

基于对偶性原理的配电变压器高频电磁暂态模型

杨庆¹, 崔浩楠¹, 揭青松¹, 刘红文², 黄继盛³

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217; 3. 云南电网有限责任公司临沧供电局, 临沧 677000)

摘要: 在高频范围内建立配电变压器模型对研究故障暂态行波及中压、低压电力线通信信号的传播特性具有重要意义。该文基于低频电磁暂态模型提出了变压器的高频模型, 使用阻抗分析仪测量了两种类型变压器的端口阻抗特性, 从而等效计算出变压器模型中的参数。同时建立了变压器高频模型, 通过仿真得到模型端口的阻抗特性, 与实测结果的对比分析表明变压器模型在频域下的准确性; 搭建了研究脉冲信号在变压器中传播特性的试验平台, 对比了实测和仿真电压波形, 验证了变压器模型在时域上的有效性。结果表明: 该文提出的模型适用于不同类型的配电变压器, 可用于在 100 Hz~1 MHz 间的高频信号在配电变压器中的传播特性研究。

关键词: 配电变压器; 高频模型; 电力物联网; 对偶性原理; 集总模型

High Frequency Electromagnetic Transient Model of Distribution Transformer Based on Duality Principle

YANG Qing¹, CUI Haonan¹, JIE Qingsong¹, LIU Hongwen², HUANG Jisheng³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Electric Power Research Institute, Yunnan Electric Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China; 3. Lincang Power Supply Company, Yunnan Electric Power Grid Co., Ltd., Lincang 677000, China)

Abstract: Establishing a distribution transformer model in the high-frequency range is of great significance for studying the propagation characteristics of fault transient traveling waves and medium-voltage, low-voltage power line communication signals. Based on the low frequency electromagnetic transient model, this paper proposes a high frequency model of transformers. The impedance analyzer is used to measure the ports impedance characteristics of the two types of transformers, and the parameters of the transformer model are calculated equivalently. The high frequency model of transformers is established, and the impedance characteristics of the model's ports are obtained by simulation. The comparison between the measured and simulated results shows the accuracy of the transformer model in the frequency domain; the experimental platform for studying the propagation characteristics of pulse signal in the transformer is built, and the effectiveness of the transformer model in the time domain is verified by comparing the measured and simulated voltage waveforms. The results show that the model proposed in this paper is suitable for different types of distribution transformers and it can be used to study the propagation characteristics of high frequency signals in distribution transformers between 100 Hz and 1 MHz.

Key words: distribution transformer; high frequency model; power Internet of Things; duality principle; lumped model

0 引言

随着智能电网的全面建设, 物联网技术在各业务环节得到广泛应用。电力物联网包括感知层、网络层和应用层, 其中感知层实现电力生产各环节传感数据的统一感知与表达, 建立统一信息模型, 规范感知层的数据接入^[1]。网络层按照规范化的统一

通信规约实现对数据的传送。配电网故障行波信号频谱主要分布在 10 kHz 到 100 kHz, 适用于输电线路的单端定位方法难以用于复杂的配电线路, 只能通过多端测量来实现故障定位。虽然在配变台区处架设了互感器, 但其主要是用于电压、电流测量, 频带较窄, 并不适用于故障暂态信号的直接获取, 通常在配电变压器二次侧感知故障暂态信号实现多端测量故障定位^[2-3]。电力线通信(power line communication, PLC)技术使用现有电力线进行数据传输, 为智能电网可用的通信解决方案之一^[4-7]。在窄

基金资助项目: 国家自然科学基金(51477018; 51837002)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51477018, 51837002).

带(narrow-band, NB)通信技术的应用中, 美国、日本和中国等国家频率使用范围从 3 kHz 到 500 kHz。然而, 在配电网中, 配电变压器作为中压网和低压网之间的物理连接, 用于传输电能, 在设计时并未考虑传输高频信号, 对高频信号传输衰减较大^[8]。因此, 研究变压器的高频模型, 对于获取故障行波信号、PLC 信号在配电变压器中的传播特性和中压、低压电力线通信信道建模具有重要的理论意义和工程应用价值, 对智能电网的感知层和网络层建设具有参考价值。

配电变压器高频模型的研究可分为两类: 集总参数模型和黑盒模型。集总参数模型使用电阻、电感和电容来模拟变压器在频域下的阻抗特性。这些模型通常基于低频模型, 同时结合了由变压器端口测量到的高频现象^[9-13]。Tran-Anh 等人通过从低压侧测量任意端口的短路、开路阻抗特性, 发现在高于一定频率后, 端口开路短路阻抗特性重合, 由此提出中频(medium frequency, MF)模型和高频(high frequency, HF)模型, 中频从低压侧对变压器进行建模, 将高压侧参数全部等效至低压侧, 高压侧不应有任何参数, 但提出的模型中仍重复考虑了高压侧对地电容的影响。此外, 基于中频模型提出高频模型时, 忽略了铁芯的影响, 理由是高频下从低压侧测得的开路短路端口特性相同, 变压器不起作用, 而实际原因是高压侧相间杂散电容在高频下呈低阻态, 虽然去掉理想变压器后对低压侧端口特性无影响, 但对高压侧端口特性影响较大, 作者并未验证变压器模型在高压侧的适用性^[10]。Cataliotti 利用已提出的 HF 模型, 测量了不同容量油浸式变压器在 50 kHz~150 kHz 下的模型参数^[11]。Lefort 在高压侧建立模型, 对于阻抗特性中存在的谐振点, 选择在低压侧串联一个并联谐振电路来等效, 建立的模型三相励磁参数相同, 而实际中间相磁路短于边上两相, 其励磁电感应大于其余两相, 同时对于高压侧相间电容并没有好的测量方法^[12]。黑盒模型是根据配电变压器在终端上的特性对其进行建模, 不需要知道其物理特性^[14-19]。Gustavsen B 以导纳矩阵为基础, 建立了变压器各端子电压和电流之间的关系^[14], 利用此方法还测量了 Dy 接法变压器的传输特性^[15]。在原有测量方法的基础上, 增加开路测量, 使用混合方法计算导纳矩阵, 提高了精度^[16]。考虑到测量工具昂贵, 在后续研究中使用更为经济的 FRA 工具, 间接测得导纳矩阵参数^[18]。Sathler 测量

了单相配电变压器的导纳矩阵, 建立了变压器在窄带下用于研究 PLC 信号传输的宽频模型^[7]。现有的集总参数模型多为使用 3 个参数相同的单相变压器按相应联结方式连接后来等效三相变压器, 而实际由于磁路长度不一致会导致各相激磁参数不同^[20]。同时在给出模型时并未提出相应理论进行模型推导, 导致模型中参数重复。在验证模型有效性过程中, 多为在频域上验证, 而在时域上验证较少。而黑盒模型精确性高, 但参数无特定物理意义。此外, 两种方法多研究模型对于单类型变压器的适用性, 未将模型应用于不同类型配电变压器。

从两种模型的物理意义来看, 集总参数模型的参数具有明显对应物理意义的优势, 因此本文对低频暂态下基于对偶性原理的变压器模型进行修正后, 提出配电变压器的高频模型, 并详细阐述了高频模型的推导过程, 避免以往高频模型中杂散电容的重复测量。考虑到各相励磁的不同与相同之处, 通过两次测量分别计算出各相励磁参数大小。同时将模型应用于不同类型变压器上, 测量并计算两种类型配电变压器参数。在得到参数后搭建仿真模型, 同时在现场搭建试验平台进行试验, 对比验证模型在频域和时域上的有效性。

1 变压器高频模型及参数提取方法

1.1 基于对偶性原理的变压器低频电磁暂态模型

电路与磁路的对偶关系可简单归纳为: 磁路中磁动势和磁阻分别对应电路中电流源和电感, 磁路网孔和节点分别对应电路节点和网孔。

配电变压器为三相三柱芯式变压器^[21-22], 物理结构图如图 1(a)所示, 其中 HV 和 LV 分别代表高低压两种绕组, 图中虚线、实线分别为变压器的主磁通和漏磁通, 其中实线中的 Φ_3 为两种绕组外区域的漏磁通, 而 Φ_1 、 Φ_2 则分别是低压绕组内区域、高低压绕组间区域的漏磁通^[23]。

图 1(b)为与变压器物理结构相对应的变压器磁路, 其中 F_L 和 F_H 分别是低压绕组、高压绕组的磁动势, R_L 、 R_Y 代表铁芯柱和铁轭的磁阻。 R_1 为铁芯与低压绕组间漏磁通对应的磁阻, R_2 为低压绕组与高压绕组间漏磁通对应的磁阻, R_3 为两种绕组外区域的漏磁通对应的磁阻^[24]。

通过对图 1(b)的磁路进行对偶变换可得到变压器的电路模型, 磁动势 F_L 、 F_H 可变换为电流源, 铁芯柱磁阻 R_L 和铁轭磁阻 R_Y 可变换为 Z_L 和 Z_Y ,

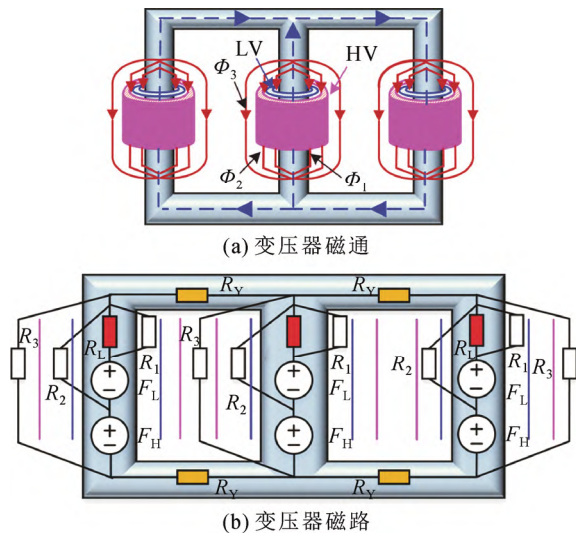


图1 变压器物理结构

Fig.1 Physical structure of transformer

低压绕组与高压绕组间磁阻 R_2 和两种绕组外区域磁阻 R_3 经变换后得到电感 L_2 和 L_3 [25]。然后将电流源等效替换为变压器，增加高压与低压绕组电阻 R_H 和 R_D ，并考虑了变压器杂散电容 C_H 、 C_1 、 C_{12} 、 C_2 后，联结组别为 Dy 接法，得到模型如图 2 所示[26]。

1.2 变压器高频模型及参数提取

在高频情况，图 2 所示的低频电磁暂态模型不能直接应用，此模型用于低频电磁暂态时需考虑变压器线圈的饱和效应，将线圈电感视为非线性。但在高频情况下，故障暂态信号和用于 PLC 传输的信号幅值有限，不会导致配电变压器磁饱和，可将电感视为线性。因此，可以通过对变压器低频模型进行修正来解决上述问题。

考虑到 Dy 接法的配电变压器零序电感远小于 Yy 接法，高频模型中忽略零序电感 L_0 [27-28]。因此将 A、C 相中心柱的阻抗 Z_L 和对应铁轭阻抗 Z_Y 分别合并后，各相励磁呈三角连接。各相高压侧杂散电容 C_1 呈 Y 形接法，可变换为三角接法，与同为三角接法的相间杂散电容 C_H 并联后可合并为相间杂散电容 C_h ，同样为三角接法。低频下，漏感 L_3 远小于杂散电容阻抗 C_h ，可将漏感 L_3 、漏电阻 R_H 略去，将同样三角接法的 C_h 等效至低压侧与各相励磁合并，形成 RLC 并联谐振。高频下，杂散电容 C_H 阻抗减小，相当于短路，而励磁回路随着频率增加，可以看作断路。因此，将图 2 中各相的 L_3 、 R_H 分别等效至低压侧后，与 R_D 合并可得到图 3 所示高频模型中的漏阻抗 R_L 电路。

图 3 中漏阻抗和励磁阻抗部分电感可能和内部

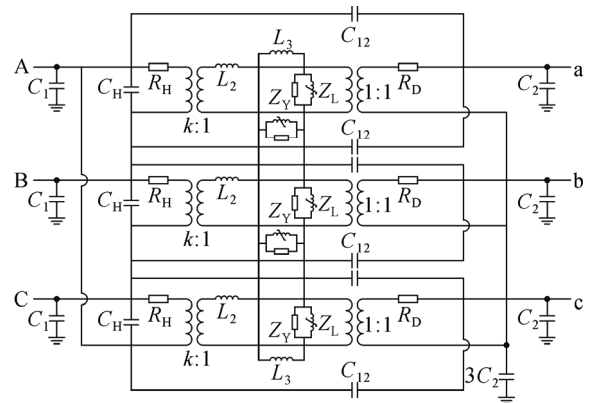


图2 变压器中低频电磁暂态模型

Fig.2 Low frequency electromagnetic transient model of transformer

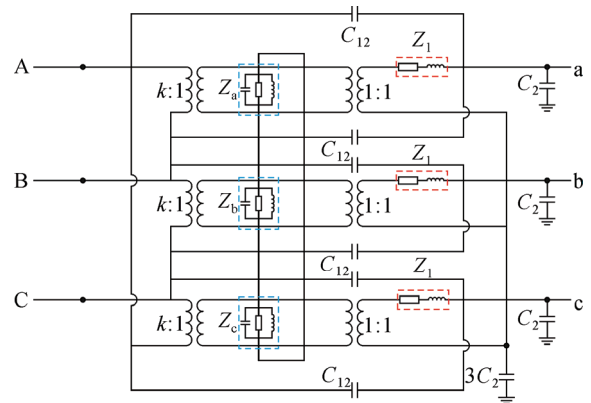


图3 本文变压器高频模型

Fig.3 HF transformer model proposed in this paper

杂散电容产生谐振，并不是完全为单一 RLC 谐振电路或是 RL 电路，可分别用 Z_a 、 Z_b 、 Z_c 和 Z_1 来替代。最终模型由三相励磁相互关联的励磁阻抗 Z_a 、 Z_b 、 Z_c 、漏阻抗 Z_1 、高低压侧电容 C_{12} 及低压侧对地电容 C_2 、变比为 k 的理想变压器组成。其中，各相漏阻抗 Z_1 相同。由于变压器两侧对称，a、c 两相对应的磁化阻抗 Z_a 、 Z_c 相同。此外，中间相磁路短于其他两相， Z_b 谐振电路中电感 L_b 较大。

可以看出，以上电磁暂态模型符合高频情况下的物理过程。对实际变压器，通过外界激励或阻抗分析仪在外部进行测试，无需对其内部特性进行测量，便可建立其对应的高频电磁暂态模型：分别在高压侧开路、短路状态下测量 a-n 的幅频特性，开路时幅频特性由 Z_1 和 $Z_a(Z_b+Z_c)/(Z_a+Z_b+Z_c)$ 串联决定，而短路时由 Z_1 决定。 $Z_a(Z_b+Z_c)/(Z_a+Z_b+Z_c)$ 在高频下呈低阻抗，则在高频下高压侧开路、短路下 a-n

的阻抗特性重合, 和以往文献测量结果符合^[8]。可由短路试验求出 Z_1 , 开路试验求出 Z_a 、 Z_b 、 Z_c 的幅频特性后, 使用集总参数元件来等效。

2 参数测量计算

为验证变压器高频模型的正确性, 本文选取 2 种典型的 Dyn11 接法配电变压器(10/0.4 kV), 分别为油浸式(T1/400 kVA)和干式配电变压器(T2/315 kVA)。如图 4 利用阻抗分析仪 WK6500B 对模型参数进行测量, 测量频率范围为 100 Hz~1 MHz。

测试用导线在测试时与被测元件串联, 高频时其影响不可忽略。将两导线连接后可得到其阻抗特性, 可等效为 0.1 Ω 电阻与 2.6 μH 电感串联。

2.1 漏阻抗测量计算

测量漏阻抗的连线如图 5 所示, 通过将高压侧端口短路, 在低压侧测量 b 相和中性点间阻抗特性可得到漏阻抗参数, 即模型中的 Z_1 。

图 6(a)和图 6(b)分别为油浸式变压器(T1)和干式变压器(T2)测得的漏阻抗特性, 在大部分频率下可看作线性, 使用 RL 电路来等效。但油浸式变压器在 40 kHz 时存在一个谐振点, 需要额外串联一个 RLC 并联谐振电路来等效^[29]。

对于油浸式变压器, RLC 并联谐振电路中的 R_p 、 L_p 、 C_p 的值可以由下式得到

$$\begin{cases} R_p = |Z(\omega_p)| \\ L_p = \frac{R_p}{Q_p \omega_p} \\ C_p = \frac{Q_p}{R_p \omega_p} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_p 为谐振点角频率; Q_p 为品质因数, 由式(2)可以计算得到。

$$Q_p = \frac{f_p}{|f_{p1} - f_{p2}|} \quad (2)$$

式中: f_{p1} 和 f_{p2} 为谐振点阻抗衰减-3 dB 对应的频率。

同时, RL 串联电路中的 L_L 、 R_L 可以计算为

$$\begin{cases} L_L = \frac{\text{Im}[Z_1(f_m)]}{\omega_m} - L_p \\ R_L = \text{Re}[Z_1(f_m)] \end{cases} \quad (3)$$

式中, f_m 为测量序列中的最小频率。

另一方面, 对于干式变压器, 有:

$$\begin{cases} L_L = \frac{\text{Im}[Z_1(f_m)]}{\omega_m} \\ R_L = \text{Re}[Z_1(f_m)] \end{cases} \quad (4)$$

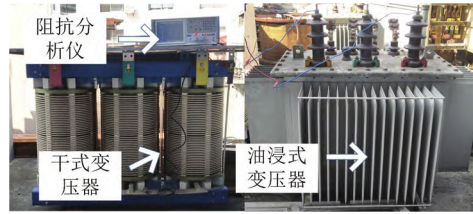


图 4 变压器参数测量装置

Fig.4 Transformer parameter measurement device

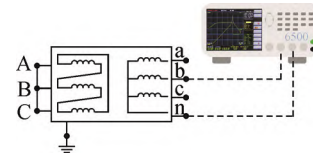
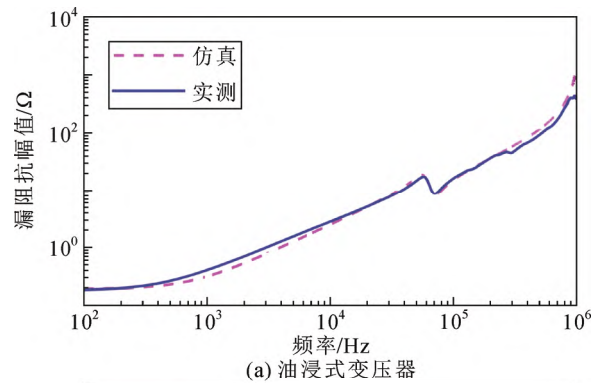
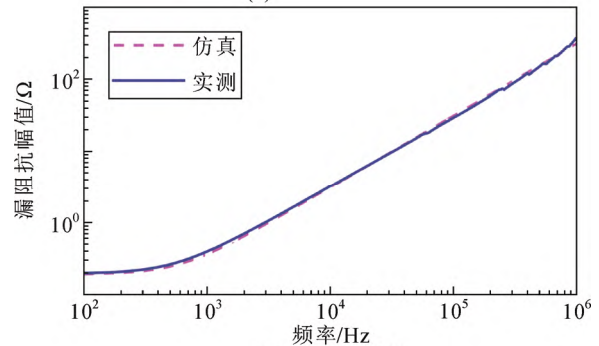


图 5 漏阻抗测量

Fig.5 Leakage impedance measurement



(a) 油浸式变压器



(b) 干式变压器

图 6 两种变压器的漏阻抗特性

Fig.6 Leakage impedance characteristic of two transformers

计算结果如表 1 所示。由计算结果得出, 参数的阻抗特性如图 6 虚线所示, 与实测数据一致性较好, 说明计算得到的参数能较好反映漏阻抗特性。

2.2 磁化阻抗测量计算

由于三相三柱式变压器中间相磁路短于其他相, 三相参数不同, 需要多次测试得到对应参数。

2.2.1 a、c 相磁化阻抗 Z_a 、 Z_c 测量计算

图 7(a)为测量电路连线, 通过将低压侧中间相

表 1 两种变压器漏阻抗参数

Table 1 Leakage impedance parameter of two distribution transformers

变压器类型	RL 电路		RLC 电路		
	$L_l/\mu\text{H}$	R_l/Ω	$L_p/\mu\text{H}$	$C_p/\mu\text{F}$	R_p/Ω
T1	26.2	0.08	10.23	0.7	13.21
T2	46.8	0.10			

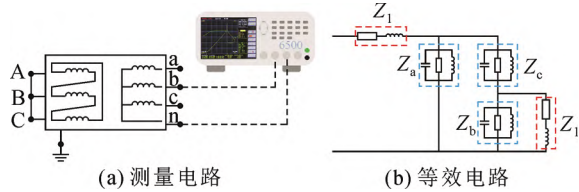


图 7 a、c 相磁化阻抗测量

Fig.7 Measurement of magnetizing impedance of phase a,c

短路, 测量 a-n 阻抗特性, 对应的等效电路如图 7(b)。由于低频下(<10 kHz) Z_1 远远小于磁化阻抗, 可忽略, 测试所得阻抗可看作 Z_a 和 Z_c 并联, 即 2 个 Z_a 并联。

图 8 为两种变压器 a-n 在 b 相短路情况下的阻抗特性, 可由并联谐振电路 R_1 、 L_1 、 C_1 (等效。通过式(5), 可以得到 a、c 相磁化阻抗参数为:

$$R_a = R_c = 2R_1, L_a = L_c = 2L_1, C_a = C_c = \frac{C_1}{2} \quad (5)$$

而干式变压器在 100 kHz 处存在一个谐振点, 这是由磁化阻抗造成的, 需要再串联一个 R_{11} 、 L_{11} 、 C_{11} 并联谐振。

$$R_{a1} = R_{c1} = 2R_{11}, L_{a1} = L_{c1} = 2L_{11}, C_{a1} = C_{c1} = \frac{C_{11}}{2} \quad (6)$$

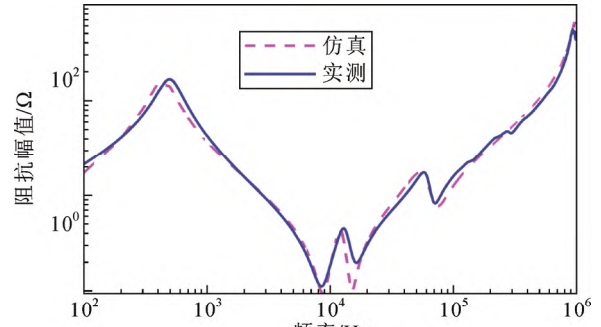
2.2.2 b 相磁化阻抗 Z_b 测量计算

测量电路如图 9(a)所示, 使用阻抗分析仪直接在配电变压器低压侧测量 b-n 阻抗特性。图 9(b)为等效电路, 可以看出测得的阻抗可以看作中间柱磁化阻抗和其余两柱磁化阻抗之和的并联。

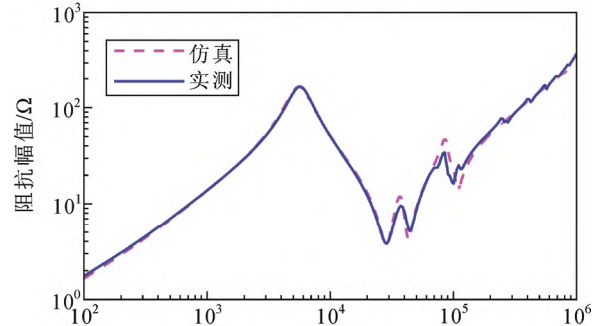
两种变压器测量结果如图 10 所示, 可由并联谐振电路 R_2 、 L_2 、 C_2 等效。同时根据等效电路图可得

$$\begin{cases} R_2 = \frac{2R_b R_a}{R_b + 2R_a} \\ L_2 = \frac{2L_b L_a}{L_b + 2L_a} \\ C_2 = C_b + \frac{C_a}{2} \end{cases} \quad (7)$$

通过计算, 可得到中间柱激磁阻抗参数为:



(a) 油浸式变压器



(b) 干式变压器

图 8 两种变压器 a-n(b 相短路)阻抗特性

Fig.8 a-n(phase b short circuit) impedance characteristic of two transformers

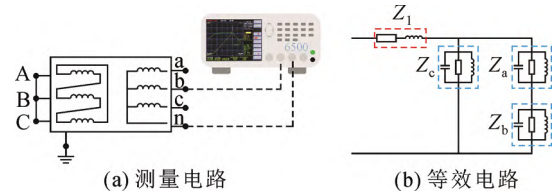


图 9 b 相磁化阻抗测量

Fig.9 Measurement of magnetizing impedance of phase b

$$R_b = \frac{2R_a R_2}{2R_a - R_2}, L_b = \frac{2L_a L_2}{2L_a - L_2}, C_b = C_2 - \frac{C_a}{2} \quad (8)$$

计算结果如表 2 所示, 由计算得出的电路低频下阻抗特性为图 8、10 虚线所示, 和实测数据相符, 说明参数准确无误。中间柱对应的磁化阻抗的电感大于两侧磁化阻抗的电感, 与前文分析结果对应。

2.2.3 杂散电容测量计算

杂散电容测量可由 3 次试验得到, 按照图 11 所示电路连接后, 可得到 3 组电容参数 C_{ap1} 、 C_{ap2} 、 C_{ap3} 。其值可由式(9)得到

$$C_{api} = \frac{1}{2\pi f Z_{ci}}, i=1,2,3 \quad (9)$$

式中, Z_{ci} 为每次电容测量的阻抗。

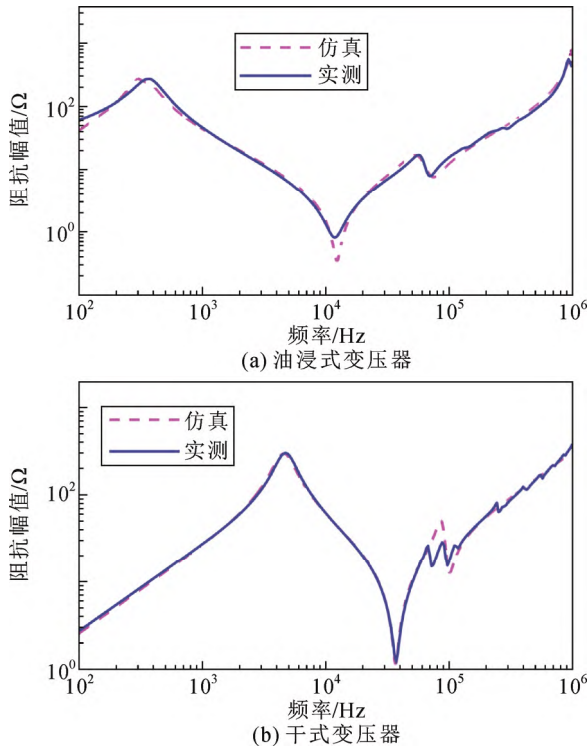


图 10 两种变压器 b-n 阻抗特性

Fig.10 b-n impedance characteristic of two transformers

表 2 两种变压器磁化阻抗参数

Table 2 Magnetizing impedance parameters of two distribution transformers

变压器 类型	Z_a			Z_b		
	R_a/Ω	L_a/mH	$C_a/\mu F$	R_b/Ω	R_b/mH	$R_b/\mu F$
T1	330	52	2.55	600	150	2.55
T2	330	4.0565	0.2	550	8.074	0.2
	65	17.2×10^{-3}	0.19	65	17.2×10^{-3}	0.19

通过图 2 电路连接可知, 电容参数 C_1 、 C_2 、 C_{12} 和 C_{ap1} 、 C_{ap2} 、 C_{ap3} 关系如式(10), 其值可由 C_{ap1} 、 C_{ap2} 、 C_{ap3} 计算得到。

$$\begin{cases} C_{ap1} = 3C_1 + 6C_{12} \\ C_{ap2} = 6C_2 + 6C_{12} \\ C_{ap3} = 3C_1 + 6C_2 \end{cases} \quad (10)$$

计算结果如表 3 所示, 其中干式变压器的杂散电容小于油浸式变压器。同时相较于相间电容, 低压侧对地电容较大。

3 变压器高频模型频域验证

为验证本文提出模型的有效性, 首先在频域下进行试验验证。在频域下对模型准确性验证是通过比较高频模型在 PSCAD 软件中端口的阻抗特性和阻抗分析仪测量结果得到。

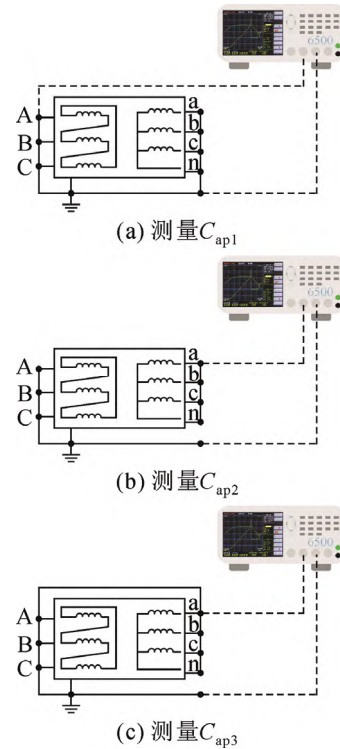


图 11 杂散电容测量

Fig.11 Measurement of parasitic capacitances

表 3 两种变压器杂散电容参数

Table 3 Parasitic capacitance parameters of two distribution transformers

变压器类型	C_2/pF	C_{12}/pF
T1	736	476
T2	400	35

3.1 低压侧验证

在低压侧分别使用阻抗分析仪对两种变压器 a-n、a-n(c 相短路)和 a-n(b、c 相短路)在高压侧开路情况下进行端口特性测量。其中, 各相短路是使用导线分别将对应相和中性点连接起来。

图 12(a)、(b)、(c)实线分别为油浸式变压器(T1)的 a-n 在无短路、c 相短路及 b、c 相同时短路情况下的阻抗特性, 虚线为仿真软件搭建的变压器模型得到的对应情况下的阻抗特性。仿真和实测数据在高频下(>1 kHz)基本一致, 仅在低频下(<1 kHz)端口特性有些许偏差, 造成图 12(a)、(b)仿真与实测存在差异的原因是励磁电感随着频率增加而略微增大, 存在非线性特性。而造成图 12(c)产生偏差的原因则是线圈存在趋肤效应, 电阻大小随频率增长而变大。其中, 图 12(b)中除磁化阻抗和漏阻抗造成的谐振点, 在 13 kHz 处也存在谐振点, 这是由于 c

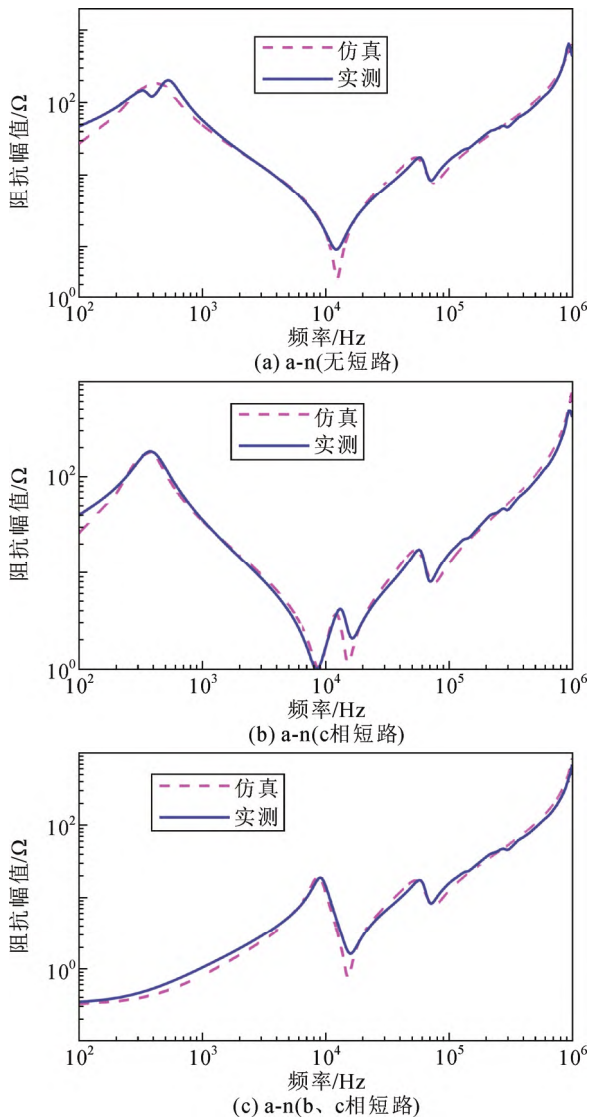


图 12 油浸式变压器 a-n 在不同短路情况下的阻抗特性
Fig.12 Impedance characteristics of oil-immersed transformer a-n under different short-circuit conditions

相短路后, c 相漏阻抗的电感和 c 相磁化阻抗中的电容谐振造成的。同理, 将 b、c 两相短路后, 图 12(c)在 8.7 kHz 处也存在谐振点, 这是由于 b、c 相短路后, b、c 相漏阻抗的电感和 a、b、c 相磁化阻抗中的电容谐振造成的。

图 13 为干式变压器(T2)在低压侧不同短路情况下的仿真阻抗特性和实测阻抗特性。由图可看出, a-n 在其他端口不同短路情况下仿真得到的阻抗特性和实测阻抗特性几乎重合, 只在高频情况下一些小的谐振点不能达到完全符合。相较于油浸式变压器, 干式变压器在频域下的实测阻抗特性和仿真结果更加匹配。同样地, 当存在其他相短路时, a-n 阻抗特性也产生了不同于无短路时的谐振点。

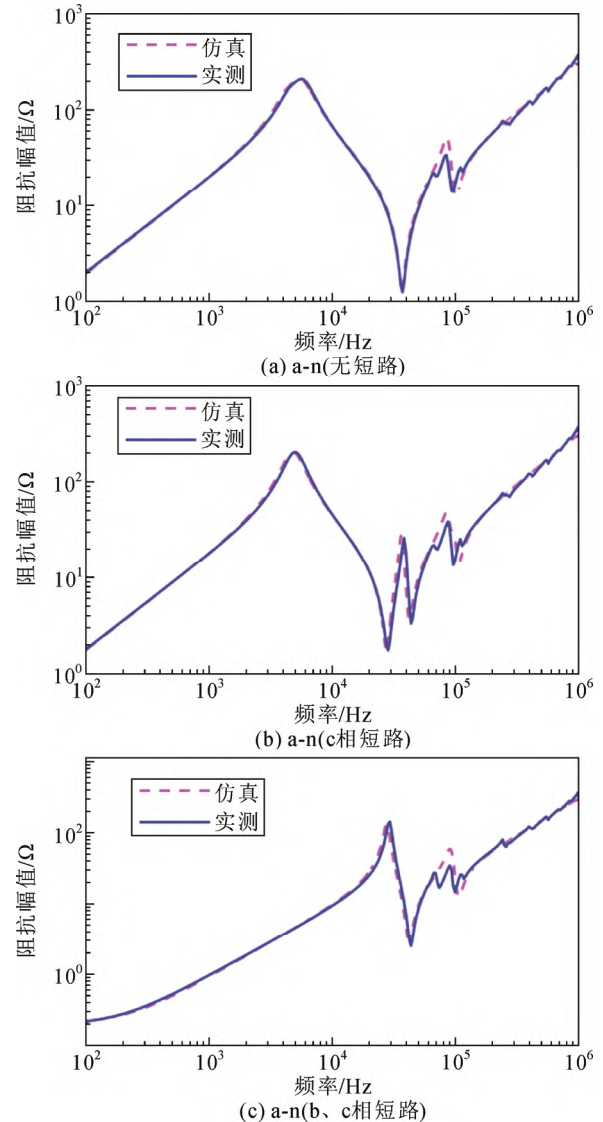


图 13 干式变压器 a-n 在不同短路情况下的阻抗特性
Fig.13 Impedance characteristics of dry-type transformer a-n under different short-circuit conditions

3.2 高压侧验证

通过将低压侧各端口进行短路连接, 测量高压侧任意两相间的阻抗特性后, 与相同情况下仿真得到的阻抗特性进行对比, 得到的结果如图 14 所示。

图 14(a)和 14(b)分别为油浸式(T1)和干式变压器(T2)在低压侧短路情况下的阻抗特性。可以看出, 仿真得到的高压侧阻抗特性和实测高压侧阻抗特性基本符合。其中, 油浸式变压器实测和仿真在谐振峰值上存在微小差异, 其余部分相符。干式变压器的高压侧阻抗在低频下相符, 在大于 20 kHz 时趋势和幅值大小相同。因此, 通过在低压侧、高压侧分别仿真模型端口特性和实测特性对比, 可以说明变压器模型在频域下有效。

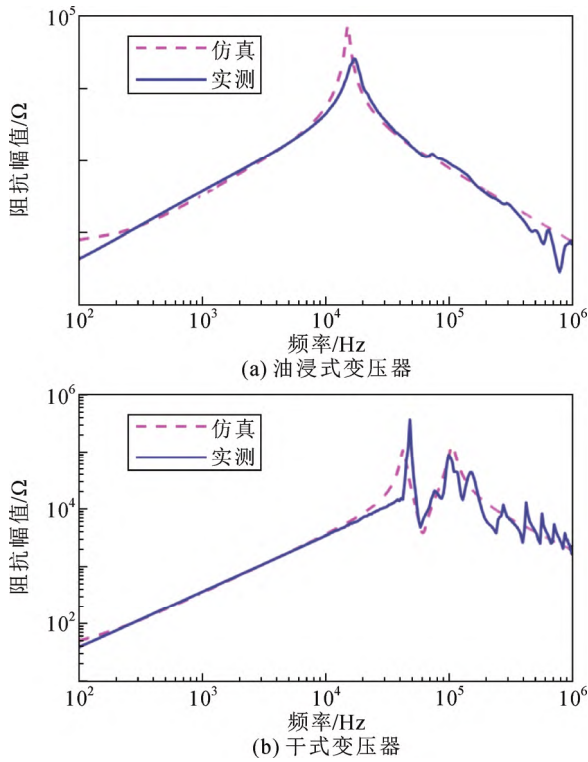


图 14 两种变压器高压侧阻抗特性

Fig.14 Impedance characteristics of high voltage side of two kinds of transformers

4 变压器高频模型时域验证

为研究配电变压器在时域下的传输特性, 搭建试验电路并与在 PSCAD 下的时域仿真进行比较。试验电路由任意波形发生器(Tektronix AFG3011)作为信号源, 示波器(Tektronix TDS 2024C)采集信号, 测试电路如图 15 所示。

图 16 为对应原理图, 高压侧 1、2、3 点接入电阻接地, 低压侧非注入相接电阻接地。 $390\ \Omega$ 为线路特征阻抗^[30], $50\ \Omega$ 为低压侧线路特征阻抗。在 4 点使用函数发生器激励一个方波脉冲信号, 大小为 $10\ \text{V}$, 进行两次测试, 所用脉冲信号持续时间分别为 $5\ \mu\text{s}$ 和 $10\ \mu\text{s}$ 。同时在高压侧 1、2、3 点和注入点 4 分别采集信号。

4.1 油浸式变压器高频模型时域验证

图 17 和图 18 为激励信号为 $5\ \mu\text{s}$ 和 $10\ \mu\text{s}$ 时的输入、输出实测和仿真波形图。图中 a、b、c、d 分别代表端口 4、1、2、3 的信号。实线、虚线分别为仿真和实测信号。

图 17(b)、(c)、(d)分别为高压侧 A、B、C 相输出信号, 各信号都存在尖峰, 这是由于变压器高压侧绕组间杂散电容造成的。当方波脉冲信号作用于

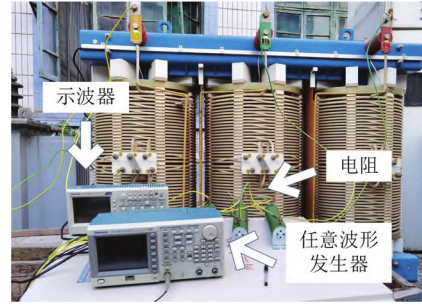


图 15 时域测量试验

Fig.15 Time-domain measurement test

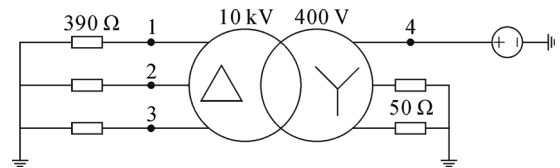


图 16 时域测量电路

Fig.16 Time-domain test circuit

变压器时, 杂散电容 C_{12} 上电压为 0, 不能突变。此时 1、2、3 端口处电压大小为负载 $390\ \Omega$ 和电源内阻的分压, 初始值很大, 随着电容的充电逐渐减小。 $5\ \mu\text{s}$ 时下降沿造成的尖峰同理, 因此输出信号存在两个尖峰。两次试验输入信号脉宽的不同只影响输出信号脉宽, 而对存在的尖峰和大小几乎不影响。

4.2 干式变压器高频模型时域验证

图 19 为激励信号脉宽为 $5\ \mu\text{s}$ 时的输入、输出的实测和仿真波形图, 可以看出仿真和实测波形一致。图 20 为激励信号脉宽为 $10\ \mu\text{s}$ 时的输入输出实测和仿真波形图, 其中 1 端口实测信号存在震荡, 和仿真结果近似相符, 其余端口幅值和形状相同。

和油浸式变压器得到的结果相似, 两次试验输入信号脉宽的不同只影响输出信号脉宽, 对存在的尖峰和大小几乎不影响。与干式变压器相比, 油浸式变压器在时域下的实测阻抗特性和仿真结果更加一致。通过在两种变压器上进行不同脉宽信号注入试验, 仿真数据和实测数据在时域上较为符合, 可以说明本变压器模型在时域下是有效的。

5 结论

1) 基于低频电磁暂态下的变压器模型, 对其中参数进行修正后提出了配电变压器高频模型。

2) 在测量得到各端口阻抗特性后, 使用集总参数来等效变压器端口阻抗特性的方法可以得到变压器模型中漏阻抗、激磁阻抗和杂散电容参数值,

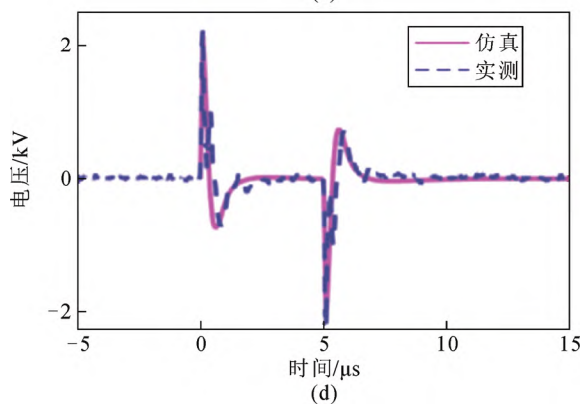
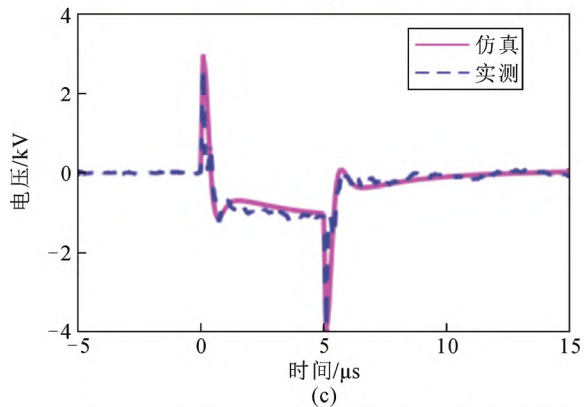
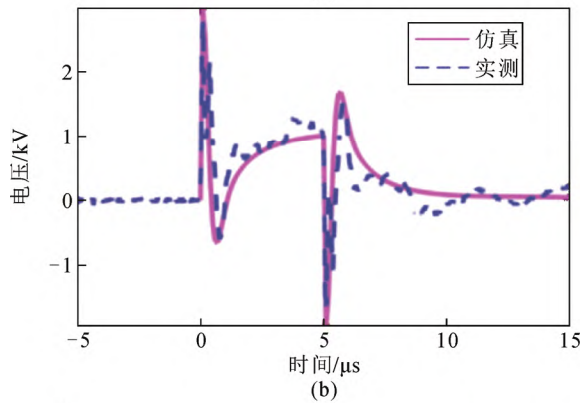
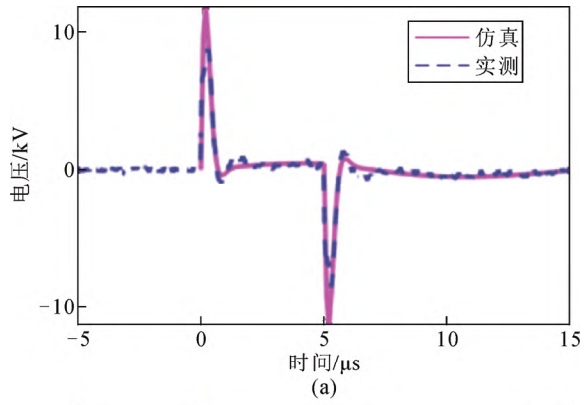


图 17 油浸式变压器时域测量试验(脉宽=5 μs)

Fig.17 Time domain measurement experiment of oil-immersed transformer (pulse width=5 μs)

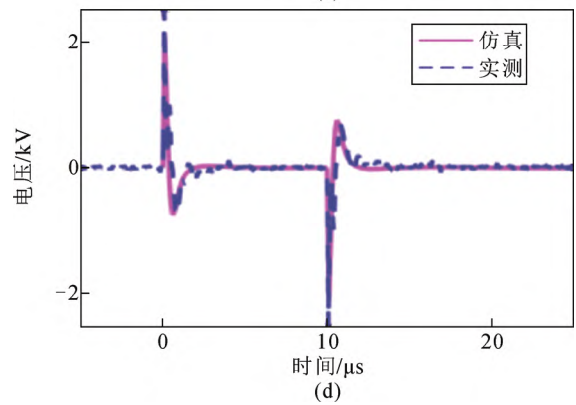
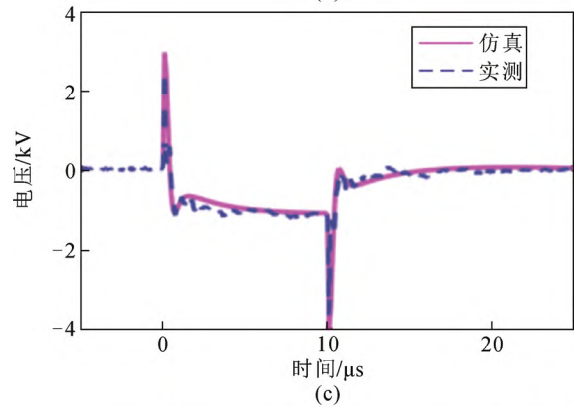
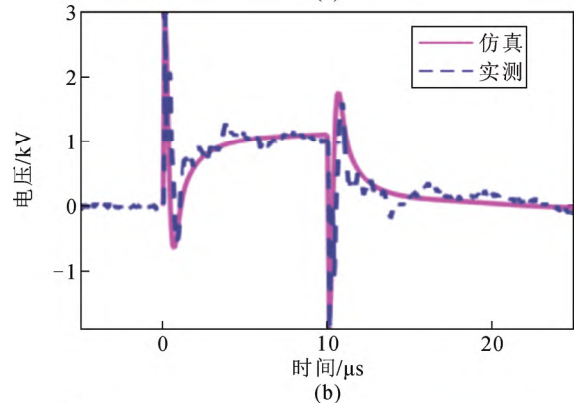
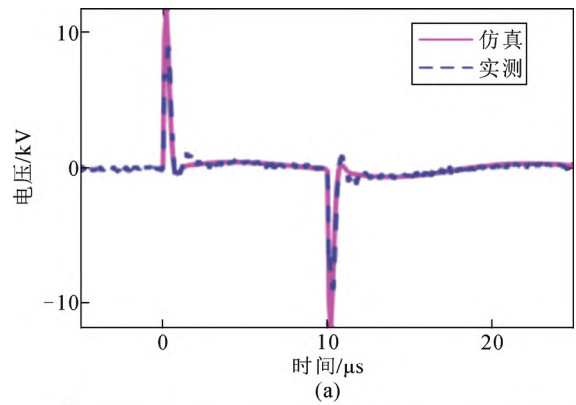


图 18 油浸式变压器时域测量试验(脉宽=10 μs)

Fig.18 Time domain measurement experiment of oil-immersed transformer (pulse width=10 μs)

计算所得和实测两种变压器阻抗幅频特性一致，表明计算所得参数准确。

3) 实测和仿真变压器不同端口的阻抗幅频特性的符合说明提出的变压器模型在频域上有效。干

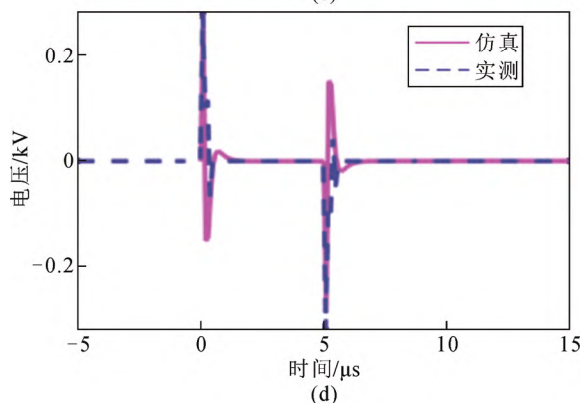
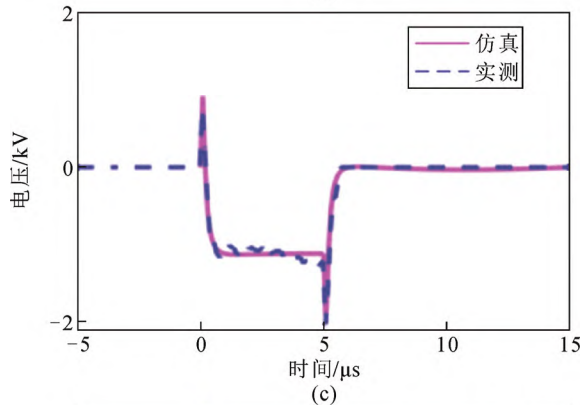
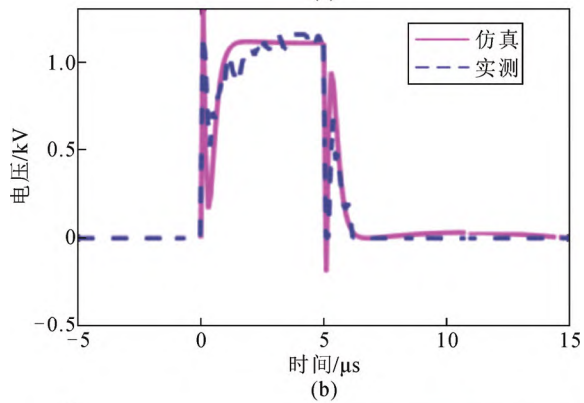
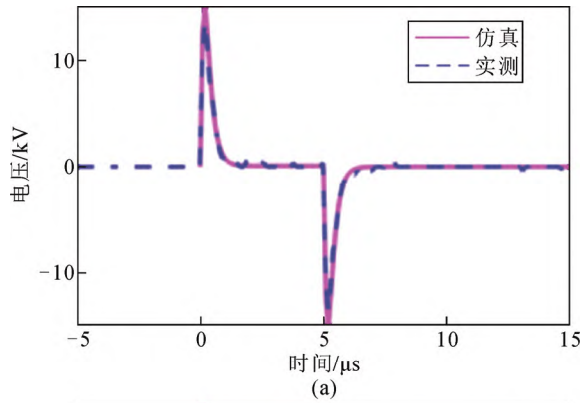


图 19 干式变压器时域测量试验(脉宽=5 μs)

Fig.19 Time domain measurement experiment of dry-type transformer (pulse width=5 μs)

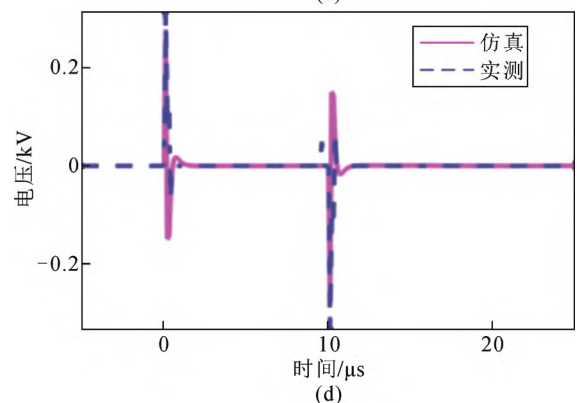
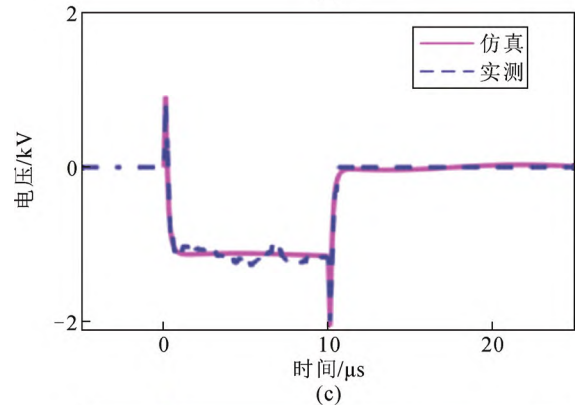
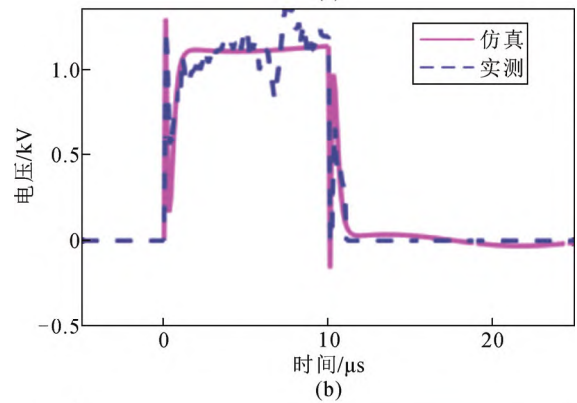
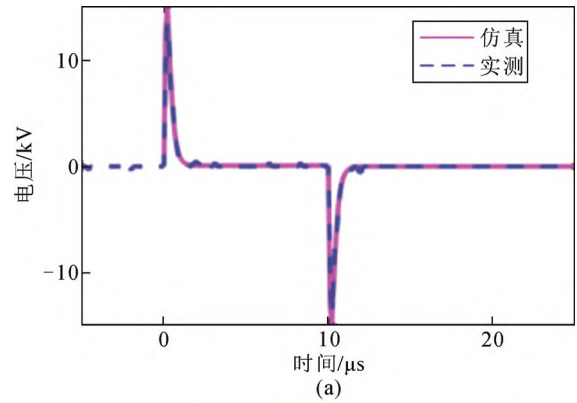


图 20 干式变压器时域测量试验(脉宽=10 μs)

Fig.20 Time domain measurement experiment of dry-type transformer(pulse width=10 μs)

式变压器的实测和仿真阻抗特性更加一致。通过搭建脉冲注入平台后测量各端口的电压波形与仿真所

得波形进行对比, 验证了模型在时域上的有效性, 油浸式变压器得到的仿真和实测时域波形更相似。

本文提出的配电变压器模型适用于两种不同变压器,能够用于 100 Hz~1 MHz 范围内的高频信号在配电变压器中的传播特性研究。

参考文献 References

- [1] 杨庆,孙尚鹏,司马文霞,等.面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J].高电压技术,2019,45(2):349-367.
YANG Qing, SUN Shangpeng, SIMA Wenxia, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 349-367.
- [2] 季涛,孙同景,徐丙垠,等.利用配电变压器获取行波信号[J].电力系统自动化,2006,30(16):66-71.
JI Tao, SUN Tongjing, XU Bingyin, et al. Traveling waves measurement with distribution transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 66-71.
- [3] 邓丰,李欣然,曾祥君,等.基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J].中国电机工程学报,2018,38(15):4399-4409.
DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4399-4409.
- [4] 丁冠军,兰海滨,樊邦奎,等.智能电网应用中的PLC技术[J].电工技术学报,2013,28(增刊2):378-382.
DING Guanjun, LAN Haibin, FAN Bangkui, et al. The power line communication technologies for smart grid application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(Supplement2): 378-382.
- [5] 黄毕尧,张明,李建岐,等.联合高低频电力线通信的中压配电网拓扑自动识别方法[J].高电压技术,2021,47(7):2350-2358.
HUANG Biyao, ZHANG Ming, LI Jianqi, et al. Automatic identification of medium-voltage power distribution network topology based on high and low frequency power line communication[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2350-2358.
- [6] 杨挺,何子阳,孙兆帅,等.面向并发多业务的宽带电力线载波通信跨层资源分配算法研究[J].电网技术,2021,45(8):3257-3267.
Yang Ting, HE Ziyang, SUN Zhaoshuai, et al. Research on cross-layer resource allocation algorithm for concurrent multi-service in broadband power line carrier communication[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3257-3267.
- [7] SATHLER L H, DE CONTI A. Single-phase distribution transformer modeling for narrowband power line communications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 674-683.
- [8] 郭以贺,谢志远,石新春.基于多导体传输线的中压电力线通信信道建模[J].中国电机工程学报,2014,34(7):1183-1190.
GUO Yihe, XIE Zhiyuan, SHI Xinchun. Modeling of medium voltage power line communication channel based on multi-conductor lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1183-1190.
- [9] CHIMKLAI S, MARTI J R. Simplified three-phase transformer model for electromagnetic transient studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1316-1325.
- [10] TRAN-ANH T, AURIOL P, TRAN-QUOC T. High frequency power transformer modeling for power line communication applications[C]// Proceedings of 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, USA: IEEE, 2006: 1069-1074.
- [11] CATALIOTTI A, COSENTINO V, DI CARA D, et al. Oil-filled MV/LV power-transformer behavior in narrow-band power-line communication systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(10): 2642-2652.
- [12] LEFORT R, VAUZELLE R, COURTECUISSSE V, et al. Influence of the MV/LV transformer impedance on the propagation of the PLC signal in the power grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1339-1349.
- [13] MASOOD B, USMAN M, GUL M U, et al. Measurements and characterization of power transformer and low voltage access network for NB-PLC[J]. International Journal of Communication Systems, 2017, 30(17): e3344.
- [14] GUSTAVSEN B. Wide band modeling of power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 414-422.
- [15] GUSTAVSEN B. Frequency-dependent modeling of power transformers with ungrounded windings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1328-1334.
- [16] GUSTAVSEN B. A hybrid measurement approach for wideband characterization and modeling of power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1932-1939.
- [17] BADRZADEH B, GUSTAVSEN B. High-frequency modeling and simulation of wind turbine transformer with doubly fed asynchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 746-756.
- [18] HOLDYK A, GUSTAVSEN B, ARANA I, et al. Wideband modeling of power transformers using commercial sFRA equipment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1446-1453.
- [19] PAPAPOPOULOS T A, CHRYSOCHOS A I, NOUSDILIS A I, et al. Simplified measurement-based black-box modeling of distribution transformers using transfer functions[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 121: 77-88.
- [20] MORK B A. Five-legged wound-core transformer model: derivation, parameters, implementation and evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(4): 1519-1526.
- [21] 安义,于宗超,方旒,等. Dyn11型变压器额定容量智能校核方法[J].高电压技术,2020,46(9):3044-3053.
AN Yi, YU Zongchao, FANG Ni, et al. Intelligent checking method for rated capacity of type Dyn11 transformers[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3044-3053.
- [22] 丁玉琴,张乔根,高萌,等.油浸式配电变压器分布式热路模型[J].高电压技术,2019,45(3):968-974.
DING Yuqin, ZHANG Qiaogen, GAO Meng, et al. Distributed thermal circuit model of oil-immersed distribution transformers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 968-974.
- [23] 邹密.计及磁滞效应的变压器低频电磁暂态模型及其在铁磁谐振中的应用[D].重庆:重庆大学,2018:26-28.
ZOU Mi. Low-frequency transformer model considering hysteresis behavior and its application in ferroresonance[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2018: 26-28.
- [24] 李建标,司马文霞,孙廷玺,等.基于Jiles-Atherton磁滞理论的“三相五柱”变压器中低频电磁暂态模型研究[J].广东电力,2017,30(2):65-69.
LI Jianbiao, SIMA Wenxia, SUN Tingxi, et al. Research on low-frequency electromagnetic transient model in three-phase five-legged transformer based on jiles-atherton hysteresis theory[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2): 65-69.
- [25] 索南加乐,许立强,焦在滨,等.基于磁路特征的三相三柱式变压器数学模型及等效电路[J].电力系统自动化,2011,35(15):52-57.
SUONAN Jiale, XU Liqiang, JIAO Zaibin, et al. Mathematical model and equivalent circuit for three-phase three-limb transformer based on magnetic circuit characteristics[J]. Automation of Electric Power Sys-

- tems, 2011, 35(15): 52-57.
- [26] MORK B A, GONZALEZ F, ISHCENKO D, et al. Hybrid transformer model for transient simulation-Part I: Development and parameters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 248-255.
- [27] 安 义, 陈 春, 范瑞祥, 等. 基于数据驱动的配电变压器容量在线校正方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2842-2848.
AN Yi, CHEN Chun, FAN Ruixiang, et al. On-line correcting method of the distribution transformer capacity based on data-driven[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2842-2848.
- [28] 郭 健, 林鹤云, 徐子宏, 等. 三相三柱变压器零序阻抗的场路耦合计算与分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 80-85.
GUO Jian, LIN Heyun, XU Zihong, et al. Calculation and analysis of zero-sequence impedance of three-phase and three limbs transformer based on field circuit coupled method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 80-85.
- [29] CATALIOTTI A, COSENTINO V, DI CARA D, et al. Measurement issues for the characterization of medium voltage grids communications[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(8): 2185-2196.
- [30] WANG Z Y, HE S Y, LI Q, et al. A full-scale experimental validation of electromagnetic time reversal applied to locate disturbances in overhead power distribution lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(5): 1562-1570.



YANG Qing
Ph.D., Professor
Corresponding author

杨 庆(通信作者)
1981—, 男, 博士, 教授, 博导
长期从事电力系统过电压及其绝缘配合和复杂环境下输电线路外绝缘特性及放电机理的研究
E-mail: yangqing@cqu.edu.cn

收稿日期 2021-03-03 修回日期 2021-09-08 编辑 卫李静