

# 高频下变压器绕组的仿真建模

梁贵书, 朱晓燕, 董华英

(华北电力大学电气工程学院, 保定 071003)

**摘 要:** 为了研究气体绝缘变电站(GIS)中陡波前过电压(VFTO)对变压器的影响,提出了对绕组分段建模的思想:靠近绕组进线端部分线匝采用多导体传输线建模,远离进线端部分线匝采用单导建模,并考虑到两部分模型之间的耦合,建立了变压器绕组的简化模型;为进一步减少计算量,以等效阻抗代替绕组末端部分线匝,建立了变压器绕组的综合模型。分析表明,提出的模型不仅可以准确计算变压器等带绕组电力设备内绕组进线端部分线匝的暂态响应,而且能有效地减小计算量。

**关键词:** 陡波前过电压; 变压器绕组; 多导体传输线; 等效阻抗; 简化模型; 综合模型

**中图分类号:** TM41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6520(2009)02-0393-06

## Simulation Modeling of Transformer Windings at High Frequencies

LIANG Gui-shu, ZHU Xiao-yan, DONG Hua-ying

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** To study the influence of very fast transient overvoltages generated (VFTO) by switching operations in gas insulated substation (GIS) on transformer windings, we established a new simplified model on the basis of multi-conductor transmission line (MTL) theory. The whole transformer winding was divided into several parts, and the coupling of the parts was considered. In order to spare more computation time, we proposed a synthesized model on the basis of the simplified model. For validation, the calculated results of these models were compared with the waveforms of MTL model and measurements. The proposed models can be used not only to calculate the voltage distribution under VFTO with good accuracy, but also to shorten computation time greatly.

**Key words:** very fast transient overvoltages (VFTO); transformer winding; multi-conductor transmission line; e-quivalent impedance; simplified model; synthesized model

## 0 引言

气体绝缘变电站中隔离开关的操作会引起陡波前过电压(VFTO)。VFTO由具有较陡的上升沿和振荡的波尾组成。研究表明,VFTO侵入变压器等电力设备中,一方面形成沿绕组或导体极不均匀的电压分布,大部分电压降落在靠近入波端的一小部分线圈或导体上;另一方面,侵入电压频率主频为数MHz至数十MHz,很可能引起设备内部的电磁振荡,引起过电压<sup>[1-10]</sup>。为了准确计算VFTO在绕组中的传播过程,多以匝为单元建立变压器绕组的多导体传输线模型<sup>[6,10,11]</sup>。对于大型电力变压器,其匝数可能达到数千,则整个绕组将表示成数千根相互耦合首尾相连的传输线。对其直接求解,计算量巨大。有研究指出,在VFTO作用下,可能产生绝缘击穿的地方在变压器绕组靠近进线端的部分线匝之间<sup>[10]</sup>。为了减少计算量,采用对变压器绕组靠近

进线端建立以匝为单元的多导体传输线模型,远离进线端采用一根传输线或等效阻抗代替。但如果简单将变压器绕组划分为两段处理,只是将一个完整的电磁场分割为只有电连接的两部分,不能真实反映绕组内的电磁过程,导致计算结果不准确<sup>[12]</sup>。为了解决上述问题,本文对绕组分段建模,并推导了段间的耦合,建立了绕组的简化模型及综合模型。

本文介绍了多导体传输线模型,提出了对绕组进行分段建模的简化模型及综合模型,并有效处理了段与段之间的耦合;根据这两个模型,计算了连续式绕组的匝末电压分布,将计算结果与多导体传输线模型的计算结果比较,并将综合模型的计算结果与试验测量结果比较,验证了本文模型的正确性。

## 1 多导体传输线模型

文[8]结合实际变压器以匝为单元建立变压器的多导体传输线模型,整个绕组被模拟成多根相互耦合并且首尾相连的多导体传输线。多导体传输线模型见图1。图中 $U_S(i)$ 、 $I_S(i)$ 和 $U_R(i)$ 、 $I_R(i)$ 分别为第*i*匝导线的输入端电压、电流和输出端电压、电流,其中 $i=1,2,\dots,N$ 。

基金资助项目:河北省教育厅2007年科研计划项目(Z2007416)。

Project Supported by Province Guiding Project of Hebei (Z2007416)。

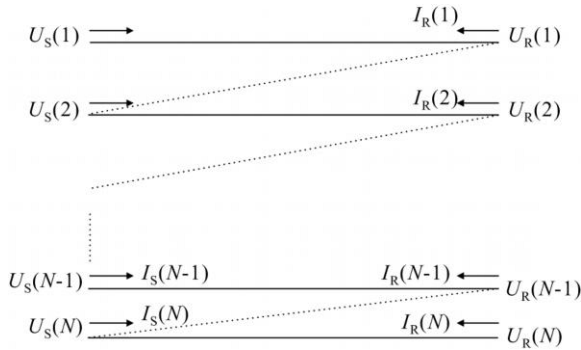


图 1 多导体传输线模型

Fig. 1 Multi-conductor transmission line model

多导体传输线的频域方程为：

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dx} &= -ZI; \\ \frac{dI}{dx} &= -YU. \end{aligned} \quad (1)$$

式中, U、I 分别为电压、电流向量;  $Z = R + jL$ ;  $Y = G + jC$ ; R、L、G、C 分别为变压器的单位长度电阻、电感、电导、电容矩阵<sup>[8]</sup>。

## 2 简化模型与综合模型

### 2.1 简化模型

VFTO 作用下, 可能产生绝缘击穿的地方在变压器绕组靠近进线端的部分线匝之间<sup>[10]</sup>, 因此对变压器绕组分段建模是可行的。

#### 2.1.1 多导体传输线模型的分段

多导体传输线分段模型见图 2。将 N 匝的多导体传输线模型划分为两段, 设段 1 有 M 匝,  $U_1$ 、 $I_1$  和  $U_2$ 、 $I_2$  表示段 1 和段 2 中的电压、电流向量, 则有

$$\begin{cases} -\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}; \\ -\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (2)$$

式中, A、B、C、D 为原多导体传输线模型方程中对阻抗参数矩阵划分后得到的各矩阵; A、B、C、D 为原多导体传输线模型方程中对导纳参数矩阵划分后得到的各矩阵。则段 1 多导体传输线部分的方程为

$$\begin{cases} -\frac{d}{dx} U_1 = AI_1 + BI_2 = AI_1 + P; \\ -\frac{d}{dx} I_1 = AU_1 + BU_2 = AU_1 + Q. \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $P = BI_2$ ,  $Q = BU_2$  表示段 2 对段 1 的耦合。

#### 2.1.2 段间耦合的计算

对于段 2, 采用单导体传输线模型建模。设绕组末端负载  $Z_L = 0$ ,  $U_s$  为绕组入端的电压,  $l_0$  为每

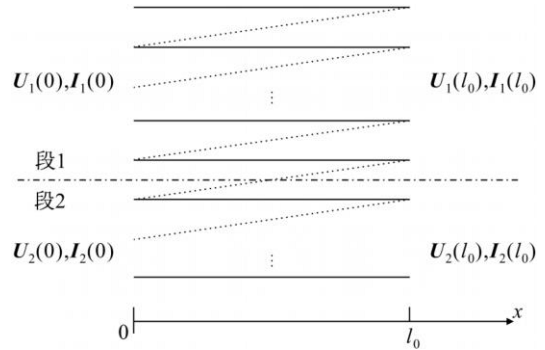


图 2 对多导体传输线模型进行分段

Fig. 2 Partition of MIL model

匝的平均长度,  $l = Nl_0$ ,  $Z_c$ 、分别为单导体传输线模型的特性阻抗、传播系数<sup>[13]</sup>, 则段 2 的入端电压及电流为：

$$\begin{aligned} U &= \frac{U_s(e^l e^{-Ml_0} - e^{-l} e^{Ml_0})}{e^l - e^{-l}}; \\ I &= \frac{U_s(e^l e^{-Ml_0} + e^{-l} e^{Ml_0})}{Z_c(e^l - e^{-l})}. \end{aligned} \quad (4)$$

将段 2 分成长度为  $l_0$  的  $N - M$  段, 则有：

$$\begin{aligned} -\frac{d}{dx} U_1 &= AI_1 + BI_2 = AI_1 + \frac{BU_s}{(e^l - e^{-l})Z_c} \cdot \\ &\begin{bmatrix} e^l e^{-Ml_0} e^{-x} + e^{-l} e^{Ml_0} e^x \\ e^l e^{-(M+1)l_0} e^{-x} + e^{-l} e^{(M+1)l_0} e^x \\ \dots \\ e^l e^{-(N-1)l_0} e^{-x} + e^{-l} e^{(N-1)l_0} e^x \end{bmatrix}; \\ -\frac{d}{dx} I_1 &= AU_1 + BU_2 = AU_1 + \frac{BU_s}{e^l - e^{-l}} \cdot \\ &\begin{bmatrix} e^l e^{-Ml_0} e^{-x} - e^{-l} e^{Ml_0} e^x \\ e^l e^{-(M+1)l_0} e^{-x} - e^{-l} e^{(M+1)l_0} e^x \\ \dots \\ e^l e^{-(N-1)l_0} e^{-x} - e^{-l} e^{(N-1)l_0} e^x \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

#### 2.1.3 段 1 的新多导体传输线模型

将式(5)写成紧凑的矩阵形式, 则有<sup>[14,15]</sup>

$$\frac{d}{dx} X(x) = T_r X(x) + I_f(x). \quad (6)$$

$$\text{式中, } X(x) = \begin{bmatrix} U_1(x) \\ I_1(x) \end{bmatrix}; T_r = \begin{bmatrix} 0 & -A \\ -A & 0 \end{bmatrix}; I_f = \begin{bmatrix} P(x) \\ Q(x) \end{bmatrix}.$$

方程组(6)的解为：

$$X(x) = (x - x_0) X(x_0) + \int_{x_0}^x (x - \xi) \begin{bmatrix} P(\xi) \\ Q(\xi) \end{bmatrix} d\xi; \quad (7)$$

$$(x) = e^{T_r x} = \begin{bmatrix} 11(x) & 12(x) \\ 21(x) & 22(x) \end{bmatrix}.$$

式中,  $(x)$  为状态转移函数。对变压器绕组, 求匝末电压电流分布, 则有:

$$\begin{bmatrix} U_1(l_0) \\ I_1(l_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11(l_0) & 12(l_0) \\ 21(l_0) & 22(l_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(0) \\ I_1(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_e(l_0) \\ Q_e(l_0) \end{bmatrix};$$

$$P_e(l_0) = \int_0^{l_0} (11(l_0 - x)P(x) + 12(l_0 - x)Q(x)) dx;$$

$$Q_e(l_0) = \int_0^{l_0} (21(l_0 - x)P(x) + 22(l_0 - x)Q(x)) dx。$$

则可得

$$\begin{bmatrix} U_1(l_0) \\ I_1(l_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1(l_0) - P_e(l_0) \\ I_1(l_0) - Q_e(l_0) \end{bmatrix} = (l_0) \begin{bmatrix} U(0) \\ I(0) \end{bmatrix}。 (8)$$

因此, 可将段1划分为两部分: 第一部分为不计段2耦合的  $M$  根多导体传输线, 第二部分为段2对段1耦合在传输线末端的集中化, 如图3所示。

因此可先求解出  $U(l_0)$ 、 $I(l_0)$ , 然后将段1对段2的耦合叠加上去, 求得匝末电压与电流。

### 2.1.4 段1的单输入多输出模型

令  $U(0) = U_S, I(0) = I_S, U(l_0) = U_R, I(l_0) = I_R$ , 则在  $x = 0$  和  $x = l_0$  处, 不计段2耦合的 MTL 部分有如下表达式:

$$\begin{aligned} U_S &= a + b; \\ U_R &= e^{-\gamma l_0} a + e^{\gamma l_0} b; \\ I_S &= Y_c(a - b); \\ I_R &= Y_c(e^{-\gamma l_0} a - e^{\gamma l_0} b)。 \end{aligned}$$

式中,  $a$ 、 $b$  分别为前行波、反行波;  $Y_c$ 、 $\gamma$  分别为多导体传输线的特征导纳矩阵、传播系数矩阵;  $U_R$ 、 $I_R$  分别为不计及段2对段1耦合的  $M$  根多传输线的末端电压、电流矩阵。整理得

$$\begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_c \coth \gamma l_0 & -Y_c \operatorname{csch} \gamma l_0 \\ -Y_c \operatorname{csch} \gamma l_0 & Y_c \coth \gamma l_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_S \\ U_R \end{bmatrix} = Y_S \begin{bmatrix} U_S \\ U_R \end{bmatrix}。 (9)$$

式中,  $Y_S$  称为 MTL 多口网络的短路导纳参数矩阵。绕组的边界条件为:

$$\begin{cases} U_S(1) = U_0; \\ U_S(2) = U_R(1); \\ \dots \\ U_S(M) = U_R(M-1)。 \end{cases} \begin{cases} I_S(2) = -I_R(1); \\ \dots \\ I_S(M) = -I_R(M-1)。 \end{cases} (10)$$

应用式(10), 式(9)可化为下列  $(M+1)$  个方程

$$\begin{bmatrix} I_S(1) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ I_R(M) \end{bmatrix} = \hat{Y} \begin{bmatrix} U_S(1) \\ U_S(2) \\ \dots \\ U_S(M) \\ U_R(M) \end{bmatrix} + \hat{Y}_P P_e - \hat{Y}_Q Q_e。 (11)$$

式中,  $\hat{Y}$ 、 $\hat{Y}_P$ 、 $\hat{Y}_Q$  为添加边界条件后经过一系列变换得到的矩阵。令  $I_e = \hat{Y}_P P_e - \hat{Y}_Q Q_e$ , 则式(11)变为

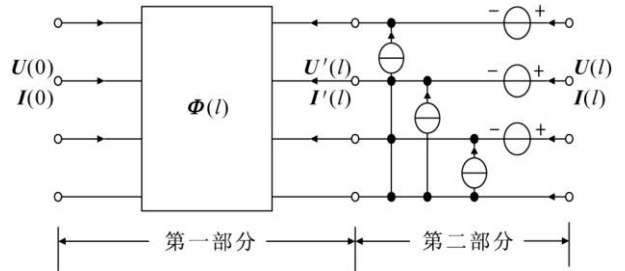


图3 段1的新多导体传输线模型

Fig.3 New MTL model of part one

$$\begin{bmatrix} I_S(1) - I_e(1) \\ -I_e(2) \\ \dots \\ -I_e(M) \\ I_R(M) - I_e(M) \end{bmatrix} = \hat{Y} \begin{bmatrix} U_S(1) \\ U_S(2) \\ \dots \\ U_S(M) \\ U_R(M) \end{bmatrix}。 (12)$$

$$\begin{aligned} \text{令 } T &= \hat{Y}^{-1}, \\ \begin{bmatrix} I_S(1) - I_e(1) \\ -I_e(2) \\ \dots \\ -I_e(M) \\ I_R(M) - I_e(M) \end{bmatrix} &= I_{ec}, \text{ 则式(12)变为} \\ \begin{bmatrix} U_S(1) \\ U_S(2) \\ \dots \\ U_S(M) \\ U_R(M) \end{bmatrix} &= T \begin{bmatrix} I_{ec}(1) \\ I_{ec}(2) \\ \dots \\ I_{ec}(M) \\ I_{ec}(M+1) \end{bmatrix}。 \end{aligned} (13)$$

对式(13)第一项和最后一项展开, 并令  $a = T_{1,2} I_{ec}(2) + \dots + T_{1,M} I_{ec}(M)$ ,  $b = T_{M+1,2} I_{ec}(2) + \dots + T_{M+1,M} I_{ec}(M)$ , 则可得:

$$I_{ec}(1) = \frac{T_{1,M+1}(U_R(M) - b) - T_{M+1,M+1}U_S(1) + T_{M+1,M+1}a}{T_{1,M+1}T_{M+1,1} - T_{1,1}T_{M+1,M+1}};$$

$$I_{ec}(M+1) = \frac{T_{1,1}(U_R(M) - b) - T_{M+1,1}U_S(1) + T_{M+1,1}a}{T_{1,1}T_{M+1,M+1} - T_{M+1,1}T_{1,M+1}}。$$

因此匝末的电压为

$$U_S(k) = U_R(k-1) = [T_{k,1}, T_{k,2}, \dots, T_{k,M}, T_{k,M+1}] I_{ec}。 (15)$$

### 2.2 综合模型

考虑到线圈之间紧密绕制, 具有一定的屏蔽作用<sup>[12]</sup>, 因此可采用简化模型结合等效阻抗模型<sup>[10]</sup>计算绕组的匝末电压分布。

综合模型: 对靠近变压器进线端的部分线匝采用多导体传输线模型进行详细描述, 中间部分采用单导体传输线建模, 其它线匝用等效阻抗代替, 如图4所示。设变压器绕组共  $N$  匝, 靠近进线端的第一部分设为  $M_1$  匝, 第二部分为  $M_2$  匝, 等效阻抗部分为  $M_3 = N - M_1 - M_2$  匝, 且绕组末端接地。将第  $i$  饼后所有线饼均等效成单根传输线,  $Z_L = 0$ , 则其等效输入阻抗为  $Z_n = Z_c \tanh l_e$ ,  $l_e$  为等效部分线饼中

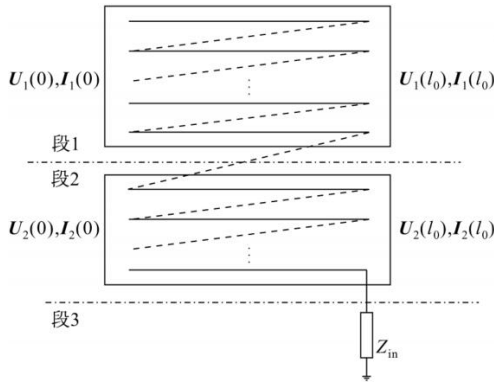


图4 综合模型

Fig. 4 Synthesized model

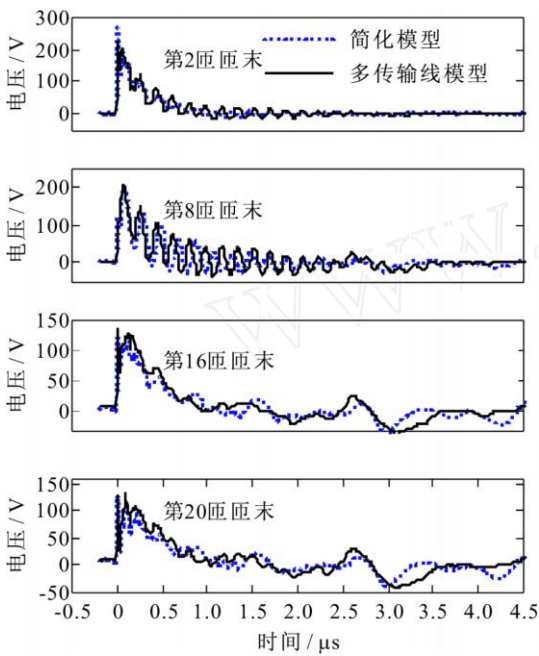


图5 多传输线模型与简化模型 - 匝末电位比较

Fig. 5 Comparison of terminal voltage distribution

between MTL model and simplified model

所有匝的长度之和。

则式(5)变为:

$$-\frac{d}{dx} U_1 = AI_1 + BI_2 = AI_1 + \frac{B}{Z_c} \cdot \begin{bmatrix} ae^{-M_1 l_0} e^{-x} - be^{M_1 l_0} e^x \\ ae^{-(M_1+1)l_0} e^{-x} - be^{(M_1+1)l_0} e^x \\ \dots \\ ae^{-(M_1+M_2-1)l_0} e^{-x} - be^{(M_1+M_2-1)l_0} e^x \end{bmatrix};$$

$$-\frac{d}{dx} I_1 = AU_1 + BU_2 = AU_1 + B \cdot \begin{bmatrix} ae^{-M_1 l_0} e^{-x} + be^{M_1 l_0} e^x \\ ae^{-(M_1+1)l_0} e^{-x} + be^{(M_1+1)l_0} e^x \\ \dots \\ ae^{-(M_1+M_2-1)l_0} e^{-x} + be^{(M_1+M_2-1)l_0} e^x \end{bmatrix}.$$

后续的处理过程与简化模型相同。

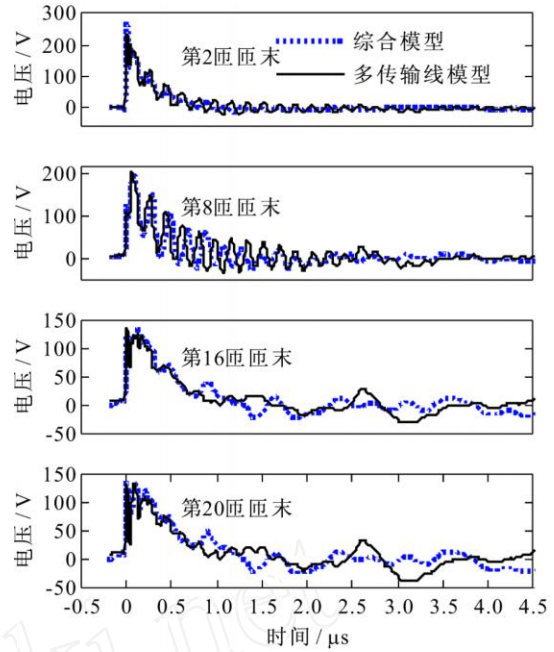


图6 综合模型与多传输线模型 - 匝末电位比较

Fig. 6 Comparison of terminal voltage distribution

between synthesized model and MTL model

表1 变压器绕组的基本参数

Tab. 1 Main parameters of the winding

参数名	参数值	参数名	参数值
每饼匝数	10	匝绝缘相对介电常数	2.7
导体宽度/mm	6.95	导体电导率/( $\mu s \cdot m^{-1}$ )	0.3
导体高度/mm	11.2	匝间电容 $C_k$ /( $pF \cdot m^{-1}$ )	120
平均匝长/m	1.4828	饼间电容 $C_s$ /( $pF \cdot m^{-1}$ )	10
匝绝缘厚度/mm	3.00	匝对铁心电容 $C_g$ /( $pF \cdot m^{-1}$ )	15

表2 模型耗时比较

Tab. 2 Comparison of computation time of the three models

模型	MTL 模型	简化模型	综合模型
CPU 时间/s	2291.4	1572.9	1433.1

### 3 计算结果

#### 3.1 模型间比较

简化模型:段1为8饼,段2为10饼;综合模型:段1为8饼,段2为5饼,段3为5饼。变压器绕组基本参数见表1。对于第2、8、16、20匝匝末电位分布,多传输线模型与简化模型比较见图5,综合模型与多传输线模型比较见图6。模型耗时比较见表2。匝末电位峰值比较见表3。

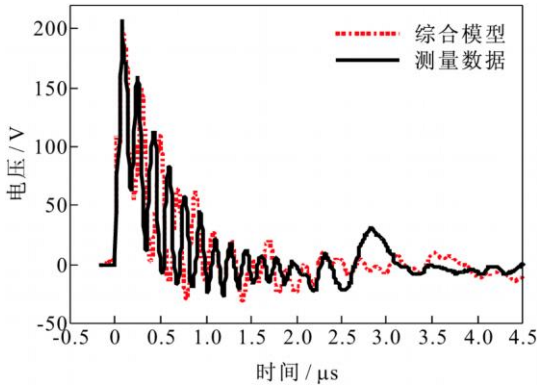


图7 综合模型 - 第9匝匝末电位分布

Fig.7 Voltage distribution of turn 9 of the synthesized model

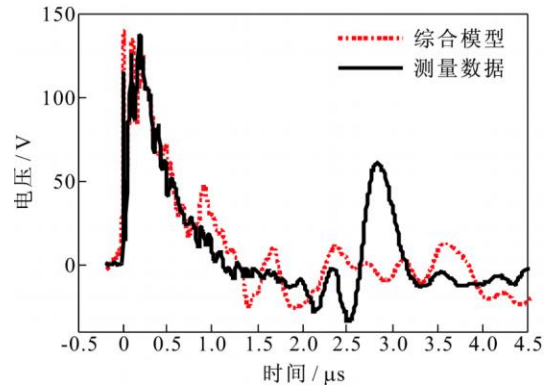


图9 综合模型 - 第20匝匝末电位分布

Fig.9 Voltage distribution of turn 20 of the synthesized model

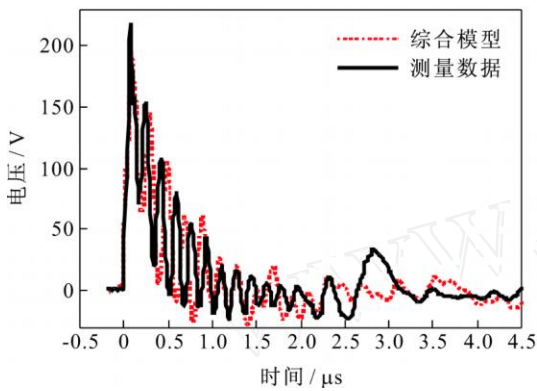


图8 综合模型 - 第10匝匝末电位分布

Fig.8 Voltage distribution of turn 10 of the synthesized model

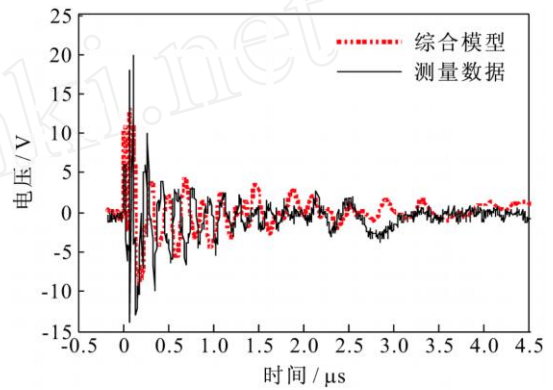


图10 综合模型 - 第9,10匝匝间电压分布

Fig.10 Inter-turn voltage distribution of turn 9,10 of the synthesized model

表3 匝末电位峰值比较

Tab.3 Comparison of inter-turn voltage distribution

匝数	匝末电位峰值/V		
	MTL	简化模型	综合模型
2	230.3	270.2	271.7
8	205.6	191.6	200.3
16	135.5	119.8	139.1
20	133.5	130.2	139.7

根据图5、6,简化模型及综合模型的波形均与多导体传输线模型的波形吻合较好;在靠近进线端的部分线匝,简化模型与多导体传输线模型的波形基本符合,而远离进线端的线匝的波形则存在一些偏移。由表2可见,简化模型及综合模型的计算时间与多导体传输线模型相比,大幅减少。由表3可见,简化模型及综合模型的匝末电压峰值略高于原多导体传输线模型,其原因是远离进线端采用单导体传输线建模,导致耦合计算存在一些误差。

### 3.2 与测量结果比较

比较综合模型的计算结果与试验测量结果,其比较结果见图7~10。结果表明,综合模型的计算结果与测量结果相符较好,采用该模型对绕组中的暂态过程进行计算能有效地减少计算时间,可用于VFTO作用下大型电力变压器绕组的暂态过程的分析与研究。

## 4 结论

a) 将绕组划分为数段建模,提出了变压器绕组的简化模型:将整个绕组分为两段,段1采用多导体传输线模型以匝为单元建模;段2用单根传输线建模。为了解决两段间的耦合,本文根据段2的单导体传输线模型,对耦合进行了推导,并建立了段1的单输入多输出端口模型,用该端口模型计算匝末电压电流。

b) 在简化模型的基础上,建立了变压器绕组的综合模型:对靠近变压器进线端的部分线匝采用多导体传输线模型进行详细描述,中间部分采用单导

体传输线建模,其它线匝用等效阻抗代替。该综合模型在满足工程计算精度的基础上能进一步减少计算量。

结果表明,本文提出的模型能有效地减少计算时间,可用于 VFTO 作用下大型电力变压器绕组的暂态过程的分析与研究。

## 参 考 文 献

- [1] Boggs S A, Chu F Y, Fujimoto N, et al. Disconnect switch induced transient and trapped charge in gas-insulated substations [J]. IEEE Trans on Power App Syst, 1982, 101(10): 3593-3602.
- [2] CIGRE WG 33/19-09. Very fast transient phenomena associated with gas insulated substations [R]. Paris, France: CIGRE, 1988.
- [3] Shigeto Fujita, Yoshikazu Shibuya, Masaru Ishii. Influence of VFT on shell-type transformer[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(1): 217-222.
- [4] Gharehpetian GB, Mohseni H, Moller K. Hybrid modeling of inhomogeneous transformer windings for very fast transient overvoltage studies[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(1): 157-163.
- [5] Popov M, van der Sluis L, Smeets R P P, et al. Analysis of very fast transients in layer-type transformer windings [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(1): 238-247.
- [6] Peng Ying, Ruan Jiangjun. Investigation of very fast transient overvoltage distribution in taper winding of tesla transformer [J]. IEEE Trans on Magnetics, 2006, 42(3): 434-441.
- [7] 陈水明, 许菁, 何金良, 等. 特快速暂态过电压及其对主变的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(4): 573-576. CHEN Shui-ming, XU Jing, HE Jin-liang, et al. Very fast transient over-voltages and their effects on power transformers [J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech Edition), 2005, 45(4): 573-576.
- [8] 陈伟根, 胡金星, 孙才新, 等. 基于静态电磁场的变压器线圈中特快速暂态仿真建模[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 56-61. CHEN Wei-gen, HU Jin-xing, SUN Cai-xin, et al. Modeling of transformer winding for very fast transient voltage simulation based on quasi-stationary electromagnetic field [J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 56-61.
- [9] 何青, 王赞基. 变压器线圈暂态的频域分析[J]. 清华大学学报(自然科学版). 1995, 35(1): 39-45. HE Qing, WANG Zan-ji. Frequency domain analysis of the transient in transformer winding [J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech Edition), 1995, 35(1): 39-45.
- [10] Liang Guishu, Sun Haifeng, Zhang Xile, et al. Modeling of transformer windings under very fast transient overvoltages [J]. IEEE Trans on EMC, 2006, 48(4): 1201-1206.
- [11] 张喜乐, 梁贵书. VFTO 作用下变压器绕组的过电压计算[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 4-6. ZHANG Xi-le, LIANG Gui-shu. Computation of very fast transient overvoltages in transformer windings [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 4-6.
- [12] 王赞基. 变压器线圈特快速暂态建模[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(5): 299-305. WANG Zan-ji. Modeling of the very fast transients in transformer windings [J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(5): 299-305.
- [13] Shibuya Y, Fujita S, Hosokawa N. Analysis of very fast transient overvoltage in transformer winding [J]. IEE Proc—Gener Transm Distrib, 1997, 144(5): 461-468.
- [14] Paul C. Analysis of multi-conductor transmission lines [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 1994.
- [15] Paul C R. A brief history of work in transmission lines for EMC applications [J]. IEEE Trans on EMC, 2007, 29(2): 237-252.



LIANG Gui-shu  
Ph.D., Professor

### 梁贵书

1961 一,男,博士,教授  
主要研究方向为电网络理论及其应用,电力系统电磁兼容和电力信息分析与处理等

电话:(0312)7522754

E-mail:gshliang@263.net

### 朱晓燕

1979 一,女,硕士生  
研究方向为电网络理论及其在电力系统中的应用

电话:(0312)7522863

E-mail:rikyno@163.com

### 董华英

1959 一,女,副教授  
现从事电网络理论及其应用、信号分析与处理等的研究

收稿日期 2008-03-07 修回日期 2008-05-12 编辑 严梦