

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250755

## 晶闸管控制串并联中压配电变压器暂态建模及解析分析

王宾<sup>1</sup>, 陈冉<sup>2</sup>, 才志远<sup>3</sup>, 王翔<sup>3</sup>, 冯倩<sup>2</sup>, 肖慈恩<sup>2</sup>, 丁长新<sup>3</sup>

(1. 新型电力系统运行与控制全国重点实验室(清华大学电机系), 北京 100084; 2. 国网上海电力科学研究院, 上海 200080; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100089)

**摘要:** 随着配电网柔性互联需求的提升, 具备软互联与潮流调节能力的晶闸管控制串并联中压配电变压器受到关注。然而, 现有相量模型难以准确刻画其在挡位切换等过程中的暂态行为。针对这一问题, 面向中压配电网提出一种适用于该类装置的暂态模型。首先, 基于装置拓扑与控制策略推导暂态数学模型, 明确副边回路中晶闸管的导通状态与电压、电流之间的关系。随后, 在 PSCAD 平台构建元件级仿真模型, 对不同工况下的时域响应进行验证。最后, 结合现场运行数据开展对比分析。结果表明, 所建模型能够较为准确地再现挡位切换过程中的瞬态特性, 仿真波形与实测数据具有良好一致性。该模型为开展含该装置的暂态分析、故障机理研究及保护策略设计提供了方法与仿真支撑。

**关键词:** 柔性互联装备; 串并联变压器; 配电网; 暂态模型; 晶闸管

### Transient modeling and analytical study of a thyristor-controlled series-parallel medium-voltage distribution transformer

WANG Bin<sup>1</sup>, CHEN Ran<sup>2</sup>, CAI Zhiyuan<sup>3</sup>, WANG Xiang<sup>3</sup>, FENG Qian<sup>2</sup>, XIAO Cien<sup>2</sup>, DING Changxin<sup>3</sup>

(1. National Key Laboratory of New Power System Operation and Control, Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200080, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100089, China)

**Abstract:** With the growing demand for flexible interconnection in distribution networks, thyristor-controlled series-parallel medium-voltage distribution transformers with soft interconnection and power flow regulation capabilities have attracted increasing attention. However, existing phasor-based models struggle to accurately characterize the transient behavior of such devices during processes such as tap switching. To address this issue, this paper proposes a transient model suitable for this type of equipment in medium voltage distribution networks. First, based on the device topology and control strategy, a transient mathematical model is derived to clarify the relationship between the conduction states of the thyristors in the secondary circuit and the corresponding voltages and currents. Subsequently, a component level simulation model is constructed in PSCAD to verify the time-domain response under different operating conditions. Finally, comparative analysis is conducted using on-site operation data. The results indicate that the established model can accurately reproduce the transient characteristics during tap switching, with good agreement between simulated waveforms and measured data. The model provides methodology and simulation support for transient analysis, fault mechanism studies, and protection strategy design in systems incorporating this device.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5400-202317546A-3-2-ZN).

**Key words:** flexible interconnection device; series-parallel transformer; distribution network; transient model; thyristor

## 0 引言

随着太阳能、风能等可再生能源的大规模接入

以及电动汽车的普及, 配电网面临着越来越复杂的运行环境<sup>[1-2]</sup>。在“双高”有源配电网中, 10 kV 环网和联络场景中频繁出现反向潮流、三相不平衡、电压越限及合环电流等问题<sup>[3-4]</sup>。这些问题对配电网的稳定运行提出了更高的要求, 需要快速、精细且高可靠的潮流和电压调控装备, 以确保配电网的安

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5400-202317546A-3-2-ZN)

全性与保护协调性<sup>[5]</sup>。传统的机械开关互联方式由于合环电流和运行灵活性不足，难以满足智能配电网精细化和实时化的运行需求<sup>[6]</sup>，因此，柔性互联装备成为解决上述问题的有效手段。

现有柔性互联装备主要分为两类：一类是全电力电子型装备，虽然其具备快速、连续的潮流调节能力<sup>[7-9]</sup>，但因造价高、损耗大、维护复杂及可靠性不足等问题，难以在 10 kV 配电网推广<sup>[10]</sup>；另一类是电磁型装备，虽然其具有成本低、损耗小、可靠性高的优势，但调节方式单一、响应速度慢、精度有限，且无法独立控制有功与无功功率<sup>[11-12]</sup>。为克服电磁型装备的不足，学者提出了“Sen”变压器，通过优化绕组结构实现有功与无功功率独立调节，但仍依赖机械开关，响应速度和精度受到限制<sup>[13]</sup>。在此背景下，引入晶闸管被认为是提升电磁型装备调节性能的有效途径。晶闸管在中压等级已具备成熟的耐压与容错能力，能够在保持电磁型装置经济性和可靠性的同时显著提升调节速度与灵活性<sup>[14-15]</sup>。相较全控型电力电子变压器，该方案复杂度和损耗更低；相较传统分接头变压器，其调节更快、维度更丰富，可实现潮流与电压的独立或协同控制<sup>[16]</sup>。因此，晶闸管控制的串并联中压配电变压器为 10 kV 配电网柔性互联提供了一种兼具经济性与可行性的解决思路。

目前，国内外针对电磁型柔性互联装备的研究，主要集中在潮流调控机理、优化布置策略以及稳态运行特性等方面<sup>[17-20]</sup>。例如，文献[21-22]基于对称移相变压器的拓扑与电磁约束关系，建立了其稳态数学模型；文献[23]提出旋转潮流控制器的双层规划模型，可兼顾投资成本与承载能力优化；文献[24]推导了负载条件下有载分接开关的分级电压表达式，系统分析了其电压调节特性及影响因素。然而，上述研究主要集中在稳态层面，尚未涉及装置在暂态过程中的行为特征。文献[25]则基于多绕组耦合理论建立了“Sen”变压器的电磁解析模型，深入剖析了其内部电磁交互机理，并研究了装置的外部特性，但所采用的控制方式仍为传统的有载调压开关，未考虑电力电子化控制手段。文献[26]建立了曲折变压器的戴维南等效模型，并采用两阶段对角隐式龙格-库塔方法进行电流计算，但忽略了晶闸管自身的压降效应及晶闸管开关过程中的暂态特性，因而无法全面反映装置实际运行中的动态特征。

综上所述，现有研究多聚焦于机械开关控制或稳态特性，尚缺乏能够在动态切换与故障场景下精细刻画晶闸管控制串并联中压配电变压器暂态行为的解析模型。针对这一不足，本文基于装置结构与

控制机理，从电路方程推导建立了该装置的暂态解析模型。该模型能够揭示不同开关状态与故障条件下电压、电流的时域演化规律，具有良好的可解释性与理论推广价值。通过与仿真结果及现场运行数据的对比，验证了模型在稳态运行与动态切换过程中的准确性和工程适用性，并为后续故障机理分析、保护整定计算及系统层面动态特性研究奠定了方法基础。

## 1 串并联变压器的拓扑及工作原理

### 1.1 串并联变压器的拓扑

串并联变压器的主电路拓扑如图 1 所示。该电路为串并联结构，其中并联变压器一次侧接入配电网系统以获取系统电压，二次侧为晶闸管控制的绕组子阵。二次侧每一相包含 3 个阀控电压组合模块，其中子阵 Aa、Ba 和 Ca 串联形成 A 相补偿电压；子阵 Ab、Bb 和 Cb 串联形成 B 相补偿电压；子阵 Ac、Bc 和 Cc 串联形成 C 相补偿电压。三相补偿电压施加在串联变压器的副边，通过电磁感应在原边形成感应电压，并串联接入配电网，实现对系统电压的动态补偿。

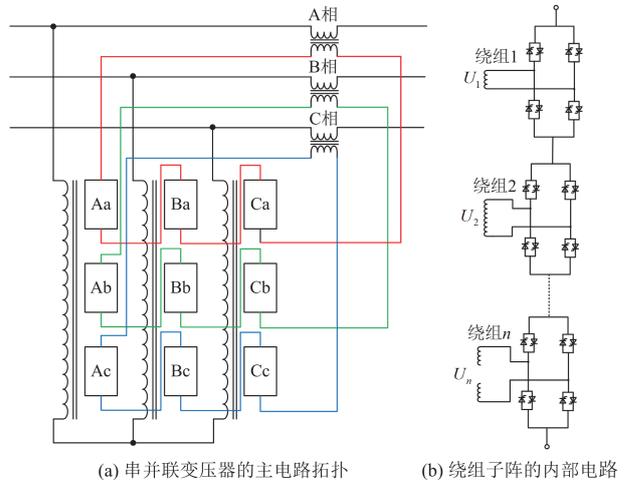


图 1 串并联变压器的主电路

Fig. 1 Main circuit of the series-parallel transformer

### 1.2 串并联变压器的控制原理

绕组子阵由多个晶闸管桥构成，其典型结构如图 1(b)所示， $U_1$ 、 $U_2$ 、 $\dots$ 、 $U_n$  分别为  $n$  个副边绕组的额定电压。对于任意一个晶闸管桥，当左桥臂上管和右桥臂下管同时导通时，其输出电压等于绕组电压；当左桥臂下管和右桥臂上管同时导通时，其输出电压等于负的绕组电压；当左或右桥臂上下管同时导通时，其输出电压等于 0。

以副边绕组 1 的额定电压  $U$  作为电压调节的基

本步长, 若子阵内各副边绕组的额定电压满足特定的比例关系, 即  $U_1:U_2:\dots:U_n=U:3U:\dots:3^{n-1}U$ , 则该绕组子阵输出总电压将以  $U$  为最小单位, 从  $-(3^n-1)/2U$  逐步变化至  $[(3^n-1)/2]U$ , 每一个绕组子阵共有  $3^n$  个可输出的电压值。

在串并联变压器的二次回路中, 每相均包含 3 个绕组子阵。这 3 个子阵的输出电压幅值独立可调, 并且各自电压矢量的相位相互间隔  $120^\circ$ 。通过适当调整各子阵中晶闸管桥的输出状态变量, 各子阵电压矢量在复平面内进行叠加合成, 实现每相输出电压幅值与相位的灵活精确调节。特别地, 当每个绕组子阵内包含两个副边绕组(即  $n=2$ ), 且额定电压满足 1:3 的比例关系时, 其输出的补偿电压矢量的可调范围在复平面内构成一个规则的六边形点阵, 如图 2 所示。

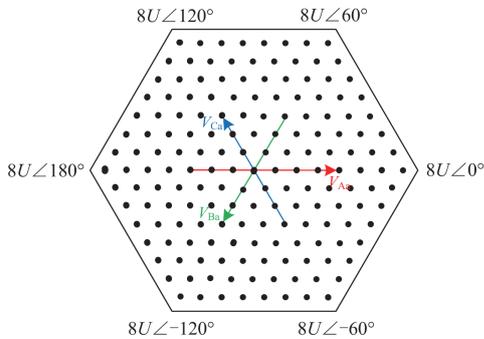


图 2 补偿电压调节范围

Fig. 2 Compensation voltage regulation range

在串并联变压器补偿电压调节过程中, 每个晶闸管桥臂均采用一组反并联晶闸管交替导通, 以确保交流电流的连续传输。当运行挡位切换时, 桥臂的导通路径需同步调整。

图 3 所示的晶闸管桥输出状态从  $+U$  切换至  $-U$  的过程为例, 原先导通的左桥臂上管与右桥臂下管应在交流电流自然过零后可靠关断, 随后切换为右桥臂上管与左桥臂下管交替导通, 以完成电压极性的反转。然而, 受限于晶闸管自身的自然过零关断特性, 若原  $+U$  导通状态的晶闸管未能在预期时间内完全关断而提前触发  $-U$  状态的晶闸管, 则可能导致两组晶闸管桥的上桥臂或下桥臂同时导通, 在副边绕组中形成短路回路, 造成电流剧增, 严重时可能引发绕组过热烧毁等故障。

为防止串并联变压器在挡位切换过程中因晶闸管关断不彻底而导致器件损毁, 本文在控制策略中引入了延时闭锁机制。具体而言, 当接收到挡位切换指令后, 系统首先向所有晶闸管发出关断命令

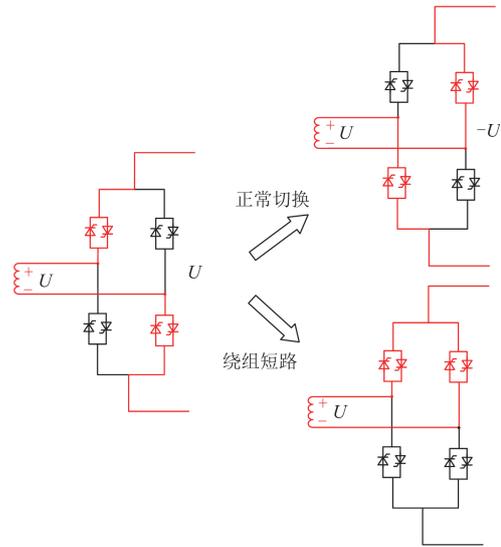


图 3 副边绕组子阵短路情形

Fig. 3 Short-circuit scenario of the secondary winding sub array

并启动 20 ms 的闭锁延时, 以确保上一挡位的导通晶闸管在电流过零时完全关断。晶闸管的关断过程受到电流过零和电压突变的共同影响。虽然电流小于维持电流时晶闸管理论上应进入关断状态, 但若电压波动未完全反向, 其两端仍可能存在正向电压, 从而影响关断效果, 导致晶闸管未能彻底关断。在此情况下, 若立即发出下一组触发信号, 可能引发绕组短路并造成设备损坏。通过设置 20 ms 的闭锁延时, 可确保上一挡位晶闸管在电流和电压稳定后完全关断, 再向下一挡位所需导通的晶闸管发出触发信号, 从而实现平滑切换与电流通道的重构。该策略从理论分析表明, 不仅能够有效避免因电压波动引起的误触发现象, 保障系统稳定性与可靠性, 还能降低实时监测带来的复杂性与成本; 在 10 kV 配电网应用中, 20 ms 的闭锁延时既提供了充分的安全裕度, 又兼顾了性能与经济性要求。

## 2 串并联变压器的暂态模型

假设串并联变压器都是理想变压器, 装置在稳态运行时装置是三相对称的结构。因此根据图 1 所示的装置拓扑结构图, 以 A 相为例, 画出图 4 所示的等效电路图。

图 4 中,  $u_{1A}$ 、 $u_{1B}$ 、 $u_{1C}$  和  $i_{1A}$ 、 $i_{1B}$ 、 $i_{1C}$  分别为装置的输入三相电压和电流,  $u_{2A}$ 、 $u_{2B}$ 、 $u_{2C}$  和  $i_{2A}$ 、 $i_{2B}$ 、 $i_{2C}$  分别为装置的输出三相电压和电流,  $i_{2sA}$  为绕组副边回路 A 相的电流,  $u_{sA}$  为串联变压器原边的电压,  $i_{pA}$  为流经并联变压器原边绕组的电流;  $n_s$

为串联变压器的变比。

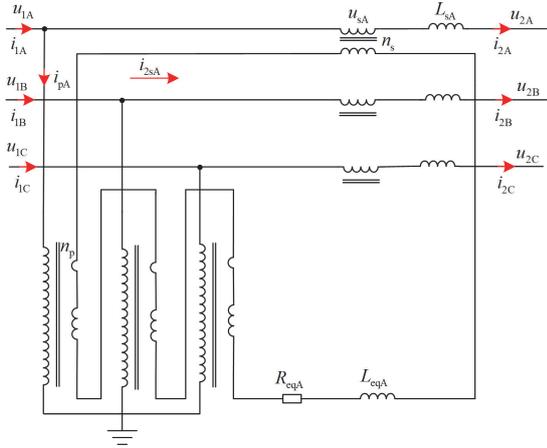


图 4 装置等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of the device

依据图 4 装置的等效电路图可得原边和副边的方程为

$$u_{2A} - u_{1A} + u_{sA} = -L_{sA} \frac{di_{2A}}{dt} \quad (1)$$

$$-u_{eqA} + L_{eqA} \frac{di_{2sA}}{dt} + R_{eqA} i_{2sA} = \frac{u_{sA}}{n_s} \quad (2)$$

式中： $R_{eqA}$ 、 $L_{eqA}$  分别为 A 相副边回路等效的电阻和电感； $L_{sA}$  为 A 相串联变压器的等效漏感； $u_{eqA}$  为绕组子阵 Aa、Ba、Ca 串联组合成的等效电压。

$$u_{eqA} = u_{Aa} + u_{Ba} + u_{Ca} = (\rho_{Aa} u_{1A} + \rho_{Ba} u_{1B} + \rho_{Ca} u_{1C}) / n_p \quad (3)$$

式中： $u_{Aa}$ 、 $u_{Ba}$ 、 $u_{Ca}$  分别为绕组子阵 Aa、Ba、Ca 输出的电压； $\rho_{Aa}$ 、 $\rho_{Ba}$ 、 $\rho_{Ca}$  分别为绕组子阵 Aa、Ba、Ca 输出电压与副边绕组 1 额定电压的比值，并将 $(\rho_{Aa}$ 、 $\rho_{Ba}$ 、 $\rho_{Ca})$ 记为串并联变压器当前运行的挡位； $n_p$  为并联变压器原边与副边绕组的变比。

副边回路等效的电阻为  $R_{eqA} = 3n \cdot R_j$ ， $n$  为绕组子阵中副边绕组的数量， $R_j$  为晶闸管的电阻。

副边回路等效的电抗为

$$L_{eqA} = L_{Aa} + L_{Ba} + L_{Ca} = (\gamma_{Aa} + \gamma_{Ba} + \gamma_{Ca}) L_{1p} \quad (4)$$

式中： $L_{1p}$  为并联变压器副边绕组 1 的漏抗； $L_{Aa}$ 、 $L_{Ba}$ 、 $L_{Ca}$  分别为绕组子阵 Aa、Ba、Ca 的漏抗； $\gamma_{Aa}$ 、 $\gamma_{Ba}$ 、 $\gamma_{Ca}$  分别为绕组子阵 Aa、Ba、Ca 的漏抗与副边绕组 1 漏抗的比值，串并联变压器的挡位决定了每一个绕组子阵有几个绕组接入副边回路中，因此根据挡位信息就能得到  $\gamma_{Aa}$ 、 $\gamma_{Ba}$ 、 $\gamma_{Ca}$  的值。

由串联变压器的关系可得  $i_{2sA} = 2i_{2A}$ ，代入到式

(2)中，并对式(1)和式(2)进行联立得到式(5)。

$$\left( \frac{L_s}{n_s} + n_s L_{eqA} \right) \frac{di_{2A}}{dt} + n_s R_{eqA} i_{2sA} = u_{eqA} - \frac{u_{2A} - u_{1A}}{n_s} \quad (5)$$

将式(3)和式(4)代入到式(5)中，得到

$$\left( \frac{L_s}{n_s} + n_s (\gamma_{Aa} + \gamma_{Ba} + \gamma_{Ca}) L_{1p} \right) \frac{di_{2A}}{dt} + 3n n_s R_j i_{2sA} = \quad (6)$$

$$\rho_{Aa} \frac{u_{1A}}{n_p} + \rho_{Ba} \frac{u_{1B}}{n_p} + \rho_{Ca} \frac{u_{1C}}{n_p} - \frac{u_{2A} - u_{1A}}{n_s}$$

对式(6)进行求解，得到输出电流  $i_{2A}$  的表达式为

$$i_{2A}(t) = e^{-\frac{N}{M}t} \left( i_{2A}(0) + \int_0^t e^{\frac{N}{M}\tau} \cdot \frac{u_A(\tau)}{M} d\tau \right) \quad (7)$$

式中： $M = \frac{L_s}{n_s} + n_s (\gamma_{Aa} + \gamma_{Ba} + \gamma_{Ca}) L_{1p}$ ； $u_A(t) =$

$$\rho_{Aa} \frac{u_{1A}(t)}{n_p} + \rho_{Ba} \frac{u_{1B}(t)}{n_p} + \rho_{Ca} \frac{u_{1C}(t)}{n_p} - \frac{u_{2A}(t) - u_{1A}(t)}{n_s} ;$$

$$N = 3n n_s R_j。$$

式(7)写成离散的形式为

$$i_{2A}(k) = e^{\frac{N}{M}(k-1)\Delta t} \left[ i_{2A}(0) + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^k e^{-\frac{N}{M}(j-1)\Delta t} \cdot \frac{u_A(j)}{M} \right] \quad (8)$$

已知串并联变压器两端节点的电压利用式(8)可求得装置输出的 A 相电流，串并联变压器是三相对称的结构，根据式(5)得到其余两相的公式为

$$\left( \frac{L_s}{n_s} + n_s L_{eqB} \right) \frac{di_{2B}}{dt} + n_s R_{eqB} i_{2sB} = u_{eqB} - \frac{u_{2B} - u_{1B}}{n_s} \quad (9)$$

$$\left( \frac{L_s}{n_s} + n_s L_{eqC} \right) \frac{di_{2C}}{dt} + n_s R_{eqC} i_{2sC} = u_{eqC} - \frac{u_{2C} - u_{1C}}{n_s} \quad (10)$$

根据装置的拓扑结构可得

$$u_{eqB} = u_{Ab} + u_{Bb} + u_{Cb} = (\rho_{Ab} u_{1A} + \rho_{Bb} u_{1B} + \rho_{Cb} u_{1C}) / n_p \quad (11)$$

$$u_{eqC} = u_{Ac} + u_{Bc} + u_{Cc} = (\rho_{Ac} u_{1A} + \rho_{Bc} u_{1B} + \rho_{Cc} u_{1C}) / n_p \quad (12)$$

串并联变压器是三相对称的，根据对称性可得

$$\begin{cases} \rho_{Aa} = \rho_{Bb} = \rho_{Cc} \\ \rho_{Ab} = \rho_{Bc} = \rho_{Ca} \\ \rho_{Ac} = \rho_{Ba} = \rho_{Cb} \end{cases} \quad (13)$$

$$L_{eqA} = L_{eqB} = L_{eqC} \quad (14)$$

$$R_{eqA} = R_{eqB} = R_{eqC} \quad (15)$$

利用式(11)和式(12)进行求解，同样可以得到和式(8)相似的 B 相和 C 相电流的表达式。

$$i_{2B}(k) = e^{\frac{N}{M}(k-1)\Delta t} \left[ i_{2B}(0) + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^k e^{-\frac{N}{M}(j-1)\Delta t} \cdot \frac{u_B(j)}{M} \right] \quad (16)$$

$$i_{2C}(k) = e^{\frac{N}{M}(k-1)\Delta t} \left[ i_{2C}(0) + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^k e^{\frac{N}{M}(j-1)\Delta t} \cdot \frac{u_C(j)}{M} \right] \quad (17)$$

当串并联变压器的档位不进行切换时, 利用式(8)、式(16)和式(17)就能求得对应装置流出的电流。

当串并联变压器的档位发出切换档位的指令时, 记此时刻为  $t_{\text{switch}}$ , 根据晶闸管过零自然关断的特性, 电流会有续流的现象。晶闸管闭锁 20 ms 之后发出下一个档位所对应的晶闸管的触发信号。

为解决晶闸管的续流问题, 准确识别电流波形中的首个过零点, 本文采用基于正弦模型的最小二乘拟合方法对电流  $i_{2A}$  进行局部拟合, 从而实现过零时刻的精确估算。考虑到在正常运行条件下, 晶闸管导通期间电流呈近似正弦波形, 可建立如式(18)所示的电流模型。

$$i_{2A}(t) = A \sin(2\pi f(t - t_0)) \quad (18)$$

式中:  $A$  为电流幅值;  $f$  为频率;  $t_0$  为电流相位起点所对应的时间偏移量。基于该模型, 选取切换指令前电流  $i_{2A}$  的一段时域数据窗口  $\{(t_i, i_{2A}(t_i))\}_{i=1}^N$ , 通过最小二乘准则进行拟合, 构建如式(19)所示的目标函数。

$$J(A, t_0) = \sum_{i=1}^N [A \sin(2\pi f(t_i - t_0)) - i_{2A}(t_i)]^2 \quad (19)$$

通过对上述函数进行数值最小化, 获取最优参数估计  $\hat{A}$ 、 $\hat{t}_0$ , 从而实现当前电流波形相位的精确还原。进一步地, 根据正弦函数在每半个周期出现一个过零点的周期性规律, 可由拟合结果计算档位切换指令发出之后的首个电流过零点。

$$t_{\text{zero}} = \hat{t}_0 + \frac{k_{\min}}{2f} \quad (20)$$

式中:  $t_{\text{zero}}$  为首个电流过零点的时刻;  $k_{\min}$  为满足  $t_{\text{zero}} > t_{\text{switch}}$  所对应的最小整数。

根据上述的理论分析, 当获取串并联变压器两端的电压时, 没有档位切换的指令发出之前, 即  $t < t_{\text{switch}}$ , 使用式(8)、式(16)和式(17)计算对应的电流; 当发出切换的指令后, 在  $t_{\text{switch}} < t < t_{\text{zero}}$  之间, 利用正弦波拟合的方法求得晶闸管续流的电流; 在  $t_{\text{zero}} < t < t_{\text{switch}} + 0.02$  之间, 晶闸管处于闭锁装置, 串并联变压器的副边回路电阻  $R_{\text{eq}}$  非常大, 在这一段时间  $i_{2A} = 0$ ; 最后当  $t > t_{\text{switch}} + 0.02$  时, 给下一个档位所对应的晶闸管发出触发信号, 再次使用式(8)、式(16)和式(17)对电流进行计算。根据此流程计算得到串并联变压器流出的三相电流  $i_{2A}$ 、 $i_{2B}$ 、 $i_{2C}$ 。

根据串并联变压器的拓扑结构及计算得到的输出三相电流, 可进一步求得其输入电流。并联变

压器视为理想多绕组变压器, 根据原副边电流关系, 可得其原边电流为

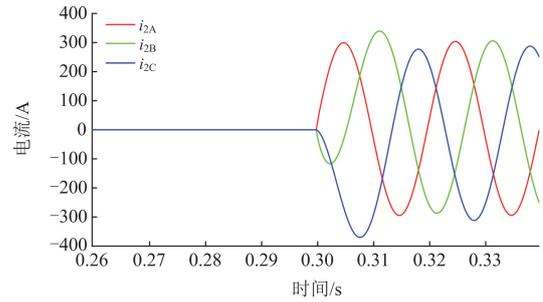
$$\begin{cases} i_{pA} = n_s(\rho_{Aa}i_{2A} + \rho_{Ab}i_{2B} + \rho_{Ac}i_{2C})/n_p \\ i_{pB} = n_s(\rho_{Ba}i_{2A} + \rho_{Bb}i_{2B} + \rho_{Bc}i_{2C})/n_p \\ i_{pC} = n_s(\rho_{Ca}i_{2A} + \rho_{Cb}i_{2B} + \rho_{Cc}i_{2C})/n_p \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $i_{pA}$ 、 $i_{pB}$ 、 $i_{pC}$  分别是 A 相、B 相、C 相并联变压器原边流过的电流, 最终得到串并联变压器的输入电流为

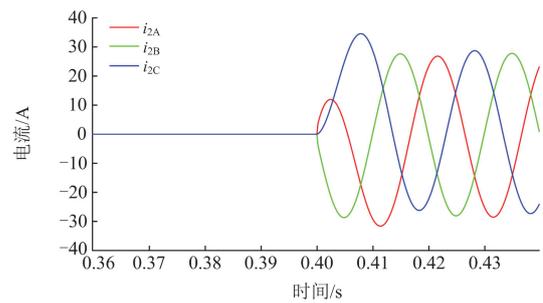
$$\begin{cases} i_{1A} = i_{pA} + i_{2A} \\ i_{1B} = i_{pB} + i_{2B} \\ i_{1C} = i_{pC} + i_{2C} \end{cases} \quad (22)$$

### 3 串并联变压器互联系统仿真

串并联变压器能够实现配电区域的软互联, 如图 5 所示。使用串并联变压器进行 10 kV 配电网互联, 两侧电源的相角差为  $5^\circ$ , 通过串并联变压器输出补偿电压进而进行互联, 其冲击电流在 30 A 左右, 冲击电流对系统的影响很小。



(a) 流经联络开关的电流



(b) 流经串并联变压器的电流

图 5 软互联功能对比

Fig. 5 Comparison of soft interconnection functions

如图 5(a)所示流经联络开关的电路波形所示, 产生了 370 A 的冲击电流。经串并联变压器补偿后, 流经串并联变压器的电流如图 5(b)所示, 冲击电流的幅值降到 30 A, 可以认为是软互联。

串并联变压器的核心功能在于实现线路潮流的

灵活调节。如图 6 所示，其通过多挡位切换实现潮流的分级调控，能够根据运行需求在较宽范围内实现潮流的双向控制。与传统分接头变压器不同，串并联变压器的挡位切换可在一个工频周期内快速完成，并通过晶闸管的控制避免了大的冲击电流，从而保证了系统的平稳过渡。最终，串并联变压器能够在不中断供电的条件下有效调节线路潮流，达到均衡配电、降低线路过载风险、提升运行灵活性的目标，满足中压配电网在高比例分布式电源接入背景下对实时潮流调节的需求。

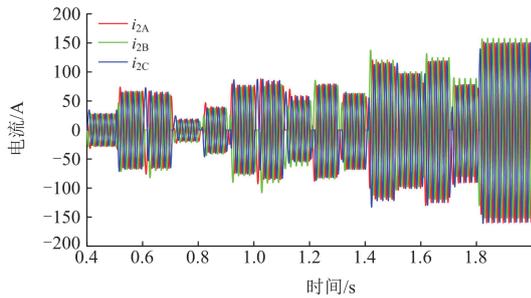


图 6 串并联变压器的潮流调节

Fig. 6 Power flow regulation of the series-parallel transformer

## 4 串并联变压器暂态模型的验证

### 4.1 仿真验证

为进一步验证前文所提出的串并联变压器暂态模型，利用 PSCAD 仿真软件搭建基于串并联变压器的中压配电网互联系统模型。仿真中串并联变压器的主要参数见表 1，其中变压器各绕组的漏抗均为 0.1 p.u.。

表 1 仿真模型主要参数

Table 1 Main parameters in simulation model

参数	数值
并联变压器的容量/MVA	0.288
串联变压器的容量/MVA	0.288
并联变压器的原边额定电压/kV	5.774
串联变压器的原边额定电压/kV	1.44
并联变压器的副边额定电压/V	90、270
串联变压器的副边额定电压/V	720
绕组子阵的绕组数	2
绕组匝数比	1:3

鉴于装置的三相对称性，以 A 相电流验证模型准确性。图 7 和图 8 分别给出了仿真与模型计算所得的输入电流和输出电流对比波形。在仿真过程中，串并联变压器在 0.4 s 时接入配电网，实现两个配电区域馈线之间的互联。初始运行挡位设为(-1, 4, -1)，运行至 0.5 s 后系统接收到挡位切换指令，挡

位切换为(-2, 4, -1)。为进一步检验暂态模型在动态切换过程中的适用性，设计仿真模型每隔 0.1 s 自动切换一次运行挡位。在 0.6 s、0.7 s、0.8 s 和 0.9 s 时刻，挡位分别调整为(-1, 3, -1)、(-1, 4, -2)、(0, 4, -1)和(-1, 4, 0)，以综合检验模型在多挡位动态运行工况下的响应特性。

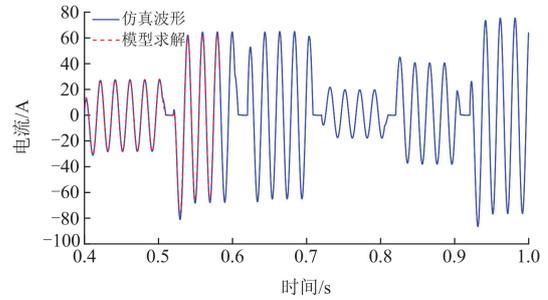


图 7 A 相仿真输出电流对比

Fig. 7 Comparison of A-phase simulated output current

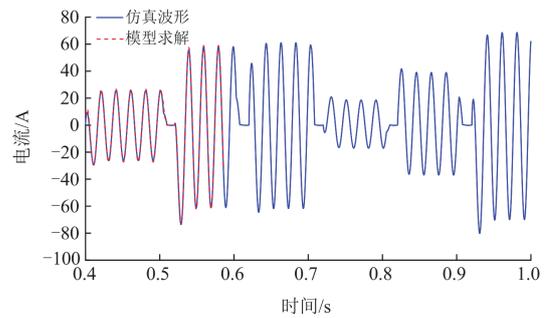


图 8 A 相仿真输入电流对比

Fig. 8 Comparison of A-phase simulated input current

为客观评价模型一致性，对图 7 和图 8 的理论暂态模型的波形与仿真波形进行了全时域单窗口评估。误差计算以仿真波形峰峰值为归一化基准，得到归一化最大绝对误差(normalized maximum absolute error, NMaxAE)与归一化均方根误差(normalized root mean square error, NRMSE)，并在计算前完成时间轴对齐与等时采样。结果显示：稳态区间两者几乎重合，幅值与相位差异极小；挡位切换瞬间虽有局部峰值偏差，但趋势、峰值时刻及衰减特性一致，未见系统性偏离。量化结果为：图 7 的 NMaxAE 为 10.09%、NRMSE 为 1.07%；图 8 的 NMaxAE 为 10.17%、NRMSE 为 1.07%。其中，约 10% 的峰值误差集中于切换后首半周的瞬态敏感区段，属于可解释的短时偏差；而约 1% 的均方根误差表明整体能量与相位层面偏差极小。综上，在该归一化与评估框架下，模型与仿真表现出较高一致性与可重复性，误差处于工程可接受范围，能够满足保护协调

与故障机理分析的需求。

在挡位切换过程所产生的差异, 其主要原因在于实际装置的副边晶闸管依靠自然关断, 导致三相电流过零时刻存在相互交错, 装置短暂处于不平衡运行状态, 如图 9 所示。而理论模型假设三相始终严格平衡, 未能完全反映实际切换过程中的瞬时不平衡特性, 从而引入了局部误差。但该误差整体较小, 仍处于工程允许范围内, 不影响所提模型在配电网暂态分析中的有效应用。

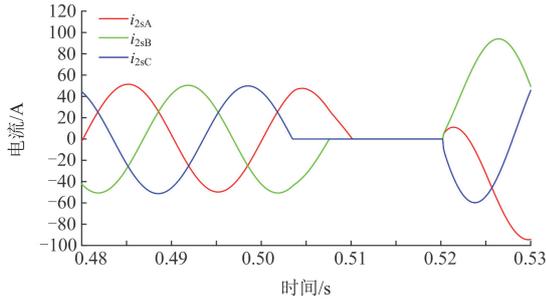


图 9 仿真波形的切换过程

Fig. 9 Switching process of the simulated waveform

#### 4.2 现场数据验证

为验证暂态模型的有效性, 在某 10 kV 配电网开展了现场接入与运行测试, 装置的主要参数见表 2, 其接入方式如图 10 所示。串联变压器与互联线路串接, 并联变压器接入母线侧, 从而实现两条馈线的互联。现场部署时, 在装置两端分别布置电压互感器和电流互感器, 采集信号统一接入数据采集单元, 采样频率不低于 10 kHz, 并采用统一时标同步, 以确保波形比对的精度。

实验过程中按预设时序对装置实施阶梯式挡位切换并最终闭锁。接入时初始挡位为(1, -3, 2); 0.4 s 时由(1, -3, 2)→(1, -1, 2); 0.9 s 时由(1, -1, 2)→(0, -1, 1); 1.4 s 时由(0, -1, 1)→(0, -2, 0); 1.9 s 时由(0, -2, 0)→(1, 0, 1); 最终在 2.4 s 发出闭锁指令, 串联支路电流迅速衰减至 0。全程在装置两端

表 2 实际运行装置的主要参数

Table 2 Main parameters of the device in practical operation

参数	数值
并联变压器的容量/MVA	0.26
串联变压器的容量/MVA	0.26
并联变压器的原边额定电压/kV	5.774
串联变压器的原边额定电压/kV	1.44
并联变压器的副边额定电压/V	120、240
串联变压器的副边额定电压/V	720
绕组子阵的绕组数	2
绕组匝数比	1:2

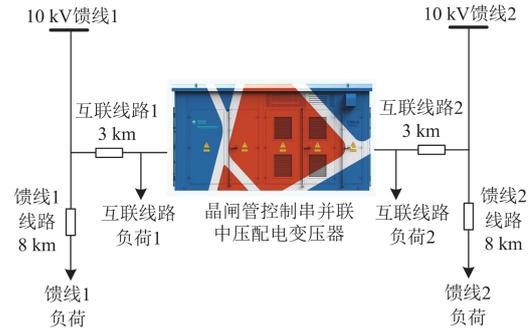


图 10 经串并联变压器互联的配电线路拓扑

Fig. 10 Topology of distribution lines interconnected by series parallel transformers

同步采集三相电压、电流及挡位反馈信号, 完整记录各次挡位切换与闭锁的动态波形; 随后将实测数据与暂态模型计算结果在统一时标下对齐, 并对实测的波形与模型计算的波形进行对比, 从而验证暂态模型的正确性与适用性。

为量化评估模型对现场记录的重现能力, 采用单窗口一致性评价方法, 以实测波形峰峰值为归一化基准, 计算 NMaxAE 与 NRMSE。结果表明, 在各挡位稳态运行及切换过程中, 仿真曲线与实测曲线高度重合, 整体趋势一致, 关键特征点对齐良好, 体现出较强的时间响应一致性与幅值预测能力。量化结果为: 图 11 的 NMaxAE 为 3.84%、NRMSE 为 1.05%; 图 12 的 NMaxAE 为 10.30%、NRMSE 为 0.89%。综上, 在以实测波形峰峰值为尺度的全时域评价下, 模型与现场波形的一致性达到工程可接受水平, 可支撑后续保护配合与故障机理分析。

从图 7、图 8 的仿真波形对比以及图 11、图 12 的现场实测波形对比可以看出, 串并联变压器在正常运行状态下的输入、输出电流整体波形高度一致, 差异较小。造成这一现象的主要原因在于, 依据本文所建立理论模型中的式(21), 并联变压器的变比远大于串联变压器的变比。在功率传输过程中, 串

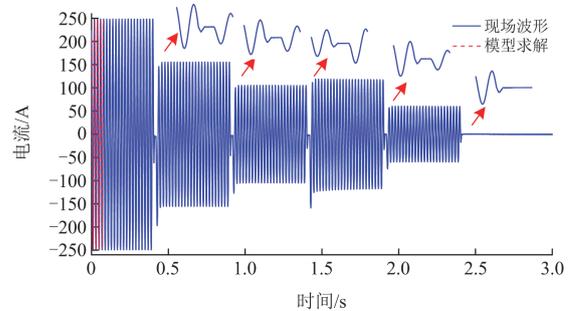


图 11 A 相现场输出电流对比

Fig. 11 Comparison of A-phase measured output current

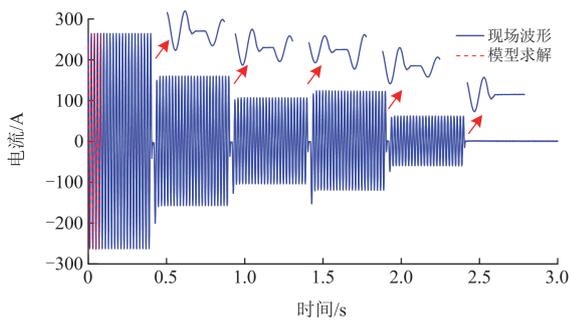


图 12 A 相现场输入电流对比

Fig. 12 Comparison of A-phase measured input current

联变压器主要用于将副边绕组子阵产生的补偿电压注入配电线路中，其绕组匝数少、变比小，以避免对主回路电压造成过大扰动；而并联变压器主要负责从配电网获取电压并向绕组子阵传输能量，其变比通常较大，以满足绕组子阵的工作电压需求。通过并联变压器向绕组子阵输送的能量，实现了对串联变压器注入电压的有效控制。因此，在非极端调节工况下，装置输入、输出电流之间仅表现为轻微的幅值调整与相位偏移，整体波形趋势仍保持高度一致。

### 5 结论

本文围绕晶闸管控制串并联中压配电变压器，阐明其拓扑与控制机理，建立了充分考虑自然过零关断与动态挡位切换的暂态模型。基于含实际控制逻辑的 PSCAD 平台与某 10 kV 配电网现场数据对齐对比，验证了装置的软互联与潮流调节能力。结果表明，模型能准确复现稳态与多次挡位切换过程的时域响应，幅值预测误差低，仿真与现场波形高度一致，证明其有效性与工程适用性。该模型为含该装置的配电网暂态分析、继电保护整定及性能优化提供基础，并为复杂工况下的保护策略与系统稳定性研究提供支撑。但是需要说明，本文研究未考虑变压器铁心深度饱和情形，将在后续工作中引入相应的磁路/饱和模型并开展敏感性验证。

### 参考文献

[1] 李博通, 孙铭阳, 张婧, 等. 基于深度神经网络融合欧氏距离的多环配电网拓扑辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(5): 123-134.  
 LI Botong, SUN Mingyang, ZHANG Jing, et al. Topology identification method for multi-ring distribution networks based on deep neural networks and Euclidean distance[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5): 123-134.

[2] 李响, 王世谦, 李秋燕, 等. 考虑 DG 和 EV 接入的分布式智能配电网联合规划[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(增刊 1): 159-167.

LI Xiang, WANG Shiqian, LI Qiuyan, et al. Joint planning of smart distribution grid considering distributed generation and electric vehicle charging station[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(S1): 159-167.

[3] 张春朋, 戚庆茹, 赵争鸣, 等. 用于配电网柔性互联的晶闸管控制曲折变压器[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3244-3250.  
 ZHANG Chunpeng, QI Qingru, ZHAO Zhengming, et al. Thyristor-controlled zigzag transformer for flexible inter-link of distribution networks[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3244-3250.

[4] 王鹏, 李华伟, 张沛. 具有源荷不平衡特性的配电网智能软开关和储能联合规划[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(5): 38-47.  
 WANG Peng, LI Huawei, ZHANG Pei. Joint planning of soft open point and energy storage in distribution networks with source-load imbalance characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(5): 38-47.

[5] 罗佳龙, 傅晓帆, 袁旭峰, 等. 基于事件触发的动态一致性馈线负载均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7): 123-132.  
 LUO Jialong, FU Xiaofan, YUAN Xufeng, et al. Event-triggered dynamic consistency algorithm based feeder load balancing control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 123-132.

[6] 肖白, 赵龙安, 张宇, 等. 城市中压配电网合环操作分析与决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 133-138.  
 XIAO Bai, ZHAO Longan, ZHANG Yu, et al. Analysis and decision of loop closing operation in urban mid-voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 133-138.

[7] LI Q, LI B, JIANG Q, et al. A novel location method for interline power flow controllers based on entropy theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(3): 70-81.

[8] ZHANG T, YU X, MU Y, et al. Multiple sources restoration for soft open points in distribution networks with a two-stage accelerated algorithm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(2): 892-905.

[9] 米阳, 申杰, 卢长坤, 等. 考虑含储能的三端智能软开关与需求侧响应的主动配电网有功无功协调优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 104-118.  
 MI Yang, SHEN Jie, LU Changkun, et al. Active and reactive power coordination optimization of an active distribution network considering a three-terminal soft open point with energy storage and demand response[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 104-118.

[10] 杨文博, 宋强, 刘文华, 等. 降低模块化多电平换流器子模块电容值的控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 86-94.  
 YANG Wenbo, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. A control strategy for reducing submodule capacitance

- value of modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 86-94.
- [11] ALBRECHTOWICZ P, SZCZEPANIK J. The comparative analysis of phase shifting transformers[J]. Energies, 2021, 14(14): 1-16.
- [12] 赵耀, 高泽华, 李东东, 等. 基于柔性合环装置 SAPST 的配电网自适应电流保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(10): 176-187.  
ZHAO Yao, GAO Zehua, LI Dongdong, et al. Research on adaptive current protection for distribution networks based on flexible loop closing device SAPST[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(10): 176-187.
- [13] SEN K K, SEN M L. Introducing the family of “Sen” transformers: a set of power flow controlling transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 149-157.
- [14] 余梦泽, 李峰, 李作红, 等. 移相变压器原理、拓扑、应用及发展[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(10): 1224-1237.  
YU Mengze, LI Feng, LI Zuohong, et al. Principle, topology, application and development of phase-shifting transformer[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(10): 1224-1237.
- [15] XU Y, PANG L, XIE T, et al. Reliability research of thyristors for HVDC transmission system[J]. Scientific Reports, 2024, 14.
- [16] XU Y, HUANG F, DIAO Y, et al. Novel single-core phase-shifting transformer: configuration, analysis and application in loop closing[J]. Energies, 2025, 18(17).
- [17] 杨用春, 杜翔宇, 唐健雄, 等. 基于改进移相变压器的综合调压合环装置及调控策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(8): 2532-2546.  
YANG Yongchun, DU Xiangyu, TANG Jianxiong, et al. Integrated voltage loop device and control strategy based on improved phase-shifting transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(8): 2532-2546.
- [18] SIDEA D, EREMIJA M, TOMA L, et al. Optimal placement of phase-shifting transformer for active power flow control using genetic algorithms[J]. University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin, Series C, 2018, 80(1): 205-216.
- [19] 李群, 张宁宇, 高山, 等. 电网移相器 RTDS 建模及应用场景分析[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 53-58.  
LI Qun, ZHANG Ningyu, GAO Shan, et al. Modeling and application scenario analysis of power phase shift transformer based on RTDS[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 53-58.
- [20] 颜湘武, 邵晨, 彭维锋, 等. 基于旋转式潮流控制器的有源配电网柔性合环及紧急功率控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(16): 6192-6205.  
YAN Xiangwu, SHAO Chen, PENG Weifeng, et al. Flexible loop closing and emergency power control method for active distribution network based on the rotary power flow controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(16): 6192-6205.
- [21] 杨永前, 崔勇, 杨增辉, 等. 双芯对称离散型可控移相器的数学建模[J]. 陕西电力, 2014, 42(11): 61-67.  
YANG Yongqian, CUI Yong, YANG Zenghui, et al. Modeling of two-core symmetrical discrete thyristor controlled phase shifting transformer[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(11): 61-67.
- [22] 李晓华, 陈镇生, 罗一杰, 等. 基于全绕组拓扑结构的移相变压器建模及应用[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 101-106.  
LI Xiaohua, CHEN Zhensheng, LUO Yijie, et al. Modeling and application of phase-shifting transformer based on full winding topology structure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 101-106.
- [23] 颜湘武, 卢俊达, 贾焦心, 等. 面向配电网台区经济性及综合承载力提升的旋转潮流控制器双层规划模型[J]. 电工技术学报, 2025, 40(7): 2078-2094.  
YAN Xiangwu, LU Junda, JIA Jiaoxin, et al. A bi-level programming model of rotary power flow controller for improving the economy and comprehensive carrying capacity of distribution station area[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(7): 2078-2094.
- [24] 高飞, 刘欣, 王利桐, 等. 对称双芯移相变压器有载分接开关最大级电压计算方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 2110-2119.  
GAO Fei, LIU Xin, WANG Litong, et al. Study on the maximum step voltage calculation method of on-load tap changer in symmetrical two-core phase shifting transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 2110-2119.
- [25] 潘宇航, 韩松, 冯金铃. 考虑多绕组耦合的 Sen Transformer 电磁解析模型[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2131-2139.  
PAN Yuhang, HAN Song, FENG Jinling. Electromagnetic analytical model of Sen transformer considering multi-winding coupling[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2131-2139.
- [26] LIU J, DINAVAH V. Nonlinear magnetic equivalent circuit-based real-time Sen transformer electromagnetic transient model on FPGA for HIL emulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(6): 2483-2493.

收稿日期: 2025-07-09; 修回日期: 2025-10-28

作者简介:

王 宾(1978—), 男, 通信作者, 研究员, 博士生导师, 研究方向为新型电力系统故障诊断与继电保护技术; E-mail: binw\_cc@mail.tsinghua.edu.cn

陈 冉(1983—), 男, 硕士, 研究方向为新型电力系统监控与运行技术。

(编辑 石晋美)