

# 变压器类装备电磁暂态模型构建技术综述

杨 鸣<sup>1</sup>, 黄琳榆<sup>1</sup>, 孙金昊<sup>1</sup>, 司马文霞<sup>1</sup>, 赵小涵<sup>1</sup>, 汪 可<sup>2</sup>,  
冯谟可<sup>1</sup>, 邹滨阳<sup>3</sup>, 彭代晓<sup>4</sup>

(1. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学电气工程学院), 重庆 400044;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;

3. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123;

4. 中国三峡建工(集团)有限公司, 成都 610041)

**摘要:** 变压器类装备种类繁多, 广泛应用于电力系统中, 是电力系统的核心装备。灵活多变的运行场景导致变压器需承受复杂的电磁暂态冲击, 对变压器安全稳定运行造成极大挑战。构建变压器电磁暂态模型是准确分析变压器及系统电磁暂态物理过程和特性的关键, 是变压器优化设计、暂态调控与安全运行的基石。该文将变压器电磁暂态模型按照适用频带分为低频模型、高频模型和宽频模型, 首先从模型结构、参数辨识、应用范围、局限性等方面介绍了现有主流的变压器低频电路模型, 重点阐述了铁芯非线性励磁支路的参数测量和表征方法, 及其与分接开关模型的动态耦合方法; 然后, 介绍了现有变压器高频电路模型, 包括黑盒模型和白盒模型, 并对不同方法进行比较与总结; 进而, 介绍了同时具备铁芯非线性和频率依赖特性表征能力的宽频模型。最后, 针对不同电磁暂态冲击场景提出模型应用建议, 并对变压器电磁暂态模型构建技术的未来研究方向进行了展望。

**关键词:** 变压器类装备; 电路模型; 电磁暂态; 铁芯非线性; 频率依赖特性

## Review of Transformer Modeling Technologies for Electromagnetic Transient Analysis

YANG Ming<sup>1</sup>, HUANG Linyu<sup>1</sup>, SUN Jinhao<sup>1</sup>, SIMA Wenxia<sup>1</sup>, ZHAO Xiaohan<sup>1</sup>, WANG Ke<sup>2</sup>, FENG Moke<sup>1</sup>,  
ZOU Binyang<sup>3</sup>, PENG Daixiao<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China; 4. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The variety of transformers is numerous, which are widely used in power system and serve as the core components. The flexible and variable operating scenarios require transformers to withstand complex electromagnetic transient impacts, which pose significant challenges to the safe and stable operation of transformers. Constructing an electromagnetic transient model for transformers is crucial for accurately analyzing the physical processes and characteristics of electromagnetic transients, which serves as the foundation for the optimal design, transient control, and safe operation of transformers. We categorize the electromagnetic transient models of transformers into low-frequency models, high-frequency models, and wideband models based on their applicable frequency ranges. First, we introduce the existing mainstream low-frequency circuit models of transformers including model structure, parameter identification, application scope, limitations, and so on. Moreover, we focus on the parameter measurement and characterization methods of the nonlinear excitation branch of core, as well as the dynamic coupling methods with the tap-changing model. Next, we present the existing high-frequency circuit models of transformers, including black-box and white-box models, and compare and summarize the different methods. Furthermore, we introduce wideband models that simultaneously characterizes both iron core nonlinearity and frequency-dependent characteristic. Finally, we propose application suggestions of models in various electromagnetic transient impact scenarios, and present an outlook on the future research directions for the construction of electromagnetic transient models of transformers.

**Key words:** transformers; circuit model; electromagnetic transients; iron core nonlinearity; frequency-dependent characteristic

## 0 引言

变压器类装备大规模应用于电力系统的各个环节,是电力系统的“心脏”。除电力变压器外,变压器类装备还包括固态变压器、高频变压器、电抗器、电磁式互感器等(以下统称为变压器)<sup>[1]</sup>。变压器在运行中承受着复杂的电磁暂态冲击,如图 A1 所示,电磁暂态冲击可能导致变压器故障,并诱发系统连锁故障。如 2018 年,某±800 kV 换流变压器发生燃爆,引发火灾,大火持续 60 h,造成直接经济损失数亿元<sup>[2]</sup>。近年来,随着大规模新能源与电力电子装备并网,电力系统动态特性发生显著变化,高频谐波和高频振荡等新问题愈加突出,对变压器及系统安全稳定运行造成了严重威胁。如 2023 年某水光互补项目并网时发生 3.3 kHz 的高频振荡,诱发变压器损毁,导致该项目被迫延迟投运,造成巨大的经济损失。

构建变压器电磁暂态模型是准确分析变压器及系统电磁暂态物理过程和特性的关键,是变压器优化设计、暂态调控与安全运行的基石。根据 IEEE Working Group 15.08.09 和 CIGRE Working Group 02 (SC 33)<sup>[3-4]</sup>提出的相关规定,变压器在不同频率范围内需要考虑相关的影响参数,其电磁暂态建模准则如表 A1 所示。

变压器在运行中遭受的电磁暂态冲击主要有低频暂态、缓波前暂态、陡波前暂态与超陡波前暂态等工况。其中,直流偏磁、励磁涌流、内部短路、有载分接开关故障等均属于变压器低频暂态现象,可构建对应的低频电路模型开展仿真分析。但不同类型低频电磁暂态作用机制不同,模型的侧重点也不尽相同。励磁涌流、直流偏磁等工况会导致变压器铁芯饱和甚至深度饱和,进而产生远超正常电流的过电流现象<sup>[5]</sup>。因此,这类现象的分析高度依赖于铁芯非线性特性的精准建模。变压器内部短路故障主要与变压器绕组的传输特性相关,该故障一般涉及多饼级、饼级、匝级等多种尺度。因此,变压器短路分析模型的建模关键在于多尺度绕组间的短路特性表征。有载分接开关故障则往往是其切换过程中发生了级间短路<sup>[6]</sup>,对其开展分析需要获取有载切换过程各触头的电压、电流应力和耗能特性,因此要求有载分接开关模型与变压器进行动态耦合,以表征变压器在任意分接档位时的暂态特性。

谐波振荡、操作冲击等缓波前暂态,雷电冲击

等陡波前暂态,以及快速暂态过电压(very-fast-transient overvoltage, VFTO)等超陡波前暂态可基于变压器高频电路模型开展暂态计算,变压器高频模型需要充分考虑导体涡流效应、电容效应等影响,一般分为黑盒、白盒模型两种技术路线。此外,部分事故中同时出现了低频和高频电磁暂态过程,例如:变压器短路故障中切除故障产生的瞬态恢复过电压<sup>[7]</sup>。工频下的计算误差可能会对高频暂态过电压的初始状态产生影响,此时需基于变压器的宽频模型进行仿真,宽频模型的频率范围包含从工频到几兆赫兹甚至更高,其关键是在兼顾低频段精度的同时,充分表征变压器在不同频率下的阻抗特性、传递特性(即:频率依赖性)。铁芯的非线性会影响变压器的等效阻抗,影响范围为 0 Hz~数十 kHz<sup>[8]</sup>,也可能对高频暂态过电压的初始状态造成影响<sup>[9]</sup>。此外,电力系统 1 kHz 至 10 kHz 甚至更高的高频谐波和高频振荡等问题愈加显著。开展变压器抗高频扰动研究时,需对变压器铁芯非线性与频率依赖特性进行小尺度的准确表征,以充分研究变压器内部电磁复杂应力分布特性。因此,在开展上述分析时,变压器需同时对铁芯非线性和频率依赖特性进行精准表征。

综上所述,变压器常见电磁暂态故障分析涉及不同频带,且对铁芯非线性、频率依赖特性等提出了不同的要求,因此需对变压器建模方法进行梳理,提出适配不同故障分析的变压器等效电路模型。

因此,本文根据变压器电磁暂态仿真需求将电路模型分为低频模型、高频模型和宽频模型,从模型结构、参数辨识、应用范围、局限不足等方面梳理了:变压器低频电路模型,重点介绍铁芯非线性的参数测量与表征方法,以及有载分接开关与变压器的联合建模方法;变压器高频电路模型,包括黑盒模型和白盒模型,对不同建模方法进行比较与总结;具备同时表征铁芯非线性和频率依赖特性的宽频非线性耦合模型。最后,本文根据变压器面临的传统电磁暂态冲击威胁,以及宽频振荡、高次谐波等新型突出问题,对变压器电磁暂态模型构建与关键技术提出建议研究方向。

## 1 变压器低频电磁暂态模型

### 1.1 典型变压器低频模型

根据变压器的物理结构,电磁暂态分析时主要针对铁芯和绕组建模。当涉及低频电磁暂态研究时,

铁芯的饱和特性、损耗特性及绕组间的短路参数对变压器建模具有重要影响。典型的变压器低频模型主要有: 经典电路模型、负电感模型、UMEC (unified magnetic equivalent circuit) 模型、对偶模型、TDM (terminal-duality model) 模型和 BCTRAN 模型。

1.1.1 经典电路模型

根据漏感和铁芯非线性的表征差异, 经典电路模型主要分为 T 模型、 $\Gamma$  模型和  $\pi$  模型。以单相双绕组变压器为例, 图 1(a) 为 T 模型, 由一、二次侧绕组电阻( $R_1$  和  $R_2$ )、漏感( $L_1$  和  $L_2$ )以及非线性励磁支路(包括铁芯损耗电阻  $R_m$  和励磁电感  $L_m$ )构成, 其中 T 模型将漏感分为两个部分, 使其漏磁通的物理意义表征不准确<sup>[10]</sup>。为了保证漏感的准确表征, 有学者将中间节点的电路模型移动至旁侧, 得到图 1(b) 所示  $\Gamma$  模型, 该模型准确表征了一、二次侧绕组间的漏感( $L_{12}$ )和电阻( $R_{12}$ )。但是, 不恰当的励磁连接位置可能会导致更大的仿真误差<sup>[11]</sup>。 $\pi$  模型(图 1(c) 所示)根据电磁对偶原理得到, 具有准确的电磁映射关系, 其漏感表征与铁芯非线性特性均具有更高的精度<sup>[12]</sup>, 且  $\pi$  模型通过并联一、二次绕组的励磁支路( $R_{m1}$ 、 $L_{m1}$  和  $R_{m2}$ 、 $L_{m2}$ )准确表征了各端口的饱和差异。为了明确上述 3 种模型的仿真差异, 有学者利用三种模型开展了励磁涌流测试, 结果表明: 当铁芯未饱和时, 3 种模型误差相近; 而当铁芯进入饱和段时, T 模型的误差高达 72.7%<sup>[12]</sup>,  $\Gamma$  模型的误差达到了 56%<sup>[11]</sup>, 而  $\pi$  模型为 10.9%<sup>[13]</sup>。由此说明, 物理意义明确的  $\pi$  模型具备更精确的端口饱和特性。此外, 研究短路特性时可忽略励磁支路, 得到图 1(d) 所示的一模型, 以简化电路结构。

上述经典电路模型因其结构简单和参数易获取的特性, 目前已被广泛应用<sup>[14]</sup>, 但是在应用至多绕组变压器时, 仍需进一步改进拓扑结构, 以获得更准确的表征。

1.1.2 负电感模型

负电感模型由 A. Boyajian<sup>[15]</sup>提出, 该模型通过多个未耦合的线性电感等效表征绕组间的耦合关系。以单相五绕组变压器为例<sup>[16]</sup>, 通过开展非标准短路试验获取各端口间的短路阻抗, 构建图 2(a) 所示的初始模型, 图中  $L_{s1} \sim L_{s10}$  分别表示非标准短路试验计算得到的端口间漏感, 再基于端口等效性简化为图 2(b) 所示的五绕组负电感模型(模型中至少有一个电感值为负), 图中  $L_{sn1} \sim L_{sn10}$  为等效计算得到的电感参数。由于负电感模型由各端口短路阻抗

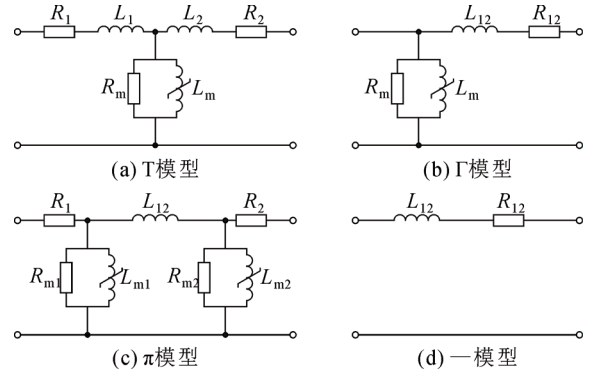
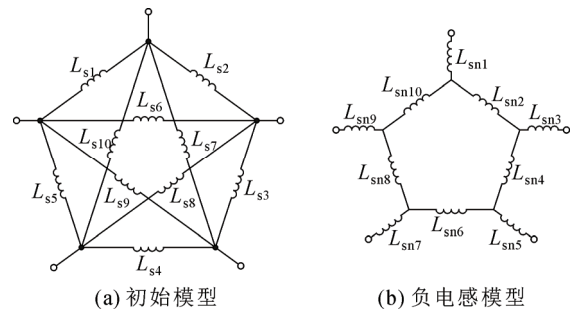


图 1 经典电路模型

Fig.1 Typical transformer models



(a) 初始模型

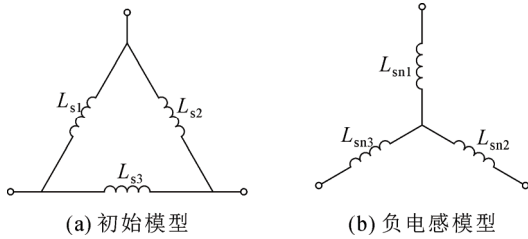
(b) 负电感模型

图 2 单相五绕组变压器负电感模型

Fig.2 Negative inductance model of a single-phase five-winding transformer

构建, 因此该模型具有准确的端口特性, 主要用于研究变压器的稳态特性。但是等效电路中的负值电感没有实际的物理意义, 并且负值电感可能导致瞬态仿真出现数值振荡的问题<sup>[17]</sup>。

在构建单相三绕组变压器的负电感模型时, 端口等效过程为三角形-星型变换, 变换过程如图 3 所示。为了拓展负电感模型在电磁暂态仿真软件中的应用, EMTP 理论指导书基于单相三绕组变压器的负电感模型构建了 STC (saturable transformer component) 模型<sup>[11]</sup>, 如图 4 所示, 图中  $R_n$  和  $L_n$  分别表示第  $n$  绕组的电阻和漏感。STC 模型将图 3(b) 的电感元件移至各个端口, 由非耦合的  $R$ - $L$  串联支路等效表征各绕组, 并在星型节点处并联非线性励磁支路, 以表征铁芯损耗和饱和特性。分别构建各绕组的 STC 模型, 并按照星-三角形连接即可得到三相变压器的 STC 模型<sup>[11]</sup>。由于 STC 模型是基于三绕组负电感模型构建的, 因此该模型无法用于三绕组以上的变压器建模, 并且该模型同样存在负值电感引起的数值振荡问题<sup>[18]</sup>。



(a) 初始模型 (b) 负电感模型

图3 单相三绕组变压器负电感模型

Fig.3 Negative inductance model of a single-phase three-winding transformer

### 1.1.3 UMEC 模型

UMEC 模型是一种基于拓扑的矩阵模型,其通过一组高维自互感矩阵表征变压器多绕组间的耦合关系<sup>[19]</sup>。以单相变压器为例<sup>[20]</sup>,UMEC 模型通过分析变压器的磁通回路,构建图 5 所示的磁路模型,图中  $F_1$  和  $F_2$  分别表示两绕组的磁动势,  $P_1$ — $P_9$  表示各磁路上的磁导,进而列写并求解磁通方程式(1),最后根据式(2)求解绕组间的自互感矩阵。式中  $\Phi$  为支路磁通,  $\theta$  为支路磁动势,  $L$  为支路电感,  $I$  为支路电流,  $P$  为支路磁导,该磁导可由铁芯的物理尺寸求取。同理,通过分析三相变压器的铁芯结构即可计算三相变压器的 UMEC 模型。UMEC 模型基于磁路结构计算,具有准确的耦合表征能力,并且,在 UMEC 模型各端口间添加励磁支路即可精确地模拟变压器非线性特性<sup>[21]</sup>。UMEC 模型在 PSCAD/EMTDC 中得到广泛应用,结合电感模块和激励等其他元件可直接用于变压器电磁暂态仿真<sup>[22]</sup>。然而,磁导的计算需要获取铁芯的物理参数,变压器精确的几何参数不易获取,这使得 UMEC 模型的应用具有一定的局限性<sup>[21]</sup>。

$$\Phi = P \cdot \theta \quad (1)$$

$$\Phi = L \cdot I \quad (2)$$

### 1.1.4 对偶模型

对偶模型<sup>[23]</sup>根据变压器实际物理结构,利用电磁对偶原理推导得到,其可以准确反映磁路结构和电路元件的映射关系。以单相层式变压器<sup>[17]</sup>为例,首先构建磁路模型,再根据对偶原理构建等效电路模型,该模型由绕组间气隙对应的线性电感( $L_{s12}$ 、 $L_{s23}$  和  $L_{sn,n-1}$  等)和铁芯对应的非线性电感( $L_{sm1}$  和  $L_{sm2}$ )构成,如图 6 所示,图中  $U_1$ — $U_n$  分别表示各端口电压。同理,三相变压器对偶模型<sup>[24]</sup>需要分析各相间的交链磁通,构建考虑各相绕组耦合关系的等效电路模型,较于单相对偶模型,三相相对偶模型需要额外考虑相间漏感元件,该漏磁通也是三相变

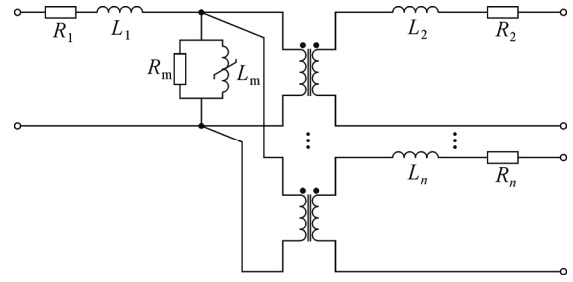


图4 STC 模型

Fig.4 Saturable transformer component

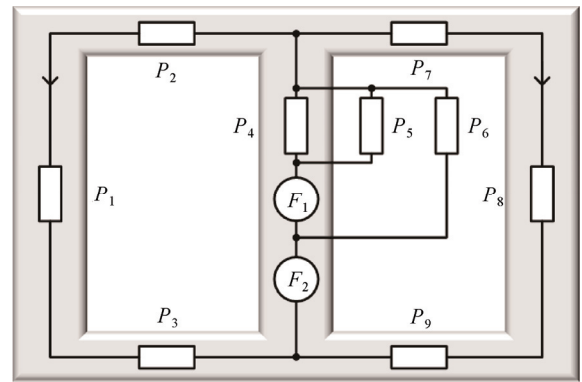


图5 单相双绕组变压器磁路模型

Fig.5 Magnetic circuit model of a single-phase double-winding transformer

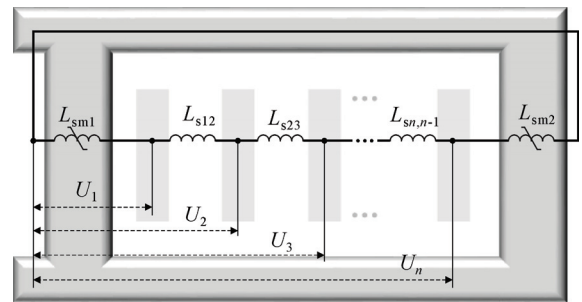


图6 单相变压器对偶模型

Fig.6 Dual model of a single-phase transformer

压器的零序路径表征<sup>[25]</sup>。

此外,有学者保留漏感的对称结构,采用双向对偶的方法得到了更准确的励磁连接节点,提高了对偶模型的端口精度<sup>[26]</sup>,该模型如图 7 所示,图中  $L_{Am}$ 、 $L_{Bm}$  和  $L_{Cm}$  表示三相芯柱对应的非线性电感,  $L_{ym1}$  和  $L_{ym2}$  表示铁轭对应的非线性电感,  $L_{An,n-1}$ 、 $L_{Bn,n-1}$  和  $L_{Cn,n-1}$  表示各相内绕组间的漏感,  $L_{AB}$  和  $L_{BC}$  表示相间绕组的漏感,  $L_{g1}$ — $L_{g5}$  表示油箱气隙的漏感。然而,对偶模型的漏磁表征不充分,端口误差随着端口间距增加而增大<sup>[16]</sup>。

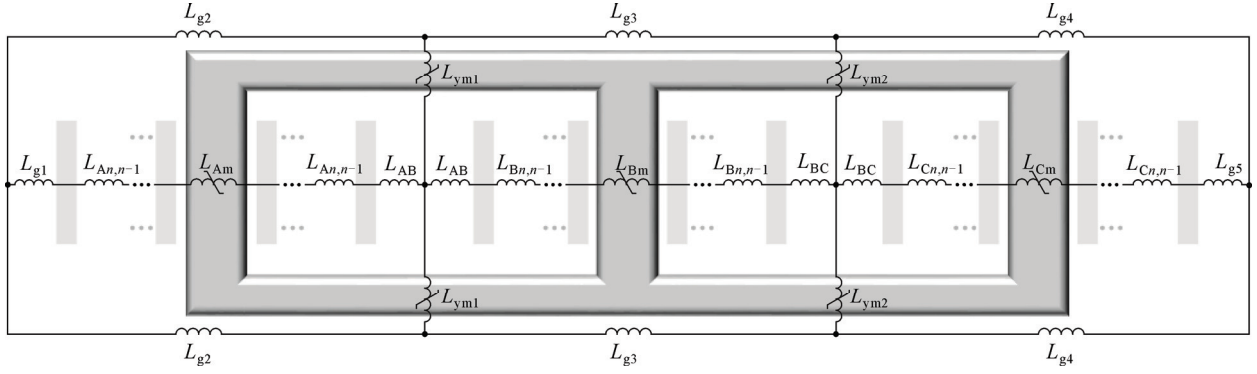


图 7 三相变压器对偶模型

Fig.7 Dual model of a three-phase transformer

### 1.1.5 TDM 模型

为了改善对偶模型的端口特性, 有学者提出了 TDM 模型<sup>[16]</sup>, 该模型基于对偶模型的电路拓扑, 以相互耦合的电感网络表示绕组间的漏感和磁耦合关系, 具有精确的端口特性。该模型的励磁支路 ( $L_{m1}$ — $L_{mn}$ ) 通过并联在各漏感连接点与公共节点之间的理想变压器端口处接入, 单相多绕组变压器的 TDM 模型如图 8 所示。绕组规则排列时, 通过标准短路阻抗端口试验得到模型参数; 绕组不规则排列时, 则基于标准短路阻抗端口试验与非标准短路导纳端口试验结果计算模型参数。TDM 模型统一了端口模型与电磁对偶模型, 所有的电路元件均具有明确的物理意义。

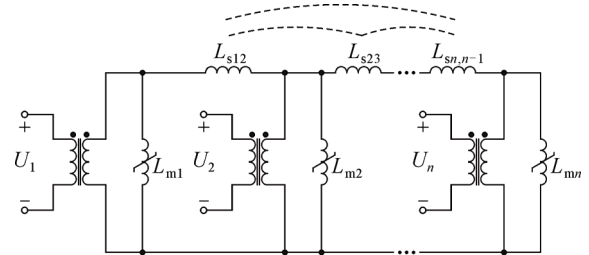


图 8 单相变压器 TDM 模型(省略互感符号)

Fig.8 TDM model of a single-phase transformer (mutual inductances are not presented)

$Z_s$  和  $Z_m$  为电感矩阵的对角矩阵和非对角矩阵。为了避免阻抗矩阵成为病态矩阵, 通常将其写成导纳形式:  $I = Y \cdot U$ , 式中  $Y$  表示导纳矩阵, 且该矩阵各元素可通过标准短路试验获取。

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

基于三相对偶模型的电路拓扑, 考虑包含相间漏感在内的所有漏感元件的耦合关系, 可以构建三相变压器 TDM 模型<sup>[27]</sup>, 该电路模型如图 9 所示, 图中  $U_{A1}$ — $U_{An}$ ,  $U_{B1}$ — $U_{Bn}$  和  $U_{C1}$ — $U_{Cn}$  表示三相绕组端口电压,  $L_{Am1}$ — $L_{Amn}$ ,  $L_{Bm1}$ — $L_{Bmn}$  和  $L_{Cm1}$ — $L_{Cmn}$  表示三相绕组对应的励磁电感,  $L_{sA12}$ — $L_{sAn, n-1}$ ,  $L_{sB12}$ — $L_{sBn, n-1}$  和  $L_{sC12}$ — $L_{sCn, n-1}$  表示各相内绕组间的漏感,  $L_{sAB}$  和  $L_{sBC}$  表示绕组相间的漏感。

### 1.1.6 BCTRAN 模型

BCTRAN 模型通过端口矩阵方程表征各端口间的电磁关系, 并利用一组高维短路阻抗矩阵描述各相绕组间的耦合特性, 其阻抗表达式为:  $U = Z \cdot I$ ; 暂态表达式为:  $u = R \cdot i + L(di/dt)$ , 其中  $R$  和  $L$  分别为电阻和电感矩阵,  $U$ 、 $u$  和  $I$ 、 $i$  分别为端口电压电流的稳态和暂态形式。此外, 将电感矩阵替换为三相电感矩阵, 即可将其应用于三相多绕组变压器的暂态分析, 如式(3)所示, 式中  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  和  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  分别为各相端口电压和电流,

传统 BCTRAN 模型可准确表征变压器的相间耦合及端口特性, 但无法表征铁芯的非线性特性<sup>[28]</sup>。为了改进 BCTRAN 模型对铁芯饱和特性及磁滞效应的表征, 有学者在该模型的端口处并联非线性铁芯模块, 构建了混合 BCTRAN 模型<sup>[29]</sup>(如图 10 所示), 改进后的模型可以准确的仿真 1 kHz 及以下的暂态特性。但是, 上述改进方法无法准确表征各端口的饱和差异。为了解决这一缺点, 文献<sup>[30]</sup>在 BCTRAN 模型的所有端口并联了非线性励磁支路, 得到了图 11 所示的改进 BCTRAN 模型, 图中  $R_i$ 、 $R_{mi}$  和  $L_{mi}$  分别表示第  $i$  个端口的绕组电阻、铁芯损耗电阻和励磁电感。改进后的 BCTRAN 模型不仅增加了非线性特性, 还准确表征了各端口的饱和差异, 模型具备端口可逆性。

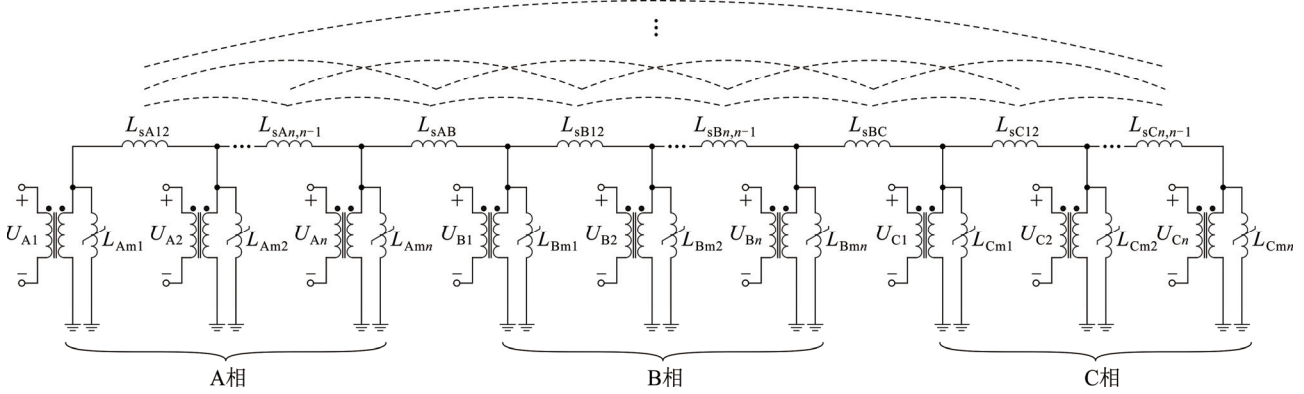


图9 三相变压器 TDM 模型(省略互感符号)

Fig.9 TDM model of a three-phase transformer (mutual inductances are not presented)

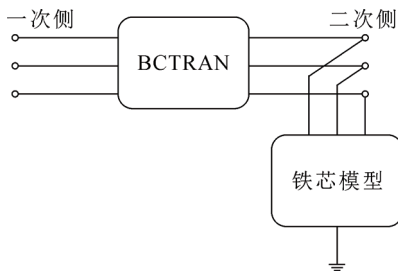


图10 混合 BCTRAN 模型

Fig.10 Hybrid BCTRAN model

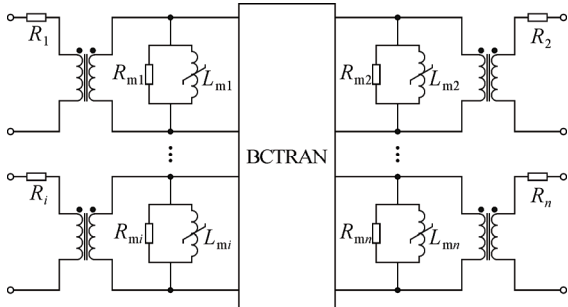


图11 改进 BCTRAN 模型

Fig.11 Modified BCTRAN model

综上所述, 变压器的低频电路模型可根据拓扑结构进行建模, 或采用解析方法进行表征, 不同低频电路模型具有其独特优势。为有效的选择仿真模型, 提高分析效率, 现将上述低频电路模型的建模特点、局限性与应用范围总结如表 1 所示。

可见, 现有研究逐步完善了变压器低频模型的代表形式, 可准确描述变压器的电磁映射关系。模型漏感参数可以通过端口试验直接获取, 但是铁芯特性参数获取困难, 铁芯非线性参数尤其是饱和时的励磁特性参数获取困难。此外, 实际变压器需要和分接开关联合运行, 两者间的电磁交互关系也是暂态研究的关键。因此, 本文 1.2 节、1.3 节将分别

就非线性模型及分接开关模型进行阐述。

## 1.2 铁芯非线性模型

变压器类设备在低频激励下可能呈现出非线性特性, 主要包括: 磁滞特性和饱和特性, 因此, 精确的变压器电磁暂态模型应完整地表征变压器的磁滞特性和饱和特性, 才可准确分析变压器在多场景复杂工况下的低频电磁暂态过程。

在现有变压器电磁暂态模型中, 变压器铁芯非线性特性通常以非线性电感的形式表征, 单值磁化曲线能够表征出铁芯的饱和特性, 但难以精确表征磁滞特性。针对精准磁滞模型的构建, 国内外学者开展了大量研究<sup>[31]</sup>。表征磁滞特性的主要方法有曲线拟合和基于物理场建模。曲线拟合的方法多基于数学表达式处理技术实现表达式拟合, 如 Preisach 模型<sup>[32]</sup>。另一类常见的磁滞模型构建思路是基于物理场建模, 如 Jiles-Atherton 模型<sup>[33]</sup>。Jiles-Atherton 模型可进一步考虑频率动态损耗、方向性或各向异性行为、谐波引起的附加损耗以及其他复杂因素, 从而增强了其磁滞现象综合建模的能力<sup>[33]</sup>。此外, 有学者将经典的磁滞模型与机器学习技术融合, 如物理信息神经网络、磁化机制启发神经网络等, 也有模型<sup>[34]</sup>结合了数据驱动和物理驱动的特性, 广泛应用在状态不确定和输出存在干扰的应用场景中。

变压器铁芯的基本磁化曲线如图 12 所示, 变压器工作点一般控制在不超过膝点区域(A 点), 此时励磁电感可以等效为常数, 计算方法主要有磁链法和能量法两种<sup>[35]</sup>。当变压器遭受宽幅值或次同步电磁激励时, 如励磁涌流、直流偏磁、低频振荡等, 变压器工作点会超过膝点, 此时变压器进入饱和甚至深度饱和状态, 变压器的饱和特性呈强非线性<sup>[36]</sup>, 导致变压器阻抗呈现显著变化。针对饱和和非线性特性,

表 1 低频电路模型总结

Table 1 Summary of low-frequency circuit models

模型	模型特点	局限性	应用范围
经典电路模型	T 模型	两漏感间并联励磁支路建模	漏感分为两部分, 无物理意义
	Γ 模型	单个漏感和励磁支路构成	励磁支路连接错误会显著增大误差
	π 模型	准确的漏感和励磁特性表征	需计算多条励磁支路的参数
	—模型	忽略励磁支路, 仅保留绕组间漏感	忽略铁芯励磁特性
负电感模型和 STC 模型	①基于短路阻抗建模, 具有准确的端口特性 ②基于三绕组模型构建了 STC 模型, 在星型节点接入励磁支路, 可以表征铁芯特征	①部分电感为负值, 无物理意义 ②STC 不适用于三绕组以上变压器 ③负值电感可能导致数值振荡问题 ④当铁芯饱和时, STC 端口可逆性较差	适用于多绕组变压器的短路故障仿真, 但可能出现数值振荡问题; STC 模型经合理励磁参数配置可用于励磁涌流等暂态仿真
UMEC 模型	①以自互感矩阵表征各绕组间的耦合关系 ②端口特性准确 ③可通过端口间并联励磁支路表征铁芯特征	①对变压器几何参数依赖性强 ②多绕组变压器结构磁路分析复杂	
对偶模型	①电磁对偶建模, 具有准确的电磁映射关系 ②相邻端口具有准确的端口特性 ③励磁支路基于对偶原理构建	①未考虑漏感间的耦合关系, 非相邻的端口特性误差偏大 ②多绕组变压器对偶建模参数测量工作量较大	适用于多绕组变压器的短路故障仿真, 添加励磁支路后的完整模型可用于励磁涌流等铁芯特性研究
TDM 模型	①基于对偶拓扑建模, 电磁映射准确 ②以耦合漏感准确表征各端口间的耦合关系 ③端口特性准确, 且满足端口可逆性 ④各端口并联励磁支路可表征铁芯特性	首末绕组空间距离相近时误差增大	
BCTran 模型	①以短路阻抗矩阵表征各绕组间的耦合关系 ②端口特性准确 ③可通过端口间并联励磁支路表征铁芯特征	未考虑铁芯和绕组拓扑结构差异	

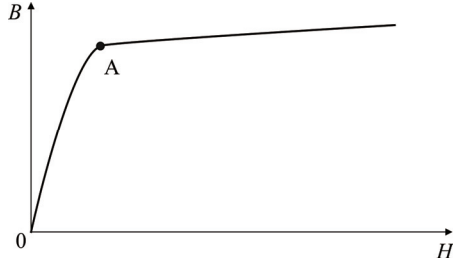


图 12 变压器铁芯的基本磁化曲线

Fig. 12 Basic magnetizing curve of transformer core

主要处理方法有求解非线性方程组法和线性拟合等效法两种。求解非线性方程组法通过使用算法或者求解器直接对非线性方程组求解, 如信任域反射算法<sup>[37]</sup>、模拟退火算法<sup>[26]</sup>、多项式拟合<sup>[38]</sup>等。另一种常见的处理方法是采用线性拟合方法, 将非线性等效进行多段线性化表征<sup>[39]</sup>, 并给予补偿<sup>[40]</sup>, 实现非线性特性的线性化拟合, 是主流电磁暂态分析软件常用的方法。此外, 有学者提出了通过分析变压器其他工作特性, 如铁芯振动程度<sup>[41]</sup>、交流分量磁通量<sup>[42]</sup>、实时感应电压<sup>[41]</sup>来表征铁芯饱和度。为了同时精确表征变压器深度饱和特性和动态磁滞特性<sup>[43-44]</sup>, 有学者构建了计及铁芯动态磁滞与深度饱和的变压器电磁对偶模型, 如图 13 所示。该模型采用 Preisach

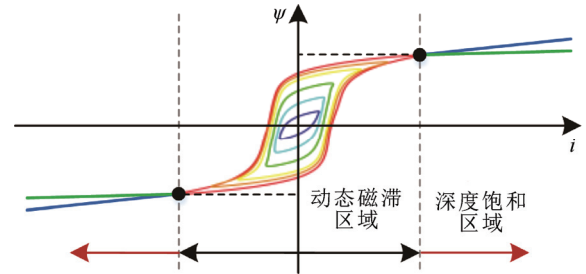


图 13 考虑铁芯动态磁滞特性和深度饱和特性的复合型励磁特性曲线

Fig. 13 Composite magnetizing curve considering dynamic hysteresis and deep saturation

分布函数辨识方法和深度饱和单值曲线表征模型励磁支路的方法, 准确表征了变压器在电流幅值较高的过激励下的电磁暂态特性<sup>[45]</sup>。

精准的励磁特性曲线是变压器低频暂态模型准确构建的关键, 变压器铁芯非线性特性的参数获取方法主要分为有限元法和端口测试法。有限元法是一种分析变压器特性的常用方法, 其求解效率受到计算机处理器性能、物理场的耦合程度、模型对象的结构复杂程度、网格的划分密度等条件制约, 求解容易出现仿真时间过长的问题, 另外有限元仿

真需要变压器高精度的尺寸和材料数据,受到人工误差和商业机密的限制<sup>[46]</sup>。

与有限元方法相比,端口试验法在现场测试中被广泛采用,具有很高的适用性。端口试验法通过改变激励条件,并调整电压使得变压器在多种工作状态下运行并完成参数测试,试验过程中利用采集的端口电压与电流波形数据计算出励磁参数。按照激励条件,端口试验法可分为交流激励源测试法、基于非理想整流源的增量电感辨识方法、基于直流叠加交流电压源的深度饱和和特性测量方法3种。

1) 交流激励源测试法主要采用工频正弦电压激励变压器,在不同幅值的电压激励下获取不同励磁状态的磁滞回线簇<sup>[47]</sup>,连接不同电压下测得磁滞回线的顶点,可得到分段线性的磁链-电流( $\lambda-i$ )曲线<sup>[48]</sup>。受试验电源容量限制,大型变压器的最大试验激励电压通常设置为1.1倍的额定电压,此时铁芯饱和程度尚不深,难以获得深度饱和状态下的铁芯励磁数据<sup>[49]</sup>。

2) 基于非理想整流源的增量电感辨识方法采用一种带谐波的直流电源为激励源,其直流分量用来激励变压器进入深度饱和状态,谐波分量用于提取该变压器饱和状态下的增量电感<sup>[50]</sup>,如图14所示。图中, $E_{1ac}$ 和 $E_{2ac}$ 均为交流电压源, $A_{ac}$ 为交流电流源,NIR(non-Ideal rectifier)为非理想整流器。该方法难以对非理想整流源输出的交直流电压分量进行独立控制,具有一定试验难度<sup>[51]</sup>。

3) 有学者提出了一种基于直流叠加交流电压源的深度饱和和特性测量方法,该方法与基于非理想整流源的增量电感辨识方法原理相同,但交直流分量可以独立控制,试验灵活性更强。如图15所示,可用独立的交流电压与直流电压( $E_{dc}$ )完成测试,交直流分量的幅值可任意调整<sup>[25,52]</sup>。

另外,在一些特定场合和工作条件限制下,有学者针对变压器的深度饱和和特性提出了其他测试方法,如通过测量励磁涌流的电压与电流的波形数据来预估深度饱和曲线<sup>[31]</sup>,通过定幅值变频方波激励获取变压器磁滞回线簇及励磁曲线<sup>[53]</sup>。

### 1.3 有载分接开关模型

有载分接开关直接与变压器绕组串联,用于调整变压器的变比,其切换过程会直接影响变压器的电磁暂态特性。有载分接开关的基本结构主要有切换开关、分接选择器、极性选择器,如图16所示,其中,LV1—LV3代表低压绕组,HV代表高压绕组,

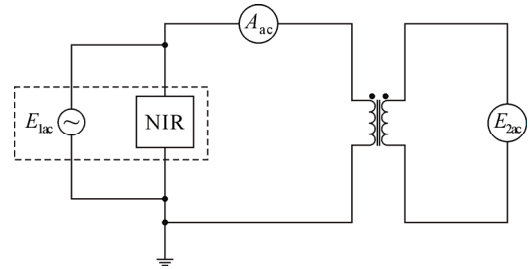


图14 谐波加直流电源激励的饱和参数测试电路

Fig.14 Saturation parameter test circuit using DC power supply and harmonic excitation

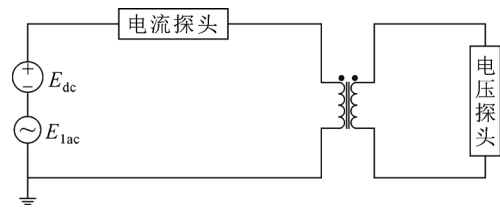


图15 基于交直流独立电源的饱和参数测试电路

Fig.15 Saturation parameter test circuit using independent AC and DC power supplies

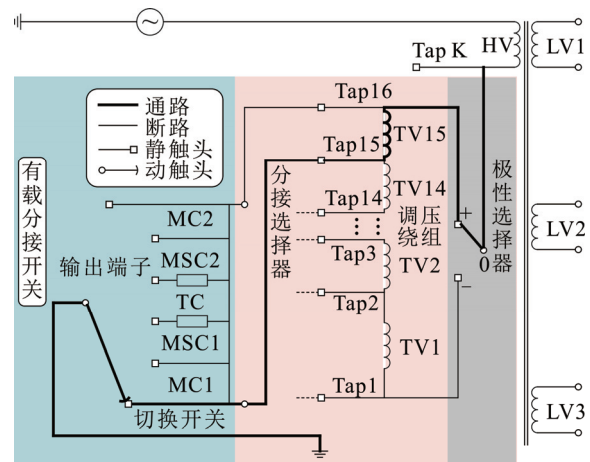


图16 有载分接开关电气结构

Fig.16 Electrical structure of OLTC

TV1—TV15代表调压绕组,Tap K和Tap1—Tap16代表分接档位,MC1和MC2代表切换开关主触头,MSC1和MSC2代表切换开关辅助触头,TC代表过渡触头。分接选择器连接调压绕组与切换开关实现档位选择;切换开关承担转移负载电流任务;极性选择器在不增加变压器绕组匝数情况下扩大调压范围<sup>[54-56]</sup>。

国内外学者以电阻式、真空式有载分接开关(on-load tap changer, OLTC)为研究对象,建立了单级调压有载分接开关模型、多级调压有载分接开关

模型、全档位有载分接开关电路-控制模型。

### 1.3.1 单级调压有载分接开关模型

单级调压 OLTC 模型通过手动选择并连接特定分接档位实现与变压器的耦合建模。时控开关控制法可基于不同切换拓扑与时序构建单级调压 OLTC 模型<sup>[57-59]</sup>, 进一步考虑结构件分布参数和触头电弧特性影响, 可提高暂态分析精度<sup>[8,60-62]</sup>。单级调压 OLTC 模型控制简单, 仅能精准表征单个分接档位切换暂态特性。

### 1.3.2 多级调压有载分接开关模型

多级调压 OLTC 模型通过改变变比参数、短路阻抗等实现与变压器的耦合建模。基于逻辑门控制可构建多级调压 OLTC 模型构建方法, 能够获取切换过程暂态特性, 但需要采取双冗余度设计, 且分接档位增加会导致元件数和控制复杂程度呈指数上升<sup>[63-64]</sup>, 扩展性受限。

为了实现更多档位调压能力的表征, 有研究提出通过改变变压器模型变比参数的有载调压变压器模型<sup>[65]</sup>, 如图 17 所示。该模型能够实现超过 3 个分接档位的有载调压目标, 且可以应用于 PSCAD/EMTDC、Matlab Simulink 等电磁暂态分析软件; 也可通过设置额定档位与实际档位短路阻抗标么值之比, 改进基于短路阻抗的有载调压变压器模型<sup>[66-69]</sup>, 提升极限档位仿真精度。然而, 上述模型缺少物理接口, 仅能表征端口特性, 无法获取分接开关切换过程内部组件电压电流应力特性, 不适用于直流系统启动、OLTC 故障<sup>[70]</sup>等场景下的暂态特性分析。此外, 上述模型均无法研究极性转换过程的暂态特性, 尽管有学者建立了极性选择器等效电路模型<sup>[71]</sup>, 能够获取极性选择器正负极间的暂态特性, 但未能实现与切换开关的协同控制, 难以仿真极性转换的完整物理过程。

### 1.3.3 全档位有载分接开关电路-控制模型

文献<sup>[72]</sup>通过“电路-控制”融合的策略实现与变压器模型的耦合建模, 实现了全部档位切换暂态特性表征的分接开关模型构建, 如图 18 所示。

上述方法能够基于不同的 OLTC 拓扑构建切换开关与极性选择器的等效电路模型。通过创建切换开关阵列实现 OLTC 与变压器调压绕组的物理耦合以及相邻分接档位互联。在极性选择器档位与分接选择器极限档位之间配备两个切换开关电路模型, 实现极性选择器与切换开关的协同控制, 完整模拟极性转换物理过程。

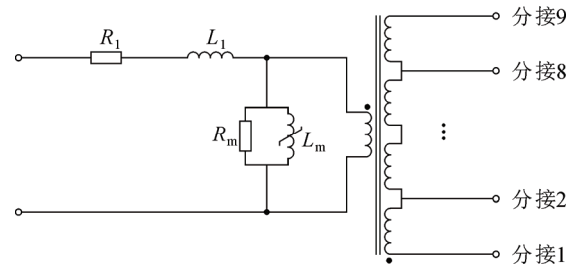


图 17 有载调压变压器模型

Fig.17 The tap-changing transformer model

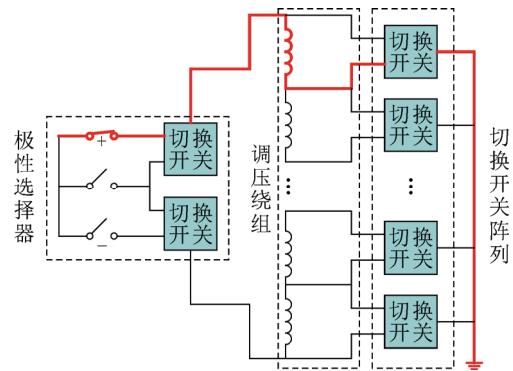


图 18 全档位有载分接开关电路模型

Fig.18 Circuit model of full-range OLTC

此外, 该方法能够根据不同切换时序建立切换开关触头时序信号生成与控制信号分配的分层立体控制系统。控制信号生成模块接收系统调压信号后根据设定的切换时序完成切换开关阵列所有触头控制信号的生成, 具备周期闭锁、边沿检测、信号复位等功能, 实现切换开关各触头通断的有序动作与精准控制。通过设置分接档位编号与触头编号的映射关系, 建立具备分接档位辨识、升降档位调节、档位闭锁与限位等功能控制信号分配系统, 完成每次调压过程下全档位 OLTC 模型所有触头控制信号的触发和分配, 实现有载分接开关电路模型与控制系统的融合。

基于文献<sup>[72]</sup>提出的方法建立的全档位有载分接开关模型能够完整表征任意多个分接档位的单级调压、循环调压(正反调)、极性转换、档位限位等与实际工程一致的调压能力(实际工程中 OLTC 的档位数目一般为 9~35 档), 实现档位切换过程内部组件上的电磁应力特性, 并可以与外部交直流系统联动进行系统级联合仿真。

## 2 变压器高频电磁暂态模型

根据建模方法的不同, 现有变压器高频电磁暂

态模型可分为黑盒模型和白盒模型(灰盒模型介于二者之间, 本文不再赘述)。其中, 黑盒模型主要用于表征变压器的端口电压、电流传输特性, 建模时无需变压器内部详细的结构参数。而白盒模型基于变压器设备结构数据和电磁参数, 构建具有物理意义的等效电路模型, 常用于表征变压器内部电磁暂态特性。

## 2.1 高频黑盒模型

变压器高频黑盒模型的建模方法是将变压器等效为二端口网络(见图 19), 通过端口测试获取变压器端口参数矩阵, 例如端口导纳参数矩阵与端口阻抗参数矩阵, 随后采用有理式拟合与网络综合法, 构建得到变压器高频黑盒模型, 有效频带可达 10 MHz<sup>[73]</sup>。变压器高频黑盒模型具有参数获取简单、表征频带宽和通用性强等优点, 能够准确表征变压器端口在高频段的响应特性。

目前, 常用的黑盒模型参数测量方法有: 脉冲响应法<sup>[74]</sup>和扫频法<sup>[75]</sup>。脉冲响应法是在变压器一次侧施加一个包含高、低频分量的脉冲信号, 同时记录输入和输出响应。为了减小噪声与测量误差等因素产生的影响, 通过快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)提取基频电压信号  $U_i(s)$  和  $U_o(s)$ , 进而计算得到获变压器的电压传递函数  $A(s)$ :

$$A(s) = U_o(s) / U_i(s) \quad (4)$$

脉冲响应法能够确保获取的变压器端口特性与实际特性具有高度的一致性。为确保具有较宽的有效测量频带, 脉冲响应法要求脉冲发生器能够输出频带足够宽的脉冲信号<sup>[76]</sup>。此外, 在应用脉冲响应法测量特高压换流变压器等高电压、大尺寸设备的高频特性时, 设备入口端的电容较大, 可能导致脉冲信号的幅值衰减和频带缩小, 并且长距离测量电缆也会引入测量误差, 通常需要定制脉冲发生器<sup>[77]</sup>并补偿测量电缆的影响<sup>[78]</sup>。

扫频法按照设定的频率范围及频点数量逐一扫描各个频点: 向变压器输入某一频率下的正弦激励信号, 响应电压与激励电压之比即为变压器在该频率下的电压传递特性。与脉冲响应法相比, 扫频法具有信噪比高、可重复性等优点<sup>[79]</sup>; 但是, 扫频法通常采用各次谐波作为激励信号, 这要求谐波源须具备高电压、宽频带, 制造成本较高<sup>[80]</sup>。为此, 有学者提出了散射参数法, 该方法利用成熟的商业测量设备(如矢量网络分析仪)直接测量变压器端口散射参数( $S$  参数)矩阵, 进而通过数学运算推导导纳

参数( $Y$  参数)矩阵, 最终获取变压器端口特性。散射参数法具有操作步骤简单和测量成本低等优点, 然而该方法在测量数百 Hz 的低频段时, 可能出现测量不准的问题<sup>[81]</sup>; 同时, 该方法激励电压幅值较低, 不适用于大变比变压器, 且测量结果是否能够代替额定电压下的频响特性仍然存在争议。

黑盒模型的建模难点在于等效电路的实现方法。目前较为常见的等效电路实现方法是电路网络综合法<sup>[82]</sup>, 如 Darlington 电路<sup>[83]</sup>、Foster 电路<sup>[84]</sup>、Cauer 电路<sup>[85]</sup>、Brune 网络<sup>[86]</sup>和 T 或  $\pi$  型等效电路。电路网络综合法是基于变压器端口参数矩阵的有理函数表达式, 通过电路原理和拉氏变换等方法实现常数项、线性项等数学表达式与特定电路结构的转换, 具有原理简单、易于实现的优点。如图 20 所示为基于变压器  $Y$  参数矩阵( $Y_A$ 、 $Y_B$ 、 $Y_C$ )推导的变压器  $\pi$  型等效黑盒模型。

在应用电路网络综合法时, 存在电路网络的严格无源性难以保证、等效电路网络的复杂度较高和计算量过大的问题<sup>[87]</sup>。有学者提出了改进的矢量匹配法<sup>[88]</sup>, 实现了变压器的端口无源性, 但该方法无法保证等效电路中各元件的无源性; 文献<sup>[89]</sup>通过将有源项合并, 然后对合项进行无源优化, 最后进行分项优化, 实现了电路网络的严格无源, 但这会导致模型在某些频段内的仿真精度降低<sup>[90]</sup>。

另一方面, 为了保证函数拟合的准确性, 通常需要选取更高的拟合阶数。然而, 当拟合阶数较高时, 等效电路网络的复杂度将显著增加。有学者采用 Pade 逼近算法对矢量匹配法拟合得到的变压器绕组高阶电压传输函数进行降阶处理, 进而降低建模难度<sup>[91]</sup>。但是, Pade 逼近算法同样无法保证系统的无源性<sup>[92]</sup>, 且可能由稳定的原始模型生成不稳定的降阶模型<sup>[93]</sup>。



图 19 二端口网络

Fig.19 Two-port network

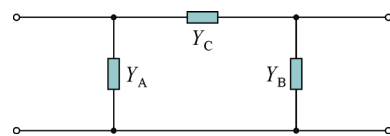


图 20 变压器  $\pi$  型等效黑盒模型

Fig.20 The  $\pi$ -type equivalent black-box model of transformer

综上所述, 变压器高频黑盒模型凭借其端口等价特性, 无需依赖变压器的详细结构与设计参数, 便能够较为精确的表征变压器的高频传递特性。然而, 现有黑盒建模方法存在需要无源性修正和拟合阶数过高等难题。

## 2.2 高频白盒模型

变压器白盒模型根据设备几何结构与材料特性, 将电磁场分布转化为电路分布, 构建的电路拓扑与实际变压器几何空间位置基本对应, 具备实际的物理参数意义, 能够反映变压器内部电磁暂态特性。现有的白盒模型主要包括分布参数模型和集总参数模型。

### 2.2.1 分布参数模型

分布参数模型包括均匀传输线模型 (steady-state transmission line, STL) 和多导体传输线模型 (multi-conductor transmission line, MTL)<sup>[94-95]</sup>。STL 模型将整个绕组看作是均匀传输线, 未考虑实际绕组的结构差异, 存在较大误差。因此, MTL 模型成为最常用的分布参数电路模型, 该模型以线匝为计算单位, 将每根线匝视作一条传输线模型。如图 21 所示, 相邻传输线首尾连接保证电压电流的连续分布, MTL 模型充分考虑了每条传输线之间的电磁耦合关系。MTL 模型的参数系数矩阵通过线圈几何结构与电气参数获得, 该矩阵准确反映了线圈内部匝间电压、电流的分布特性, 可以充分考虑不同线圈绕制方式之间的自互感与电容矩阵, 使其被广泛应用于特快速暂态过电压等高频暂态问题的研究。当应用于变压器线匝长度不同建模时, 可采用平均匝长代替实际匝长<sup>[96]</sup>, 在保证波阻抗和传输时间不变情况下进行线长和传输速度之间的等效变换。

有学者提出将单导体模型与多导体模型相结合, 并等效为传输线的变压器建模方法, 该模型能准确计算绕组每匝单元的电压分布, 但由于忽略了绕组间互感, 使其未得到广泛应用<sup>[97]</sup>; 进一步研究在此基础上提出了改进的变压器传输线等效电路模型, 将线匝视为最小单元, 充分考虑绕组线匝的绕制方式, 对绕组前端采用常规建模方法, 其他绕组部分采用等效阻抗建模方法, 降低了模型的阶数, 极大减少了计算量, 适用于大型变压器的绕组暂态过电压分析<sup>[75]</sup>。

但对于大型变压器, 其单线圈的内外线匝最大长度差可达到 20%<sup>[96]</sup>, 导致难以建立 MTL 系数矩

阵, 并且多线匝 MTL 模型方程规模较大, 对计算资源要求较高。

### 2.2.2 集总参数模型

集总参数模型是基于变压器的行为特性建立的, 用特定的电路元件来表征变压器的端口或内部特性。根据变压器行为特性表征程度通常分为两种, 表达端口特性且含电容参数的变压器  $\pi$  型等值电路模型, 以及能够表达变压器内部复杂物理结构与电磁特性的集总参数等值电路模型。

#### 1) 含电容参数的变压器 $\pi$ 型等值电路模型

该类模型从整体出发将变压器作为一个多端口网络, 建立聚焦于绕组层面的集总参数模型<sup>[98]</sup>。如果将变压器的一次和二次绕组分别看作输入和输出端, 则双绕组变压器可以看作一个双端口网络。含电容参数的变压器  $\pi$  型等值电路模型是一种典型的双端口网络, 该模型在经典变压器电路模型的基础上, 添加绕组间杂散电容<sup>[99]</sup>、匝间电容<sup>[100]</sup>、对地电容<sup>[101]</sup>等元件, 进而建立图 22 所示的三电容  $\pi$  型等效电路模型。图中,  $C_{12}$  表示绕组间电容,  $C_{1s}$  和  $C_{2s}$  表示匝间电容。该模型考虑了变压器的绕组传递过电压, 被广泛应用于高频下的变压器系统分析与电路仿真<sup>[102]</sup>。

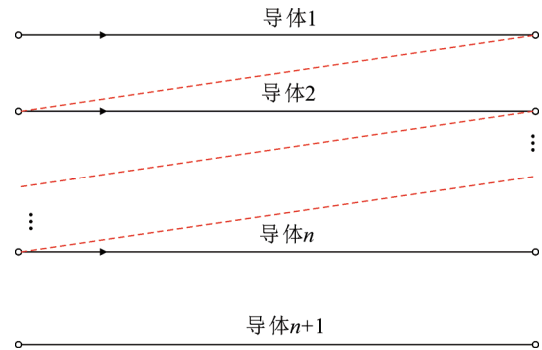


图 21 变压器绕组的多导体传输线模型

Fig.21 Multi-conductor transmission line model of a transformer winding

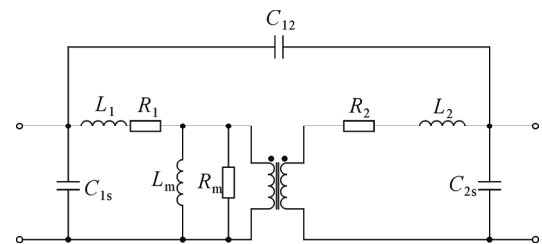


图 22 变压器三电容等效电路模型

Fig.22 Equivalent circuit model of a transformer with three capacitors

有学者在三电容等效电路模型的基础上，考虑了两侧绕组的对地电容( $C_{10}$  和  $C_{20}$ )，构建了五电容等效电路模型。如图 23 所示，五电容等效电路模型通过五个电容参数表征高频下变压器的电容效应，使其适用于更高的频段<sup>[103]</sup>。

有学者考虑了高频下流经一、二次绕组间寄生电容的泄漏电流，从而将变压器看作一个三端口网络，并基于此提出了含 6 个电容参数的变压器宽频模型<sup>[104]</sup>。进一步的研究聚焦于变压器绕组间的电容耦合，通过静电方程推导，完善了 6 电容表征模型的数学基础，并将建模方法推广到多绕组变压器<sup>[105]</sup>。文献<sup>[106]</sup>针对应用于特高压直流换流站的换流变压器，提出了含有 8 个电容参数的电路模型，该模型考虑了变压器的绕组对地(换流变压器铁芯和外壳均接地)电容。

此类模型只适用于静电传递，将电磁传递部分采用理想化建模，很难完全反映变压器内部的耦合特性。

2) 集总参数等值电路模型

该类模型从变压器内部各匝线圈间的电磁耦合出发，将电阻、电感、电容参数与绕组每一匝(或段)关联起来，建立反映变压器暂态特性的精细模型。此类模型具有明确的物理意义，能够反映变压器内部的电磁耦合机理，且适用于较高频段，被广泛应用于变压器的电磁暂态研究<sup>[107]</sup>。

集总参数模型采用单元等值电路表征分割单元的电磁特性，图 24 为单线圈的集总参数等值电路模型，其每段参数根据线圈结构求解，图中  $L$ 、 $C$  和  $C_g$  分别表示单线圈的电感、电容和对地电容。单绕组集总参数模型适用于定性分析，是最广泛应用的集总参数模型，适用于频率响应法对线圈形变进行频响分析，该模型主要用于单线圈问题的分析。图 25 为多绕组线圈的等值电路，通过多个单线圈集总参数模型并联表征内外层绕组关系，不同绕组单元间通过电容和电感相连，相邻线圈饼间则通过电容连接，该模型主要用于多绕组设备的饼间暂态分析<sup>[107]</sup>。

根据适用频率范围，可以对绕组选择不同剖分方式，剖分精度越细，适用范围越广。图 26 为以线饼作单元的剖分方式，图中  $R$  为单个线饼的电阻， $C_{teq}$  为单个线饼的匝间电容， $C_p$  为饼间电容，该方法具有较快的计算效率。图 27 为以线匝作单元的剖分方式，图中  $C_{t1}—C_{tn}$  为匝间电容， $R_{t1}—R_{tn}$  和

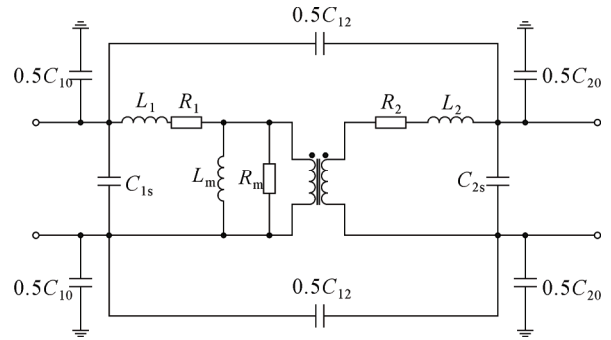


图 23 变压器五电容等效电路模型

Fig.23 Equivalent circuit model of a transformer with five capacitors

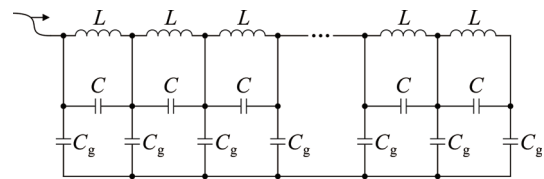


图 24 单线圈集总参数等值电路

Fig.24 Lumped parameter equivalent circuit of a single winding

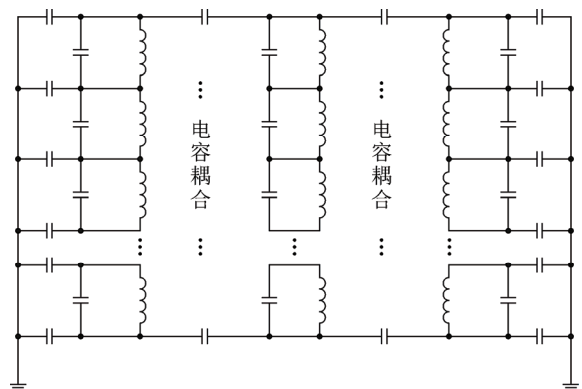


图 25 多绕组线圈等值电路

Fig.25 Equivalent circuit of multiple windings

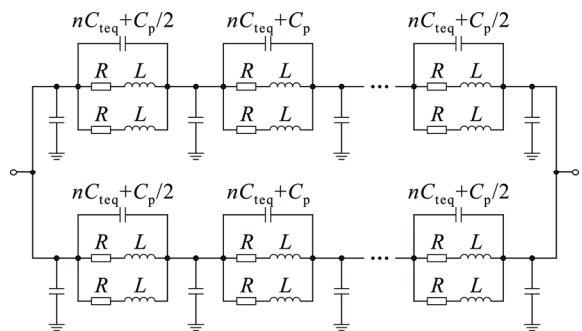


图 26 以线饼为单元的变压器宽频等效电路模型

Fig.26 Wideband equivalent circuit model of whole reactor with coil as unit

$L_{t1}—L_{tn}$  分别为每个线匝的电阻和电感, 该方法可以反映 3~4 MHz 的响应特性, 但当划分  $N$  匝线圈时, 需要求解  $N(N-1)/2$  次自互感参数, 所以该方法的参数提取和瞬态电压计算将消耗大量计算资源, 因此, 匝级模型只适用于小容量变压器<sup>[108]</sup>。

此外, 还可将两种模型进行混合建模<sup>[108]</sup>, 基于高频侵入波集中在线圈端部的特性, 可将端部线并以线匝精度剖分, 其余部分进行饼级剖分。混合建模的方法可以同时兼顾计算效率和仿真精度。然而, 当剖分单元匝数差距较大时, 容易出现病态矩阵, 使得模型求解困难。

### 3) 改进的集总参数电路模型

改进的集总参数电路模型通过将 MTL 模型的  $\pi$  型等值电路与集总参数的  $\pi$  型等值电路进行统一等效, 如图 28 所示进行线性电路等效建模<sup>[96]</sup>, 图中  $C_{tp0}$ ,  $C_{tp}$  和  $L_{tp}$  分别为集总参数计算得到的单位长度线圈对地电容、线圈电容和电感。 $k$  为新型集总参数电路的近似系数, 其与频率范围相关。

将集总参数的系数矩阵分配到等值电路的传输线上, 通过相模转换矩阵进行等效求解, 得到端口电压电流的分布关系。仿真<sup>[96]</sup>对比了 100 kHz 到 4 MHz 宽频范围内的改进集总参数电路模型与 MTL 模型的传递函数幅频特性, 结果表明, 改进的集总参数电路模型显著提升了传统模型的适用频率范围, 并使得高频段误差显著降低。传统的 RLC 集总参数电路适用频率通常不高于 1 MHz, 而以线匝为单元的集总参数等值电路适用频率范围可以达到 4 MHz。也有学者提出了改进变压器绕组宽带等效电路模型, 采用有限元法得到了改进模型中的电感、电容和电阻参数矩阵, 通过参数矩阵表征频变涡流效应, 实现了对于瞬态电位的求解, 提高了模型频率范围<sup>[109]</sup>。

此外, 还有将集总参数电路和分布参数电路相结合的混合电路模型<sup>[110]</sup>, 针对关注的暂态过程进行具体建模, 该方法存在两个主要问题: 不同模型电路之间的电磁耦合关系难以准确表征, 以及不同电路模型参数的数量级差别较大导致的病态矩阵。现有集总与分布模型的适用频率都在 10 kHz 以上, 且将铁芯等效为开路, 忽略了铁芯在中低频段的非线性特性与绕组的涡流效应, 缺少对全频段范围的宽频准确表征<sup>[111]</sup>。

综上, 现有的变压器高频白盒模型建模方法、优势、局限性以及应用范围总结如表 2 所示。

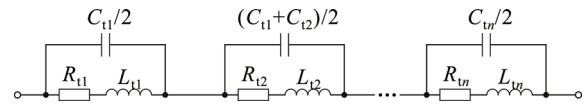


图 27 以线匝为单元的单个线圈宽频等效电路模型  
Fig.27 Wideband equivalent circuit model of single coil with turn as unit

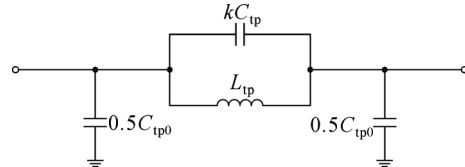


图 28 新型集总参数电路的二端口电路模型  
Fig.28 Two-port circuit model of the new lumped parameter circuit

表 2 变压器高频白盒模型

Table 2 High-frequency white-box model of transformers				
模型	优势	局限性	共性问题	应用范围
分布参数模型	①考虑电磁波沿线传播过程, 能够准确获取线圈内高频暂态下电压、电流分布; ②参数矩阵直接计算, 没有适用频率限制	①大型线圈内外径差大, 难以构建系数矩阵, 线匝单元求解困难; ②节点矩阵求解, 适用于定性分析	①均需要变压器详细的结构	特快速暂态过电压等高频暂态问题
集总参数模型	①等值电路状态方程求解线圈电压分布; ②等效电路模型物理意义明确, 通用性强、适用范围广	①多线圈模型耦合复杂, 难以表征; ②剖分单元匝数差大时, 容易出现病态矩阵, 难以求解	和尺寸参数;	10 kHz~1 MHz (线匝剖分可达 2.5 MHz)
改进的集总参数模型	①适用范围较集总参数模型频带有提升; ②反映线匝剖分级别节点电压、电流关系	大型线圈装置, 线圈内外径差大, 适用频带范围降低, 准确性下降	②缺少中低频段铁芯特性与线圈涡流效应	10 kHz~4 MHz
混合电路模型	针对高频问题线圈对端部精细建模, 降低多匝数线圈建模难度	完整磁场分割成电连接部分, 不同电路模型之间耦合关系复杂, 难以真实反映线圈内电磁暂态过程	等参数非线性物理表征	针对暂态问题混合模型精度不同

## 3 变压器宽频电磁暂态模型

由前述可知, 变压器白盒模型的参数具有明确的物理意义, 但现有建模技术难以保证其宽频适用性。变压器黑盒模型的有效频带较宽, 但难以表征铁芯非线性励磁特性等元件特性, 无法用于分析变压器内部电气量。并且, 部分复杂工况可能同时涉及低频和高频电磁暂态仿真, 如变压器二次短路时,

切除故障会产生暂态恢复过电压<sup>[7]</sup>, 变压器模型的工频电流误差可能会影响高频暂态过电压的初始状态, 导致瞬态恢复过电压存在较大的计算误差。此外, 在变压器发生励磁涌流时切除故障<sup>[112]</sup>, 可能造成二次电压畸变和铁芯损耗超常等情况, 这也会影响高频暂态过电压的初始状态。

由于变压器在不同频段范围内的电磁特性存在差异, 为了构建能够准确表征宽频特性的等效电路模型, 需要同时考虑中低频下的铁芯非线性与高频下的涡流效应和电容效应。

### 3.1 宽频非线性耦合模型

为进一步扩大变压器模型的有效频带与适用范围, 有学者将低频模型与高频模型进行耦合, 构建了变压器宽频非线性耦合模型。现有模型耦合方法主要分为三种, 分别为直接并联法、滤波器法和联合仿真法。

文献<sup>[113]</sup>将高频黑盒模型与低频非线性子模型直接并联, 构建了变压器宽频非线性模型, 如图 29 所示, 该模型能够用于低频和高频电磁暂态计算。但该模型没有考虑变压器的高频电流传输特性, 忽略了直接耦合引入的误差, 且  $\Gamma$  型低频非线性子模型对于铁芯非线性特性的表征精度有待提升。

还有学者利用滤波器实现了高频模型和低频模型的耦合<sup>[114]</sup>。文献<sup>[73]</sup>通过滤波器将输入信号分为高频信号和低频信号, 分别输入至变压器高频模型与工频 T 型等效电路, 进而实现模型的耦合, 如图 30 所示, 图中  $Y_{wb}(\omega)$  和  $Y_{50}(\omega)$  分别表示高频和工频下的端口导纳矩阵。与直接并联法相比, 基于滤波器的变压器模型耦合方法, 能够实现高频黑盒模型和低频模型的平滑过渡。

然而, 该模型中的低频子模型是采用统一励磁支路的 T 型等效电路, 无法准确表征铁芯在饱和过程中的空间非线性, 并且 T 型等效电路不具有可逆性<sup>[12]</sup>。此外, 该变压器滤波器耦合模型没有考虑滤波器引入的电流误差, 无法准确表征变压器的高频电流传输特性<sup>[115]</sup>。

在此基础上, 有学者采用  $\pi$  模型表征变压器铁芯非线性励磁特性<sup>[116]</sup>, 同时提出一种受控电流源补偿滤波器漏电流的方法, 如图 31 所示。图中  $R_H$  和  $R_L$  分别表示高频滤波器和低频滤波器的内阻。该方法减小了滤波器引入的电流误差<sup>[115]</sup>, 进一步提升了基于滤波器耦合的变压器宽频非线性模型的电磁暂态仿真精度。

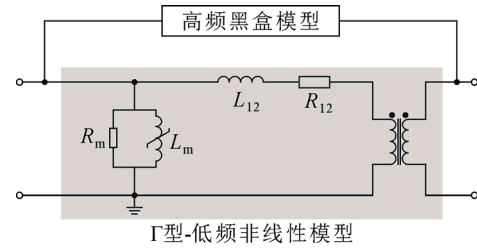


图 29 变压器并联耦合模型

Fig.29 The parallel coupling model of a transformer

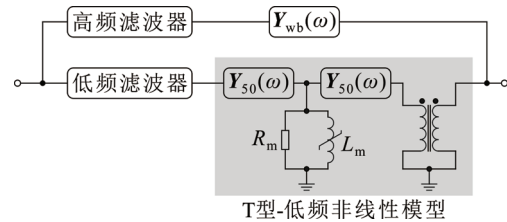


图 30 变压器滤波器耦合模型

Fig.30 The filter coupling model of a transformer

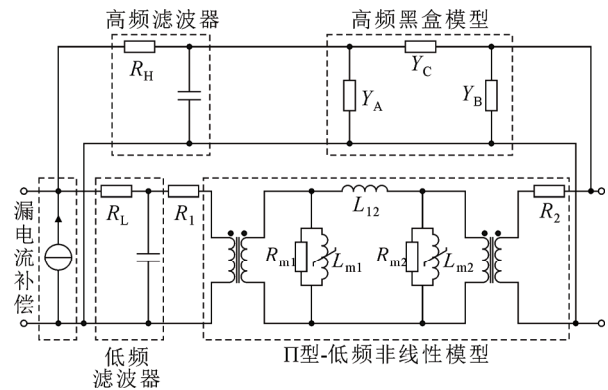


图 31 变压器宽频非线性耦合模型

Fig.31 Wideband nonlinear coupling model of a transformer

除了上述方法外, 文献<sup>[117]</sup>提出了一种基于联合仿真的模型耦合方法, 如图 32 所示。图中  $U_{1s}(t)$ ,  $i_{1s}(t)$  和  $U_{2s}(t)$ ,  $i_{2s}(t)$  分别表示低频模型的一、二次电压电流。该方法将变压器低频模型稳态响应与高频模型暂态响应的差值作为高频模型的激励, 使其能够以正确的初始值计算暂态响应, 提高变压器暂态响应的仿真精度。但是该耦合方式将低频稳态响应作为激励, 将会影响后续稳态响应的仿真精度, 因此无法用于分析涉及多种暂态电压的情况<sup>[118]</sup>。

综上所述, 与低频白盒模型、高频黑盒模型相比, 变压器宽频非线性耦合模型能够同时表征变压器的频率依赖特性和铁芯非线性励磁特性, 适用范围更广, 但是现有模型耦合方法均会引入新的耦合误差, 其模型特征对比如表 3 所示。

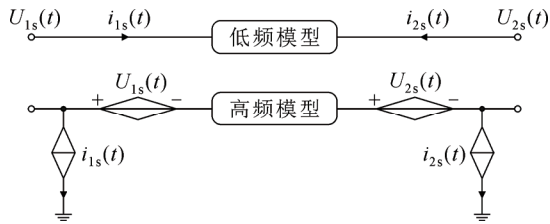


图 32 联合仿真法

Fig.32 Co-simulation method

### 3.2 宽频对偶模型

有学者基于对偶原理提出了完整的变压器宽频对偶电磁暂态模型, 其铁芯/绕组频变效应采用 Cauer 电路进行拟合表征, 可实现 1 MHz 范围内的端口宽频特性表征, 但拟合参数的物理意义不够明确, 且未考虑磁性路径间的相互作用<sup>[119]</sup>。后续学者基于 Cauer 电路模型与对偶原理提出了一种物理 Cauer 模型, 该模型可以表征高频效应下的绕组涡流和临近效应<sup>[120-121]</sup>。

进而, 文献<sup>[122]</sup>提出了一种新的绕组对偶宽频模型, 如图 33 所示, 将涡流效应等效为磁路中的复磁导, 再采用电磁对偶原理将其转换为电阻 ( $R_{d1}—R_{d8}$ ) 和电感 ( $L_{d1}—L_{d4}$ ) 电路; 根据趋肤深度对绕组进行分层剖分, 构建绕组的频变模型, 通过理想变压器将电、磁效应分开, 磁路通过 CMP 共磁点连接。铁芯模型采用了两个背靠背的传统 Cauer 电路模型, 如图 34 所示, 图中  $R_{c1}—R_{cn}$ 、 $L_{c1}—L_{cn}$  表示铁芯剖分部分对应的电路参数, 可以通过非线性电感表征铁芯非线性特性, 实现了对铁芯模型的频变特性与物理意义的表征。

将铁芯与绕组的对偶模型连接, 并添加电容构建了完整的宽频对偶电路模型, 如图 35 所示, 图中  $L_{leak}$  表示气隙的漏感。该对偶宽频模型实现了 10 MHz 范围内绕组频变效应的准确表征, 并且通过磁路连接并不需要互感表征, 实现了参数的简易获取。同时, 对偶结构可以准确反映磁场的分布规律, 电阻、电感电流分布分别可以表征线圈损耗与绕组剖面的磁场分布<sup>[122]</sup>。

综上所述, 宽频黑盒模型通过非线性耦合的方式表征宽频特性, 具有适用范围广、通用性强的优点, 但是该模型缺少对内部电磁分布特性的表征, 仅表征了端口等效特性; 宽频对偶电路模型具有明确的物理意义, 基于几何结构和材料特性获取等效电路模块及参数, 能够反映变压器的电磁分布特性, 但对于详细剖分的对偶模型, 模型元件众多, 参数

表 3 宽频非线性耦合模型

Table 3 Wideband nonlinear coupling model

模型/方法	特点	局限性	应用工况
直接并联法	通过将高频黑盒子模型与低频非线性子模型直接并联实现模型耦合	未考虑直接并联时产生的误差	额定与饱和工况、雷电冲击电压、VFTO 等电磁暂态仿真
滤波器法	通过滤波器将输入信号分为高频和低频信号, 输入对应高频和低频模型, 实现模型的平滑过渡	模型计算不稳定, 滤波器会引入误差	励磁涌流、短路电流以及高频暂态电压等电磁暂态仿真
联合仿真法	将低频模型的稳态响应作为高频模型的初始值, 实现模型的电气耦合	无法用于分析涉及多种暂态电压的情况	雷电冲击电压、高频暂态电压等电磁暂态仿真

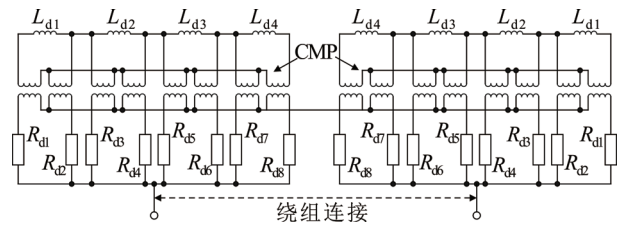


图 33 单层绕组离散对偶电路

Fig.33 Dual circuits for a discretized single-layer winding

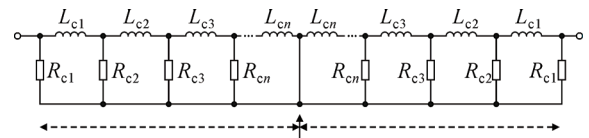


图 34 背靠背铁芯对偶 Cauer 模型

Fig.34 Duality-derived back-to-back Cauer model for the representation of iron

计算难度较大。

## 4 结论与展望

本文梳理分析了变压器低频、高频及宽频电路模型的建模方法、模型特点和局限性等相关内容。其中, 低频电路建模的关键在于绕组间漏感特性、铁芯非线性特性和分接开关动态耦合特性的准确表征; 而高频和宽频电路模型则需要准确反映不同频段的频率特征。完整的变压器模型可以反映宽频段的暂态特征, 但其复杂的模型结构会增加分析难度和计算成本, 因此根据仿真的频段需求, 可以选择性的简化电路模型, 以提高仿真效率。本文总结的各模型结构特性及应用范围为变压器分析模型的合理选择和持续改进提供了理论基础和有效建议。

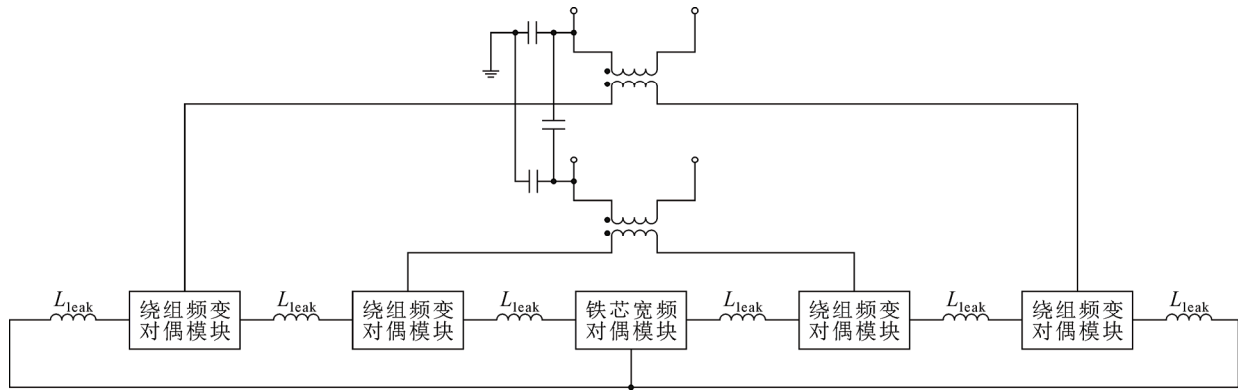


图 35 以线圈为单元的变压器宽频等效电路模型

Fig.35 Broadband equivalent circuit model of the transformer with coil as unit

此外, 面临传统电磁暂态冲击的威胁, 以及大规模新能源与电力电子装备并网带来的新问题, 本文提出变压器电磁暂态模型构建方法的进一步研究重点及展望:

1) 进一步提高变压器电磁暂态模型的仿真精度, 包括更精确地模拟变压器的铁芯非线性特性和频率依赖特性, 并考虑变压器内部的电磁、热、机械等多种物理场的相互作用, 研究多尺度、多物理场耦合模型。

2) 通过应用人工智能与大数据等研究成果, 自动辨识变压器模型参数并进一步优化模型, 开发基于数据驱动的方法, 利用并行计算和高性能计算技术, 实现变压器电磁暂态响应的快速预测和评估。

3) 探究自适应仿真与优化技术, 根据变压器的实际运行工况和需求, 自动调整仿真参数和模型结构, 以实现更高效的仿真与优化, 支撑变压器数字孪生体的构建。

4) 针对新型变压器(如固态变压器、超导变压器等)开发专有的电磁暂态模型, 进一步研究新型材料与结构对变压器电磁暂态特性的影响。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn>)。

## 参考文献 References

[1] SALEH S A, OZKOP E, ALSAYID B, et al. Solid-state transformers for distribution systems—Part II: deployment challenges[J]. IEEE Transactions on Industry Applications. 2019, 55(6): 5708-5716.

[2] 应急管理部四川消防研究所. 某换流站火灾[EB/OL]. (2022-01-24). <https://www.scfri.cn/go-a1030.htm>. Sichuan Fire Research Institute of MEM. Fire at a Converter Station[EB/OL]. (2022-01-24). <https://www.scfri.cn/go-a1030.htm>.

[3] COVA. Guidelines for representation of network elements when calculating transients[M]. France: CIGRE Brochure, 1990.

[4] WILSON R E, MIETEK GLINKOWSKI, MLADEN KEZUNOVIC, et al. Modeling and analysis of system transients using digital programs[M]. USA: IEEE Power & Energy Society, 1998.

[5] 师泯夏, 吴 邦, 靳宇晖, 等. 直流偏磁对变压器影响研究综述[J]. 高压电器, 2018(7): 20-36. SHI Minxia, WU Bang, JIN Yuhui, et al. Research summary on the impacts of DC magnetic bias on transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2018(7): 20-36.

[6] 沈大中, KRAEMER A, DOHNAL D. 真空有载分接开关在高压直流换流变压器中的运用[J]. 南方电网技术, 2011, 5(1): 25-28. SHEN Dazhong, KRAEMER A, DOHNAL D. Application of vacuum on-load tap changer in HVDC converter transformers[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(01): 25-28.

[7] 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.

[8] MARTINEZ J A, MORK B A. Transformer modeling for low- and mid-frequency transients—A review[J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2005, 20(2): 1625-1632.

[9] SOYSAL A O. A method for wide frequency range modeling of power transformers and rotating machines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 1993, 8(4): 1802-1810.

[10] DE LEÓN F, GÓMEZ P, MARTINEZ-VELASCO J A, et al. Transformers[M]//Martinez-Velasco J A. Power System Transients: Parameter Determination. Boca Raton, FL: CRC, 2009: 188-190.

[11] DOMMEL H W. Electromagnetic transients program reference manual(EMTP Theory Book)[M]. Portland, USA: Bonneville Power, 1992: 192-237.

[12] DE LEÓN F, FARAZMAND A, JOSEPH P. Comparing the T and  $\pi$  equivalent circuits for the calculation of transformer inrush currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2012, 27(4): 2390-2398.

[13] JAZEBI S, FARAZMAND A, MURALI B P, et al. A comparative study on  $\pi$  and T equivalent models for the analysis of transformer ferroresonance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 526-528.

[14] 李慧奇, 李晓孟, 李金忠, 等. 计及铁芯损耗和磁滞效应改进的变压器模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 196-202. LI Huiqi, LI Xiaomeng, LI Jinzhong, et al. An improved transformer model considering of the losses and hysteresis of the core[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(21): 196-202.

[15] BOYAJIAN A. Theory of three-circuit transformers[J]. Journal of the A. I. E. E., 1924, 43(4): 345-355.

[16] ALVAREZ-MARINO C, DE LEÓN F, LOPEZ-FERNANDEZ X M. Equivalent circuit for the leakage inductance of multiwinding transformers: Unification of terminal and duality models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 353-361.

[17] JAZEBI S, ZIRKA S E, LAMBERT M. Duality derived transformer models for low-frequency electromagnetic transients—part I: topologi-

- cal models[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(5): 2410-2419.
- [18] CHEN X S. Negative inductance and numerical instability of the saturable transformer component in EMTP[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, 15(4): 1199.
- [19] 夏 悦, 雷园园, 刘 刚, 等. 基于空载试验数据和 UMEC 的单相四柱换流变压器饱和模型研究和有效性验证[J]. *高电压技术*, 2021, 47(10): 3733-3743.
- XIA Yue, LEI Yuanyuan, LIU Gang, et al. Research and validation of saturation model for single-phase four-column converter transformer based on no-load experiment data and UMEC model[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(10): 3733-3743.
- [20] 章 彬, 伍国兴, 黄炜昭, 等. 一种新的变压器磁路到电路的转换模型及多种方法的统一[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(14): 128-135.
- ZHANG Bin, WU Guoxing, HUANG Weizhao, et al. A new conversion model of transformer from magnetic circuit to electric circuit and the unification of various methods[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(14): 128-135.
- [21] HAMIDI R J, BHADRA A B. Identifying the core aspect ratios of three-limb core-type transformers using machine learning[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 128024-128038.
- [22] LI X H, WU J Q, YE C, et al. Transformer model with hysteresis characteristic for electromagnetic transients based on PSCAD/EMTDC[C]//*Proceedings of 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. Changsha, China: IEEE, 2015: 1689-1694.
- [23] DE LEON F, MARTINEZ J A. Dual three-winding transformer equivalent circuit matching leakage measurements[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(1): 160-168.
- [24] ZHOU C, HAN S, RONG N, et al. A duality based quasi-steady-state model of three-phase five-limb sen transformer[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 115217-115226.
- [25] ABDULSALAM S G, XU W, NEVES W L A, et al. Estimation of transformer saturation characteristics from inrush current waveforms[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(1): 170-177.
- [26] WU Q, JAZEBI S, DE LEON F. Parameter estimation of three-phase transformer models for low-frequency transient studies from terminal measurements[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, 53(7): 8107108.
- [27] LAMBERT M, MARTÍNEZ-DURÓ M, MAHSEREDJIAN J, et al. Transformer leakage flux models for electromagnetic transients: critical review and validation of a new model[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(5): 2180-2188.
- [28] BRANDWAIN V, DOMMEL H W, DOMMEL I I. Matrix representation of three-phase n-winding transformers for steady-state and transient studies[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1982, PAS-101(6): 1369-1378.
- [29] MORK B A, GONZALEZ F, ISHCHENKO 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.
- [30] YANG M, KAZEMI R, JAZEBI S, et al. Retrofitting the BCTRAN transformer model with non-linear magnetizing branches for the accurate study of low-frequency deep saturating transients[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(5): 2344-2353.
- [31] LI W, FAN X, ZHU L X, et al. A dynamic hysteresis-based iron loss calculation method and its application in a PWM-Fed IPMSM[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2024, 39(3): 1738-1749.
- [32] M. MICHNA, P. DWORAKOWSKI, A. WILK, et al. Modified Preisach model of hysteresis in multi air gap ferrite core medium frequency transformer[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(1): 116-124.
- [33] LI Y, ZHU J G, ZHU L H, et al. A dynamic magnetostriction model of grain-oriented sheet steels based on Becker-Döring crystal magnetization model and Jiles-Atherton theory of magnetic hysteresis[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, 56(3): 1-5.
- [34] ZHOU M L, SU L C, ZHANG C, et al. Neural network based iterative learning control for dynamic hysteresis and uncertainties in magnetic shape memory alloy actuator[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2024, 71(6): 2885-2896.
- [35] GÓMEZ P, DE LEÓN F, ESPINO-CORTÉS F P. Improved computation of core inductance for fast transient analysis of transformers[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(4): 2034-2036.
- [36] DOLINAR M, DOLINAR D, STUMBERGER G, et al. A three-phase core-type transformer iron core model with included magnetic cross saturation[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(10): 2849-2851.
- [37] JAZEBI S, DE LEÓN F. Experimentally validated reversible single-phase multiwinding transformer model for the accurate calculation of low-frequency transients[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(1): 193-201.
- [38] DE JESÚS MARTÍNEZ-FIGUEROA G, CÓRCOLES F, BOGARRA S. Saturation curve estimation of three-legged three-phase transformers using inrush current waveforms[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2024, 39(1): 325-334.
- [39] JAZEBI S, REZAEI-ZARE A, LAMBERT M, et al. Duality-derived transformer models for low-frequency electromagnetic transients-part II: complementary modeling guidelines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(5): 2420-2430.
- [40] TOSCANI S, FAIFER M, FERRERO A, et al. Compensating nonlinearities in voltage transformers for enhanced harmonic measurements: The simplified volterra approach[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(1): 362-370.
- [41] PAN C, WANG C J, SU H. Excitation current and vibration characteristics of DC biased transformer[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2021, 7(3): 604-613.
- [42] ZHANG Y, LI J D, WANG Z S, et al. Saturation and hysteresis characteristics analysis of a HTS controllable reactor with orthogonally configured core[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(5): 5001105.
- [43] DEŽELAK K, PIHLER J. Artificial neural network as part of a saturation-level detector within the transformer's magnetic core[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, 52(5): 8400504.
- [44] SHEN Z L, WANG J G, YAN X J, et al. A method for extracting stray capacitance and hysteresis curves of potential transformers based on frequency referring[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(3): 1897-1905.
- [45] SIMA W X, PENG D X, YANG M, et al. Low-frequency model for single-phase transformers based on the three-component Preisach model considering deep saturation[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 110: 107-117.
- [46] 王迎迎, 袁建生. 利用数值仿真方法确定三相变压器深度饱和等效电路模型参数[J]. *高压电器*, 2020, 56(3): 60-66.
- WANG Yingying, YUAN Jiansheng. Determination the parameters of deep saturated equivalent circuit model of three-phase transformer by numerical simulation method[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(3): 60-66.
- [47] 朱连双, 董成海, 李冬林. 基于磁场分析软件的变压器绕组涡流损耗分析[J]. *变压器*, 2019, 56(9): 1-8.
- ZHU Lianshuang, DONG Chenghai, LI Donglin. Eddy current loss analysis of transformer winding based on magnetic field analysis software[J]. *Transformer*, 2019, 56(9): 1-8.
- [48] ALONSO C. H, JAZEBI S, DE LEÓN F. Experimental parameter determination and laboratory verification of the inverse hysteresis model for single-phase toroidal transformers[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, 52(11): 1-9.
- [49] TANG Q, WANG Z D, Jarman P. Electrical steels and power trans-

- former cores in deep saturation[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia: IEEE, 2012: 1035-1038.
- [50] DE LEÓN F, JAZEBI S, FARAZMAND A. Accurate measurement of the air-core inductance of iron-core transformers with a non-ideal low-power rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 294-296.
- [51] 杨 鸣, 熊 钊, 司马文霞, 等. 电磁式电压互感器“低频过电压激励-响应”逆问题求解[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17): 3605-3613. YANG Ming, XIONG Zhao, SIMA Wenxia, et al. Solution of the inverse problem of “low-frequency overvoltage excitation to response” for electromagnetic potential transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(17): 3605-3613.
- [52] 司马文霞, 刘永来, 杨 鸣, 等. 考虑铁芯深度饱和的单相双绕组变压器改进  $\pi$  模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7131-7140. SIMA Wenxia, LIU Yonglai, YANG Ming, et al. An improved  $\pi$  model for single-phase two winding transformers considering deep saturation of the iron core[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7131-7140.
- [53] 杨 鸣, 蒋罗平, 司马文霞, 等. 基于开关频率调制的高频变压器励磁曲线测量方法及其电磁暂态模型[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4450-4458. YANG Ming, JIANG Luoping, SIMA Wenxia, et al. Measurement method of magnetization curve of high-frequency transformer based on switching frequency modulation and its electromagnetic transient model[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4450-4458.
- [54] MONROY-BERJILLOS D, GÓMEZ-EXPÓSITO A, BACHILLER-SOLER A. A lab setup illustrating thyristor-assisted under-load tap changers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1203-1210.
- [55] 王绍武, 李 鹏, 李金忠, 等. 变压器真空有载分接开关研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6893-6908. WANG Shaowu, LI Peng, LI Jinzhong, et al. Overview of transformer vacuum-type on-load tap changers[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6893-6908.
- [56] LI X M, LIAO Q F, YIN X G, et al. A new on-load tap changing system with power electronic elements for power transformers[C]// Proceedings of the International Conference on Power System Technology. Kunming, China: IEEE, 2002: 556-559.
- [57] BAO L W, YUAN Y, LEI Y Y, et al. Simulation and experimental study of switching transient process of on-load tap changer of converter transformer[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Beijing, China: IEEE, 2020: 1-4.
- [58] XIAHOU D, ZHAO T, YI X Q, et al. Electromagnetic transient simulation analysis on electrical fault of vacuum type on-load tap changer in converter transformer[C]//Proceedings of the 22nd International Symposium on High Voltage Engineering. Xi'an, China: IEEE, 2021: 1314-1319.
- [59] DONG Y Z, LIU H, ZHOU H B, et al. Switching mechanism and simulation study of vacuum type on-load tap changer in converter transformer[C]//Proceedings of 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference. Wuhan, China: IEEE, 2021: 1-5.
- [60] 雷园园, 赵林杰, 彭在兴, 等. 换流变压器有载分接开关切换过程仿真及选型技术[J]. 南方电网技术, 2018, 12(07): 14-19. LEI Yuanyuan, ZHAO Linjie, PENG Zaixing, et al. Switching process simulation and type-selection technology of on-load tap changer of converter transformer[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(7): 14-19.
- [61] XU W J, LI Y. Study on transient recovery voltage characteristics of on-load tap charger during switching process[C]//18th International Conference on AC and DC Power Transmission, ACDC 2022. Online, China: IET, 2022: 488-493.
- [62] 梁贵书, 晏 阔, 高 飞, 等. 变压器混合式有载分接开关熄弧方法的仿真及试验研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3156-3163. LIANG G S, YAN K, GAO F, et al. Study on simulation and experiments of method of extinction hybrid on-load tap changer in transformers[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3156-3163.
- [63] OATES C, BARLOW A, LEVI V. Tap changer for distributed power[C]//Proceedings of 2007 European Conference on Power Electronics and Applications. Aalborg, Denmark: IEEE, 2007: 1-9.
- [64] LEVI V, KAY M, ATTREE M, et al. Design of low voltage networks for premises with small scale embedded generators[C]//Proceedings of the 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Turin, Italy: IEEE, 2005: 1-5.
- [65] MONTICELLI A. State estimation in electric power systems, a generalized approach[M]. New York, USA: Springer, 1999.
- [66] MOJUMDAR M R R, CANO J M, ORCAJO G A. Estimation of impedance ratio parameters for consistent modeling of tap-changing transformers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3282-3292.
- [67] ABUR A, EXPÓSITO A G. Power system state estimation, theory and implementation[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2004.
- [68] CANO J M, MOJUMDAR M R R, ORCAJO G A. Reconciling tap-changing transformer models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6): 2266-2268.
- [69] CANO J M, MOJUMDAR M R R, ORCAJO G A. On the consistency of tap-changing transformer models in power system studies[C]//Proceedings of 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Montreal, Canada: IEEE, 2020: 1-5.
- [70] AL-AMERI S M, ALMUTAIRI A, KAMARUDIN M S, et al. Application of frequency response analysis technique to detect transformer tap changer faults[J]. Applied Sciences, 2021, 11(7): 3128-3142.
- [71] BABAEI A, ZIOMEK W, GOLE A M. Transient characteristics of on-load tap changers during change-over operation[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 197: 107296.
- [72] 司马文霞, 王大森, 杨 鸣, 等. 适配变压器全档位切换暂态分析的有载分接开关电路模型构建[J]. 高电压技术, 2024, 50(02): 478-488. SIMA Wenxia, WANG Dasen, YANG Ming, et al. Construction of on-load tap-changer circuit model for transient analysis of transformer full-range switching[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 478-488.
- [73] GUSTAVSEN B. Wideband transformer modeling including core nonlinear effects[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 219-227.
- [74] 卞士朋, 张重远, 李彦松. 变压器宽频网络参数测量方法的研究[J]. 陕西电力, 2011, 39(06): 30-33. BIAN Shipeng, ZHANG Zhongyuan, LI Yansong. Research on broadband network parameters measurement of the transformer[J]. Smart Power, 2011, 39(06): 30-33.
- [75] 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, 25(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, 25(4): 144-148.
- [76] 闫治安, 崔新艺, 苏少平. 电机学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2006: 80-103. YAN Zhi'an, CUI Xinyi, SU Shaoping. Electrical engineering[M]. 2nd ed. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University Press, 2006: 80-103.
- [77] 黄冬冬, 李江涛, 何 双, 等. 用于特高压换流变压器宽频特性测量的脉冲发生器设计[J]. 高压电器, 2022, 58(1): 191-198. HUANG Dongdong, LI Jiangtao, He Shuang, et al. Design of pulse generator for measurement of broadband characteristics of UHV converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 191-198.
- [78] 张燕乘, 黄冬冬, 马 春, 等. 大尺度电气设备宽频特性时域测量方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 512-518. ZHANG Yanbing, HUANG Dongdong, MA Chun, et al. Time domain

- measurement method of broadband characteristics of large scale electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 512-518.
- [79] SECUE J, MOMBELLO E, MUEL E. Approach for determining a reliable set of spot frequencies to be used during a Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) for power transformer diagnosis[C]//Proceedings of 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. Bogota, Colombia: IEEE, 2008: 1-5.
- [80] 乐 健, 柳永妍, 李琼林, 等. 电容式电压互感器谐波测量误差试验技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 108-113.  
LE Jian, LIU Yongyan, LI Qionglin, et al. Harmonic measurement error test technology of capacitor voltage transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 108-113.
- [81] 张重远, 唐 帅, 梁贵书, 等. 基于电磁型电压互感器传输特性的过电压在线监测方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 142-148.  
ZHANG Zhongyuan, TANG Shuai, LIANG Guishu, et al. Online over-voltage monitoring method based on transmission parameters of voltage transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 142-148.
- [82] ANTONINI G. SPICE equivalent circuits of frequency-domain responses[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(3): 502-512.
- [83] DARLINGTON S. Synthesis of reactance 4-poles which produce prescribed insertion loss characteristics, including special applications to filter design[D]. New York, USA: Columbia University, 1940.
- [84] DE LEON F, SEMLYEN A. Time domain modeling of eddy current effects for transformer transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(1): 271-280.
- [85] TIMMINS I, WU K L. An efficient systematic approach to model extraction for passive microwave circuits[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(9): 1565-1573.
- [86] BRUNE O. Synthesis of a finite two-terminal network whose driving-point impedance is a prescribed function of frequency[D]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1931.
- [87] 张重远, 赵京生, 葛 鑫, 等. 变压器类设备无源高频宏模型建模方法[J]. 电力科学与工程. 2012, 28(08): 36-42.  
ZHANG Chongyuan, ZHAO Jingsheng, GE Xin, et al. Passive high-frequency macro modeling methods for transformer devices[J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(08): 36-42.
- [88] GUSTAVSEN B. Wide band modeling of power transformers[C]//Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting. Denver, USA: IEEE, 2004: 1791.
- [89] 梁贵书, 杜欣宇, 谢宇廷, 等. 电容式电压互感器的宽频无源电路模型[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 179-185.  
LIANG Guishu, DU Xinyu, XIE Yuting, et al. Broadband Passive Circuit Model of Capacitor Voltage Transformer[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 179-185.
- [90] 司马文霞, 王 惠, 杨 鸣, 等. 考虑中间变压器饱和特性的电容式电压互感器宽频非线性模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 5034-5043.  
SIMA Wenxia, WANG Hui, YANG Ming, et al. Wideband and non-linear model of capacitive voltage transformer considering the saturation of intermediate transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 5034-5043.
- [91] 田丰源. VFTO 下大型电力变压器绕组过电压分布研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2021.  
TIAN Fengyuan. Research of winding research on overvoltage distribution of large power transformer windings under VFTO[D]. Tianjin, China: Hebei University of Technology, 2021.
- [92] 刘 刚, 温晓芳, 郝世缘, 等. 双导体有损频变均匀传输线的电磁暂态时域仿真模型研究[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 823-833.  
LIU Gang, WEN Xiaofang, HAO Shiyuan, et al. Study on electromagnetic transient time-domain simulation model of lossy frequency-dependent uniform transmission line with two-conductor[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 823-833.
- [93] RAMLAL, CRAIG J. SINGH, ARVIND, et al. A comparison of model-order reduction techniques for multiphase transmission line systems[C]//8th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN). 2016: 459-465.
- [94] 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 Zhanji. Modeling for simulating very fast transient in transformer windings[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(5): 299-305.
- [95] 卞士朋, 李彦松. 基于多导体传输线模型的单相双绕组变压器宽频网络参数计算[J]. 广东电力, 2012, 25(9): 16-19, 66.  
BIAN Shipeng, LI Yansong. Computation of wide band network parameters on single-phase two-winding transformer based on multi-conductor transmission line theory[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(9): 16-19, 66.
- [96] 杨 钰, 王赞基. 用于特快速暂态分析的大型电力变压器线圈的宽频建模[J]. 中国科学: E 辑, 2009, 39(10): 1655-1662.  
YANG Yu, WANG Zanji. Wide band modeling of large power transformer windings for very fast transient overvoltage (VFOTD) analysis[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(9): 2597-2604.
- [97] SHIBUYA, Y. FUJITA. S. High frequency model and transient response of transformer windings[C]//1st International Conference and Exhibition on Transmission and Distribution in the Asia Pacific Region. 2002: 1839-1844.
- [98] LIU C, QI L, CUI X, et al. Experimental extraction of parasitic capacitances for high-frequency transformers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4157-4167.
- [99] DENG L, SUN Q Q, JIANG F, et al. Modeling and analysis of parasitic capacitance of secondary winding in high-frequency high-voltage transformer using finite-element method[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 5500105.
- [100] DAS A K, FERNANDES B G. Accurate capacitance calculation of multi-layer foil windings in a medium/high-frequency high-power transformer[C]//Proceedings of 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Detroit, USA: IEEE, 2020: 5834-5841.
- [101] 赵 涛, 刘乐康, 孙建涛, 等. 特高压换流变压器网侧绕组电流检测系统设计及谐波特性分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1443-1450.  
ZHAO Tao, LIU Lekang, SUN Jiantao, et al. Design of detection system and harmonic characteristic analysis for the grid side winding current of UHVDC converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1443-1450.
- [102] LU H Y, ZHU J G, HUI S Y R. Experimental determination of stray capacitances in high frequency transformers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(5): 1105-1112.
- [103] 胡应宏, 李 雨, 李 阳, 等. 面向柔直换流站高频谐振问题的换流变压器建模与参数辨识[J]. 电工技术学报, 2024, 39(22): 7154-7166.  
HU Yinghong, LI Yu, LI Yang, et al. Modeling and Parameter Identification of Converter Transformer for High-Frequency Resonance Problem of Flexible DC Converter Station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(22): 7154-7166.
- [104] COGITORE B, KERADEC J P, BARBAROUX J. The two-winding transformer: an experimental method to obtain a wide frequency range equivalent circuit[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1994, 43(2): 364-371.
- [105] BLACHE F, KERADEC J P, COGITORE B. Stray capacitances of two winding transformers: Equivalent circuit, measurements, calculation and lowering[C]//Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Denver, USA: IEEE, 1994: 1211-1217.
- [106] YU Z Q, HE J L, ZENG R, et al. Simulation analysis on conducted EMD caused by valves in  $\pm 800$  kV UHVDC converter station[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(2):

- 236-244.
- [107] 姚陈果, 胡迪, 赵仲勇, 等. 基于有限元法的电力变压器绕组集总参数电路仿真建模[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3517-3523. YAO Chengguo, HU Di, ZHAO Zhongyong, et al. Simulation modeling of lumped parameter circuit for power transformer winding based on the finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3517-3523.
- [108] 韩释瑶, 崔翔, 侯彦明, 等. 环型空心电抗器瞬态电压分布特性的分析[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 413-421. HAN Shiyao, CUI Xiang, HOU Yanming, et al. Distribution characteristics of transient voltage for toroidal air-core reactors[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 413-421.
- [109] HE S, WANG YF, Li JT. Analysis of electromagnetic transient characteristics on the winding of UHVDC converter transformers based on an improved broadband model[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 2022.58(8): 8401505.
- [110] POPOV M, VAN DER SLUIS L, SMEETS R P, et al. Analysis of very fast transients in layer-type transformer windings[J]. IEEE Trans Power Delivery, 2007, 22(1): 238-247.
- [111] 王贇基. 电力变压器线圈内暂态电压计算[M]. 北京: 科学出版社, 2021. WANG Zhanji. Calculation of transient voltage in power transformer windings[M]. Beijing, China: Science Press, 2021.
- [112] POPOV M, VAN DER SLUIS L, PAAP G C. Investigation of the circuit breaker reignition overvoltages caused by no-load transformer switching surges[J]. European Transactions on Electrical Power, 2001.11(6): 413-422.
- [113] 张重远, 杜欣欣. 考虑铁芯非线性的变压器宽频建模方法研究[J]. 华北电力大学学报, 45(1): 7-13, 57. ZHANG Chongyuan, DU Xinxin. Research on establishing method of broadband transformer model considering the nonlinearity of iron core[J]. Journal of North China Electric Power University, 45(1): 7-13, 57.
- [114] PAUL D, NAKHLA M S, ACHAR R, et al. Broadband modeling of high-frequency microwave devices[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(2): 361-373.
- [115] SIMA Wenxia, PENG Daixiao, YANG Ming, et al. Reversible wide-band hybrid model of two-winding transformer including the core nonlinearity and EMTP implementation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(4): 3159-3169.
- [116] SIMA Wenxia, ZOU Binyang, YANG Ming, et al. Reconstructing primary voltages across inductive VTs part I: Methodology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 1353-1362.
- [117] GUSTAVSEN B, BREDE A P, TANDE J O. Multivariate analysis of transformer resonant overvoltages in power stations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2563-2572.
- [118] GUSTAVSEN B. A filtering approach for merging transformer high-frequency models with 50/60-Hz low-frequency models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1420-1428.
- [119] DE LEON F, SEMLYEN A. Complete transformer model for electromagnetic transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1): 231-239.
- [120] HOLMBERG P, LEIJON M, WASS T. A wideband lumped circuit

model of eddy current losses in a coil with a coaxial insulation system and a stranded conductor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003.

[121] JAZEBI S. Dual transformer model based on standard circuit elements for the study of low- and mid-frequency transients[D]. New York, USA: Polytechnic Institute of New York University, 2014.

[122] DESWAL D, DE LEÓN F. Distributed dual model for high-frequency transformer windings: electromagnetic transients and solid state transformers[J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2022, 9, 549-559.



YANG Ming  
Ph.D., Professor

杨鸣

1987—, 男, 博士, 教授, 博导  
主要从事交直流电网电磁暂态特性分析与防护、  
变压器类装备电磁暂态建模与应用、新型直流装  
备电磁暂态建模与应用研究  
E-mail: cqucee@cqu.edu.cn



HUANG Linyu

黄琳榆

2001—, 男, 硕士  
主要从事变压器电磁暂态建模及故障分析研究  
E-mail: 1657634392@qq.com



SUN Jinhao

孙金昊

2000—, 男, 硕士  
主要从事变压器类设备电磁暂态建模与仿真应  
用、高频暂态下的电磁特性分布研究  
E-mail: hitsunjinhao@163.com



SIMA Wenxia  
Ph.D., Professor  
Corresponding author

司马文霞(通信作者)

1965—, 女, 博士, 教授, 博导  
主要从事电磁暂态感知、建模、分析与防护; 电  
网雷电致灾机理与接地防护技术; 电力装备绝缘  
失效机制与防御技术方面的研究工作  
E-mail: cqsmwx@cqu.edu.cn

收稿日期 2024-12-12 修回日期 2024-12-23 编辑 卫李静

## 附录 A

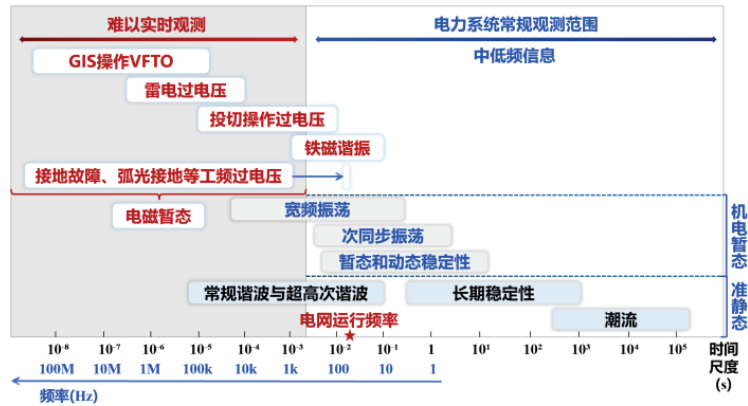


图 A1 电力系统电压的宽频带分布

Fig. A1 Broadband distribution of voltage in power system

表 A1 变压器建模准则

Table A1 Modeling guidelines for transformers

影响参数	电磁暂态冲击			
	低频	缓波前	陡波前	超陡波
频率范围	0.1 Hz~3 kHz	50/60 Hz~20 kHz	10 kHz~3 MHz	100 kHz~50 MHz
短路阻抗	非常重要	非常重要	重要	可忽略
饱和特性	非常重要	非常重要	可忽略	可忽略
铁芯损耗	重要	重要	可忽略	可忽略
涡流效应	非常重要	重要	可忽略	可忽略
耦合电容	可忽略	重要	非常重要	非常重要

## 致谢

本论文的完成离不开课题组同学的热心帮助。在研究过程中，课题组的许策、朱豪帅、柴建龙、苏玉豹和吕嘉琦同学为文献的查阅与筛选提供了重要支持，帮助笔者快速梳理了相关领域的研究进展与热点问题。这些工作为本综述的撰写奠定了坚实的基础，特别感谢以上同学在繁忙的科研工作中抽出时间，提供了详实的数据资料和具有启发性的建议。在此，谨向各位同学表示诚挚的感谢！