + \frac{2}{3}\beta + \frac{1}{6}\beta^2}{f_1(\alpha, \beta)} + f_2(\alpha, +\beta) \right], \quad (2)$$

其中 $\alpha = \frac{\alpha_0}{(1-\rho_0)} = h/R_i$; $\beta = \frac{2\rho_0}{(1-\rho_0)} = b/R_i$; $f_1(\alpha, \beta)$

和 $f_2(\alpha, +\beta)$ 是 α 和 β 的解析式, 其它参数的意义如图 1 所示。 b 为线饼的幅向宽度; h 为线饼的轴向高度; R 为线饼的半径; d 为线饼的平均直径。

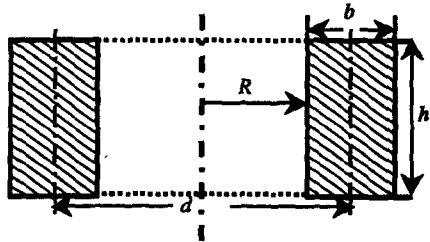


图 1 矩形截面的 N 匝线饼的示意

当线饼(匝)的截面积相对于它们之间的距离而言较小时, 则它们之间的空气互感计算可按诺以曼(Neuman)公式进行计算, 假设线饼的截面集中于其重心位置, 则可按下式:

$$L_m = \mu_0 \sqrt{R_1 R_2} N_1 N_2 \int_0^\pi \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{2(1 - \cos(\varphi) + \frac{d^2}{R_1 R_2})}} d\varphi = \mu_0 \sqrt{R_1 R_2} N_1 N_2 \cdot f(x). \quad (3)$$

$$f(x) = \int_0^\pi \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{2(1 - \cos(\varphi) + x^2)}} d\varphi, x = \frac{d}{\sqrt{R_1 R_2}}, \quad (4)$$

其中 d 为两线饼(匝)的中心距离; R_1, R_2 分别为其内半径。 $\lambda_{nm}(\mu_r)$ 为考虑铁心存在的影响, 其计算采用向

量位法进行计算。公式如下:

$$\lambda_{nm}(\mu_r) = 2N_n N_m (1 - \mu_r) \mu_0 r_0 \cdot$$

$$\int_0^\infty \frac{I_0(pr_0) \cdot I_1(pr_0) \cdot F(p)}{\mu_0 + (1 - \mu_r) pr_0 \cdot I_1(pr_0) \cdot K_0(pr_0)} dp, \quad (5)$$

式中的 I_0, I_1, K_0 和 K_1 分别为第一类和第二类零阶和一阶修正贝塞尔(Bessel)函数; μ_r 为铁心的相对导磁率(40~200); N_n 和 N_m 分别为第 n 和 m 线饼的匝数; r_0 为铁心的半径^[10]。

1.2 电 容

在特高频的冲击作用下变压器表现为容性, 线圈中的电压分布主要取决于电容。所以电容参数的计算的准确性直接影响到所得线圈中电压分布的准确性。目前线圈中的电容分为两大类——串联电容和并联电容。串联电容包括匝间和段间电容; 并联电容主要有不同线圈之间的电容、线圈对铁心间的电容、线圈端部对静电环或铁轭之间的电容。电容的计算主要采用等效的平板电容公式。计算双饼线匝总的匝间和段间电容一般假设总能量不变和电压在段内是线性分布的。单线匝的电容仅考虑相互正对的几何电容。

一个普通饼式线圈的两连续线段如图 2 所示。

在匝间存在两类电容, 即同一段中相邻匝间的幅向电容 C_{ij} , 和相邻段间正对匝间的轴向电容 C_{ai} 。后者仅考虑相邻段间直接正对的匝间并且等于整个段间电容除以每段的匝数的平方。

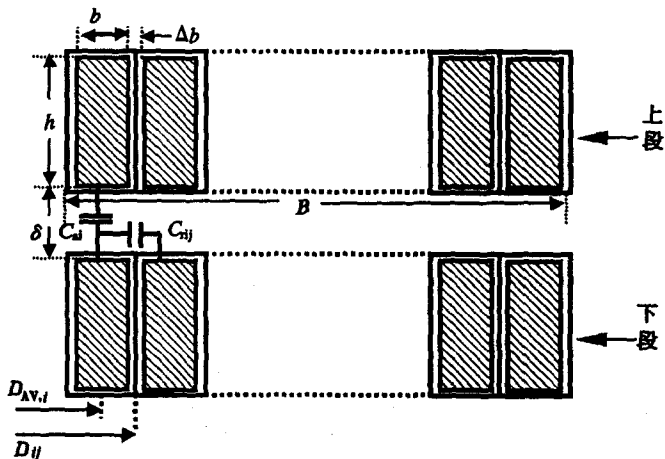


图 2 饼式线圈中电容的计算

幅向相邻的导线 i 和 j 之间的幅向电容按下式进行计算:

$$C_{ij} = \epsilon_s \epsilon_0 \pi D_{ij} \frac{h}{\Delta b} \cdot f_{cor}, \quad (6)$$

两轴向相邻导体间的平均电容如下式:

$$C_{ai} = \epsilon_{eqv} \epsilon_0 \pi D_{AVi} \frac{b}{\delta} \cdot f_{cor}, \quad (7)$$

其中, ϵ_s 为绝缘纸的介电常数; ϵ_0 为空气的介电常数; ϵ_{eqv} 为油、纸和纸板的等效介电常数; h 为导线的轴向

高度; B 为整个线饼的幅向尺寸; D_{ij} 为导线 i 和 j 间的直径; D_{AVi} 为导体 i 的平均直径; b 为导线的幅向宽度; Δb 为导线的绝缘厚度; δ 为导线间纵向绝缘距离; f_{corr} 是考虑到变压器中杂散电场对电容值影响的修正系数. 在变压器线圈中通常要考虑 3 种情况下杂散电场的影响, 即一根电缆中单根导线之间的间隙(绝缘)引起的杂散场; 相邻电缆间的最外层导线间的间隙(绝缘)造成的杂散场; 在线圈外端边角产生的杂散场. 它们都会导致线圈电容的增减. 充分考虑上述 3 种情况下杂散场的影响, 引入相应的修正系数. 从而得到正确的电容值. 如果是纠结式线饼, 相邻线匝间的幅向和轴向电容应在上式的计算结果上乘以各自电压差的平方. 整个线饼的电容则是它们的代数相加即可.

不同线圈两相对支路间的并联电容的计算公式如下:

$$C_{\text{pSeg}} = \varepsilon_{\text{eqv}} \varepsilon_0 \pi D_m \frac{H}{d_{12}} f_{\text{corr1}} \cdot f_{\text{corr2}}, \quad (8)$$

C_{pSeg} 支路间的并联电容(pSeg: 是 parallel 和 segment 的简写, 意为正对段); d_{12} 为两线圈间的距离; D_m 为 d_{12} 的直径; f_{corr1} 和 f_{corr2} 为各自支路的修正系数, 它们与各自的支路线匝的轴向高度、轴向油道的大小和支路间距离有关. 如果两支路是线圈的端部支路则还有加上由于内外线圈不等高造成的电容增量.

线圈支路对铁心或油箱间的电容用下列公式近似得到:

$$C_{\text{ER}} = \varepsilon_{\text{eqv}} \varepsilon_0 2\pi \frac{H_{\text{seg}}}{\ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)} f_{\text{corr}}, \quad (9)$$

其中, C_{ER} 为支路的对地电容(ER: earth 的简写, 意为地); R_o 和 R_i 分别为线圈的内半径和铁心的半径; H_{seg} 为支路的轴向高度. 如是对油箱间的电容, 上式中的 R_o 和 R_i 位置要对换, R_o 和 R_i 分别为油箱和线圈的外半径^[8].

1.3 阻性参数

在大部分快速暂态过电压的等效电路中部无需考虑阻性元件的影响(即焦耳损耗和介质损耗), 但在计算谐振过电压时, 必须考虑它们对过电压峰值的影响.

焦耳损耗主要是涡流电流在线匝中引起的直流电阻损耗, 但在特高频下, 由于线匝自身的集肤效应和相邻线匝的临近效应, 使得线匝的直流电阻值较工频下显著增加; 要准确计算其电阻非常困难, 文献[9]对此做了详尽的阐述. 采用圆导线在工频和高频率下的集肤深度 δ 的比值乘以导线的直流电阻来近似估算高频下的导线电阻值.

介质损耗可以近似由一个电阻和电容并联的模型来计算, 电容的计算由 1.2 节的公式得到, 电阻的计算

公式如下^[10]:

$$R(f) = \frac{1}{2\pi f C \tan \delta} \quad (10)$$

2 线圈的混合高频模型

由于实际的 500 kV 变压器高压线圈多采用纠结与连续式混合饼式结构, 单饼匝数可能不为整数, 且单匝为多根导线并绕. 笔者在基于前人研究成果的基础上, 为了减少计算机运算的时间且能准确反应 VFTO 作用下线圈中电压的分布, 提出了在准静态电磁场的前提下以单匝单线为单元支路和以两段线匝为单元支路相结合的集中参数混合模型. 其可以描绘为以下几个部分:

1) 受冲击的线圈入波端的若干段线圈, 以单匝单线为一个支路, 其物理模型和等值电路示意图如图 3 所示, 支路间存在互感但没有表示. 每匝 2 根导线并联, 每段 3.5 匝; 其余的线段, 以两饼线匝为一支路.

2) 非受冲击的线圈两端接地, 以 2 段或 4 段或更多线匝为一支路.

3) 调压线圈以每一个调压分接为一个支路.

4) 所有的电容和电感参数都是线性, 离散的、与频率无关的; 阻性参数虽然与频率有关, 但也只取特定频率进行计算.

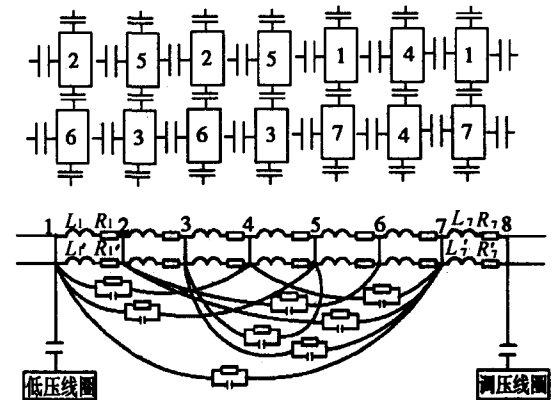


图3 双饼线匝布置图与基于单匝单线的等效电路混合模型之间参数间的联系如下:

1) 在电连接点处电流连续和等电位条件自动满足.

2) 同一线圈中所有正对的支路间存在电容耦合和所有支路间电感耦合, 不同线圈的支路间也存在电容和电感耦合.

3) 不同模型连接处间存在几何电容和互感.

线圈模型的等效电路示意图如图 4 所示, E 代表高频的冲击波, 低压线圈和调压线圈的支路等效电路没有表示, 其与高压线圈双饼线匝模型类似, 各支路间均存在互感但没有在电路中表示, 节点电压(U)和支路电流(I), 电路方程如下:

$$(\Delta U) = -[Z] \cdot (I), \quad (\Delta I) = -[Y] \cdot (U), \quad (11)$$

公式中 ΔU 和 ΔI 分别表示矢量 $U_i - U_{i-1}$ 和 $I_i - I_{i-1}$ 的差值, 阻抗矩阵 $[Z]$ 由支路的电感和电阻组成, 导纳矩阵 $[Y]$ 由相应支路的电容和导纳构成. 参数的计算可按 1 节的方法和公式进行. 电感性支路由自感、互感和电阻串联而成; 电容性支路由电容和电导并联组成^[4].

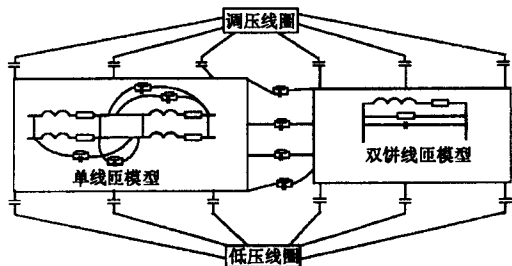


图4 线圈模型等效电路示意图

模型的入波端的单匝等效电路可以近似模拟陡波冲击下的波过程; 单线匝模型的段数决定分析的准确性, 而且可以准确识别导线在线圈中的几何位置, 适用于任何线圈型式(纠结式、普通饼式、螺旋式), 从而得到正确的参数计算值. 阻性参数的引入可以考虑线圈是否有谐振产生. 由于冲击波在线圈中传播, 能量逐渐消失, 将不会再引起破坏性的过电压, 故可在线圈的其余线匝采用 2 段线匝模型, 结合 2 段线匝模型可以有效地减少仿真计算的时间. 模型的另一个显著特点是参数的计算与变压器的线圈的几何位置有关, 在设计阶段可以通过修改线匝的尺寸, 绝缘结构等来改善线圈暂态电压的分布, 从而使变压器在设计阶段就可以充分考虑快速暂态过电压下变压器的绝缘裕度. 从而避免变压器在实际运行中遭受 VFTO 发生绝缘故障.

3 计算分析

笔者对以 2 段线饼为基本支路的线圈模型利用向量特征值法和 FFT 采用了商业软件 Saber 进行分析, 流程图见图 5. 变压器为 720MVA/500kV 三相无载调压变压器, 低压线圈螺旋结构 40 匝, 分为 20 个支路, 高压线圈为部分纠结连续式结构, 1 288 匝, 190 段, 每两段为一支路, 共 95 条支路, 调压线圈为层式结构, 60 匝, 分为 4 条支路. 冲击电压波采用雷电截波: 波前时间为 $1.2 \mu s$, 波尾时间为 $50 \mu s$, 截断时间为 $3.7 \mu s$, 过零时间为 30%, 幅值为 1 675 kV. 分别在考虑阻性分量和没有阻性分量 2 种情况下进行了分析, 而且在高压线圈采用全部连续、全部纠结、纠结与连续相结合的 3 种情况进行了分析. 波形如图 6 - 图 10 所示.

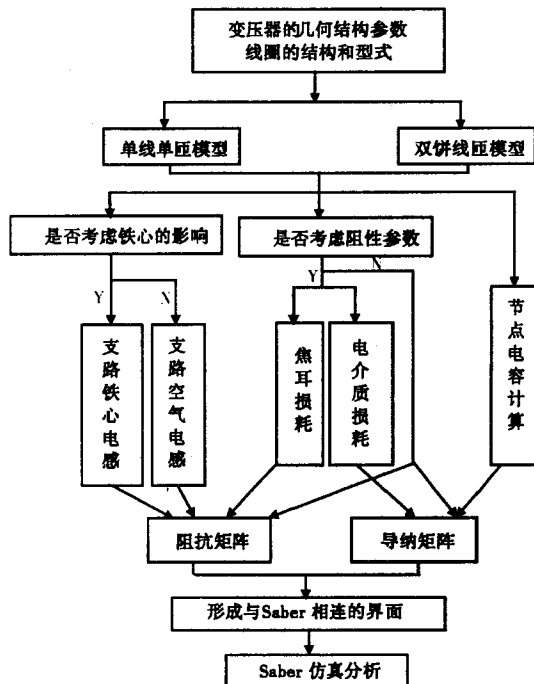


图5 仿真计算流程图

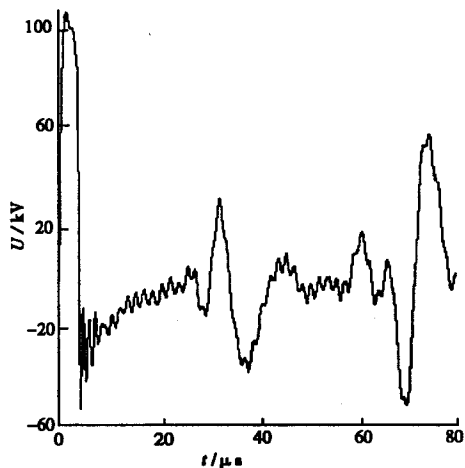


图6 入波端第1、2段线匝间的电压无阻性分量

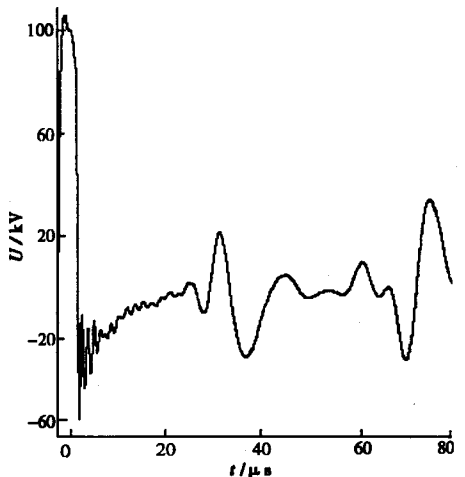


图7 入波端第1、2段线匝间的电压有阻性分量

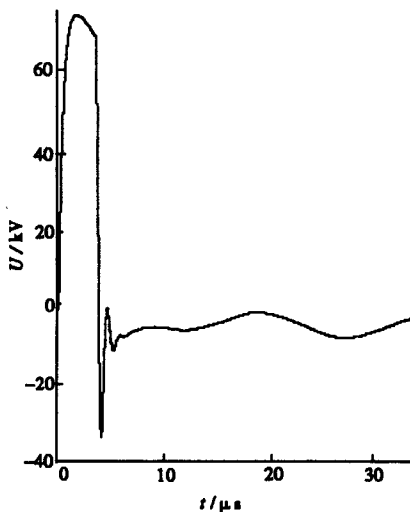


图8 高压全纠结时入波端第1、2段线匝间的电压

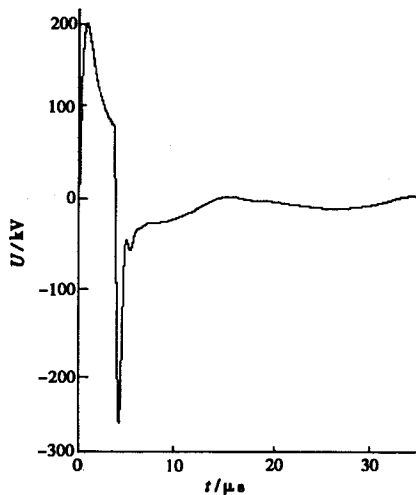


图9 高压全连续时入波端第1、2段线匝间的电压

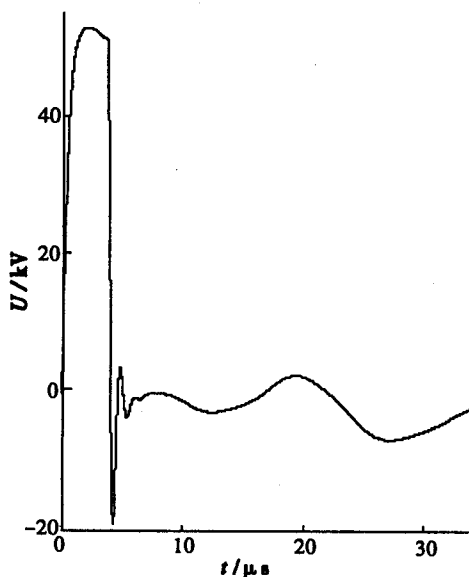


图10 高压部分纠结时入波端第1、2段线匝间的电压

从计算可知,没有考虑阻性分量,高压线圈入波端第一个支路(前两饼线匝)的电压为 106 kV,考虑阻性分量,其电压分别为 103 kV. 入波端对地电压没有振荡,节点间的电压存在振荡,但幅值不高. 如果减小和增加截波的截断时间,节点间电压会相应地减小和增大,而且有可能出现段间振荡过电压. 从图 8 和图 10 可知,在暂态高频下,当高压线圈采用全部纠结式结构,第 1 段线匝内的电压为 +73 kV 到 -32 kV;当线圈采用全部连续式结构,第 1 段线匝内的电压为 +200 kV 到 -250 kV;当线圈采用部分纠结和部分连续式结构,第 1 段线匝内的电压为 +53 kV 到 -20 kV. 则表明第 3 种的线圈结构最合理,它使得线圈中各线匝在高频冲击下,电容分布最合理,从而有效地降低了线匝中的梯度电压.

对以单匝单线为单元支路和 2 段线匝为单元支路相结合的集中参数混合线圈模型进行仿真分析将是以后工作的重点.

4 结 论

1) 在变压器设计阶段,通过改变线圈的结构型式,导线的尺寸,绝缘厚度等,可以得到不同的电容和电感参数数值,从而得到在 VFTO 作用下,线圈中不同的电压分布. 基于这个特点,可以确定变压器的合理结构. 这是混合模型的一个突出的优势. 而且单线单匝模型,可以识别同一匝中并联导线的不同几何位置,从而能准确计算其电气参数.

2) 以 2 段线饼为基本支路的线圈模型在截波冲击下,在频率不是太高的情况下($\leq 1\text{MHz}$)阻性参数对节点间和节点对地的电压峰值影响不是很大,仅会影响算法的收敛.

3) 快速暂态陡波冲击下,应该合理地选择线圈的结构,使线圈中电压分布尽可能均匀,从而降低变压器油中的电场强度.

参考文献:

- [1] 陈庆国,张乔根,邱毓昌. GIS 在快速暂态过电压下的放电特性[J]. 电网技术,2000,24(9):1-4.
- [2] 汪汛,邱毓昌. 气体绝缘开关装置(GIS)的近期发展动向[J]. 电网技术,2003,27(2):54-57.
- [3] DONG XUZHU, ROSADO S, LIU YILU, et al. Transients at GSU Transformer Terminals. I. Historical Case Analysis[Z]. Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, USA, 2001. IEEE, 1: 312-317.
- [4] NAKANISHI K, FUJITA S, KURITA H, et al. High Frequency Voltage Oscillation in Transformer Windings and Electrical Breakdown Properties of Inter-turn Insulation Immersed in Oil at VFT Voltage[Z]. IEEE Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Annual Report, Minneapolis, 1997. 2: 490-493.

- [5] 王赞基. 变压器线圈中特快速暂态仿真的建模[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(5): 299-304.
- [6] GHAREHPETIAN G B, MOHSENI H, MÖLLER K. Hybrid Modeling of Inhomogeneous Transformer Windings for Very Fast Transient Over-voltage Studies [J]. IEEE Trans On Power Deliver, 1998, 13(1): 157-163.
- [7] YOSHIKAZU, SHIBUYA, SHIGETO FUJITA. High Frequency Model and Transient Response of Transformer Windings [Z]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia Pacific, Yokohama, 2002. 3: 1 839-1 844.
- [8] 杨学昌, 崔益彬. 用 Bergeron 法计算变压器线圈暂态电压分布[J]. 电工电能新技术, 1996, 3: 1-5.
- [9] FOO C F, GONG X H. Determination of Winding Losses of High Frequency Planar-type Transformer Using Finite-element Method [Z]. Power Electronics and Variable Speed Drives, Nottingham, 1996. (429): 477-482.
- [10] DE LEON, SEMLYEN F A. Detailed Modeling of Eddy Current Effects for Transformer Transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(2): 1 143-1 149.

Hybrid Lumped Parameter Transformer Winding Model for Very Fast Tansient

CHEN Wei-gen, HU Jin-xing, WANG You-yuan

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The very fast Transient over-voltage generated due to the switchgear in GIS switching off or on is very harmful to transformer insulation. The model presented is a winding hybrid lumped parameter model which combines the branch model based on parallel cables in one turn with grouped-turns model of two discs to efficiently simulate the very fast transient in the coil. Under quasi-stationary electromagnetic field, network topology and element size are derived from the geometry and properties of the transformer, whose inductance and capacitance are assumed to be passive and to have linear characteristics, however which have an inherent feature of a medium, which propagates waves. The formula of parameters are obtained. Based on the built winding model, the voltage gradients between discs and turns are found out, according to the simulation results, the reasonable winding insulation design can be made.

Key words: very fast transient; hybrid model; quasi-stationary; winding

(编辑 李胜春)

(上接第27页)

Model and Numerical Analysis of Radiation Field Created by Lightning Overvoltage Wave on Transmission Lines

WANG Quan-di¹, ZHANG Xi-peng¹, ZHU Lei-lei²

(1. Key Laboratory of High Voltage and New Technology of Electrical Engineering, College of Electrical Engineering, Chongqing University, Ministry of Education, Chongqing 400030, China;
2. Zhejiang Huzhou Electric Power, Huzhou 313000, China)

Abstract: The radiation field created by the transmission line stroked by lightning far from the lightning channel has been analyzed by the FDTD method. The authors we establish the calculation model and FDTD calculation method of transmission line, and discusses the import of lightning excitation source. The simulation of lightning stroked on a single transmission line in free space or stroked on three-phase high voltage transmission lines in actual environments has been done, and gives the distribution of transient radiation field around the transmission lines when lightning overvoltage wave transmits along the transmission line. The simulation result shows that; the effect of the transient radiation field caused by lightning over voltage wave done with environment is obvious, and the high frequency component of transient radiation field may disturb or do harm to the electronic facility or communication facility around the transmission lines.

Key words: FDTD; radiation field; transmission line; direct lightning; electromagnetic compatibility.

(编辑 张小强)