

用于特快速暂态仿真的大型电力变压器 线圈频域分段建模

杨钰, 王赞基

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

Piecewise Frequency-domain Modeling of Large Power Transformer Windings for Very Fast Transient Overvoltage Simulations

YANG Yu, WANG Zan-ji

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: A piecewise modeling method is proposed in this paper, to meet the need of very fast transient overvoltage (VFTO) simulations of large EHV and UHV power transformers and to overcome the challenges that it is difficult to apply the multi-transmission line (MTL) model to the whole winding and to determine the frequency-dependent parameters in a model within about 10 MHz frequency. A new lumped RLC circuit model was applied in the frequency range below 4 MHz, and the lossless MTL model was used in the range above that frequency. As a result, the complexity of calculation was greatly reduced and hence the proposed model can be used to model the winding with a large number of turns. In the model, the frequency-dependent losses and inductances were determined in the new RLC circuit and MTL model respectively. Besides, the concerned frequency range up to 10 MHz was divided into three sections with joint frequencies at 100 kHz and 4 MHz, in which the sampling rates were 1, 10 and 50 kHz respectively so that not only the accuracy of the solutions at the low-frequency section can be improved, but also the computational time can be largely saved at the high-frequency section. The theoretical analysis and simulations showed that the proposed method is valid for the VFTO simulations of large power transformers.

KEY WORDS: very fast transient overvoltage (VFTO); power transformer; simulation modeling; lumped circuit; multi-transmission line model

摘要: 针对超高压和特高压电力变压器特快速暂态仿真的需

要以及以线匝为单元的多传输线模型难以用于完整绕组的建模、在单一模型中难以在近 10 MHz 频率范围内确定频率依赖参数的问题, 提出了一种频域分段建模的方法。在低于 4 MHz 频率范围内采用新型的集总参数 RLC 电路模型, 在高于 4 MHz 频率范围内采用无损多传输线 (multi-transmission line, MTL) 电路模型进行建模, 在保证求解准确度的基础上, 比单纯采用 MTL 模型有效降低了求解的复杂度, 因而可用于具有大量线匝的绕组的建模。在分段模型中, 频率依赖的损耗参数和电感参数可以分别考虑, 避免了在单一模型中确定这些参数的困难; 同时, 在所关心的 10 MHz 以下频率范围内以 100 kHz, 4 MHz 为 2 个分界点, 从低频到高频分别采用 1, 10 和 50 kHz 3 种分辨率求解频域方程, 既提高了低频段求解精度, 又减少了高频段计算时间。理论分析和实例仿真表明该方法适用于大型电力变压器特快速暂态仿真。

关键词: 特快速暂态过电压; 电力变压器; 仿真建模; 集总参数电路; 多传输线模型

0 引言

气体绝缘变电站(gas insulated substation, GIS) 由于开关操作或短路故障产生的特快速暂态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)中含有丰富的频率成分, 其能量主要集中在数十 kHz 至数十 MHz 频率范围之内^[1], 甚至可能更高^[2], 持续时间在 100 μ s 以内^[3]。考虑到 VFTO 经过 GIS 各元件传输到变压器线端, 又经过高压引线电感和套管对地电容对高频信号的阻挡和旁路作用, 能够侵入变压器线圈并可能对线圈绝缘结构造成危害的各分量的最高频率应在 10 MHz 以内^[4]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50577034)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50577034).

分布参数多传输线(multi- transmission line, MTL)模型已被广泛地用于分析变压器线圈中 VFTO 分布的建模^[5-11]。由于大型变压器线圈匝长度(或线圈直径)远大于邻近匝之间的距离(或线圈径向厚度),因此分布参数多传输线模型还是有较宽的频率范围适用性;但是将 MTL 模型应用于实际电力变压器建模还存在一些困难。

首先,由于变压器线圈各匝在换位处与邻近匝或邻近导体的电容耦合不连续,尤其是对于纠结式线圈和内屏蔽式线圈,几何上相邻的 2 个匝并不是电气上连续的 2 个匝。对于这种非均匀的线圈,不能将若干匝或若干线饼表示为 1 根传输线,只能以匝为单位进行建模;若要对整个绕组甚至多个绕组建模,则传输线方程的维数将达到 1000 以上甚至数千;且电感矩阵为满阵,不能采用稀疏矩阵技术,以至于现有数值计算方法和平常使用的台式计算机无法给出合理解答。

其次,在 10MHz 的频率范围内分析变压器线圈内的电磁暂态,需要考虑参数的频率依赖特性,特别是随频率变化的电阻(电导)和电感对 VFTO 的影响。传输线模型在工频和低频范围内都有计算参数的方法,但是在单一模型中计入这些参数在 10MHz 宽频范围内频率依赖特性的方法尚未见报道。

此外,在所关注的近 10MHz 的 VFTO 响应频率范围内,从数 kHz 至数百 kHz 的低频段内,变压器线圈的自然频率有比较密集分布;而在高频段,由于损耗电阻的衰减作用,网络函数相对比较光滑。因此在频域方程求解过程中,在低频段需要有足够高的频率分辨率,而在高频段拟采用较低的频率分辨率以减少计算代价。

为解决上述问题,本文提出的解决思路如下:

1) 在频域中采用集总参数 RLC 电路和 MTL 电路分段建模的方法。在低频段,利用 RLC 电路只需要求解复数代数方程的特点,采用 RLC 电路建模,避免了求解 MTL 的高维的带损耗项的 2 阶微分方程,从而可以提高求解电路的规模;而在高频段,根据高频分量只在起始一小段时间对响应波形产生影响,随后很快衰减的特点,采用无损的 MTL 电路模型,以降低计算复杂度,然后在各次特征谐波上施加衰减因子,使高频分量很快衰减。2 种模型均以匝为单元来建立。2) 在低频段,在 RLC 电路的节点导纳矩阵中,介质损耗可以考虑在内并作近似处理;在高频段,虽然采用无损传输线,但

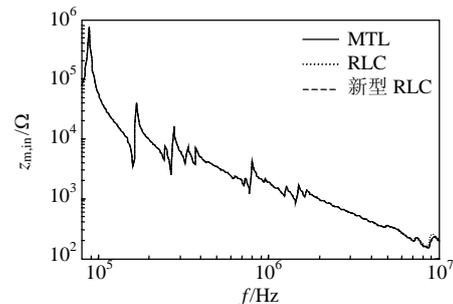
是损耗对高频信号的衰减作用可以通过将衰减因子的经验公式作用在各次谐波分量上来加以考虑。

3) 在 RLC 电路中,计算电感时考虑了铁心的存在及其对漏磁场的影响;在高频段,假设电磁波不进入良导体,采用 $L = C^{-1}/v_s^2$ 来计算电感,其中 $v_s^2 = c/\sqrt{\epsilon_r}$, ϵ_r 为等值介电常数, c 为光速。这样就实现了分段考虑电感参数随频率变化的问题。4) 对所关注的计算频域进行分段,不同频段内采用不同的频率分辨率,以兼顾求解精度和计算代价 2 方面的要求。

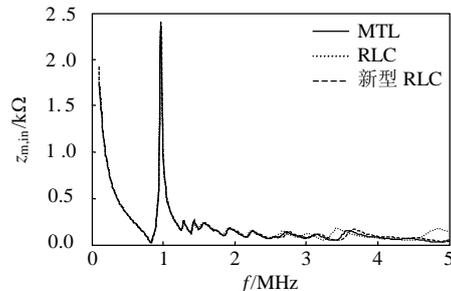
1 频域分段等效电路模型

集总参数 RLC 电路已经广泛地用于变压器雷电冲击电压分布的计算^[12-14]。由于雷电波的波前时间及截断陡度为 μs 级,其等效频率仅数百 kHz,变压器线圈可采用 1 对线饼或若干个线饼为 1 个单元进行剖分。当将集总参数 RLC 电路应用于变压器 VFTO 计算的建模时,如前所述,必须以匝为单元进行剖分。

文献[15]认为,集总参数 RLC 电路的适用频率在 1 MHz 以下。事实上,该电路的适用频率既与线圈剖分单元的大小有关,又与线圈平均直径密切相关。图 1 为 2 个实际算例,分别用以匝为单元的集总参数 RLC 电路模型计算 1 个实验线圈和 1 个 220 kV 电力变压器线圈的入端阻抗函数 $z_{m,in}$,其中



(a) MTL 电路与 RLC 电路模型计算实验线圈的入端阻抗



(b) MTL 电路与 RLC 电路模型计算超高压线圈的入端阻抗

图 1 MTL 和 RLC 2 种模型计算线圈电压传递函数的比较
Fig. 1 Comparison between MTL circuit and RLC circuit for calculation of voltage transfer function

实验线圈的平均直径是 523 mm, 220 kV 变压器线圈的平均直径是 1 825 mm。由于分布参数 MTL 模型有更宽的频率适用范围, 可以它作为比较的依据。从图 1 中可以看出, 对于实验线圈, RLC 电路模型(图中标为 RLC)在 10 MHz 以内与 MTL 都是比较吻合的; 而对于 220 kV 线圈, RLC 电路只在 3 MHz 以内与 MTL 比较吻合。上述比较中, MTL 电路参数与 RLC 电路参数是按照相同方法计算的。

本文作者推导了一种新型的集总参数等值电路^[16], 其电路单元如图 2 所示。图中: s 为拉普拉斯算子; L 为电感矩阵, 其对角线元素是每个线匝的自感, 非对角线元素是线匝之间的互感, 所有线匝之间都有互感, 因此它是满阵; C 类似于 3 对角矩阵, 其对角线元素是每匝对地电容与该匝与邻近线匝间电容的总和, 非对角线元素是相邻 2 匝间电容的相反数(加负号); G 为匝间电导, 其非零元素分布与 C 类似, 并近似与匝间电容成正比, 即 $G=(\omega \tan \delta)C$ 。对大型变压器线圈(指超高压和特高压线圈, 目前所见最大平均直径可达 2.6 m), 该电路频率适用范围可提高至 4 MHz 以上(图 1 中标为新型 RLC)。以下称其为新型 RLC 电路。

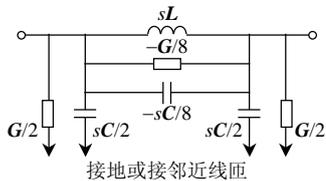


图 2 新型集总 RLC 单元等值电路

Fig. 2 New equivalent RLC lumped circuit unit

基于上述分析, 本文提出以 4 MHz 频率为界, 低于 4 MHz 频率范围内采用以线匝为单元的新型 RLC 电路模型对变压器线圈进行建模, 在 4 MHz 以上频率范围内采用以线匝为单元的简化 MTL 模型, 即无损 MTL 模型。原因如下: 1) 经验表明, 变压器线圈的损耗参数对自然频率分布的影响很小, 主要对高频分量起到衰减作用^[12]; 2) 4 MHz 以上的频率分量主要是在起始很短的时间对时域响应波形有影响, 这段时间内衰减作用还不明显; 3) 无损传输线的求解复杂度远低于有损传输线, 从而可求解更大规模的无损传输线方程。由于时域解答可表示为特征谐波的线性组合, 可以将随频率变化的衰减因子经验公式直接作用在各次谐波上。对于大型电力变压器, 暂态响应中的各次谐波衰减系数与频率的关系可近似表示为 $\delta=(a\omega+b)\omega$, 其中系数 a 和 b 可通过测量大型电力变压器线圈中各次

频率正弦信号传输的衰减过程并拟合获得^[12,14]。例如, 对于大型电力变压器, 典型参数为: $a=6 \times 10^{-8}$, $b=0.02$ 。

2 频域分段均匀采样

VFTO 的观察时间小于 100 μ s, 若按 100 μ s 计, 频率分辨率为 10 kHz; 然而, 根据大量的测量或仿真可知, 大型电力变压器线圈最小的固有频率通常在数 kHz 至数十 kHz 范围, 且其他固有频率在附近可能有比较密集的分布。如果在频域求解中取分辨率为 10 kHz, 必然会遗漏一些固有频率或造成固有频率偏移。因此, 在低频段应选择较高的频率分辨率, 比如 1 kHz; 但是, 如果最高频率 f_h 设为 10 MHz, 且全频段均采用 1 kHz 的分辨率, 则采样点数目高达 10 000 个, 计算代价很高。实际上, 在高频段, 由于 VFTO 的能量较小, 且线圈中高频损耗较大, 高频信号衰减较快, 节点电压的频响曲线在高频段比较平缓, 因此没有必要采取如此之高的频率分辨率。

根据上述分析, 同时考虑到大型变压器线圈自然频率的分布规律, 本文考虑采取 3 个分段的频域分辨率, 即以 100 kHz 和 4 MHz 为 2 个分界点, 低于 100 kHz 的频率范围采用 1 kHz 的分辨率, 100 kHz~4 MHz 区间采用 10 kHz 的分辨率, 4 MHz 以上的频率范围采用 50 kHz 的分辨率。为方便起见, 本文将 3 个频段分别称为低频段、中频段和高频段。

4 MHz 以下频率范围采用集总参数电路模型, 容易求解; 4 MHz 以上频率范围采用无损 MTL 电路模型, 且电感、电容矩阵为常数, 计算复杂度降低, 且采用较低的频率分辨率, 可有效减小计算量。

3 时域波形的合成

无论是采用新型的 RLC 电路模型还是采用 MTL 模型, 都可以先求得每个线匝首端对于入波节点的电压转移函数 $H(s)$, 然后根据输入的 VFTO 波形的频域变换 $X(s)$, 获得节点电压的频域响应 $F(s)=H(s)X(s)$, 最后通过频域反变换得到时域响应。

由频域响应获得时域响应可使用 Fourier 展开的拉普拉斯数值反变换^[17-18]。

有 2 点需要特别指出: 1) 由于采用频域分段算法, 对 3 个频段获得的频域响应在进行反变换之前应该在其他频段进行补零才能得到正确的时域解答。2) 由于 3 个频段中分辨率不同, 得到的时域波形长度也不一样。4 MHz 以上频率范围采样频率间隔为 50 kHz, 因此其时域响应只能反映在 20 μ s

以内， $20\ \mu\text{s}$ 之后的时域响应中将没有 $4\ \text{MHz}$ 以上的频率信号；但是这种情况并不会影响时域解的准确性。当 $f=4\ \text{MHz}$ ， $t=20\ \mu\text{s}$ 时，按照前文给出的衰减因子经验公式，有 $e^{-\delta t} = e^{-20.8} \approx 9.26 \times 10^{-10}$ 。可见，时间大于 $20\ \mu\text{s}$ 后， $4\ \text{MHz}$ 以上频率分量可以忽略。

4 仿真实例

1) 首先，用本文提出的电路建模和分析方法对 1 台 $220\ \text{kV}$ 有载调压变压器的 VFTO 分布进行计算。该变压器高压绕组中部进线，上下半柱对称，为插花纠结-纠结-连续结构，共有 88 饼，每饼 10~12 匝。假设输入为一 $2\ \text{MHz}$ 的单周期正弦波，计算各线匝端点的电压。

以高压绕组第 2 饼首端节点为例，首先计算出 3 个频段内节点电压传递函数的频域特性 H_L ， H_M 及 H_H ，如图 3 所示；然后计算输入 $2\ \text{MHz}$ 单周期正弦波电压时的节点电压频域响应，同样按低、中、高 3 个频段记为 F_L 、 F_M 及 F_H ，如图 4 所示；用不同频段内的响应计算得到的时域波形 f_L ， f_M 及 f_H ，如图 5 所示；最后，合成的节点电压波形如图 6 所示。

从图 3，4 可以看到，低、中、高频段的 3 个频谱能比较好地衔接起来，这说明新型 RLC 电路在 $4\ \text{MHz}$ 以内有较好的适用性，与 MTL 模型能够

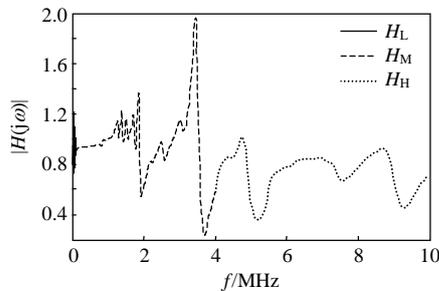


图 3 合成的第 2 饼首端电压传递函数幅频特性
Fig. 3 Amplitude-frequency characteristic of the composed voltage transfer function at the 1st node of the 2nd disk

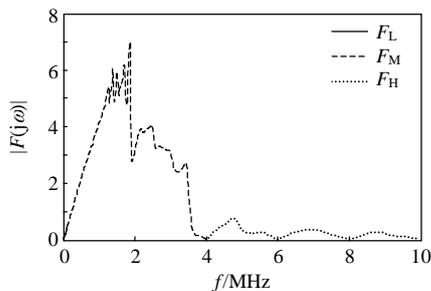


图 4 第 2 饼首端电压幅频特性
Fig. 4 Amplitude-frequency characteristic of the voltage at the 1st node of the 2nd disk

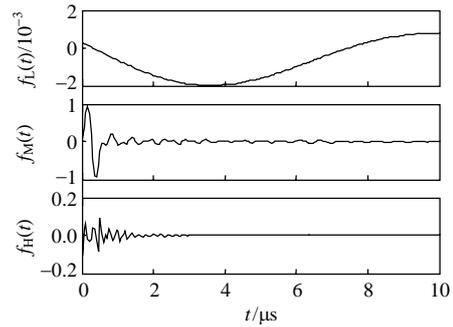


图 5 3 个频段内电压信号的时域波形
Fig. 5 Voltage waveforms of 3 frequency sections

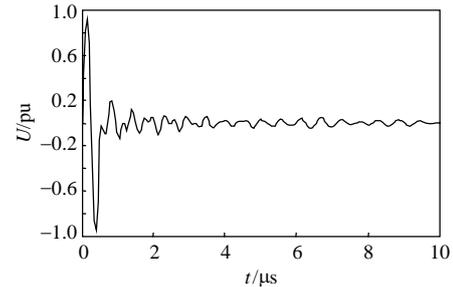


图 6 合成的第 2 饼首端电压波形
Fig. 6 Composed voltage waveform at the 1st node of the 2nd disk

保持一致。从图 5 可以看出，在该输入信号的激励下，中频信号在节点电压响应中所占比例较大，而低频信号分量较小，高频信号衰减得很快。

随后，本文又采用了由 4 个正弦波合成的电压作为输入计算该变压器线圈中的电压分布。4 个正弦分量的幅值 A_k 、频率 f_k 及衰减因子 α_k 如表 1 所示，将该合成波形记为输入电压 U_1 。

表 1 组成 U_1 的 4 个谐波分量的幅值、频率及衰减因子
Tab. 1 Magnitudes, frequencies and damping factors of 4 harmonic components composing U_1

k	A_k/pu	f_k/MHz	$\alpha_k/10^4$
1	0.50	1.415	5.1
2	0.30	3.642	9.6
3	0.15	5.971	5.3
4	0.05	8.321	3.1

图 7 为高压绕组第 2 饼首端电压计算波形，其中实线是只采用 MTL 模型计算的结果，虚线是本

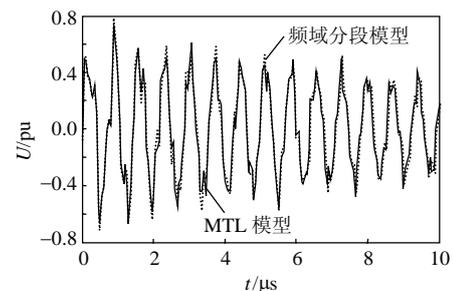


图 7 频域分段算法与全频段 MTL 算法的比较
Fig. 7 Comparison between the MTL model and the piecewise model

文提出的频域分段模型计算结果。由图7可见,2种电路模型计算结果非常接近。由于本例中只计算高压绕组88个线饼,不足1000匝,所以还可以采用MTL模型进行计算;而频域分段电路不仅比MTL电路大量节省计算时间,还可以有效地提高计算电路的规模。

采用上述电路建模方法,分析一1000kV特高压变压器的高压线圈,分析过程类似,可得相似结论,即4MHz频率分界点对特高压变压器而言是适用的;同时,频域分段算法的高效性也得以验证。这也证明了本文的建模分析方法在超高压和特高压变压器上的适用性。

2)其次,本文在一个实验线圈上做了低压陡波冲击的测量实验,并与本文方法的计算结果进行比较。该线圈为内屏-纠结-连续结构,共50个线饼,每饼6~8匝。输入电压波形如图8所示,采用矩阵束法对该波形进行拟合^[19],提取出1个谐波分量及2个指数分量,其幅值、频率及衰减因子如表2所示,拟合的波形即图8中的光滑曲线,该合成波形记为输入电压 U_2 。

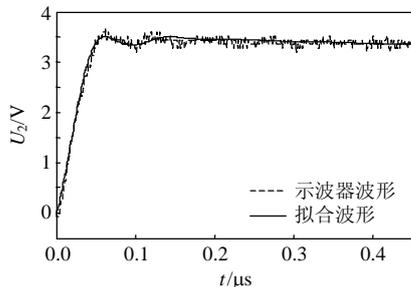


图8 输入电压 U_2 波形

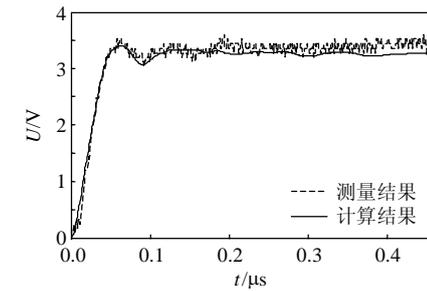
Fig. 8 Waveform of input voltage U_2

表2 U_2 的3个谐波分量的幅值、频率及衰减因子
Tab. 2 Magnitudes, frequencies and damping factors of 3 harmonic components composing U_2

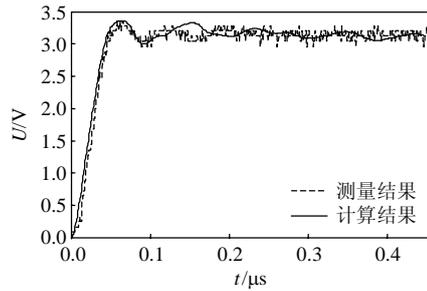
k	$A_k/\mu\text{V}$	f_k/MHz	$\alpha_k/10^5$
1	$-0.31 \pm 0.48 j$	11.14	240.0
2	3.54	0.00	1.2
3	-2.92	0.00	390.0

采用拟合的输入电压波形并用本文提出的频域分段算法分别计算了线圈各匝上的电压分布。图9为第3饼和第5饼首端电压波形的实测与计算结果。可以看出,两者吻合得较好。

3)最后,利用文献[20]中给出的一台壳式变压器的结构数据和陡波冲击实测结果来验证本文模型的有效性。图10为第100,200,400匝处的电压波形比较,虚线为本文计算结果,实线为实测结果。可以看出,尽管文献中所给的结构数据不是非

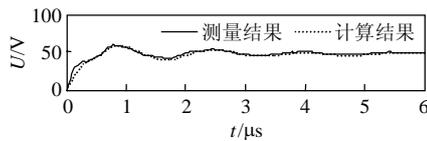


(a) 第3饼

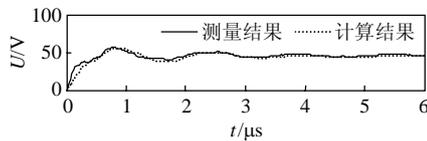


(b) 第5饼

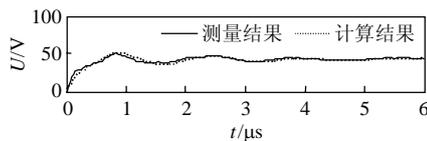
图9 线圈第3饼和第5饼首端电压波形
Fig. 9 Voltage waveforms at the 1st nodes of the 3rd and 5th disks respectively



(a) 100匝



(b) 200匝



(c) 400匝

图10 本文模型计算结果与文献[20]实测结果的比较
Fig. 10 Comparisons between computed voltages and measured ones in reference [20]

常详尽(如铁心直径等),但是计算结果与实测结果在谐振频率和振荡幅值上还是比较吻合的。

5 结论

本文提出了一种频域分段建模的方法。理论分析与仿真结果表明,该算法在保证计算准确度的基础上,有效地提高了可建模的线圈规模,同时减少了计算的复杂度。频域分段模型和分段均匀采样算法具有以下优点:

1) 决定变压器线圈中VFTO响应的主要频率

成分是由集总参数电路来计算的。在以线匝为单元的电路参数完全相同的情况下, 在频域中求解节点电压代数方程要比求解几乎相同维数的 2 阶微分方程简单得多, 从而可以提高待求解电路的规模。

2) 在高频段由分布参数电路计算得到的响应只是对初始一小段时间的电压波形有所贡献, 因此可以将 MTL 电路简化为无损的, 降低了计算复杂度, 而且由于时域解答表示为特征频率分量的叠加, 避免了迭代误差, 还可以直接施加随频率变化的衰减因子。

3) 在分段模型中, 随频率变化的电阻(电导)参数和电感参数可以分频段考虑, 解决了在单一模型中确定频率依赖参数的困难。

4) 在频域中采用分段均匀采样的办法, 提高了低频段的频率分辨率, 从而提高低频段计算准确度, 而低频段计算准确度对整体 VFTO 的响应具有决定作用。在高频段采用较低的频率分辨率进行计算, 在保证计算准确度的同时, 节省了计算时间。

参考文献

- [1] Povh D, Schmitt H, Völcker O, et al. Modelling and analysis guidelines for very fast transients[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(4): 2028-2030.
- [2] Mohana R M, Joy T M, Singh B P. Frequency characteristics of very fast transient currents in a 245 kV GIS[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2005, 20(4): 2450-2457.
- [3] Meppelink J, Diederich K, Feser K, et al. Very fast transients in GIS[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4(1): 223-233.
- [4] Yang Yu, Wang Zanji, Shao Chong. A circuit model in a wide frequency range for power transformer and analysis of its characteristics[C]. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC'2009), Wuhan, China, 2009.
- [5] Popov M, Sluis L, Paap G, et al. Computation of very fast transient overvoltages in transformer windings[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(4): 1268-1274.
- [6] Shibuya Y, Fujita S, Tsmaki E. Analysis of very fast transient in transformers[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(5): 377-383.
- [7] 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): 299-305.
Wang Zanji. Modeling for simulating very fast transient in transformer windings[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(5): 299-305(in Chinese).
- [8] Hosseini S M, Vakilian M, Gharehpetian G B. Computation of transformer detailed models for fast and very fast transient studies[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2008, 23(2): 733-741.
- [9] 彭迎, 阮江军, 张宇, 等. 脉冲变压器特快速暂态电压分布计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 141-144.
Peng Ying, Ruan Jiangjun, Zhang Yu, et al. Calculation of very fast transient voltage distribution in pulse transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 141-144(in Chinese).
- [10] 彭迎, 阮江军, 李名加. 锥形绕组特快速暂态过电压分布研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 6-14.
Peng Ying, Ruan Jiangjun, Li Mingjia. Investigation of very fast transient over-voltage distribution in taper winding[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 6-14(in Chinese).
- [11] 梁贵书, 张喜乐, 王晓晖, 等. 特快速暂态过电压下变压器绕组高频电路模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 144-148.
Liang Guishu, Zhang Xile, Wang Xiaohui, et al. Research on high-frequency circuit model of transformer windings in VFTO[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 144-148(in Chinese).
- [12] Fergestad P I, Henriksen T. Transient oscillations in multi-winding transformers[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1974, 93(2): 500-509.
- [13] Miki A, Hosoya T, Okuyama K. A calculation method for impulse voltage distribution and transferred voltage in transformer windings [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(3): 930-938.
- [14] 王赞基. 多绕组变压器波过程计算[D]. 北京: 清华大学, 1985.
Wang Zanji. Calculations of impulse voltage distribution in multi-winding transformers[D]. Beijing: Tsinghua University, 1985 (in Chinese).
- [15] Hosseini S M H, Vakilian M, Gharehpetian G B. Comparison of transformer detailed models for fast and very fast transient studies[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2008, 23(2): 733-741.
- [16] 杨钰. 用于特快速暂态仿真的大型电力变压器线圈的仿真研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
Yang Yu. Study on the modeling of large power transformer windings for very fast transient simulations[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009(in Chinese).
- [17] Crump K S. Numerical inversion of Laplace transforms using a Fourier series approximation[J]. Journal of the Association for Computing Machinery, 1976, 23(1): 89-96.
- [18] Amore L D, Laccetti G, Murli A. An implementation of a Fourier series method for the numerical inversion of the Laplace transform [J]. ACM Trans. on Mathematical Software, 1999, 25(3): 279-305.
- [19] 王宇静, 于继来. 电力系统振荡模态的矩阵束辨识法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 12-17.
Wang Yujing, Yu Jilai. Matrix pencil method of oscillation modes identification in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 12-17(in Chinese).
- [20] Popov M, Sluis van der 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.



杨钰

收稿日期: 2009-07-23。

作者简介:

杨钰(1982—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统快速暂态建模与仿真, yangyu04@mails.tsinghua.edu.cn;

王赞基(1946—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电路与系统的建模与仿真、电磁暂态、超导电工等, wzj-dea@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 马晓华)