

华北电力大学

学术硕士学位论文

基于分层拓扑解析与基准电压继承的电磁暂态模型
转换方法研究

**A Study on Electromagnetic Transient Model Con-
version Method Based on Hierarchical Topology
Parsing and Reference Voltage Inheritance**

李敖冰

2025 年 5 月

国内图书分类号：TM743

国际图书分类号：621.3

学校代码：10054

密 级：公开

学术硕士学位论文

基于分层拓扑解析与基准电压继承的电磁 暂态模型转换方法研究

硕 士 研 究 生：李敖冰

导 师：刘崇茹教授

申 请 学 位：工学硕士

学 科 专 业：电气工程

所 在 学 院：电气与电子工程学院

答 辩 日 期：2025 年 5 月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM743

U.D.C: 621.3

Thesis for the Academic Master's Degree

A Study on Electromagnetic Transient Model Conversion Method Based on Hierarchical Topology Parsing and Reference Voltage Inheritance

Candidate:	Li Aobing
Supervisor:	Prof. Liu Chongru
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Electrical Engineering
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	May, 2025
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

PSCAD/EMTDC 作为国际主流的电磁暂态仿真软件,广泛应用于模型搭建。为了避免国外技术垄断风险,实现国产化替代,需要将 PSCAD/EMTDC 模型转换到我国自主研发的仿真平台 ADPSS 内。为了提高转换效率,减少人为误差,亟需开发自动转换平台以实现高效准确的模型跨平台转换。针对跨平台转换过程中的关键技术挑战,本文提出基于分层拓扑解析与基准电压继承的转换方法,构建 PSCAD/EMTDC 至 ADPSS 的模型兼容机制。本文的主要内容如下:

首先,构建了一种分层拓扑解析方法。在一次元件层,基于 PSCAD/EMTDC 端点连接特征和转换前后元件端口对应关系构建拓扑单元,通过参数映射和建立母线重构物理连接关系,实现了一次系统的拓扑转换。在子电路中,设计基于深度优先搜索的嵌套拓扑解析算法,实现多级嵌套子电路的完整转换。在二次系统中,基于“多输入单输出”连接原则,提出考虑信号流向的二次系统拓扑连接方法。针对 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 信号传输差异,建立信号类型映射规则,确保控制逻辑的一致性。以 Cigre 直流算例为例,对转换前后的拓扑关系进行了对比,结果表明提出的拓扑转换方法具有有效性。

其次,提出了建立基准电压动态继承机制。考虑到母线基准电压的特点,定义基于基准电压的电气岛概念,通过改进的 shortcutting 算法对电力网络进行分区,结合电力设备参数与电压等级标准解析电气岛基准电压,实现局部区域内基准电压的精确继承。针对跨图层电气连接,设计基于深度优先搜索的基准电压传播算法,建立电气岛间的基准电压继承关系。通过 IEEE14 节点系统和 Cigre 直流算例验证了所提方法的有效性。

最后,提出了一种多维度时频域结合的转换质量分析方法,从时域和频域两个维度评估本文所提出的 PSCAD/EMTDC 到 ADPSS 模型自动转换方法的可靠性。在时域层面,采用欧氏距离量化转换前后数据的几何空间差异,直观反映波形局部误差,结合 Spearman 相关系数衡量时序变量的动态趋势一致性,确保全局动态特性的准确复现。在频域层面,使用傅里叶变换将时序信号转换为频域,基于幅值设置权重,从频率、相位和功率谱密度三个角度评价转换质量。通过对比转换前后 Cigre 直流算例、IEEE39 节点算例和吉泉工程算例在不同工况下表现,证明了所提出的 PSCAD/EMTDC 到 ADPSS 模型转换方法的正确性。

关键词: PSCAD/EMTDC; ADPSS; 电磁暂态模型; 模型转换

Abstract

As a globally leading electromagnetic transient simulation software, PSCAD is widely used for modeling power systems. To mitigate the risks associated with foreign technology monopolies and achieve domestic substitution, there is an urgent need to migrate PSCAD models to China's independently developed simulation platform, ADPSS. To enhance conversion efficiency and minimize human errors, the development of an automated conversion platform is critical to enable efficient and accurate cross-platform model translation. Addressing the key technical challenges in this cross-platform conversion process, this paper proposes a conversion method based on hierarchical topology parsing and base voltage inheritance, establishing a model compatibility mechanism from PSCAD to ADPSS. The main contents of the paper are as follows:

Firstly, a hierarchical topology parsing method was constructed. At the primary component level, topological units were built based on the endpoint connection characteristics of PSCAD/EMTDC and the port correspondence between components before and after conversion. By parameter mapping and reconstructing the physical bus connection relationships, the topology conversion of the primary system was achieved. For subcircuits, a nested topology parsing algorithm based on depth-first search was designed to accomplish the complete conversion of PSCAD/EMTDC's multi-level nested subcircuits to ADPSS. In the secondary system, a topology connection method considering signal flow direction was proposed based on the "multiple-input single-output" principle. To address the differences in signal transmission between PSCAD/EMTDC and ADPSS, signal type mapping rules were established to ensure control logic consistency. The effectiveness of this conversion method was verified by comparing the topological relationships before and after conversion using the CIGRE DC benchmark model.

Secondly, a dynamic reference voltage inheritance mechanism was established. Considering the characteristics of bus reference voltages, the concept of electrical islands based on reference voltages was defined. The power network was partitioned using an improved shortcutting algorithm, and the reference voltages of electrical islands were determined by combining power equipment parameters with voltage level standards, enabling precise inheritance of reference voltages within localized regions. For cross-layer electrical connections, a reference voltage propagation algorithm based on depth-first search was designed to establish inheritance relationships between electrical islands. The effectiveness of this method was validated through the IEEE 14-bus system and the CIGRE DC benchmark model.

Finally, a multi-dimensional time-frequency domain conversion quality analysis method was proposed to evaluate the reliability of the automatic PSCAD/EMTDC to ADPSS model conversion approach from both temporal and spectral perspectives. In the time domain, Euclidean distance was employed to quantify geometric spatial differences between pre- and post-conversion data, visually reflecting waveform local errors, while Spearman correlation coefficients measured dynamic trend consistency of time-series variables to ensure accurate reproduction of global dynamic characteristics. In the frequency domain, Fourier transform converted time-domain signals for weighted evaluation (amplitude-based weighting) through three metrics: frequency components, phase relationships, and power spectral density. The correctness of the proposed conversion method was demonstrated using the CIGRE benchmark, IEEE 39-bus system, and Jiquan project case studies under various operational conditions.

Keywords: PSCAD/EMTDC, ADPSS, electromagnetic transient model, model transformation

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题背景及研究的目的和意义	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 本文主要工作.....	4
第 2 章 基于分层拓扑解析的电磁暂态模型转换方法	6
2.1 引言.....	6
2.2 拓扑连接关系分析.....	6
2.2.1 解析元件端口信息.....	6
2.2.2 解析拓扑连接关系.....	9
2.3 一次系统的拓扑连接.....	10
2.3.1 建立母线.....	11
2.3.2 一次元件的拓扑连接.....	12
2.3.3 子电路的拓扑连接.....	13
2.4 二次系统的拓扑连接.....	15
2.5 信号传输系统转换方法.....	16
2.6 算例分析.....	18
2.7 本章小结.....	21
第 3 章 基于基准电压动态继承的母线基准电压处理方法	22
3.1 引言.....	22
3.2 以基准电压为基础的电气岛	22
3.3 全域路径优化算法的电气岛构建	23
3.3.1 图的基本概念.....	23
3.3.2 全域路径优化算法.....	25
3.3.3 基于全域路径优化算法的基准电压岛构建	26
3.3.4 算例分析.....	28
3.4 跨图层电气岛的基准电压解析方法	30
3.4.1 基于深度优先搜索算法的跨图层电气岛基准电压解析方法	30
3.4.2 算例分析.....	31
3.5 本章小结.....	34
第 4 章 多维度时频域结合的转换质量分析方法	36
4.1 引言.....	36
4.2 时域数据转换质量分析方法	36
4.2.1 欧氏距离.....	36

4.2.2 Spearman 相关系数.....	37
4.3 频域信号转换质量分析方法	39
4.3.1 频率转换质量.....	39
4.3.2 相位转换质量.....	40
4.3.3 功率谱密度转换质量.....	40
4.4 仿真分析.....	41
4.4.1 IEEE39 节点系统算例	41
4.4.2 Cigre 直流工程算例	44
4.4.3 吉泉算例.....	49
4.5 本章小结.....	54
第 5 章 结论与展望	55
5.1 结论.....	55
5.2 展望.....	56
参考文献.....	57

第 1 章 绪 论

1.1 课题背景及研究的目的和意义

电力系统的持续发展使其规模不断扩大, 结构日益复杂, 其安全稳定运行已成为研究的核心问题^[1,2]。电磁暂态仿真根据各类元件的不同特性精准地获取其动态特征, 其时间尺度通常在微秒至毫秒范围内, 具有较高的仿真准确度, 对于保障电网安全稳定运行具有重要意义^[3,4]。

PSCAD/EMTDC 是由加拿大曼尼托巴高压直流研究中心开发的电磁暂态仿真软件, 现已成为世界上应用最为广泛的电磁暂态离线仿真软件之一^[5]。这款仿真软件具有以下几个特点: EMTDC 作为该软件的暂态计算程序, 通过时域分析的方法求解电力系统及微分方程时, 计算结果比较精确^[6,7]; PSCAD 作为与 EMTDC 组合的交互界面, 支持用户在完整且图形化的仿真环境中实现电路模型的灵活构建, 并通过数值求解和图形化显示技术实现仿真分析^[8]; 用户可以在仿真过程中动态调整电路控制参数, 实时观察仿真结果, 包括各种测量数据和参数曲线, 从而显著提升仿真效率^[9,10]。

为了实现电磁暂态仿真软件的国产化, 中国电科院研发了基于高性能机群服务器的电力系统全数字实时仿真装置 ADPSS(Advanced Digital Power System Simulator, ADPSS)^[11,12], 其特点如下:

(1) 并行计算与高效处理: ADPSS 基于高性能微机集群和高速本地通讯网络, 使用网络并行技术分解电力系统仿真计算任务, 通过对仿真进程的控制, 可以实现大规模复杂交直流系统的机电和电磁暂态混合实时仿真, 适用于大规模电网的离线分析和实时校核^[13,14]。

(2) 高可扩展性和模块化设计: ADPSS 的软件部分包括能够详细仿真开关动作的电磁暂态仿真模块 ETSDAC 和使用于大规模交直流电力系统设计的机电暂态仿真模块 PSASP, ADPSS 还支持将 ETSDAC 与 PSASP 结合使用, 实现大规模电力系统的机电-电磁暂态混合仿真^[15]。

(3) 良好的软硬件兼容性: ADPSS 为用户提供了自定义程序 UD 以及与 MATLAB 等外部软件对接的功能, 还支持将实际物理装置接入软件系统, 方便研究电网中实测模型并网工况下的性质^[16]。

PSCAD/EMTDC 凭借其高效的算法架构和丰富的元件库资源, 在国内外电力系统研究领域得到了广泛应用, 大量电磁暂态仿真模型均基于该平台构建, 但是 PSCAD/EMTDC 存在潜在的技术封锁风险。ADPSS 作为我国自主研发的电磁暂态仿真平台, 具有完整的自主知识产权, 是保证我国电力仿真安全的重要

要技术支撑^[17-19]。为推进电力系统仿真工具的国产化替代进程，降低对国外技术的依赖性，亟需实现 PSCAD/EMTDC 模型向 ADPSS 平台的迁移。

由于 PSCAD/EMTDC 和 ADPSS 在模型建立和仿真方法上存在显著差异，PSCAD/EMTDC 的模型数据并不可以被 ADPSS 直接识别。大规模实际电网模型规模庞大，人工转换需要逐一调整模型参数和拓扑结构，不仅效率低下，还容易引入人为误差，影响模型的准确性和可靠性^[20-22]。同时，由于两款软件的建模逻辑和仿真机制不同，用户需要重新学习和适应 ADPSS 的建模方法，增加了使用难度。这些问题严重阻碍了电磁暂态仿真模型从 PSCAD 向国产软件 ADPSS 的迁移进程。

在转换过程中，存在以下关键技术挑战：首先，在拓扑表达方面，PSCAD 允许元件直接连接而 ADPSS 要求通过母线连接，这种差异导致连接关系重构时容易出现子电路嵌套断裂等问题；其次，基准电压是标么值系统与有名值系统间进行参数转换的核心参考量，电压标么值的定义直接依赖于基准电压，而其他参数的标么值（如电流、功率、阻抗等）均通过基准电压间接计算。最后，在控制系统方面，两款软件信号传输机制的差异也给控制逻辑的准确转换带来一定困难。这些问题也制约着模型转换的进程。

综上所述，为了解决 PSCAD/EMTDC 到 ADPSS 的跨平台模型转换难题，节省建模时间，提升模型转换效率，本文研究了基于分层拓扑解析与基准电压继承的电磁暂态模型转换方法。该方法可以解决 PSCAD 与 ADPSS 在拓扑表达、基准电压机制等底层建模逻辑上的异构性问题，降低国产软件的应用门槛，为推动我国电力系统仿真软件国产化替代提供了关键技术支撑，具有重要的理论意义和工程实践价值。

1.2 国内外研究现状

为解决不同仿真软件间的模型兼容性问题，提升模型跨平台转换效率，近年来国内外学者针对仿真平台间的模型转换技术展开研究，取得了一定的进展。

文献[23-28]开发了从 PSD-BPA 向 PSCAD/EMTDC 转换的仿真平台。文献[23]研究对比了两款软件中传输线、发电机、负荷、变压器模型的数据结构和参数特征，确定了模型转换的参数对应关系，并手动进行元件位置摆放和拓扑连接。文献[24]对比了 BPA 与 PSCAD/EMTDC 内各模型的差别，提出了线路模型、变压器模型、负荷模型和发电机模型的转换方法。文献[25]将图论中的生成树概念应用在拓扑处理中，基于待转换模型的电气拓扑连接关系，使用深度优先搜索算法形成电力系统生成树，实现拓扑转换。文献[26]对比分析了 BPA 和 PSCAD/EMTDC 中各种常用电器元件的稳态特性和暂态特性，并基于 BPA

的仿真结果修正误差。文献[27]提出了一种新的模型在线转换技术,根据传输线和负荷模型的在线数据提出转换规则,改善了传统方法误差偏大、准确性偏低的缺点,并进行仿真验证。文献[28]基于高压直流输电换流站接线方式提出了一种直流输电系统的简化方法,减少了模拟换流站而利用的计算资源,并提出了从 BPA 转到 PSCAD/EMTDC 的电磁暂态模型转换方法。

PSASP 是一款机电暂态仿真软件,限于计算步长,对电力电子开关动作不能够进行详细的模拟。文献[29]提出了一种将模型从 PSASP 转换到 PSCAD/EMTDC 中的方法,两个软件共同拥有的模型根据参数比较进行转换计算,PSCAD/EMTDC 元件库内没有的模型使用隐式梯形法搭建模型。文献[30]研究 PSASP 和 ATP-EMTP 软件在同一元件模型参数的数学转换关系,通过 ATP-EMTP 可视化输入文本和数据卡片搭建了电网模型从 PSASP 向 ATP 的自动转换系统。

文献[31]和文献[32]提出了从 BPA 模型到 DIgSILENT 的转换方法。文献[31]分析了一次设备模型从 BPA 转到 DIgSILENT 的模型参数对应关系,研究了 DIgSILENT 所提供的 DGS 接口和 DPL 变成语言的技术特点,将 BPA 数据文件转换为 DGS 文件后,再导入 DIgSILENT 内,实现模型转换。文献[32]比较了两款仿真软件的发电机与负荷的机电暂态模型,提出了发电机和负荷的模型转换方法,基于“Frame+Block”的双层结构实现模型匹配,使用 Python 语言编写数据匹配程序,实现大规模电力系统数据自动转换。

文献[33]提出了一种从 BPA 数据模型转到 RTDS 模型的转换方法,开发了一款数据移植软件,并在华东电网等值网络验证。文献[34]综合模型管理、子系统划分、智能继承多个角度,对原始电网进行等值计算,开发了从 BPA 到 HYPERSIM 的自动建模软件。文献[35]对比分析 BPA 和 ADPSS 的差异,提出了一种从 BPA 到 ADPSS 的软件自动转换方法,搭建自动转换平台,并使用某电网验证所提出转换方法的正确性。文献[36]研究了 PSCAD/EMTDC 和 ADPSS 之间的模型自动转换方法,但是该文献并不是直接将 PSCAD/EMTDC 模型转换到 ADPSS 中,而是先生成 xml 中间文本,解析后再生成 ADPSS 工程。

综上所述,现有研究存在显著不足:在模型拓扑解析方面,当前的拓扑转换方法在系统性和完整性方面有待完善,缺乏复杂电磁暂态模型的分层处理能力,特别是对于包含多层子系统、信号交互系统的模型,现有方法难以实现高效且准确的拓扑转换,导致模型拓扑结构的完整性难以保障。在基准电压继承机制方面,现有研究尚未建立有效的电压等级映射规则,难以确保不同仿真平台间电气参数的一致性。这一系列技术瓶颈严重制约了实际电网复杂模型从 PSCAD/EMTDC 向国产 ADPSS 平台的迁移进程,亟需突破性解决方案。

1.3 本文主要工作

为降低国外技术垄断风险并推动国产化替代,本文对 PSCAD/EMTDC 向 ADPSS 的模型转换方法进行了探索,解决了两平台在模型结构、拓扑表达、信号传输机制和母线基准电压等方面的转换问题,搭建了电磁暂态模型自动转换平台。本文的主要内容如下:

(1) 为了解决 PSCAD/EMTDC 到 ADPSS 模型拓扑转换困难的问题,第 2 章针对 PSCAD/EMTDC 和 ADPSS 在拓扑表达方式的差异性,提出分层解析的拓扑转换架构:一次系统构建“元件-母线”映射机制,基于 PSCAD/EMTDC 端点信息解析与线路连接关系重构,实现物理连接关系的等效转换。针对自定义子电路,设计基于深度优先搜索的嵌套拓扑解析算法,实现多级嵌套子电路的完整转换。二次系统设计基于信号流向的拓扑分组算法,建立“多输入单输出”二次系统拓扑连接原则,借助拓扑连接关系完成二次系统拓扑连接。在信号传输系统转换部分,受限于 PSCAD/EMTDC 和 ADPSS 信号传输逻辑的本质差异,建立信号类型映射规则实现了跨平台信号传输系统的转换。以 Cigre 直流算例作为研究对象,对比转换前后模型的拓扑关系,证明所提方法的正确性。

(2) 为了解析出正确的基准电压,第 3 章提出了一种基于图论的基准电压继承分析方法。首先结合母线基准电压的特性,定义了基于基准电压的电气岛概念,基于第 2 章解析出的模型拓扑关系生成图结构。其次采用 shortcutting 算法对网络进行分区,并结合电力设备参数和电压等级标准,解析各电气岛的基准电压,实现区域内母线基准电压的准确传递。基于不同图层之间的电气连接关系,提出了基于深度优先搜索的跨图层基准电压继承方法,根据变压器、换流器等边界设备的电压特性,构建电气岛之间的基准电压继承链条。经 IEEE14 节点系统和 Cigre 直流工程算例验证所提出的母线基准电压继承方法的正确性。

(3) 为了解决传统单一维度评价难以全面表征时域与频域特性的问题,第 4 章提出了一种基于多维度时频域结合的转换质量分析方法。在时域层面,采用欧氏距离量化转换前后波形的几何差异,并通过 Spearman 相关系数评估时序动态趋势一致性,实现局部误差与全局趋势的双重捕捉。在频域层面,利用傅立叶变换将信号分解至频域,基于频率特性、相位匹配度及功率谱密度构建加权评价函数,评价信号的主要成分、时序特征、能量分布的一致性。结合 Cigre 标准算例、IEEE39 节点算例与吉泉直流工程在不同工况下的表现,验证了本文所提出的电磁暂态模型转换方法的正确性,为复杂系统模型转换质量评估提供了可靠的技术支撑。

本文的研究思路如图 1-1 所示,各章节之间的逻辑关系如下:第 2 章提出的分层解析拓扑转换架构,实现了 PSCAD/EMTDC 物理连接关系向 ADPSS 平

台的等效转换，为第3章电气岛构建提供了跨平台的一次系统拓扑基础，为第4章转换质量评价建立了完整的拓扑映射框架。第3章提出了一种基于图论的基准电压继承分析方法，有效解决了PSCAD/EMTDC与ADPSS平台间电气参数映射问题，为第4章的转换质量评价提供了关键参数基础。第4章提出了一种多维度时频域结合的转换质量分析方法，验证了基于前两章内容提出的PSCAD/EMTDC到ADPSS跨平台模型转换方法的可靠性。

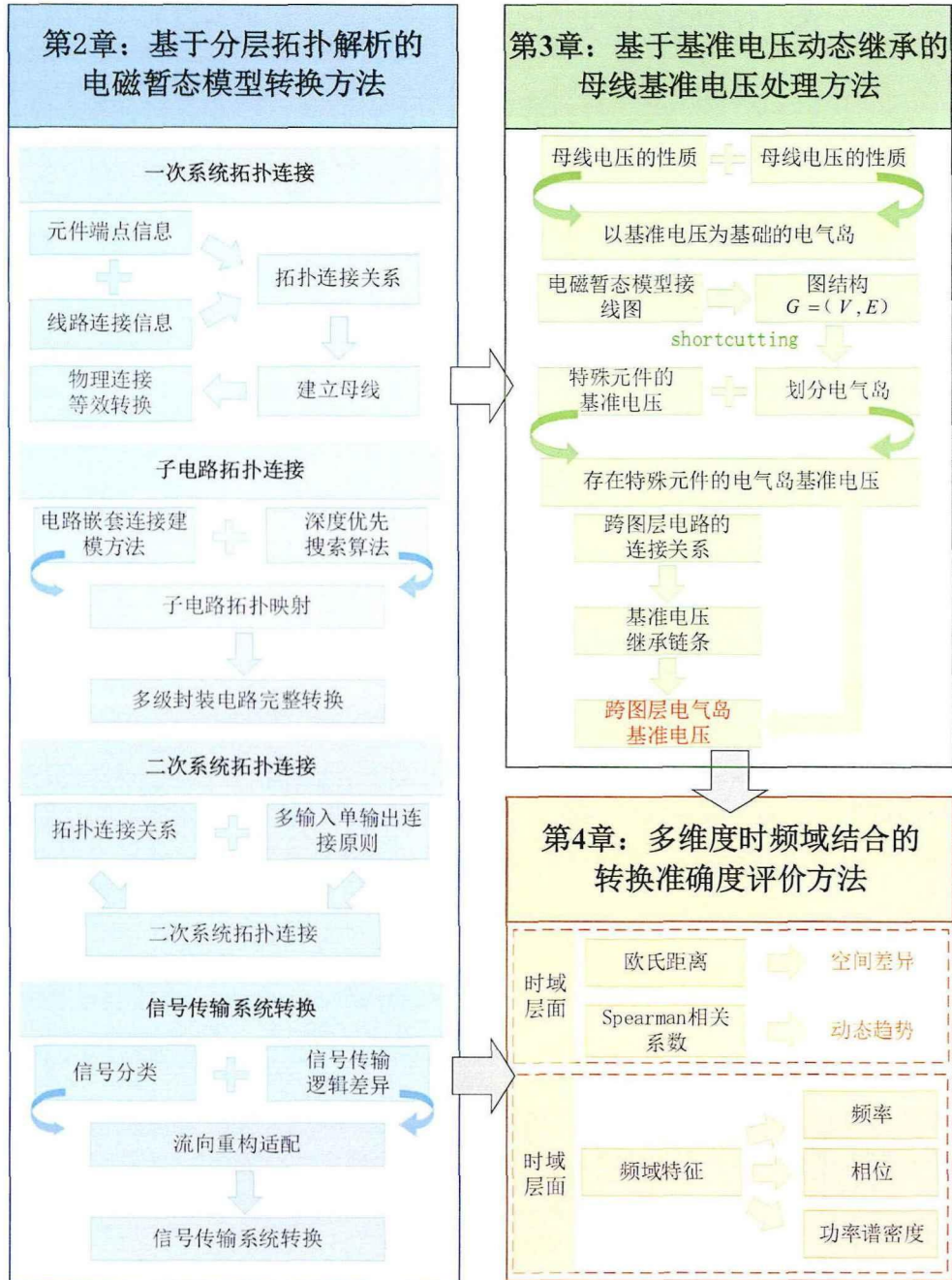


图 1-1 本文的研究思路

第 2 章 基于分层拓扑解析的电磁暂态模型转换方法

2.1 引言

在 PSCAD/EMTDC 和 ADPSS 中, 由于软件架构和设计理念的不同, 拓扑连接逻辑存在显著差别, 信号传输机制差异显著, 子电路嵌套关系复杂, 这些因素增加了跨平台拓扑转换的复杂性和难度。

为了解决 PSCAD/EMTDC 到 ADPSS 模型拓扑自动转换困难的问题, 本章基于 PSCAD/EMTDC 和 ADPSS 两个平台的拓扑逻辑差异, 提出了基于分层拓扑解析的电磁暂态模型转换方法。首先基于 PSCAD/EMTDC 工程文件和端口配置文件, 结合元件参数信息, 解析元件端口并建立跨平台元件端口对应关系; 基于元件和线路的端口信息, 解析拓扑结构, 建立端口到端口的连接关系。在一次系统中, 通过端口连接关系重构母线拓扑, 实现一次系统的拓扑连接。子电路的拓扑连接基于电路的嵌套关系和 ADPSS 中子电路的拓扑性质, 提出基于深度搜索算法的子电路拓扑连接方法。在二次系统中, 引入虚拟母线作为拓扑载体, 结合二次元件的端口性质, 提出了基于信号流向的拓扑分组方法, 实现二次系统的拓扑连接。在信号传输系统中, 通过建立信号对象并引入信号类型映射规则, 实现信号传输系统的转换。

2.2 拓扑连接关系分析

在 PSCAD/EMTDC 中, 元件与元件之间可以使用导线直接相连; 而在 ADPSS 中, 一次元件必须通过母线才能相连^[36]。因此, 在将 PSCAD/EMTDC 内的电磁暂态模型向 ADPSS 软件转换的过程中, 必须先遍历所有元件和连接线的端口及坐标, 获取元件和线路的连接关系。

2.2.1 解析元件端口信息

因为在 PSCAD/EMTDC 内, 拓扑关系的信息以坐标和端口为基础储存, 所以需要分析各元件的端口信息。对于 PSCAD/EMTDC 元件而言, 元件端口信息的存储由 PSCAD/EMTDC 内记录元件端点信息的 master 配置文件和待转换 PSCAD 电磁暂态模型文件中的元件坐标和参数信息共同构成, 元件端口信息解析流程如图 2-1 所示。

本方法先分析配置文件中元件的端口类型、坐标、存在条件等信息, 获取元件所有端口的信息; 再根据待转换的 PSCAD/EMTDC 工程文件中的元件坐标

和参数取值，分别与配置文件中元件的端口坐标和存在条件进行对比，获取元件各端口的坐标与是否存在的判断结果，完成元件端口信息的解析。

在待转换的 PSCAD/EMTDC 工程文件中，可以读取元件的坐标以及元件的参数信息，与在配置文件中读取到的端口信息结合后，可以解析出元件的端口信息。通过解析各元件的端口信息，可以获得元件的基本端口情况。基于待转换工程中元件的坐标和参数取值，得到元件的端口信息，为拓扑分析提供基础。

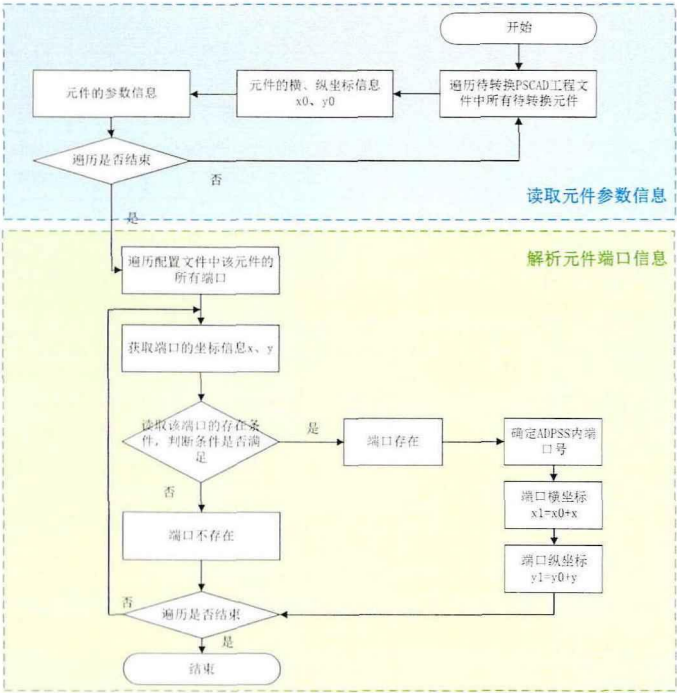


图 2-1 元件端口信息解析流程

在 master 文件，每个元件的端口信息如表 2-1 所示：

表 2-1 元件端口信息表

端口信息名称	描述
port mode	值为“Natural”时，该端口与一次系统连接； 值为“Transfer”时，该端口与二次系统连接。
name	该端口的名称，例如：“DP”、“DN”。
x	该端口相对于元件的横坐标。
y	该端口相对于元件的纵坐标。
mode	值为空时，说明该端口与一次系统直接相连； 值为“Input”时，表示该端口为输入端口，与二次系统相连； 值为“Output”时，表示该端口为输出端口，与二次系统相连。
type	值为“NonRemovable”时，表示该端口时不可移除的； 值为“Real”时，表示该端口传递的是实数值； 值为“Ground”时，表示该端口为接地端口，直接与接地元件相连。
端口存在条件	根据元件的参数值判断端口是否存在。

因为在 ADPSS 仿真平台中，元件的端口以序号形式进行标识，所以需要将 PSCAD/EMTDC 模型中的端口名称与 ADPSS 中的端口序号建立一一对应关系，以确保模型在跨平台仿真时端口连接的正确性和数据传递的一致性。

三相双绕组变压器是电力系统中常用的重要设备，主要用于电压变换和电能传输，在第三章的电气岛划分中将不同电压等级的电网连接起来，实现跨电压等级的能量交换。三相双绕组变压器的配置文件中端口信息如表 2-2 所示：

表 2-2 三相双绕组变压器的端口配置信息

port mode	name	x	y	mode	type	存在条件
Natural	G1	-18	36	Electrical	NonRemovable	(YD1 == 0) && (View != 0)
Transfer	TapI	-54	-18	Input	Real	(Tap) && (View != 0)
Transfer	TapI	-36	-72	Input	Real	(Tap) && (View != 0)
Natural	G2	0	36	Electrical	NonRemovable	(YD2 == 0) && (View != 0)
Natural	G2	0	0	Electrical	Ground	(YD2 == 1)
Natural	G1	-18	0	Electrical	Ground	(YD1 == 1)
Natural	G1	-36	72	Electrical	NonRemovable	(YD1 == 0) && (View == 0)
Natural	G2	36	72	Electrical	NonRemovable	(YD2 == 0) && (View == 0)
Natural	C1	-72	36	Electrical	NonRemovable	(View == 0)
Natural	A1	-72	-36	Electrical	NonRemovable	(View == 0)
Natural	C2	72	36	Electrical	NonRemovable	(View == 0)
Natural	A2	72	-36	Electrical	NonRemovable	(View == 0)
Natural	B2	72	0	Electrical	NonRemovable	(View == 0)
Natural	B1	-72	0	Electrical	NonRemovable	(View == 0)
Natural	N1	-54	0	Electrical	NonRemovable	(View != 0)
Natural	N2	36	0	Electrical	NonRemovable	(View != 0)

单相视图下三相双绕组变压器的 PSCAD/EMTDC 端口名称与 ADPSS 端口序号对应表格如表 2-3 所示：

表 2-3 三相双绕组变压器端口 PSCAD 与 ADPSS 对应表

参数取值	PSCAD 端口名称	ADPSS 端口序号
View = 0	N1	1
	N2	2
	G1	3
	G2	4
View = 1	A1	1
	B1	2
	C1	3

表 2-3（续表）

参数取值	PSCAD 端口名称	ADPSS 端口序号
View = 1	A2	4
	B2	5
	C2	6
	G1	7
	G2	8

PSCAD/EMTDC 内一个三相双绕组变压器的拓扑图如图 2-2 所示：

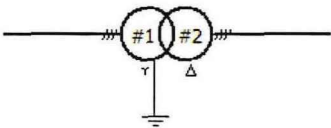


图 2-2 PSCAD 内三相双绕组变压器拓扑图

该变压器与拓扑有关的关键参数如表 2-4 所示：

表 2-4 三相双绕组变压器拓扑参数表

参数名	参数值
View	1
Tap	0
YD1	1
YD2	0

如上表可知，由于参数 View 取值为 1，所以三相双绕组变压器是单相视图下的变压器，所以只有 N1、N2 两个端口与电路相连；因为参数 Tap 为 0，所以没有调压触头端口；因为参数 YD1 取值为 1，所以变压器一次绕组有一个接地端口；因为 YD2 取值为 0，所以变压器二次侧没有接地端口，共三个端口，与图 2-2 一致。参考表 2-3 可知，该三相双绕组变压器在 ADPSS 内共有 3 个端口，N1 端口对应的序号为 1，N2 端口对应序号为 2，G1 端口对应序号为 3。

2.2.2 解析拓扑连接关系

在解析拓扑连接关系的过程中，以节点作为连接关系的载体，为每一个端口都创建一个节点对象（node）。该对象中除了存储节点的坐标信息 x、y 之外，还需要记录以下内容：

- 与该节点相连的元件 id——component_id；
 - 与该节点相连的线路 id——wires_id；
 - 与节点相连的元件数量——n_component；
 - 与节点相连的线路数量——n_wires。
- 其中，component_id 与 wires_id 均为 int 型 map 容器，依次存放与节点相

连的元件 id, $n_component$ 和 n_wires 为容器的大小。

获取拓扑连接关系的流程图如下图所示：

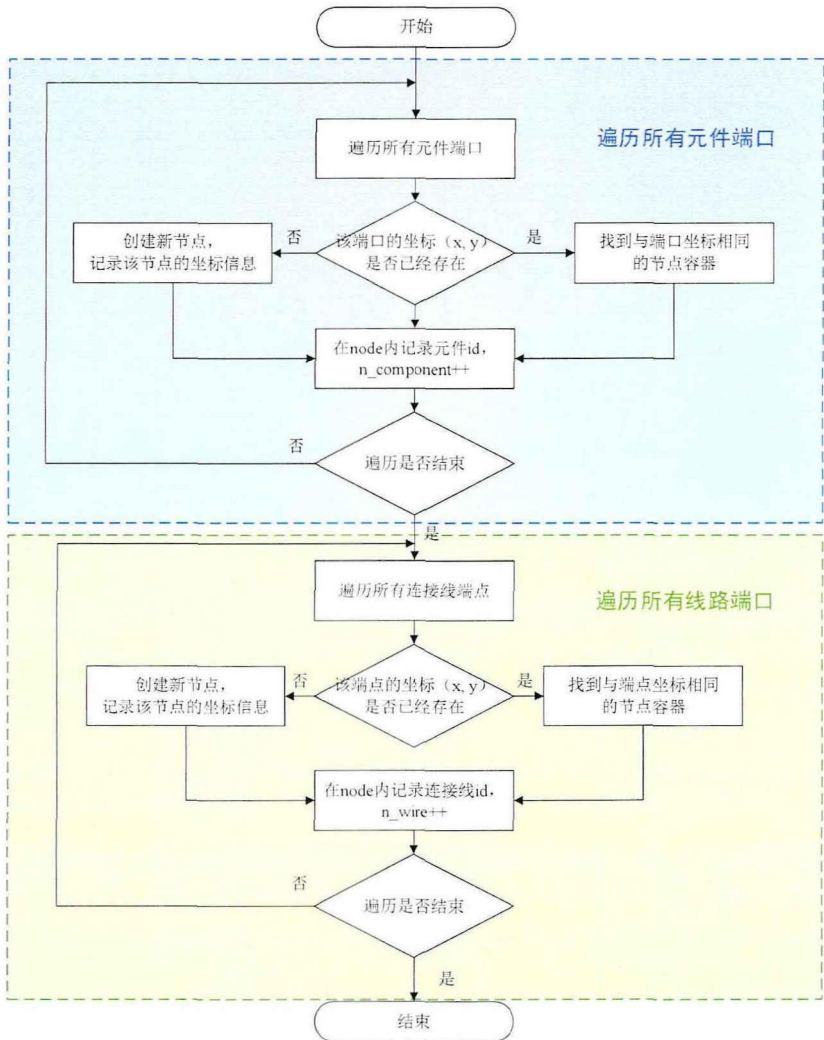


图 2-3 拓扑连接关系解析流程图

拓扑关系的解析主要分为两部分。首先遍历元件的所有端口，根据坐标信息作为辨别标准：如果相同坐标的 **node** 已存在，那么就将元件及端口信息存入对应的 **node** 里；如果没有相同坐标的 **node**，那么需要新建该坐标的 **node**，并存入该元件及端口信息。元件遍历结束后，对连接线进行类似的操作，直到所有连接线的端点均遍历完成。至此，所有 **node** 中已经记录了所有元件和连接线的信息，该模型中的拓扑连接关系已经解析完毕。

2.3 一次系统的拓扑连接

在 ADPSS 中，一次系统的元件之间必须通过母线连接；但是在 PSCAD 中，一次系统的元件之间可以不通过母线直接使用导线相连。所以对于一次系统的

拓扑连接，需要先建立母线，再根据连接关系实现拓扑连接^[37]。

2.3.1 建立母线

在 ADPSS 中，一次元件的连接规则要求连接必须从元件的端口出发，在对应的母线结束，不允许端口与端口直接连接，也不允许母线与母线之间直接使用连接线相连。因为之前解析出的拓扑连接关系是端口与端口之间的连接关系，也是节点与节点的连接关系，所以需要进一步处理，建立母线与元件的连接关系，为实现一次系统的拓扑连接提供基础。

母线的建立分为初筛母线和二次筛选两部分。初筛母线就是根据节点的连接信息直接筛选母线的过程，通过划分节点连接的元件和线路情况，初步筛选出母线节点。具体流程如图 2-4 所示：

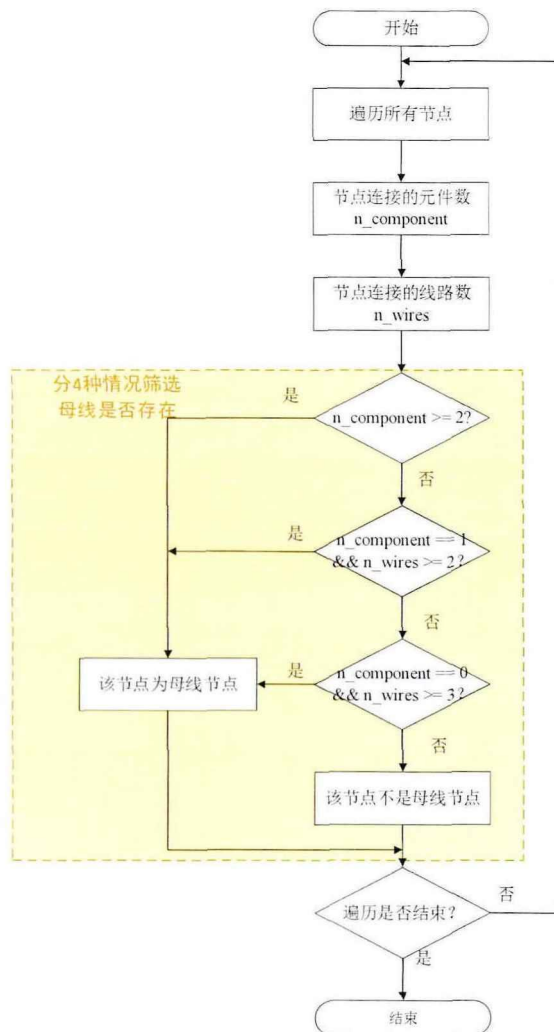


图 2-4 母线初筛流程图

在母线节点的初筛过程中，本文根据节点的连接关系将其划分为四种情况。具体而言，如果节点满足以下任一条件，则将其划分为母线节点：（1）与至少

两个元件相连；(2) 与一个元件和两条以上连接线相连；(3) 连接了至少三条连接线。只有以上三种情况均不满足时，节点才不被视为母线节点。由于初筛后的母线节点无法保证每个元件端点都能与母线节点相连，因此需要进一步进行二次筛选。二次筛选的具体流程如图 2-5 所示：

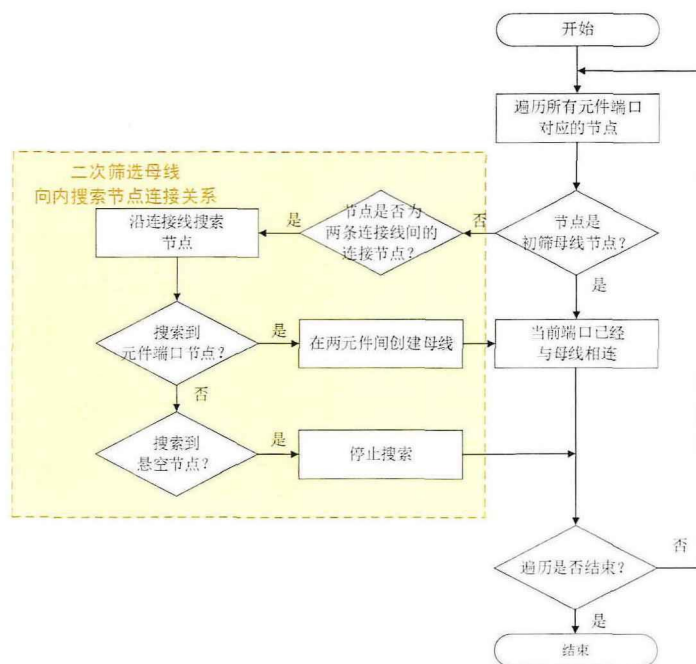


图 2-5 二次筛选母线流程图

二次筛选母线的过程是从各元件的端口向系统内部检索的过程。当元件端口是初筛后的母线节点时，跳过该端口，处理下一个端口。当该端口是两条连接线之间的连接节点时，需要向连接线另一端搜索：搜索到另一个元件端口节点且仍然没有找到母线节点时，需要在两个元件之间创建母线；检索到悬空节点时，停止检索。

母线节点的二次筛选过程遵循从各元件端口向系统内部检索的逻辑，具体步骤如下：若元件端口对应的是初筛后的母线节点，则跳过该端口，继续处理下一个端口；若端口是两条连接线之间的连接节点，则向连接线的另一端进行搜索：若搜索到另一个元件端口节点且仍未发现母线节点，则需在两个元件之间创建新的母线；若检索到悬空节点，则终止检索。

通过两次母线筛选，确保所有元件端口均与对应的母线成功连接，从而完成节点之间连接关系向节点与母线连接关系的转换。这一过程为一次元件的拓扑连接奠定了重要基础。

2.3.2 一次元件的拓扑连接

基于 2.2 解析出的拓扑连接关系和 2.3.1 得到的母线连接关系，可以得到各

母线与元件的情况以及每个 PSCAD/EMTDC 元件端口与 ADPSS 的对应情况。在 ADPSS 内创建元件后，可以直接根据母线与端口连接连线进行对应的连接操作。在元件端口连接情况的记录中，将元件的连接情况划分为三种类型：

- (1) 如果端口悬空，那么不进行任何操作；
 - (2) 如果端口直接接地，那么直接将对应端口与接地元件相连；
 - (3) 如果端口与母线相连，那么根据记录的母线信息，与对应母线连接。
- 通过以上操作，可以完成一次元件的拓扑连接。

2.3.3 子电路的拓扑连接

在 PSCAD/EMTDC 中，“exnode”元件被用作子电路与外部电路之间进行信号和能量交互的桥梁，如图 2-6 a)所示。而在 ADPSS 中，实现相同功能的是“外部节点”元件，如图 2-6 b)所示。

在 PSCAD/EMTDC 中，子电路通过内部外部节点名称与上级电路匹配，而在 ADPSS 中，子电路内部外部节点名称与 PSCAD/EMTDC 一致，但子电路端口用序号表示。为实现拓扑准确转换，需标记子电路内部各外部节点对应的端口序号，为上级电路内子电路元件的连接提供拓扑基础。



图 2-6 PSCAD/EMTDC 内外节点元件的图像

为了在 ADPSS 中完成子电路与上级电路的有效连接，需要首先在子电路内部完成“外部节点”元件的定义与布局。当子电路内部的“外部节点”元件配置完成后，子电路作为一个整体元件才能在上级电路中生成对应的端口，从而实现与其他元件的拓扑连接。

因为子电路端口的生成依赖子电路内部“外部节点”元件的摆放，所以当拓扑连接操作按电路层次逐级展开时，即先完成主电路布局和拓扑连接，再配置子电路内部元件，可能导致主电路中的子电路无法生成端口，进而影响主电路的拓扑连接。因此，在 ADPSS 建模时，应优先根据子电路的功能需求，在子电路内部合理布置“外部节点”元件，确保子电路在上级电路中具备相应端口。随后，依次完成子电路内部元件的布局及拓扑连接，并在主电路中实现与一次设备的完整连接和布局优化。这种建模顺序确保了子电路与上级电路间的拓扑关系顺利实现，避免因端口缺失造成拓扑断裂。

在实际工程中，电路系统可能存在多层次嵌套结构，如图 2-7 所示。为确保模型完整性和端口连接正确性，本节提出以深度优先搜索算法（Depth-First Search, DFS）^[38,39]为基础的子电路拓扑连接方法。本方法应用于一次元件拓

扑连接之前，以一级主电路为起点，使用 DFS 算法递归遍历其包含的各级子电路，逐层解析拓扑结构，通过匹配外部母线的名称和子电路元件的端口名称，依次完成不同层级子电路及其端口的创建与关联。

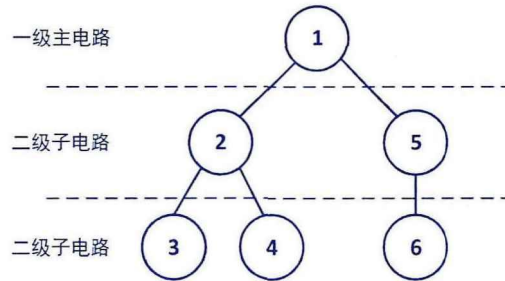


图 2-7 深度优先搜索示意图

使用深度优先搜索算法的目的是优先深入最深的子电路建立外部节点，方便子电路元件在上级电路中的拓扑连接。基于深度优先搜索算法的子电路拓扑连接方法伪代码如表 2-5 所示。

表 2-5 基于深度优先搜索的子电路拓扑连接方法伪代码

算法 2.1 基于深度优先搜索的子电路拓扑连接方法

```

已知: circuit_info // 包含 PSCAD 内各电路的外部节点名称; 子电路元件及端口名称。
求解: topology = {} // 存储子电路的拓扑连接关系
1:  main_circuit = circuit_info.get_main_circuit() // 获取主电路，并将其压入栈
2:  stack.append((main_circuit, None))
3:  while stack: // 使用 DFS 算法检索到最底层电路
4:      current_circuit, parent_circuit = stack.pop() //取出当前电路及其上级电路
5:      if current_circuit.is_leaf()://如果当前电路是最底层子电路（即没有子电路）
6:          topology[current_circuit] = [] //初始化当前电路的拓扑结构
7:          for node in current_circuit.get_external_nodes():
8:              topology[current_circuit].append(f"Bus_{node}") // 创建外部母线节点
9:          end for
10:      else
11:          topology[current_circuit] = [] // 初始化当前电路的拓扑结构
12:          for subcircuit in current_circuit.get_subcircuits(): //遍历子电路
13:              stack.append((subcircuit, current_circuit)) //压入栈，继续 DFS
14:          end for
15:      end if
16:      if parent_circuit: // 处理当前电路与其上级电路的拓扑连接
17:          topology[parent_circuit].append((current_circuit, topology[current_circuit]))
18:      end if
19:  while stack is not empty // 继续执行，直到栈为空
    
```

2.4 二次系统的拓扑连接

在 PSCAD/EMTDC 中, 二次元件通过信号端子实现连接; 而在 ADPSS 中, 二次元件之间通过线路直接相连。为统一建模并明确区分一次系统与二次系统, 本节引入虚拟二次母线作为拓扑关系的载体。虚拟母线通过属性与一次系统的母线区分, 且不实际模型中创建物理节点, 其核心作用是以虚拟化方式存储二次信号端口的连接关系, 作为二次系统拓扑分析的中介层。二次信号遵循严格的单向多播机制, 每个信号具有唯一的输出端, 可关联多个输入端, 形成“单源端-多宿端”的树状结构。

为实现二次系统拓扑连接, 本节提出了一种基于信号流向的拓扑分组方法, 伪代码如表 2-6 所示:

表 2-6 基于信号流向的拓扑分组方法伪代码

算法 2.2 基于信号流向的拓扑分组方法

已知: allBuses: 所有母线列表; componentProperties: 元件性质;

portProperties: 端口性质; adpssPortNumbers: ADPSS 端口号

求解: signalGroups: 信号组; 二次系统的拓扑连接关系

```

1:  for each bus in allBuses: // 遍历所有母线
2:      // 检查母线是否与一次元件相连
3:      isPrimary = false
4:      for each component in bus.connectedComponents:
5:          if componentProperties[component] == "Primary":
6:              isPrimary = true
7:              break
8:      end if
9:  end for
10:  if isPrimary: // 若母线为一次母线, 跳过该母线, 处理下一条母线
11:      continue;
12:  end if
13:  bus.type = "Virtual" // 标注虚拟母线
14:  for each port in bus.connectedPorts: // 遍历虚拟母线连接的所有端口
15:      port.properties = portProperties[port] // 确定端口的性质 (输入/输出)
16:      port.adpssPortNumber = adpssPortNumbers[port] // 确定 ADPSS 内端口号
17:  end for
18:  signalGroup = new SignalGroup(bus.connectedPorts) // 生成信号组
19:  signalGroups.add(signalGroup)
20: end for
21: for each signalGroup in signalGroups: // 遍历各信号组, 构建拓扑连接关系
22:     signal.outputPort.connectedPorts = signal.inputPort
23: end for

```

本方法共分三阶段实施：首先根据 2.3 节解析出的连接关系，通过虚拟母线媒介确定绑定信号名称和该信号的各端口；随后根据 2.1 节各端口的性质和转换前后端口对应关系，分析信号流向，确定输出信号的信号源和输入宿端；最后根据信号名称生成信号组，建立输出端与输入端的完整连接关系，实现二次信号的拓扑连接。该方法通过虚拟母线实现二次系统拓扑的清晰化表达，为二次系统建模提供了系统化的解决方案。

2.5 信号传输系统转换方法

信号端子主要用于传递信号，既可以在一次与二次之间传递信号，可以在本图层次二次电路与控制器之间传递信号，也可以在不同图层次之间传递信号，甚至还有一些特殊元件也需要处理。在解析信号传输关系的过程中，创建一个信号对象（signal），该对象内除了存储信号名称外，还需要记录以下内容：

信号名称——signal_name；

产生信号的元件，即信号的来源——signal_origin；

产生信号的元件类型——signal_origin_type；

产生信号的图层——signal_origin_hierachy；

使用信号的元件——signal_receive；

使用信号的元件类型——signal_receive_type；

使用信号的图层——signal_receive_hierachy。

信号传输系统处理流程图如图 2-8 所示：

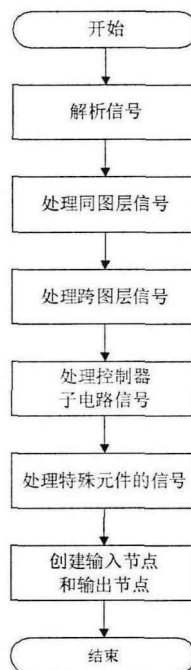


图 2-8 信号传输系统转换方法流程图

对于同图层内一次系统和二次系统之间传输的信号而言，由于在 PSCAD/EMTDC 中，同一图层内一次与二次间的信号传递只需要满足信号端子名称相同的条件即可，所以需要根据该信号的具体情况记录相应的信号对象 signal 的参数信息。

对于跨图层信号的处理，需要了解 PSCAD/EMTDC 中实现信号跨图层传递的方法。在 PSCAD/EMTDC 使用无线链接（Wireless Radiol Links）实现跨图层的信号传递，当该元件的作用是将信号发送给另一个电路图层的信号时，该元件的“Mode”参数设置为“Transmit”；当该元件的作用是将信号发送给另一个电路图层的信号时，该元件的“Mode”参数设置为“Receive”。通过分析各无线链接元件的参数，可以得到各跨电路图层信号的来源电路图层以及被使用的电路图层，可以为信号传递系统提供基本信息。

二次系统控制器子电路是一个特殊的存在，这种子电路在 PSCAD/EMTDC 内与一次子电路元件类似，输入端口和输出端口通过连接线与其他元件相连。但是这类子电路在 ADPSS 内只能作为单独的 UDM 存在，不能够与其他元件直接相连，只能通过 UDM 内部创建输入节点和输出节点，实现信号的传输。在这种情况下，需要解析各端口的拓扑连接情况，确认各端口的信号连接情况，记录与各端口连接的信号信息。此时需要注意的是，有些信号可能是经过 radiolink 实现与该控制器的上级电路交互，但实际上信号只与控制器产生交互，并没有与控制器上级电路的二次系统或一次系统交互。在这种情况下，需要修改该信号所对应的 signal 内的信息，将信号内原本记录的控制器上级电路图层信息修改为子电路对应信息。类似地，如果存在一次系统信号直接与控制器交互，并未与二次系统产生联系，那么也需要修改 signal 信息，将之前标记的该二次系统对应图层信息修改为控制器内信息。

在 PSCAD/EMTDC 内，并非所有元件的参数都是数字，有些元件的参数可以设置为变量。当元件的参数类型为“variable”时，这个参数既可以是信号名，也可以是常数。对于此类参数，当参数为信号名时使用信号端子并记录该信号，当参数为常数时使用电平。通过参数的第一个字符判断该参数是信号名还是常数，创建相应的信号端子或者常数。如果参数为信号名，根据信号名找到信号的来源，寻找相应的 signal 对象，将该元件记录为接收信号的元件，并根据元件的具体信息解析相应的参数。

所有信号解析完毕后，需要创建输入节点与输出节点实现信号传输。当产生或接收信号的元件是一次系统时，只需要在接收或产生信号的 UDM 电路内创建 UDin 或 UDout。当信号的产生和接收都发生在二次元件之间时，与信号产生和接收相关的 UDM 电路内创建 UDout 和 UDout。

2.6 算例分析

以 Cigre 直流工程算例为例，采用本章提出的基于分层拓扑解析的电磁暂态模型转换方法转换，转换前后的电磁暂态模型拓扑对比图如下图所示：

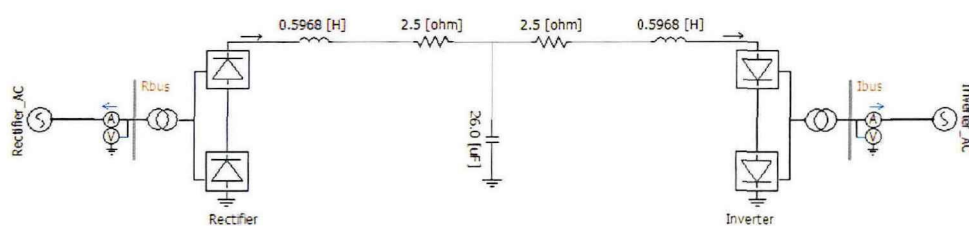


图 2-9 转换前 PSCAD/EMTDC 内 Cigre 主电路图

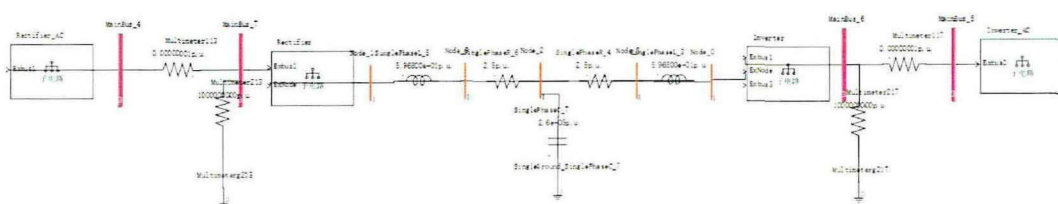


图 2-10 转换后 ADPSS 内 Cigre 主电路图

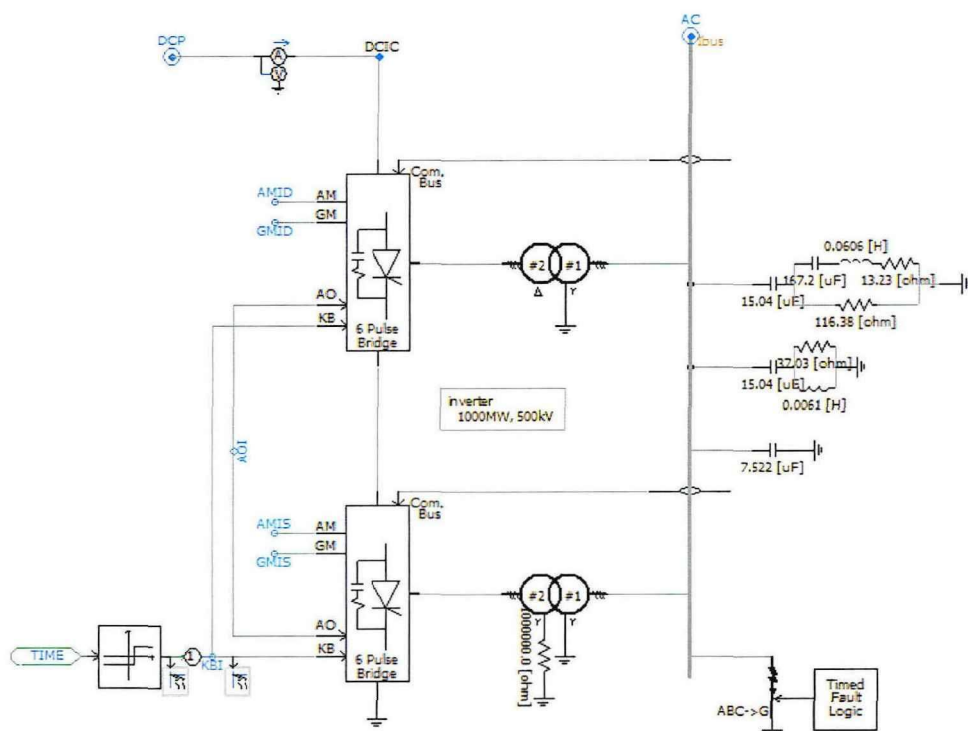


图 2-11 转换前 PSCAD/EMTDC 内 Cigre 电路一次电路图

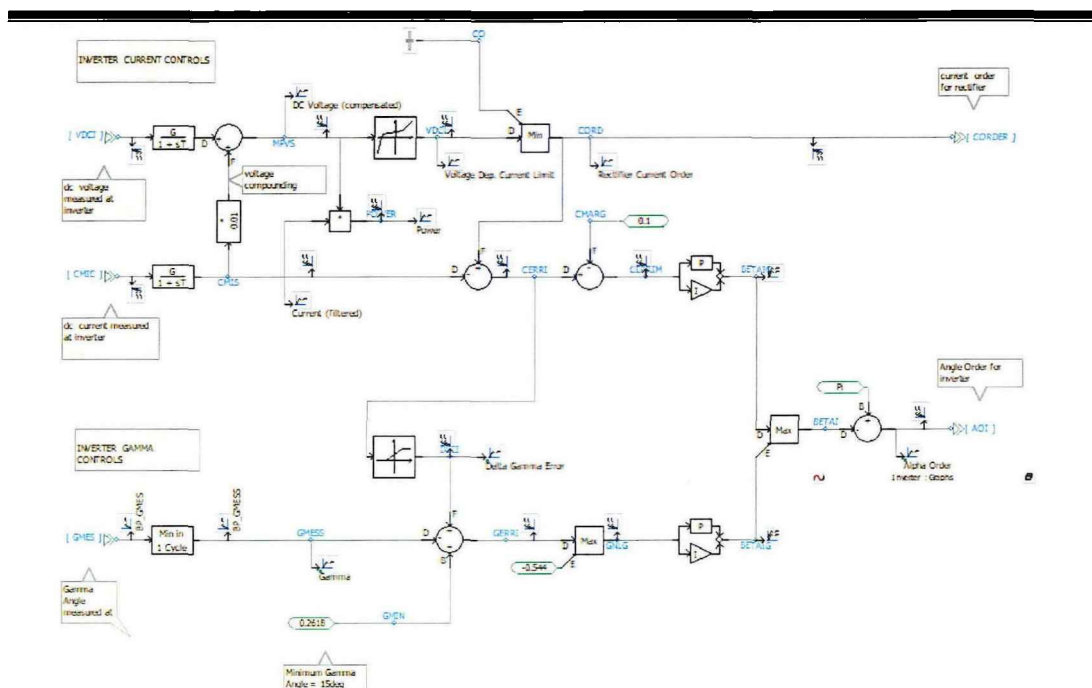


图 2-15 转换前 PSCAD/EMTDC 内 Cigre 逆变电路二次控制器电路图

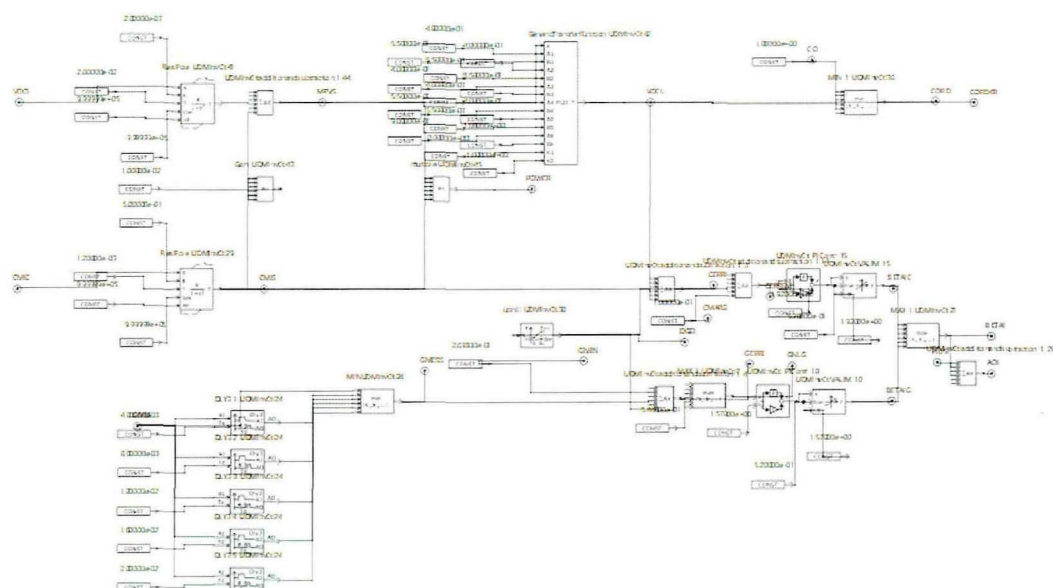


图 2-16 转换后 ADPSS 内 Cigre 逆变电路二次控制器电路图

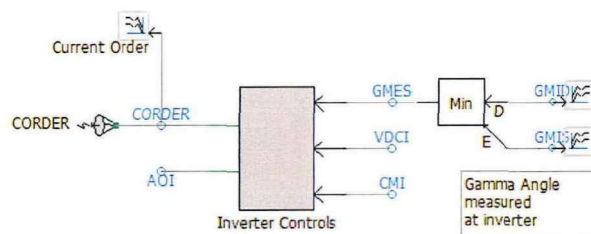


图 2-17 转换前 PSCAD/EMTDC 内 Cigre 逆变电路二次控制器外部接线图

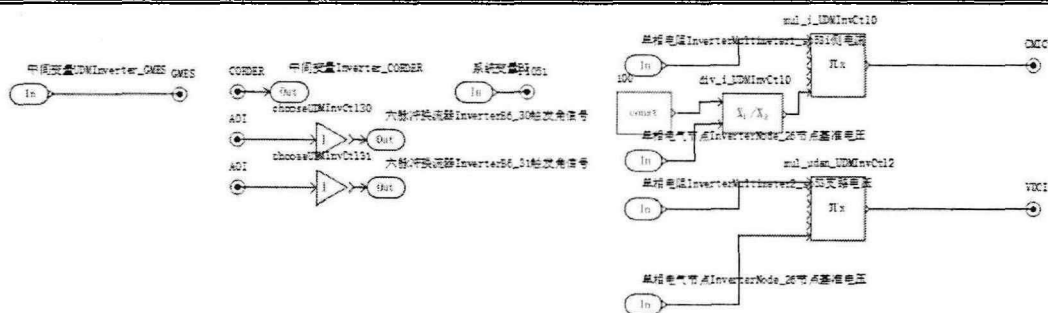


图 2-18 转换后 ADPSS 内 Cigre 逆变电路二次控制器外部接线图

转换前后 Cigre 工程的主电路、逆变侧电源电路、逆变一次电路、逆变二次电路、逆变控制器以及逆变控制器的信号传输系统转换结果一致，证明本章提出的一次系统拓扑转换方法、二次系统拓扑转换方法以及信号传输系统转换方法的合理性。

2.7 本章小结

本章针对 PSCAD/EMTDC 到 ADPSS 模型转换中的拓扑异构性问题，介绍了基于分层拓扑解析的电磁暂态模型转换方法，提出了一套分层解析的拓扑转换架构，主要内容如下：

（1）拓扑连接关系分析：基于解析工程文件和端口配置文件，结合元件参数信息解析元件的端口信息，并根据 ADPSS 内对应元件的端口序号，建立跨平台元件端口对应关系；基于元件和线路的端口信息，解析元件和线路的连接关系，为分层拓扑解析提供拓扑数据支撑。

（2）一次系统的拓扑连接：依据 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 连接规则差异，建立母线并重构母线与元件的连接关系，实现一次系统的等效转换；为解决子电路与上级电路的拓扑连接问题，本章采用深度优先搜索算法解析子电路的嵌套关系，确保跨图层复杂电路的完整转换。

（3）二次系统的拓扑连接：设计基于信号流向的拓扑分组方法，以虚拟母线作为连接关系的载体，根据“多输入单输出”连接原则，结合元件端口性质实现二次系统的准确连线。

（4）信号传输系统：针对 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 信号传输逻辑差异，引入信号溯源机制，通过信号分类和流向解析解决了信号传输系统在转换过程中的兼容性问题。

通过 Cigre 直流算例的验证，证明了该分层拓扑解析方法在一次系统、二次系统及信号传输系统的拓扑转换中的有效性和正确性。

第3章 基于基准电压动态继承的母线基准电压处理方法

3.1 引言

在电磁暂态仿真中，基准电压是标幺值系统与有名值系统间进行参数转换的核心参考。与 PSCAD/EMTDC 允许元件直接连接不同，ADPSS 仿真平台严格要求一次元件必须通过具有明确基准电压的母线实现相连。这一差异使得基准电压的自动解析成为 PSCAD 到 ADPSS 模型转换的核心挑战之一。

为了正确解析出电磁暂态模型的基准电压，本章提出一种基准电压动态继承方法：定义基于基准电压的电气岛概念，基于第二章解析出的电磁暂态模型拓扑连接关系，将变压器等特殊元件视为开路，将模型拓扑图抽象为图结构，通过改进的 shortcutting 算法划分电气岛，结合电力设备参数与电压等级标准解析电气岛基准电压，实现局部区域内基准电压的精确继承。针对跨图层电气连接，设计基于深度优先搜索的基准电压传播算法，利用边界元件的电压变换特性，建立电气岛间的基准电压继承关系。

3.2 以基准电压为基础的电气岛

在电磁暂态模型中，不同电压等级的区域通常拥有独立的基准电压，每个区域的基准电压直接对应该区域内所有设备的额定电压等级，例如 10kV、110kV、220kV 等。这种独立性确保了每个区域内的标幺值参数能够正确反映实际物理量，从而为标幺值计算和电磁暂态仿真提供基础。

根据基准电压的区域特性，本文提出以基准电压为基础的电气岛的概念。以基准电压为基础的电气岛是指电磁暂态模型中通过电气拓扑连接形成的局部区域，这些区域内所有元件均直接或者间接相连，并且共享相同的基准电压。由于变压器等特殊元件的不同节点通常具有不同的基准电压，因此无法完整地包含在单一电气岛内，而是仅以节点的形式与电气岛相连。通过分析边界元件的电气参数可以获知该元件各节点的基准电压，从而实现基准电压在不同电气岛内的传播和继承。IEEE9 模型电气岛划分原理图如图 3-1 所示：

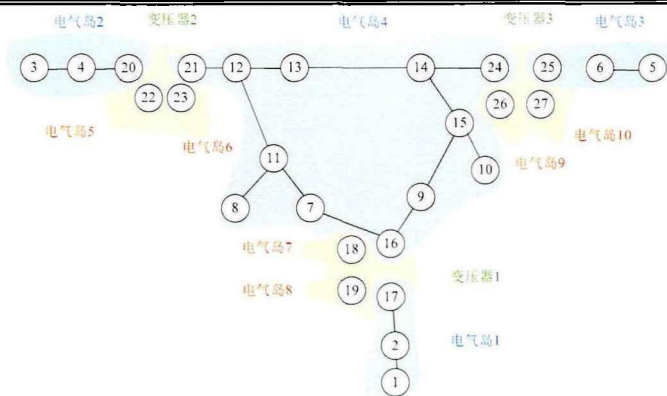


图 3-1 电气岛划分原理图

基于电气岛的概念，本文提出了一种基准电压确定方法。先通过分析电力系统的拓扑结构，将待转换的模型抽象为图结构，其中节点代表母线和关键设备，边代表线路连接关系。通过分析图内的连接关系和连通性将整个模型划分为多个独立的电气岛。每个电气岛对应一个连通分量，内部元件和线路仅与本岛相连。通过分析可确定基准电压的元件参数，系统地确定了每个基准电压岛内元件和母线的基准电压值。

3.3 全域路径优化算法的电气岛构建

3.3.1 图的基本概念

图论作为几何数学的一个分支，以图为研究对象，由若干个节点以及连接两点的边组成。图将节点作为事物的描述，将事物某种特性之间的相关性作为构建边的依据，用于描述这些事物之间的特定关系^[52-56]。结合电路图的特点，为了基于模型的拓扑连接关系形成电气岛，需要将元件作为节点，将电路内的导线作为边，将电磁暂态模型图抽象为无向无权图。

在图论中，连通分量（Connected Component）是一个重要概念。连通分量是指在一个图中，满足以下条件的最大子图：子图中的任意两个顶点之间都存在由有限条边构成的路径，使得这两个顶点相互连通。简单来说，连通分量是图中能够实现内部完全连通的最大节点集合^[57,58]。图 3-2 展示了两个互不连接的连通分量。

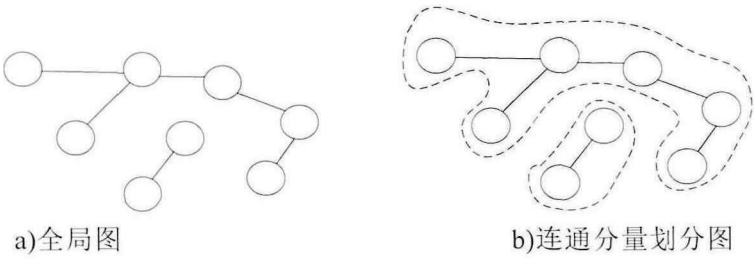


图 3-2 连通分量定义图

在电磁暂态模型中，电气岛内部节点可以通过有限条边实现完全连通，而不同电气岛之间则无法通过路径实现连通。连通分量能够很好地描述电气岛的这个结构特性。通过分析连通分量，可以识别出电磁暂态模型中的各电气岛及连通分量，直观地反映电气岛之间的隔离状态。

连通分量算法用于无向图中，通过搜索算法（如 DFS 或 BFS）或并查集算法，找出所有连通分量。搜索算法从一个节点出发，使用遍历的思想沿着节点连接的边访问并标记相连的所有节点，直至访问完毕当前连通分量连接的所有节点。再从未被访问的节点开始，如此重复直至完成图中所有节点的访问，连通分量由具有相同标记的顶点构成。

并查集（Union-Find）是一种高效的数据结构，将每个集合都表示为一棵树，树中的每个节点都指向其父节点，树的节点是该集合的代表元（或称为根节点），所有属于同一集合的元素通过路径最终指向同一个根节点。但是并查集算法的性能受到多种因素的影响，如集合合并和查找操作的效率。

并查集算法常见的改进思路主要分为路径压缩和按秩合并两种^[59]。路径压缩是指让同一集合内的元素都指向一个根节点，避免因为合并次数增加而增加查询节点的根节点。随着集合拥有元素数量的增加，集合内的标签数组会形成链状结构，查询根节点的时间复杂度也随之增加，使用路径压缩算法可以避免此情况的发生。路径压缩前后集合内的元素根节点关系如图 3-3 所示：

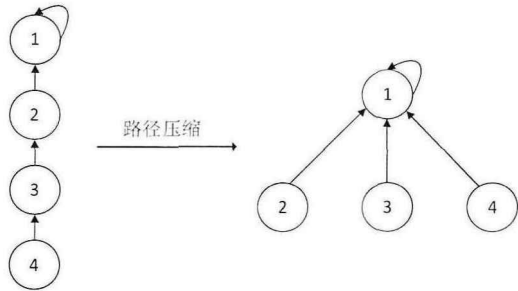


图 3-3 路径压缩示意图

按秩合并是指在合并的过程中将秩的集合合并到秩大的集合中。如果两个集合的秩相等，那么将任意一个集合合并到另一集合中。这一做法可以降低集合的深度，达到缩短节点查询路径和防止链式搜索出现的目的。具体合并过程如图 3-4 所示：

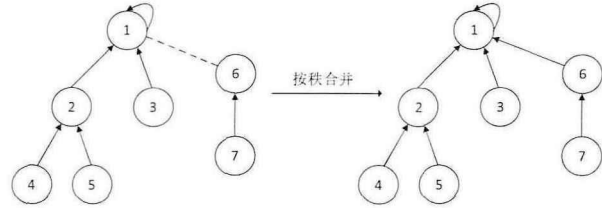


图 3-4 按秩合并示意图

3.3.2 全域路径优化算法

全域路径优化算法（shortcutting 算法）在并查集算法中引入 shortcutting 思想，结合了路径压缩和路径分割的方法，可以进一步降低算法的时间复杂度，提高执行效率^[60]。shortcutting 算法执行流程如图 3-5 所示：

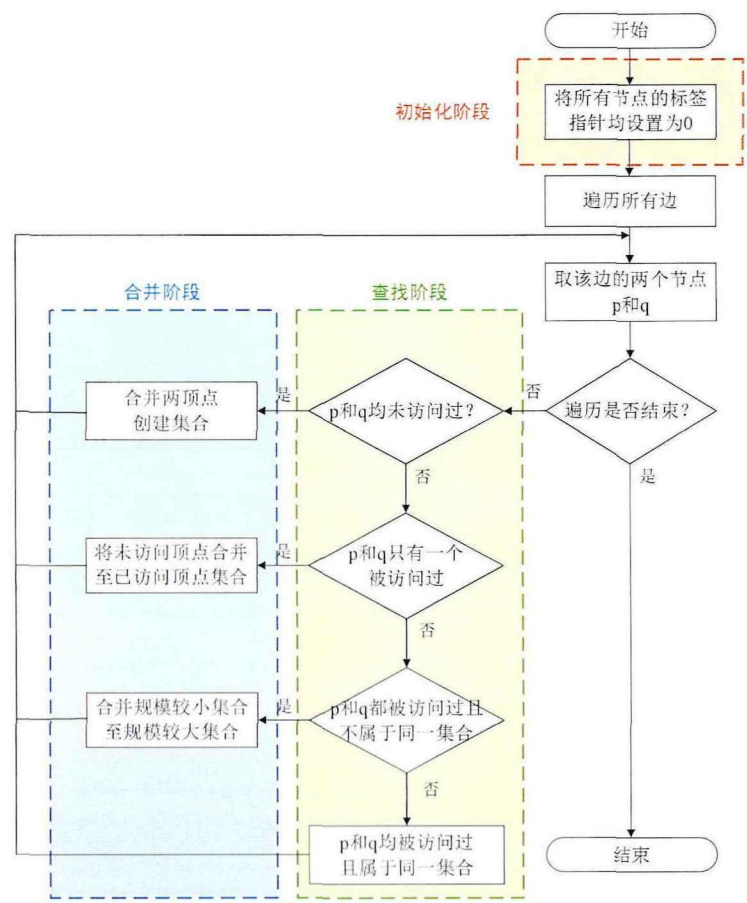


图 3-5 shortcutting 算法流程图

（1）初始化阶段：为了方便标记是否访问过此节点，标签指针被设置为统一的初始值 0。初始化标签如式 (3-1)所示：

$$label_i = 0(i = 1, 2, \dots, n) \tag{3-1}$$

（2）查找阶段：在查找阶段，根据边的两个顶点的标签指针的不同情况，可以分为 4 种情况分别处理。

（3）合并阶段：在合并阶段，shortcutting 算法吸收了路径压缩和路径分割的思想，对于不同的合并情况采取不同的合并策略：当涉及到未被访问的顶点，直接改变未被访问过顶点的标签为另一个集合的代表元；当两个顶点均被访问过且所属集合不同时，将规模较小的集合合并至较大集合^[61-63]。

在以上三种情况中，都采用直接改变待合并元素的标签的方式，压缩了查找路径上的顶点距离集合的代表元的路径，使得涉及到的顶点的标签都直接变

为了代表元顶点，减少了后面 find 操作的次数，并在合并过程中减少了顶点的移动次数。从结构上看，shortcutting 算法使得所有的连通分量集合由标签关系形成的树层级为 2，形成了“flat tree”，具体如图 3-6 所示。

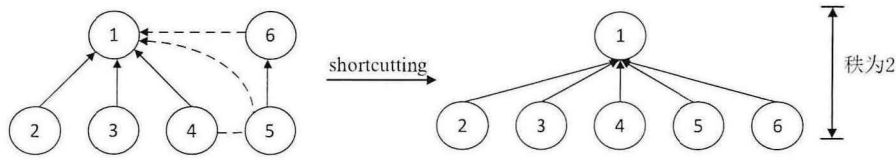


图 3-6 shortcutting 算法示意图

与传统并查集算法相比，shortcutting 算法在合并过程中，直接对所有顶点的标签进行重定向，避免了重复的路径压缩操作，降低合并操作的时间复杂度。在查找操作中，shortcutting 算法通过全局重定向，使得查找操作可以直接访问代表元，进一步优化时间复杂度。

在空间复杂度方面，由于 shortcutting 算法采用全局重定向策略，减少了路径压缩过程中对父节点指针的频繁更新，从而降低了实际运行时的内存访问开销，提升了实际运行的效率。

综上所述，shortcutting 算法在时间复杂度和空间复杂度上均优于传统的并查集算法，在处理大规模数据结构时具有更强的性能和可扩展性，更适合电磁暂态模型的电气岛划分。

3.3.3 基于全域路径优化算法的基准电压岛构建

本节将详细阐述基于 shortcutting 算法构建电气岛的过程。首先，根据电路的连接关系以及图论的相关知识，建立相应的连接关系图。随后，引入 shortcutting 算法以解析图的连接关系，从而获取根据基准电压划分的电气岛。最后，为各电气岛及岛内母线赋予基准电压值。

在构建电气岛的过程中，首先需要对电路的拓扑结构进行系统性建模与分析，并基于图论原理建立精确的连接关系图。基于第二章分析得到的元件拓扑连接关系，将电路连接图遵循“节点-边”二元化原则抽象化为，节点定义与元件电气特性相关，边构建取决于物理连接关系。

节点划分需区分两类元件：一是无电压变换功能的常规元件（如电阻、电容），其所有端点在稳态下电气特性一致，可抽象为单一节点；二是可改变电压的特殊元件（如变压器、子电路），其输入端与输出端基准电压可能不同，需将每个端点单独视为节点，并将元件本身视为开路状态。

边的构建依据实际物理连接关系，将连接线抽象为无向无权边。通过上述建模方法，可以将电磁暂态模型拓扑连接关系转化为无向图 $G=(V,E)$ ，其中顶点集合 V 对应网络中的所有电气节点，边集合 E 表征节点间的连通关系。

使用 shortcutting 算法主要包括初始化、查找和合并三个部分的内容。在初始化的过程中，为每个电路节点分配初始标签 0，表示均未被访问，并创建电气岛大小字典记录每个根节点电气岛的大小，创建两个成员列表分别记录电气岛内节点的集合和边的集合。

在查找和合并的过程中，将根据各边的顶点的电气岛归属情况，分类处理电气岛的合并操作。具体执行过程的伪代码如表 3-1 所示：

表 3-1 基于 shortcutting 算法的电气岛划分方法伪代码

算法 3.1 基于 shortcutting 算法的电气岛划分方法

已知： $E \subset G$

求： 电气岛 (island)

```

1:  for  $i = 1$  to  $n$  do                //初始化
2:       $label[i] \leftarrow 0$           // 0 表示未访问
3:       $island[i] \leftarrow \{v[i]\}$     // 每个节点初始构成单独的电气岛
4:       $islandSize[i] \leftarrow 1$       // 每个岛的初始大小为 1
5:       $islandEdges[i] \leftarrow \{\}$   // 每个岛的边集合
6:  end for
7:  //对边的两个顶点执行查找和合并操作
8:  For  $(v_i, v_j)$  in  $E$  do
9:      // find 阶段
10:      $p \leftarrow find(v_i)$ 
11:      $q \leftarrow find(v_j)$ 
12:     // union 阶段
13:     if  $(p \neq q) \parallel (p = q = 0)$  then    //两顶点属于不同的电气岛
14:         //将规模小的电气岛合并至规模大的岛内
15:         if  $islandSize[p] \geq islandSize[q]$  then:
16:             for each node  $u$  in  $island[q]$  do:
17:                  $label[u] \leftarrow p$ 
18:             end for
19:              $island[p] \leftarrow island[p] \cup island[q]$ 
20:              $islandSize[p] \leftarrow islandSize[p] + islandSize[q]$ 
21:              $islandEdges[p] \leftarrow islandEdges[p] \cup islandEdges[q]$ 
22:         else:
23:             for each node  $u$  in  $island[p]$  do:
24:                  $label[u] \leftarrow q$ 
25:             end for
26:              $island[q] \leftarrow island[p] \cup island[q]$ 
27:              $islandSize[q] \leftarrow islandSize[p] + islandSize[q]$ 
28:              $islandEdges[q] \leftarrow islandEdges[p] \cup islandEdges[q]$ 

```

表 3-1（续表）

算法 3.1 基于 shortcutting 算法的电气岛划分方法

```
29:         end if
30:     end if
31:     if (p = q) && (p ≠ 0) && (q ≠ 0) then    //两节点属于相同的电气岛
32:         //跳过本条边
33:     end if
34: end for
```

通过上述操作，成功实现了对电磁暂态模型电气岛的划分，每个电气岛内部各元件和母线的基准电压都相同，但是并没有解析出这些电气岛的基准电压。

在电力网络中，变压器、换流器等关键设备是基准电压的重要来源。首先，量化分析这些特殊元件的电压参数，判定其端口电压为交流或直流，全面掌握其电压特性。其次，结合电力系统电压等级划分标准，明确各电压等级的基准电压值及允许波动范围。将特殊元件的电压参数与电压等级表匹配，确定其所属电压等级。通过这一流程，可推导出电力网络中关键设备的基准电压值，为系统分析与划分提供依据。基准电压划分如表 3-2 所示：

表 3-2 电压等级与基准电压划分表

电压等级/kV	基准电压/kV	电压裕度最小值/kV	电压裕度最大值/kV
3	3.15	2.7	3.3
6	6.3	5.4	6.6
10	10.5	9	11
35	38	31.5	38.5
60	63	54	66
110	115	99	121
220	230	198	242
330	345	297	363
500	525	450	550
750	785	675	825
1000	1050	900	1100

根据特殊元件的拓扑连接关系，识别其各端口所连接的电气岛。将特殊元件的基准电压值赋给其所在的电气岛，进而为其内部所有元件和母线赋值相同的基准电压。

3.3.4 算例分析

以 IEEE 14 节点为例，PSCAD/EMTDC 电磁暂态模型接线图如图 3-7 所示：

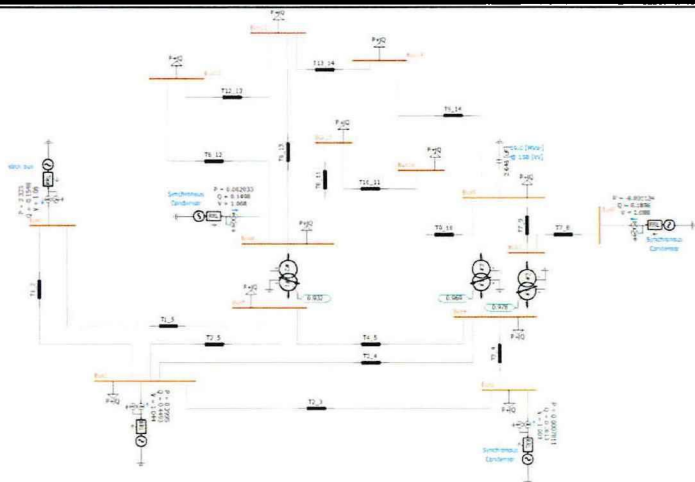


图 3-7 IEEE 14 算例接线图

(1) 建立图结构。IEEE14 算例的图结构如图 3-8 所示：

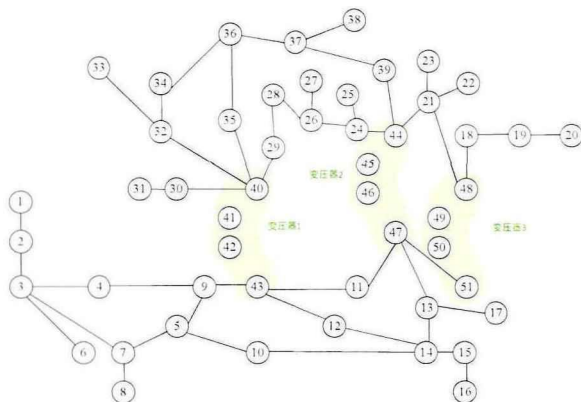


图 3-8 IEEE 14 结构图

(2) 电气岛划分结果及母线基准电压赋值结果如表 3-3 所示：

表 3-3 电气岛构建运行结果

序号	电气岛内包含的节点	规模	基准电压/kV
1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,43,47,51	20	121
2	18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30, 31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,44,48	15	121
3	41	1	121
4	42	1	121
5	45	1	121
6	46	1	121
7	49	1	121
8	50	1	121

由于 3 个变压器的绕组均为 110kV 电压等级，所以该模型所有元件和母线的基准电压均为 121kV。根据上表的电气岛赋值结果可以看出，本算例母线基准电压转换结果是符合分析结果的，证明了本节所提出的母线基准电压处理方法的正确性。

3.4 跨图层电气岛的基准电压解析方法

3.4.1 基于深度优先搜索算法的跨图层电气岛基准电压解析方法

通过上一节分析，电磁暂态模型被划分为若干具有相同内部基准电压的电气岛，其基准电压值可通过解析关键设备的电压参数获取。上节分析主要围绕单一电路图层内的电气岛划分，未能实现跨图层交互。由于并非所有电气岛均直接与关键设备相连，而是通过子电路相关元件实现跨图层连接，仅依靠前述分析无法准确获取所有电气岛的基准电压值。

子电路与上级电路的跨图层连接关系主要通过外部母线元件与子电路元件实现。对于未赋基准电压值的电气岛，可通过分析电路的嵌套关系，跨图层求解其基准电压。本文引入深度优先搜索算法，从未赋基准电压值的电气岛出发，递归检索所连接的下级或上级电路电气岛，直至搜索到已赋值的电气岛为止，从而实现跨图层基准电压的准确解析。使用深度搜索算法实现跨图层基准电压检索的过程如表 3-4 所示：

表 3-4 跨图层基准电压解析方法伪代码

算法 3.2 跨图层基准电压解析算法

已知： $island$ ：所有电气岛的集合； $V[i]$ ：电气岛 i 的基准电压值（若未解析，则为 null）；

C ：电气岛 i 内部的子电路元件集合； P ：电气岛 i 连接的外部母线端口集合；

求： $V[i]$ ：所有电气岛的基准电压

```

1:  for  $i = 1$  to  $n$  do //遍历所有电气岛
2:      if  $V[i]$  is not null then:
3:          return  $V[i]$  // 终止条件：电气岛  $i$  已解析基准电压，直接返回
4:      for subCircuit in  $C[i]$ : // 向下级电路检索
5:          for port in subCircuit.ports: // 遍历子电路元件的端口
6:               $j = port.connectedElectricalIsland$  // 获取下级电路电气岛  $j$ 
7:              result = DFS( $j$ ) // 递归检索
8:              if result is not null: //找到基准电压值，为访问路径所有的电气岛赋值
9:                  for island in visited:
10:                      $V[island] = result$ 
11:                 return result
12:      for externalBus in  $P[i]$ : // 向上级电路检索
13:           $m = externalBus.connectedElectricalIsland$ 
14:          if result is not null: //找到基准电压值，为访问路径所有的电气岛赋值
15:              for island in visited:
16:                  $V[island] = result$ 
17:          return result

```

经上述过程，对于未解析出基准电压的电路，需要根据电路的嵌套包含关

系，使用深度优先搜索算法分别向下级电路和上级电路检索，直至检索到已解析出基准电压的电气岛为止。

深度优先搜索算法的时间复杂度主要取决于电气岛的嵌套层数和每个电气岛内部的连接复杂度。假设电磁暂态模型中共有 N 个电气岛，每个电气岛的平均连接数为 M ，则算法的理论时间复杂度如式 (3-2)所示：

$$O(N \times M) \tag{3-2}$$

由于电气岛的嵌套关系可能涉及多层结构，实际时间复杂度可能更高。为提高检索效率并避免重复检索，在检索过程中引入了访问路径记录机制，在递归检索时，记录所有访问过的电气岛，一旦找到基准电压值，就为路径中的所有电气岛赋值，减少了时间复杂度。

3.4.2 算例分析

以 Cigre_Benchmark 标准算例为例。Cigre 标准算例共有 3 级电路，主电路拥有 4 个子电路，分别为整流侧电源、逆变侧电源、整流站、逆变站。逆变站内拥有 1 个子电路 Inverter Controls，由于该子电路为二次控制器，并不涉及基准电压的讨论。

根据电磁暂态模型拓扑得到的图结构如图 3-9 至图 3-13 所示：

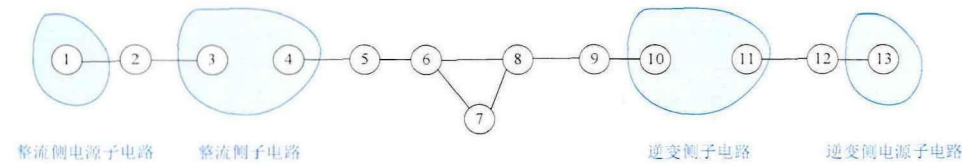


图 3-9 主电路图结构

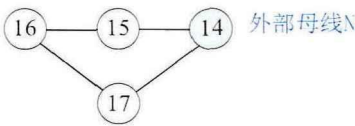


图 3-10 整流侧电源电路图结构

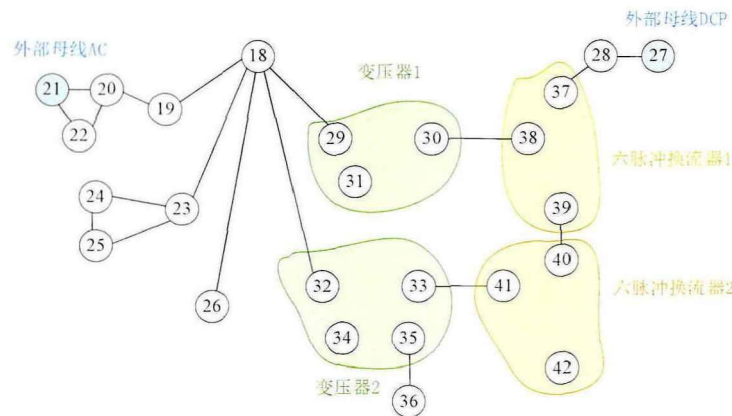


图 3-11 整流侧子电路图结构

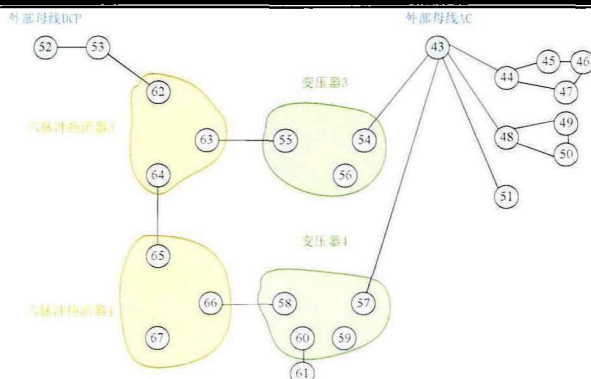


图 3-12 逆变侧子电路图结构

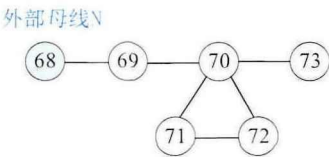


图 3-13 逆变侧电源电路图结构

根据图结构得到的各电路的连接关系矩阵如图 3-14 至图 3-16 所示：

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

图 3-14 主电路连接关系矩阵

	14	15	16	17
14	0	1	0	1
15	1	0	1	0
16	0	1	0	1
17	1	0	1	0

图 3-15 整流侧电源电路连接关系矩阵

	68	69	70	71	72	73
68	0	1	0	0	0	0
69	1	0	1	0	0	0
70	0	1	0	1	1	1
71	0	0	1	0	1	0
72	0	0	1	1	0	0
73	0	0	1	0	0	0

图 3-16 逆变侧电源电路连接关系矩阵

	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
18	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
29	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 3-17 整流侧电路连接关系矩阵

	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67
43	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
54	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 3-18 逆变侧电路连接关系矩阵

根据连接关系矩阵，使用 shortcutting 算法划分电气岛。该算例共划分为 23 个电气岛，计算结果如表 3-5 所示：

表 3-5 Cigre 算例电气岛解析结果表

序号	电气岛内包含的节点	基准电压/kV
1	1,2,3	345
2	4,5,6,7,8,9,10	525
3	11,12,13	230
4	14,15,16,17	345
5	18,19,20,21,22,23,24,25,26,29,32	345
6	27,28,37	525
7	30,38	230
8	31	345
9	33,41	230
10	34	345
11	35,36	230
12	39,40	230
13	42	230
14	43,44,45,46,47,48,49,50,51,54,57	230
15	52,53,62	525
16	55,63	230
17	56	230
18	58,66	230
19	59	230
20	60,61	230
21	64,65	230
22	67	230
23	68,69,70,71,72,73	230

经理论分析可知，Cigre 工程共分为三个电压等级，整流侧交流电路基准电压为 345kV，连接整流侧变压器和换流器的线路和逆变侧交流电路基准电压为 230kV，直流电路基准电压为 525kV。

结合理论分析结果和表 3-5 的计算数据可知，基准电压转换结果与理论计算结果一致，验证了本节所提出的基准电压转换方法的正确性和可靠性。

3.5 本章小结

本章针对 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 平台在一次系统建模中存在的母线基准电压差异问题，提出了基于基准电压动态继承的解决方案，主要内容如下：

(1) 基于母线基准电压的特性与电气岛概念的共性，提出了以基准电压为核心的电气岛定义，为基准电压的解析与继承提供了理论基础。

(2) 基于电路拓扑关系，将特殊元件视为开路，重构图结构，并利用改进的 shortcutting 算法将复杂模型划分为多个独立电气岛。通过解析电气岛内可决定基准电压的特殊元件，实现了各电气岛基准电压的精确解析。基于 IEEE14

算例的对比实验表明，与遍历算法相比，所提方法在效率与准确性上均具有显著优势。

(3) 针对跨图层电气岛的基准电压继承问题，提出了一种基于深度优先搜索的基准电压动态传播算法。该算法从未赋值的电气岛出发，跨图层检索并传递相连电气岛的基准电压值，确保了跨图层电路基准电压的正确继承。通过 Cigre 算例验证，所提方法在跨图层电路中的正确性与可靠性得到了充分验证。

第 4 章 多维度时频域结合的转换质量分析方法

4.1 引言

PSCAD/EMTDC 到 ADPSS 的模型精确转换与数据一致性是确保电磁暂态模型国产化替代可靠性的关键。在第 2 章和第 3 章中,本文提出了基于分层拓扑解析与基准电压继承的电磁暂态模型转换方法,并基于 ADPSS 的 API 接口实现转换。但是评价跨平台转换的有效性不仅需要确保拓扑结构的正确映射,更需对 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 仿真数据的特征一致性进行系统验证。

为建立科学的转换质量评估体系,本章提出了一种多维度时频域结合的转换质量评价方法。该方法从时域与频域两个维度深入剖析仿真数据,时域分析使用欧氏距离评估转换前后数据的静态距离,使用 Spearman 相关系数评价转换前后数据的动态趋势一致性。频域分析通过计算以幅值为基础计算权重,转换前后频率、相位、功率谱分别评价信号的主要成分、时序特征、能量分布的一致性,全面评价 PSCAD/EMTDC 原始模型与 ADPSS 转换模型在频域特性的吻合度。以 Cigre 直流工程算例、IEEE39 节点系统和吉泉直流工程为例,量化评估关键变量的转换质量指标,验证本文所提出的模型跨平台转换方法的正确性。

4.2 时域数据转换质量分析方法

时域数据转换质量分析的常用方法主要包括残差分析法、距离度量法及相关性分析法。为综合评估时域数据的转换质量,欧式距离法(距离度量法)与 Spearman 相关系数法(相关性分析法)被选取为核心评价指标。前者通过几何空间距离直观反映数据差异,后者则专注于捕捉时序变量的动态趋势一致性,两者结合可为时域数据转换的准确度提供多维度的互补性评价。

4.2.1 欧氏距离

欧氏距离(Euclidean Distance)由古希腊数学家欧几里得在其著作《几何原本》中提出,是衡量向量或点集之间相似性或差异性的基础工具之一^[65,66]。

考虑权重和具体数据特征后,转换前仿真时间序列 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 与转换后仿真时间序列 $Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 的欧式距离计算公式如式(4-1)所示:

$$D_e(X, Y) = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\omega_i (x_i - y_i)^2}{\max(|x_i|, |y_i|)}} \quad (4-1)$$

式中, ω_i 代表第 i 维的权重,将第 i 维向量的幅值占有所有向量幅值的比值,

具体计算公式如式 (4-2) 所示:

$$\omega_i = \frac{|x_i|}{\sum_{i=1}^n |x_i|} \quad (4-2)$$

式 (4-2) 表明, 欧氏距离是两点在各维度上差值平方和的平方根。这一计算方法既体现了欧几里得几何的直观性, 又便于在多维空间中进行数值计算。该指标的大小范围为[0,1], 越接近 1 则仿真结果差距越小, 越接近 0 说明仿真结果差距越大。

欧式距离具有直观易懂、计算简单等优点, 但是该方法是一种静态度量方法, 无法有效捕捉时间序列中蕴含的动态特性, 需要使用其他方法共同评价转换的准确度。

4.2.2 Spearman 相关系数

为量化评估模型转换前后时序变量动态特性的保留程度, 本文选用非参数统计的 Spearman 相关系数评价变量之间的相关性。该方法既不要求时序向量间的相关性必须是线性的, 也不要求变量满足正态分布的条件。这使得 Spearman 相关系数能够更有效地捕捉和反映转换前后时序向量在动态特性上的一致性, 为评估模型转换的效果提供了一个有力的统计依据。

定义两个变量的样本数据分别为 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 $Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$, 则它们组成的二维样本为 $(X, Y)^T$ 的观测数据为 $(x_1, y_1)^T, (x_2, y_2)^T, \dots, (x_n, y_n)^T$ 。通过对变量 X 和变量 Y 分别排序, 可以得到两个变量的秩, 即变量 X 的秩统计量为 $R_1, R_1, \dots, R_n$, 变量 Y 的秩统计量为 $S_1, S_1, \dots, S_n$ 。

当 X 和 Y 的相关性比较强时, 两个变量的秩统计量的相关性也比较强, 所以变量的相关性可以由变量的秩统计量的相关性表示, 这就是 Spearman 相关系数判断变量相关性的原理。Spearman 相关系数的计算公式如式 (4-3) 所示^[67]:

$$q_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (4-3)$$

式中, $\bar{R}$ 与 $\bar{S}$ 分别表示秩统计量的平均值, 计算方法为 $\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$, $\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$ 。由于变量的数值大小相同的情况下, 秩取值也是相同的, 所以在变量的数值排序后, 秩的取值就是顺序的平均值。式 (4-4) 由秩的定义计算变量

X 的秩统计量平均值:

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i = \frac{n+1}{2} \quad (4-4)$$

同理, 变量 Y 的秩统计量相关值如式 (4-5) 所示:

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i = \frac{n+1}{2} \quad (4-5)$$

通过推导, 由式 (4-6) 可以计算变量 X 和 Y 的 Spearman 相关系数:

$$q_{xy} = 1 - \frac{6}{n(n^2-1)} \sum_{i=1}^n (R_i - S_i)^2 \quad (4-6)$$

计算 Spearman 相关系数时, 由式 (4-7) 对变量进行假设检验:

$$H_0: q_{xy} = 0 \leftrightarrow H_1: q_{xy} \neq 0 \quad (4-7)$$

当两个变量相互独立且自由度为 2 时, 统计量 t 服从 $t(n-2)$ 分布, 如式 (4-8) 所示:

$$t = \frac{r_{xy} \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} \quad (4-8)$$

假设 t_0 为根据实际数据计算得到的 t 值, 那么检验 p 值如式 (4-9) 所示:

$$p = P_{H_0}(|t| \geq |t_0|) = P(|t(n-2)| \geq |t_0|) \quad (4-9)$$

对于一个已经给定的显著水平 α , 通过比较 p 与 α 的大小可以反映假设检验的结果: 当 $p < \alpha$ 时, 接收 H_1 , 拒绝 H_0 , $q_{xy} \neq 0$, 说明 X 和 Y 相关, 并且这两个变量的相关性可以通过计算得到的相关系数体现; 当 $p \geq \alpha$ 时, 说明 X 与 Y 不相关, 相关系数 q_{xy} 对于这两个变量也就没有意义。

对于计算得到的相关系数的取值范围是 $q_{xy} \in [-1, 1]$, 变量相关性的强弱可以通过相关系数的值判定, 式 (4-10) 展示了具体规则^[68]:

$$\begin{cases} q_{xy} = 1, \text{两变量完全正相关} \\ q_{xy} = 0, \text{两变量不存在相关关系} \\ q_{xy} = -1, \text{两变量完全负相关} \end{cases} \quad (4-10)$$

Spearman 相关系数 q_{xy} 的绝对值越接近 1, 说明两个变量之间的相关性越强; q_{xy} 越接近 0, 说明两个变量的相关性越弱。由于 Spearman 相关系数具有对异常值敏感性低、鲁棒性强的特点, 所以该方法被广泛应用于电力系统动态特性的相似性评估中^[69-71]。

通过欧式距离量化幅值差异, Spearman 相关系数捕捉转换前后时序变量动态趋势的一致性, 可以互补地衡量模型转换前后的一致性。由于欧式距离对相位偏移不敏感, 而 Spearman 相关系数无法表征幅值缩放效应, 因此需结合频域

分析以完善评估体系。

4.3 频域信号转换质量分析方法

频域分析关注信号在频率域的成分和分布情况，即信号中所包含的信号频率以及各频率下的信号特征。频域分析方法的主要分为幅值谱分析和功率谱分析两种，本文选用幅值谱分析信号在频域内的分布情况。幅值谱以振幅的形式表示频谱图的幅值，通过傅里叶变换将信号从时域转换到频域，使用 Welch 法求解功率谱密度，分析信号中不同频率分量特征的大小。

通过频域分析使用频率转换质量指标验证信号主要成分的一致性，相位转换质量指标确保时序特征的准确性，功率谱密度转换质量指标反映能量分布的匹配性。三者结合，从成分、时序和能量分布三个维度系统评估信号关键特征的保留情况^[72,73]。

通过频域分析，可得输入信号的各组成分量的幅值、频率、相位特征，构成变换后的频域 $PX=(A,F,P)$ ，具体元素如式 (4-11)所示：

$$\begin{cases} A=(a_1,a_2,...,a_{N-1}) \\ F=(f_1,f_2,...,f_{N-1}) \\ P=(\phi_1,\phi_2,...,\phi_{N-1}) \\ PSD=(psd_1,psd_2,...,psd_{N-1}) \end{cases} \quad (4-11)$$

式中， A 代表幅值向量，其中第 i 个元素 a_i 代表第 i 个频率分量的幅值，即 $|X[k]|$ 。 F 代表频率向量，其中第 i 个元素 f_i 代表第 i 个频率分量的频率。 P 代表相位向量，其中第 i 个元素 ϕ_i 代表第 i 个频率分量的相位。

待转换模型 PSCAD/EMTDC 的时间序列 $X=(x_1,x_2,...,x_n)$ 通过傅立叶变换后特征值为 $FFTX=(A_x,F_x,P_x)$ ，转换后模型 ADPSS 的时间序列 $Y=(y_1,y_2,...,y_n)$ 通过傅立叶变换后特征值为 $FFTY=(A_y,F_y,P_y)$ ，基于分解出的特征值可以计算模型转换结果的频域转换质量。

4.3.1 频率转换质量

在计算频率转换质量时，使用待转换模型信号的幅值作为计算频率转换质量的权重因子，具体计算方法如式 (4-12)所示：

$$\omega_i = \frac{a_{xi}}{\sum_{i=1}^{N-1} a_{xi}} \quad (4-12)$$

使用方差评价各频率转换质量指标，式 (4-13)展示了第 i 个频率分量的频

率转换质量指标计算公式：

$$\lambda_i = \left(\frac{f_{i,x} - f_{i,y}}{f_{i,x}} \right)^2 \quad (4-13)$$

由式 (4-14) 可计算待评价信号的频率转换质量指标：

$$\xi_f = \sqrt{1 - \sum_{i=1}^{N-1} \omega_i \lambda_i} \quad (4-14)$$

频率转换质量指标 ξ_f 的取值范围为[0,1]，当该值趋近于 1 时，意味着频率准确度达到了较高水平。

4.3.2 相位转换质量

与频率转换质量指标类似，将各频率分量的幅值作为相位转换质量指标的权重因子，各频率分量的相位转换质量指标如式 (4-15) 所示：

$$\lambda_{i,\phi} = \left(\frac{\phi_{i,x} - \phi_{i,y}}{\phi_{i,x} + \pi} \right)^2 \quad (4-15)$$

考虑各频率分量的相位转换质量和权重，由式 (4-16) 计算相位转换质量：

$$\xi_\phi = \sqrt{1 - \sum_{i=1}^{N-1} \omega_i \lambda_{i,\phi}} \quad (4-16)$$

类似地，相位转换质量指标 ξ_ϕ 的取值范围为[0,1]，如果该值越靠近 1，频率转换质量指标越高。

4.3.3 功率谱密度转换质量

与幅值转换质量指标类似，将各频率分量的幅值作为功率谱密度转换质量指标的权重因子，各频率分量的功率谱密度转换质量计算方法见式 (4-17)：

$$\lambda_{i,PSD} = \left(\frac{psd_{i,x} - psd_{i,y}}{psd_{i,x}} \right)^2 \quad (4-17)$$

考虑各频率分量的功率谱密度转换质量指标和权重，待评价信号的功率谱密度转换质量指标见式 (4-18)：

$$\xi_{PSD} = \sqrt{1 - \sum_{i=1}^{N-1} \omega_i \lambda_{i,psd}} \quad (4-18)$$

类似地，功率谱密度转换质量 ξ_{PSD} 的取值范围为[0,1]，如果该值越靠近 1，功率谱密度转换质量越高。

转换质量评价方法如图 4-1 所示，通过欧式距离和 Spearman 相关系数在时域量化评价转换前后信号的转换质量，在频域内分别量化分析转换前后的频率、

相位、幅值、功率谱密度特征的转换质量指标，可以较全面地评价模型转换的转换质量。

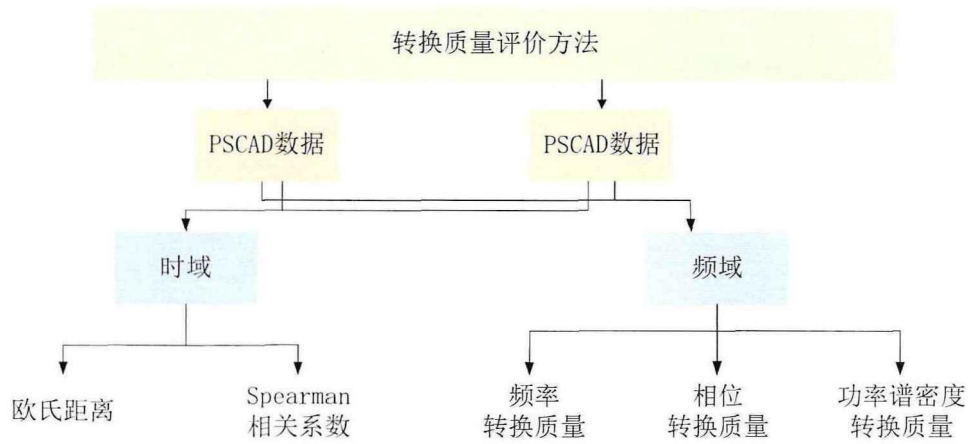


图 4-1 转换准确度评价方法

4.4 仿真分析

4.4.1 IEEE39 节点系统算例

为验证本文所提方法在交流系统模型模型转换的正确性，本节选择 IEEE39 节点系统作为研究对象。IEEE39 节点系统是一个大型电力系统，常用于模拟和研究特定地区或场景下的电力系统运行情况，该算例共存在 10 个电源，12 个变压器，34 条分布参数线路。转换程序运行时间为 15.588 秒，进程内存为 48MB。图 4-2 和图 4-3 为转换前后 IEEE39 节点系统的拓扑对比图：

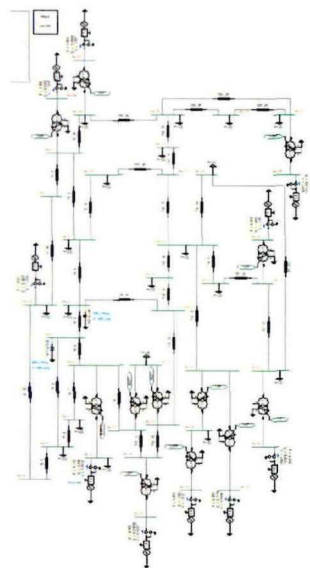


图 4-2 转换前 IEEE39 算例 PSCAD 拓扑图

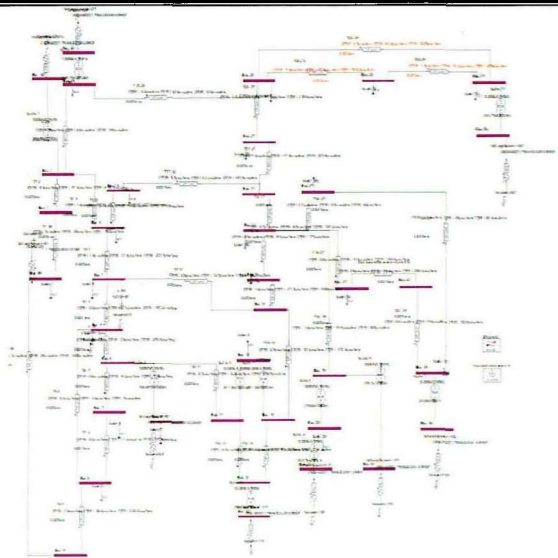


图 4-3 转换后 IEEE39 算例 ADPSS 拓扑图

通过对比可知，转换前后所有模型的拓扑排列均保持一致，且基准电压转换也符合预期。为了监测系统核心节点的电压稳定性和关键线路的电流稳定性，本节选取了母线 Bus1 的 A 相电压 U_1 ，母线 Bus19 的 A 相电压 U_{19} ，母线 Bus28 的 A 相电压 U_{28} ，母线 Bus38 的 A 相电压 U_{38} ，线路 T1-39 的 A 相电流 I_{1_39} ，线路 T16-19 的 A 相电流 I_{16-19} ，线路 T28-29 的 A 相电流 I_{28-29} ，电压源 38 的 A 相电流 I_{38} 八个变量进行监测，选取在稳态工况，母线 Bus1 三相接地，母线 Bus28 的 A 相单相接地三种工况，测试转换前后该工程的转换质量。本节设置仿真时长为 3s，采样间隔为 $50\mu\text{s}$ 。

转换前后 IEEE39 节点系统稳态工况下各关键变量电压电流对比图如图 4-4 至图 4-6 所示：

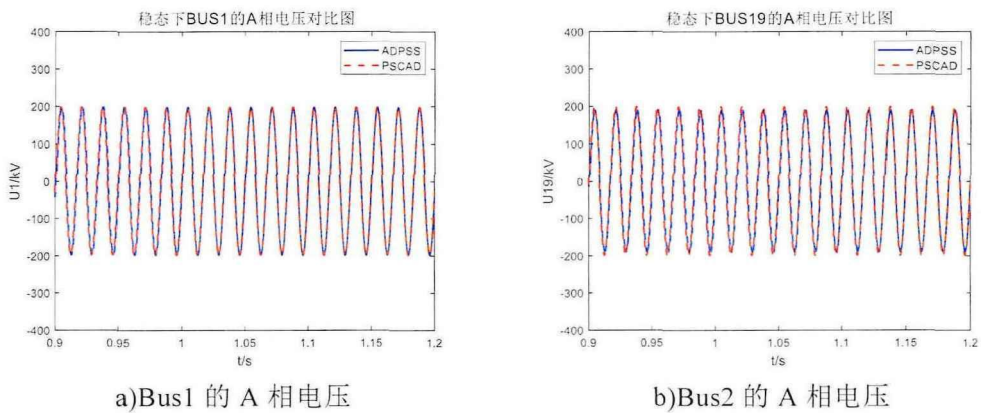


图 4-4 IEEE39 算例电压变量对比图

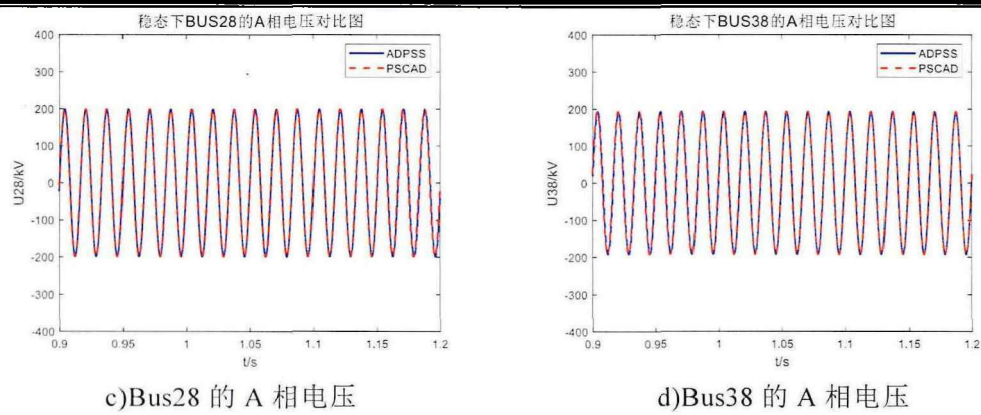


图 4-5 IEEE39 算例电压变量对比图

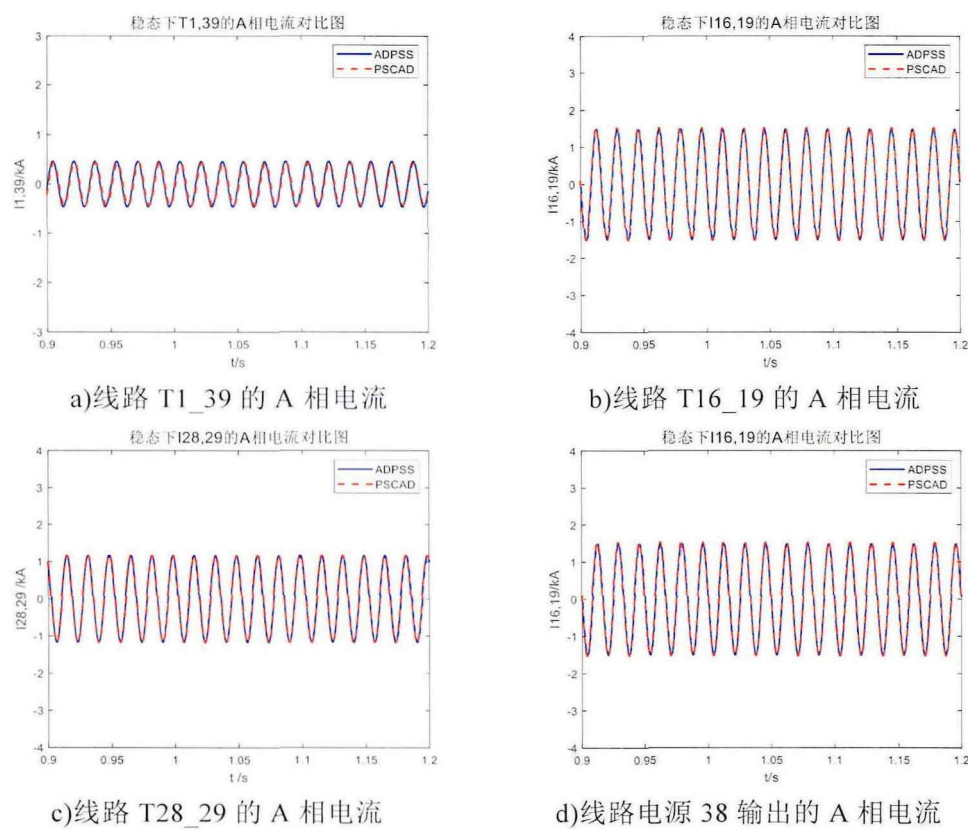


图 4-6 IEEE39 算例电流变量对比图

表 4-1 展示了该工况下各变量的转换质量指标计算结果。

表 4-1 IEEE39 算例的转换质量计算结果

信号名称	D_e	q_{xy}	ξ_f	ξ_ϕ	ξ_{PSD}
U_1	0.97410	0.99662	0.99996	0.97662	0.99997
U_{19}	0.98715	0.99900	0.99993	0.96787	0.99999
U_{28}	0.97195	0.99607	0.99987	0.98098	0.99989
U_{38}	0.98782	0.99911	0.99998	0.99498	0.99998

表 4-2（续表）

信号名称	D_e	q_{xy}	ξ_f	ξ_ϕ	ξ_{PSD}
I_{1_39}	0.97775	0.99740	0.99993	0.96706	0.99999
I_{16-19}	0.96930	0.99934	0.99990	0.97319	0.99986
I_{28-29}	0.97980	0.99925	0.99997	0.98286	0.99999
I_{38}	0.93801	0.98274	0.99997	0.96386	0.99978

通过对转换前后信号波形对比可以看出，稳态情况下转换前后波形具有较高的相似度。经过量化计算，IEEE39 节点系统在三种工况下的转换质量指标均超过 0.9。且经自动转换后的 ADPSS 模型与手动转换搭建的 ADPSS 模型波形图保持一致，证明本文所提出的转换方法的正确性。

4.4.2 Cigre 直流工程算例

Cigre 直流工程算例是一个单极高压直流输电系统的基础算例，整流侧和逆变侧均采用 12 脉动换流器，直流电压等级为 500kV，系统传输容量为 1000MW。整流侧交流电压等级为 330kV，逆变侧交流电压等级为 220kV，输电频率为 50Hz。送端和受端交流系统的短路比 SCR 均为 2.5。转换程序运行时间为 11.898 秒，进程内存为 46MB。

本算例分别在整流侧和逆变侧提取仿真数据观察，整流侧的观察对象为直流电压波形、交流电压波形和交流电流波形，以及二次电路里的换流器触发角 AOR。逆变侧的观察对象为直流电压波形、直流电流波形和交流电压波形、交流电流波形。本节在稳态工况、逆变侧三相故障、整流侧阀区故障三个工况下对比转换前后模型关键变量的数据，评价模型在稳态、阀区故障和不对称故障条件下的转换质量。

（1）工况一：稳态工况

设置仿真时长为 4s，采样间隔为 50μs，本工况下并未设置故障发生，仿真波形如图 4-7 至图 4-10 所示：

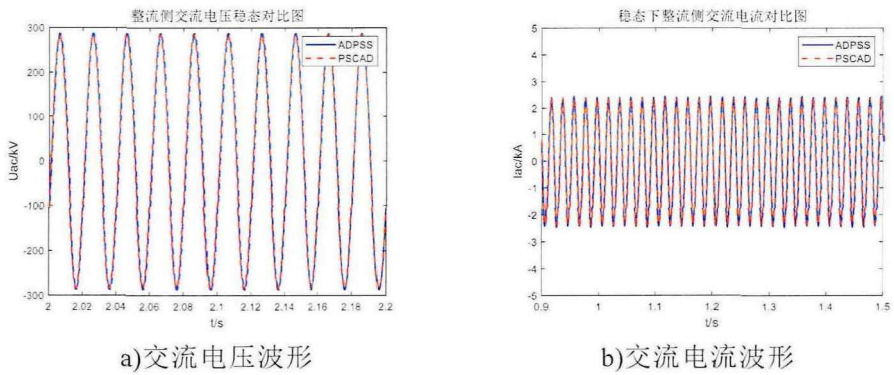


图 4-7 稳态下整流侧信号波形对比图 1

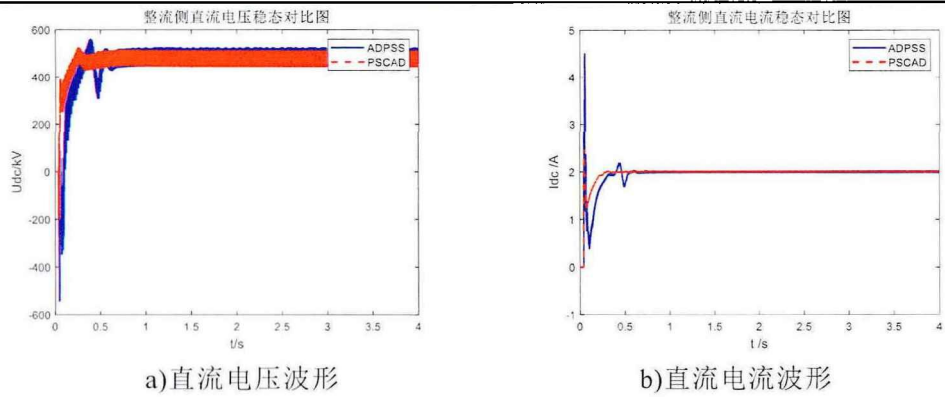


图 4-8 稳态下整流侧信号波形对比图 2

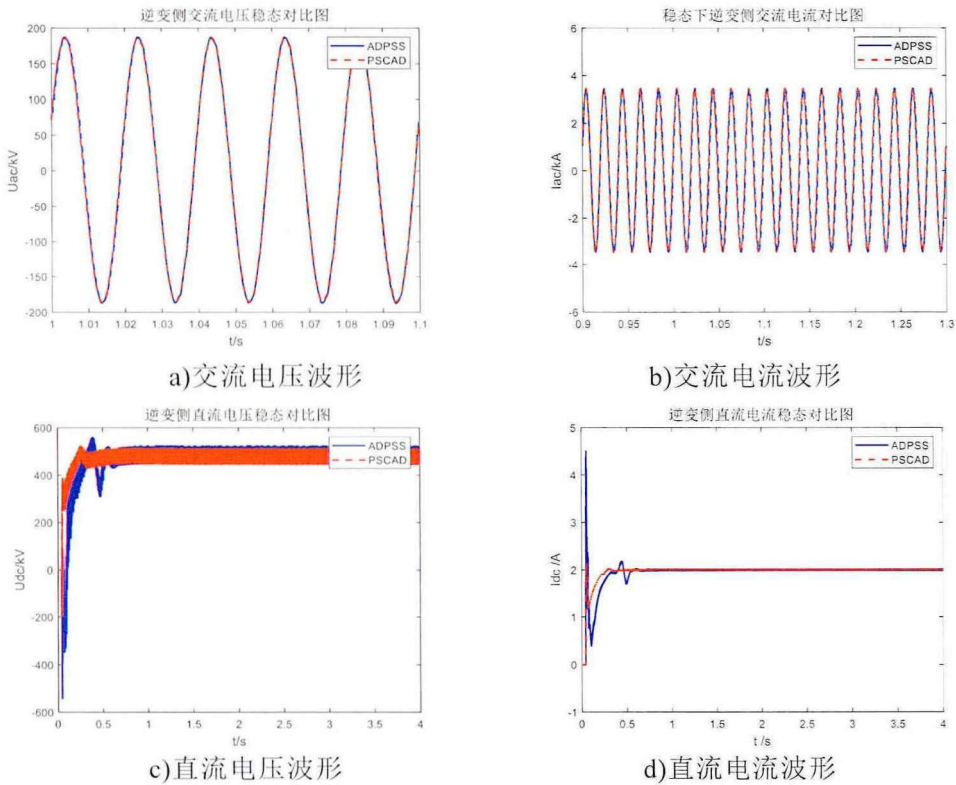


图 4-9 稳态下逆变侧信号波形对比图

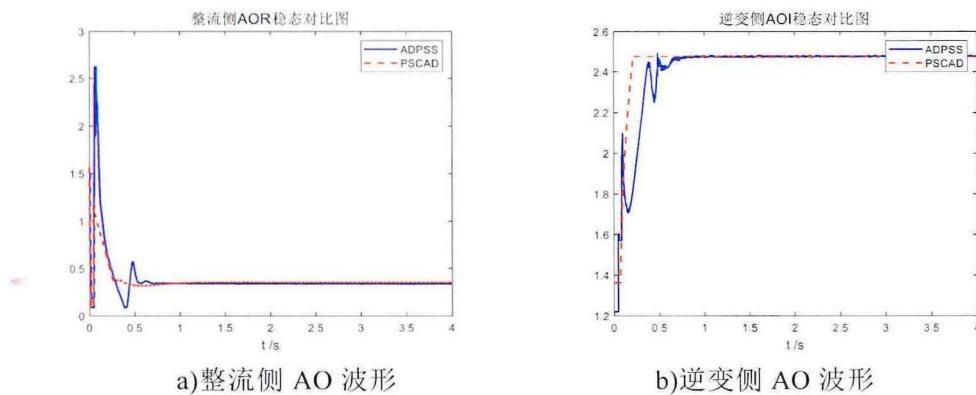


图 4-10 稳态下二次电路触发角控制波形对比图

该工况下各变量的数据计算得到的转换质量指标结果如表 4-2 所示：

表 4-2 稳态下 Cigre 算例信号转换质量指标

信号归类	信号名称	D_e	q_{xy}	ξ_f	ξ_ϕ	ξ_{PSD}
整流侧	交流电压	0.93094	0.99837	0.99955	0.91680	0.99998
	交流电流	0.92342	0.98359	0.99745	0.92917	0.99997
	直流电压	0.93199	0.95390	0.99824	0.96884	0.99994
	直流电流	0.93342	0.95735	0.99838	0.97553	0.99996
	AO	0.92580	0.94618	0.98808	0.94821	0.99989
逆变侧	交流电压	0.94903	0.99798	0.99952	0.92466	0.99999
	交流电流	0.94647	0.99272	0.99713	0.94997	0.99993
	直流电压	0.91806	0.93814	0.99826	0.93264	0.99994
	直流电流	0.94932	0.94789	0.99850	0.95738	0.99996
	AO	0.90234	0.92916	0.99907	0.97299	0.99995

(2) 工况二：逆变侧三相故障

该故障设置于本工程的逆变电路的交流母线上，在 1s 时发生三相接地故障，故障持续时间为 0.05s。采用设置仿真时长为 3s，采样间隔为 50μs，故障情况下各信号的仿真波形和转换准确度指标计算结果如图 4-11 至图 4-13 所示：

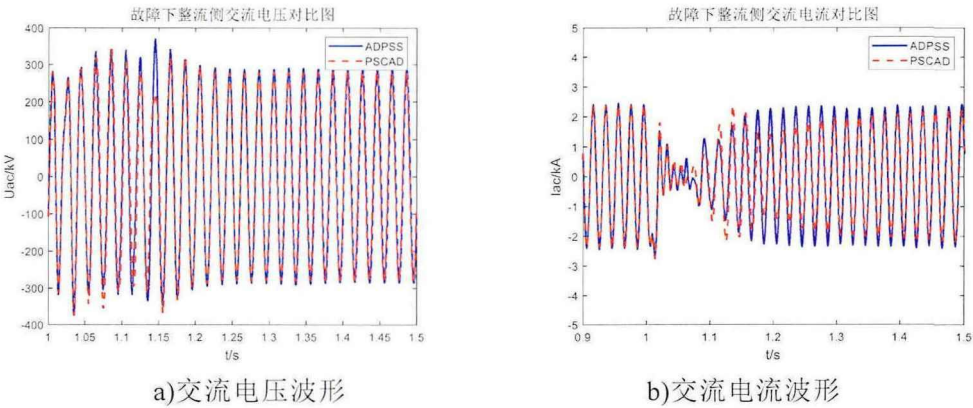


图 4-11 三相故障下整流侧交流信号波形对比图

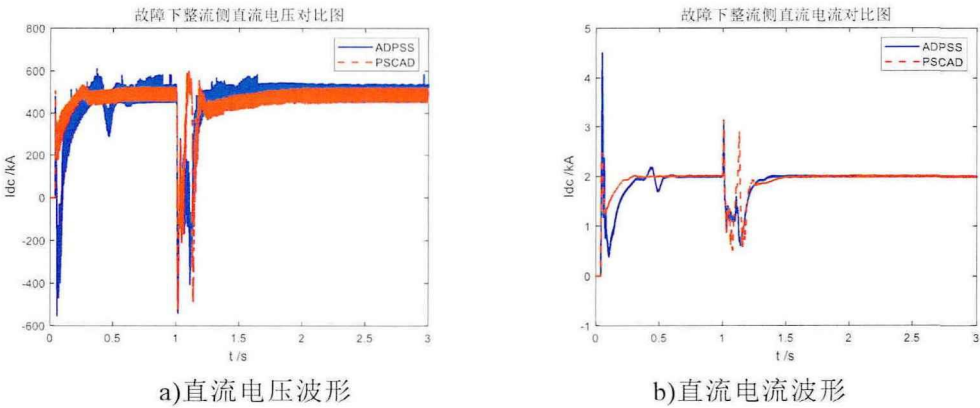


图 4-12 三相故障下整流侧直流信号波形对比图

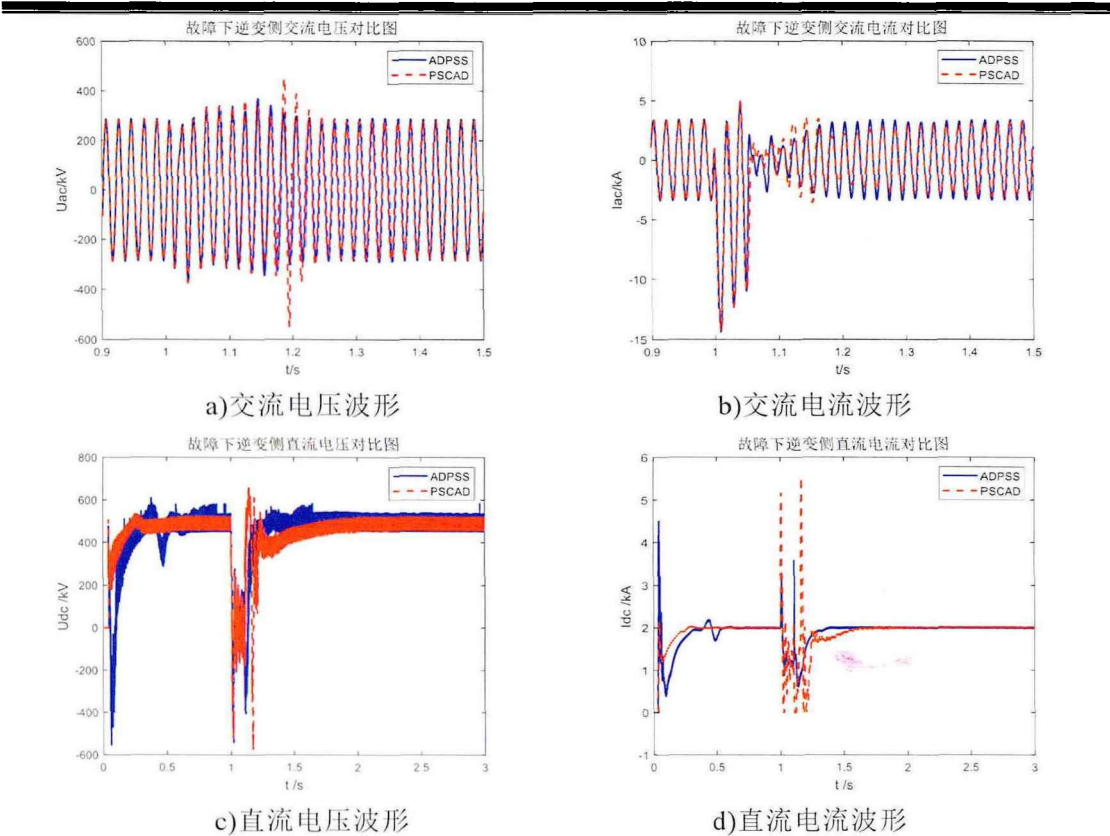


图 4-13 三相故障下逆变侧信号波形对比图

该工况下各变量的数据计算得到的转换质量指标结果如表 4-3 所示：

表 4-3 三相故障下 Cigre 算例信号转换质量计算结果

信号归类	信号名称	D_e	q_{xy}	ξ_f	ξ_ϕ	ξ_{PSD}
整流侧	交流电压	0.92657	0.98905	0.99580	0.96901	0.99990
	交流电流	0.91752	0.97554	0.99052	0.95231	0.99971
	直流电压	0.91279	0.92483	0.98192	0.92602	0.99966
	直流电流	0.92848	0.93295	0.99588	0.93806	0.99995
逆变侧	交流电压	0.96155	0.99498	0.99736	0.95077	0.99991
	交流电流	0.92528	0.98206	0.99169	0.96982	0.99983
	直流电压	0.93049	0.95002	0.99103	0.91194	0.99988
	直流电流	0.92353	0.92732	0.98299	0.90416	0.99981

(3) 工况三：整流侧阀区故障

本故障设置于整流电路两个换流器之间，在 1s 时发生三相接地故障，故障持续时间为 0.05s。故障情况下各信号的仿真波形和转换准确度指标计算结果如图 4-14 至图 4-16 所示：

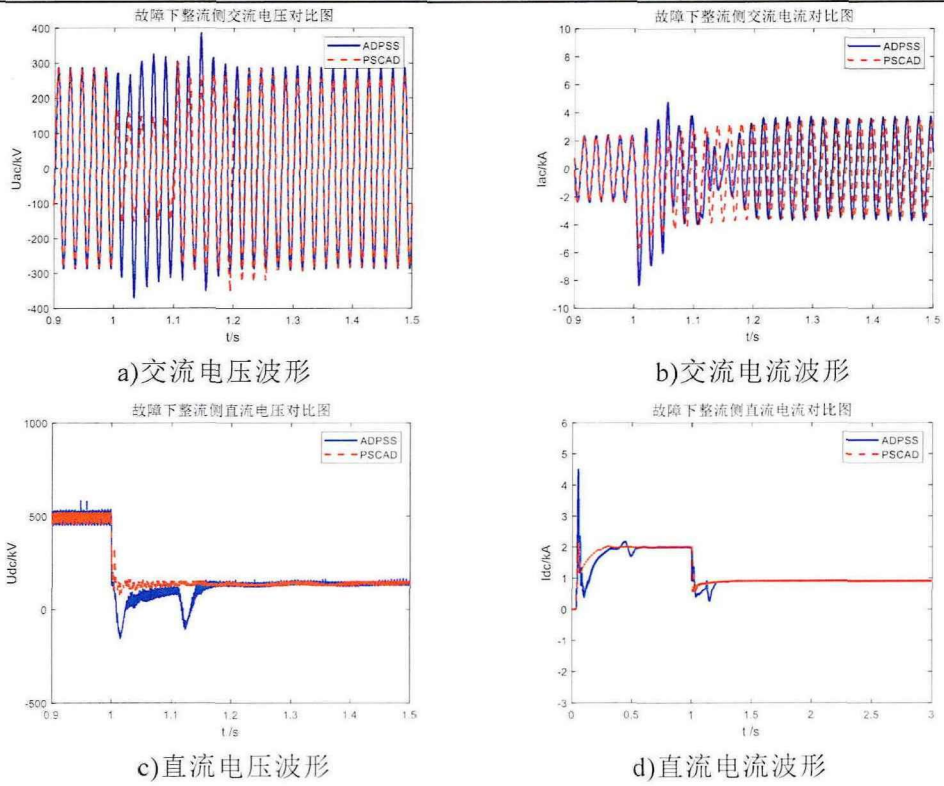


图 4-14 工况三整流侧信号波形对比图

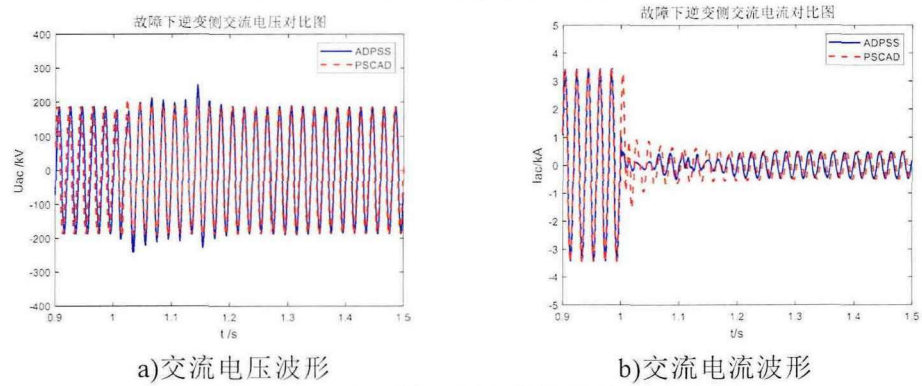


图 4-15 工况三逆变侧交流信号波形对比图

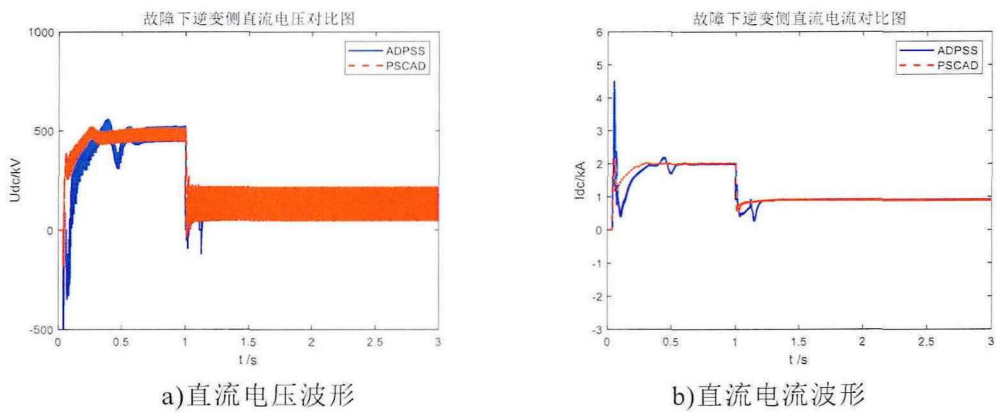


图 4-16 工况三逆变侧直流信号波形对比图

该工况下各变量的数据计算得到的转换质量指标结果如表 4-4 所示：

表 4-4 工况三 Cigre 算例信号转换质量计算结果

信号归类	信号名称	D_e	q_{xy}	ξ_f	ξ_ϕ	ξ_{PSD}
整流侧	交流电压	0.94132	0.98891	0.99643	0.96857	0.99993
	交流电流	0.90848	0.93295	0.99588	0.92806	0.99995
	直流电压	0.91142	0.96219	0.98205	0.91921	0.99588
	直流电流	0.90215	0.95618	0.98007	0.91886	0.99979
逆变侧	交流电压	0.95904	0.98804	0.99549	0.92569	0.99991
	交流电流	0.90055	0.93884	0.98811	0.91063	0.99957
	直流电压	0.91357	0.95682	0.98802	0.91687	0.99532
	直流电流	0.93043	0.96304	0.98247	0.95719	0.99978

根据三种工况下 Cigre 工程转换前后的对比分析可知，从波形上看，转换前后各关键变量的数值大小和变化趋势都比较接近，各项转换质量指标都达到或超过 0.9 的高精度水平，经自动转换后的 ADPSS 模型与手动转换搭建的 ADPSS 模型波形图保持一致，证明本文所提出的转换方法的正确性。

4.4.3 吉泉算例

吉泉工程是中国自主研发、自主设计、自主建设的目前世界电压等级最高、输送容量最大、输电距离最远、技术水平最先进的特高压输电工程。本算例的整流侧和逆变侧采用分层直流，直流电压等级为 1000kV，整流侧交流电源电压等级为 750kV，逆变侧交流电源电压等级为 500kV 和 1000kV。

经过对转换前后模型对比，所有模型都能按拓扑排列，位置比较清晰，母线基准电压的转换也符合要求。转换程序运行时间为 41.237 秒，进程内存为 923MB。对所转换算例模型启动计算并输出计算结果，本算例主要在 1000kV 直流电路提取数据观察，包括 1000kV 整流换流阀上桥臂直流电压 U_{dcR1} （母线 Electric SystemBus_55），1000kV 整流侧换流阀下桥臂直流电压 U_{dcR2} （母线 Electric SystemBus_60），1000kV 逆变侧换流阀上桥臂直流电压 U_{dcI1} （母线 Electric SystemBus_68），1000kV 逆变侧换流阀桥臂直流电压 U_{dcI2} （母线 Electric SystemBus_65），1000kV 整流侧换流阀上桥臂直流电压 I_{dcP1} （母线 Electric SystemBus_89），1000kV 逆变换流阀下桥臂直流电压 I_{dcP2} （母线 Electric SystemBus_151）。吉泉算例接线原理图如图 4-17 所示：

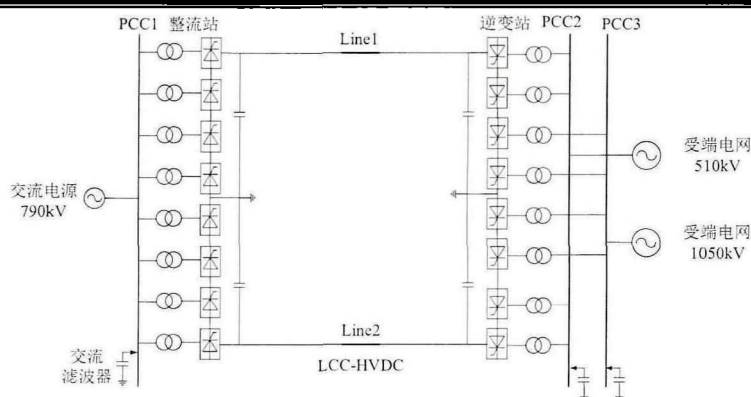


图 4-17 吉泉算例接线图

鉴于本算例在整流侧存在 1 个电压等级，逆变侧存在 2 个电压等级，所以采用整流侧 500kV 三相故障、逆变侧 500kV 三相故障、逆变侧 1000kV 三相故障三种工况对比转换前后模型关键变量的数据评价转换前后模型在不同电压等级的转换质量。在三种工况下测试转换前后模型，结果如下：

(1) 工况一：整流侧 500kV 三相故障

本工况故障设置在整流侧 500kV 三相母线上，故障类型为三相故障，故障发生时间为 1s，故障持续时间为 0.1s，仿真时间设置为 3s，各关键变量的对比图如图 4-18 至图 4-20 所示：

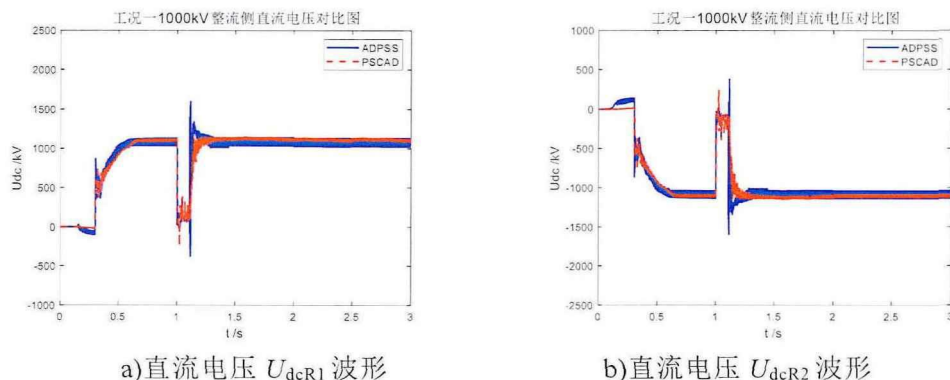


图 4-18 工况一一直流电压信号波形对比图 1

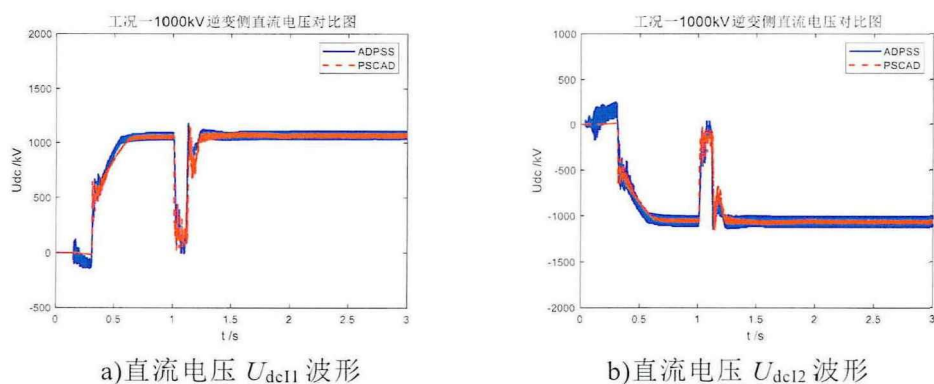


图 4-19 工况一一直流电压信号波形对比图 2

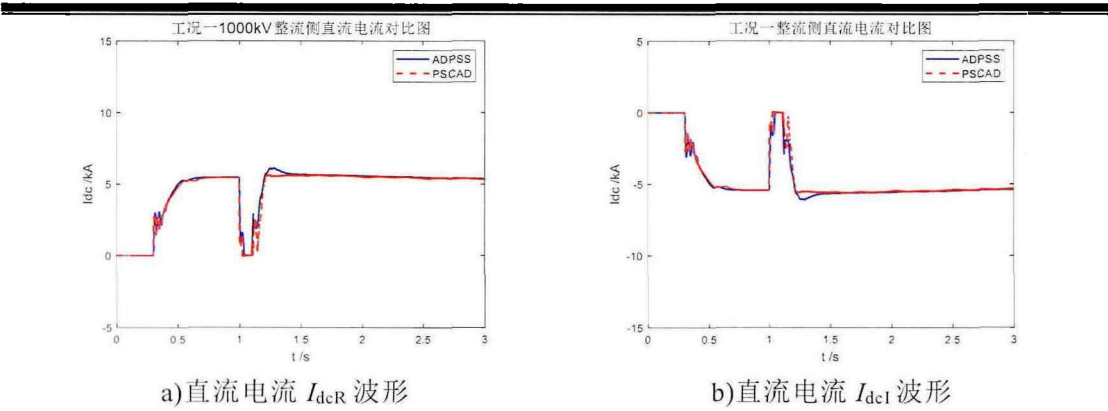


图 4-20 工况一信号波形对比图

该工况下各变量的数据计算得到的质量指标计算结果如表 4-5 所示：

表 4-5 工况一 Cigre 算例转换质量指标计算结果

信号名称	D_e	q_{xy}	ξ_f	ξ_ϕ	ξ_{PSD}
U_{dcR1}	0.94968	0.95679	0.99814	0.92908	0.99994
U_{dcR2}	0.95442	0.96439	0.99816	0.92348	0.99993
U_{dcL1}	0.93900	0.94737	0.99869	0.93616	0.99994
U_{dcL2}	0.92948	0.91406	0.99836	0.93367	0.99994
I_{dc1}	0.93329	0.95467	0.99983	0.92359	0.99992
I_{dc2}	0.93138	0.95223	0.99910	0.92050	0.99992

(2) 工况二：逆变侧 500kV 三相故障

本次故障设置于受端系统 500kV 交流电路，故障类型为三相故障。仿真时间设置为 3s，故障发生时间为 1s，故障持续时间为 0.1s。各信号波形对比图如图 4-21 和图 4-22 所示：

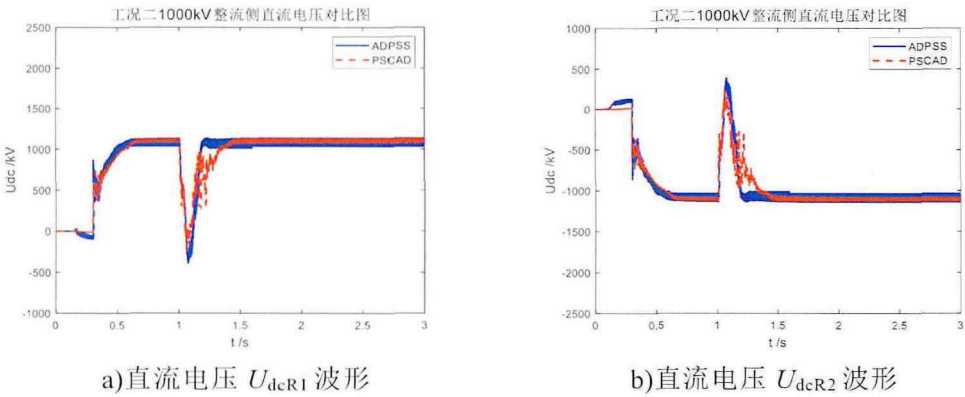
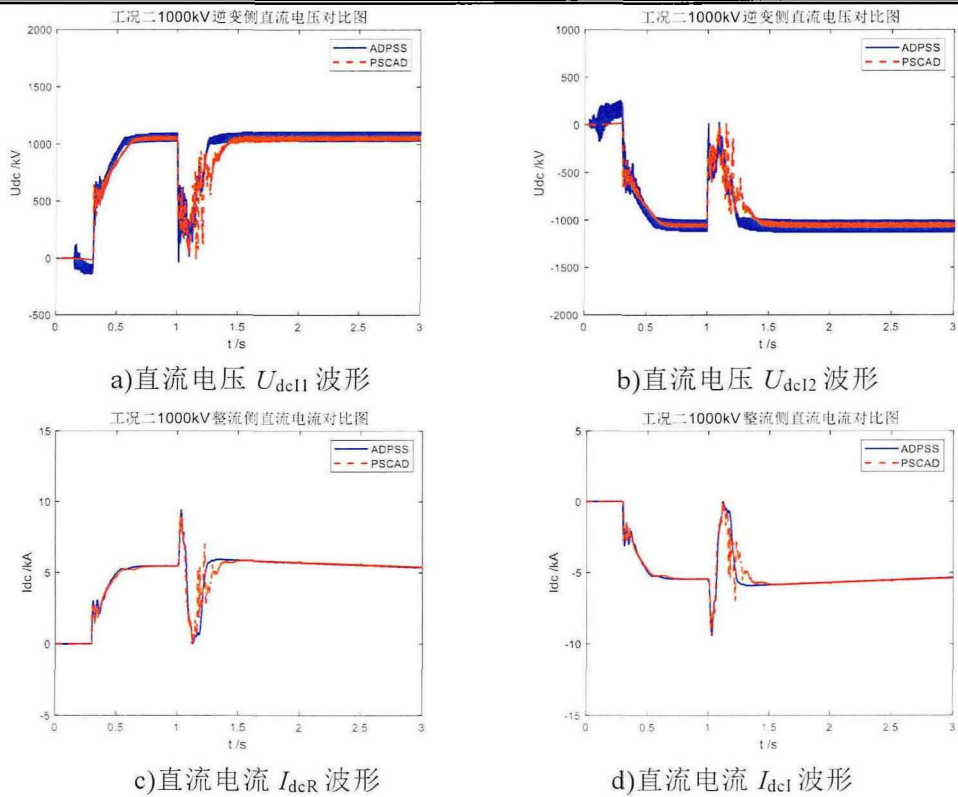


图 4-21 工况二信号波形对比图



该工况下各变量的数据计算得到的质量指标计算结果如表 4-6 所示：

表 4-6 工况二 Cigre 算例信号质量指标计算结果

信号名称	D_e	q_{xy}	ξ_f	ξ_ϕ	ξ_{PSD}
U_{dcR1}	0.92900	0.91181	0.99688	0.91266	0.99995
U_{dcR2}	0.92929	0.91304	0.99688	0.91458	0.99995
U_{dc11}	0.91844	0.90601	0.99788	0.94422	0.99994
U_{dc12}	0.91318	0.90476	0.99759	0.93486	0.99994
I_{dc1}	0.94744	0.93315	0.99745	0.95829	0.99996
I_{dc2}	0.94746	0.93746	0.99745	0.95739	0.99996

(3) 工况三：1000kV 逆变侧三相故障

本次故障设置于受端 1000kV 交流系统，故障类型为三相接地故障。故障发生时间为 1s，故障持续时间为 0.1s，故障电阻设置为 0.01Ω。故障清除后，系统恢复正常运行状态，仿真时间设置为 3s。该工况下各信号波形对比图如图 4-23 所示：

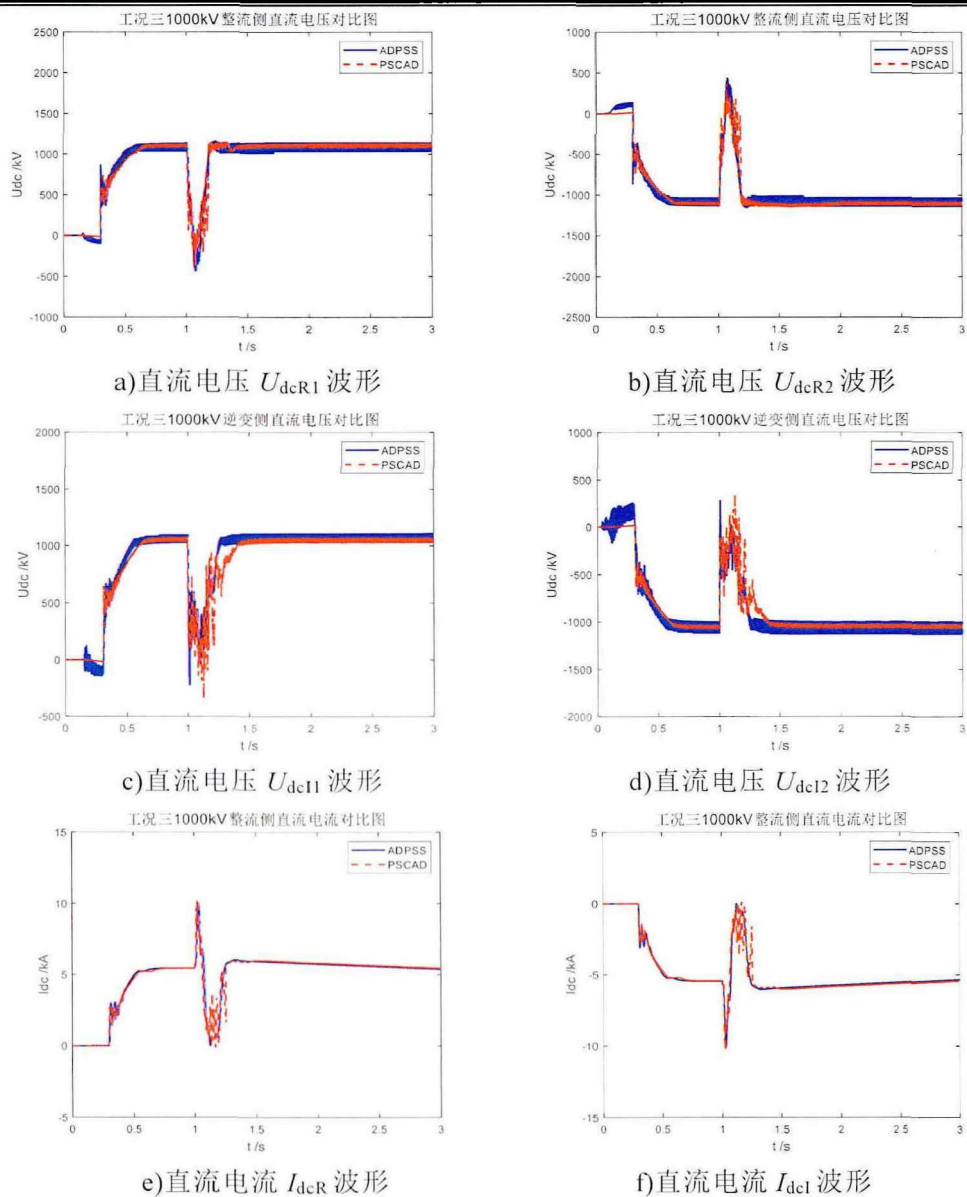


图 4-23 工况三信号波形对比图

该工况下各变量的数据计算得到的质量指标计算结果如表 4-7 所示：

表 4-7 工况三 Cigre 算例信号质量指标计算结果

信号名称	D_c	q_{xy}	ξ_f	ξ_ϕ	ξ_{PSD}
U_{dcR1}	0.94575	0.91163	0.99807	0.94062	0.99996
U_{dcR2}	0.94549	0.91473	0.99800	0.93456	0.99994
U_{dcI1}	0.93344	0.92368	0.99783	0.90371	0.99988
U_{dcI2}	0.93365	0.92527	0.99842	0.99273	0.99988
I_{dc1}	0.95709	0.93976	0.99816	0.93267	0.99997
I_{dc2}	0.95713	0.93990	0.99812	0.93684	0.99997

对比分析显示，转换前后的信号波形在整体形态和动态特征上保持高度一致。经自动转换后的 ADPSS 模型与手动转换搭建的 ADPSS 模型波形图保持一

致，波形图中显示的故障持续及恢复阶段波形差异，都是由软件内部的故障处理机制造成的。通过量化评估，所有信号的转换准确度均超过 0.9，这验证了转换过程具有优异的准确性和可靠性，证明了本文所提出转换方法的正确性。

4.5 本章小结

本章提出多维度时频域结合评估框架，通过时域-频域联合建模与跨维度特征融合，系统性验证了第二章和第三章所提出的模型转换方法的正确性，主要内容如下：

在时域维度，采用欧氏距离量化波形几何差异与 Spearman 相关系数捕捉时序动态一致性，形成对信号局部波动与全局趋势的双重敏感性分析。频域维度通过傅里叶变换分解，从频率成分匹配度（基波与谐波分布）、相位对齐特性（时延效应）及功率谱密度相似性（能量分布）三个层面实现频谱特征的全景解析。

基于本章所提出的转换方法对 Cigre 标准算例、IEEE39 节点算例与吉泉直流工程进行转换并开展多工况测试。研究结果表明，转换前后模型的关键变量在整体形态和动态特征上保持较高的一致性。并且经自动转换后的 ADPSS 模型与手动转换搭建的 ADPSS 模型波形图保持一致，证明 PSCAD 与 ADPSS 仿真不同的不同是由不同仿真软件内部仿真机制的不同引起的。经过量化评估，所有信号的转换准确度均超过 0.9，这验证了转换过程具有优异的准确性和可靠性，证明了本文所提出转换方法的正确性。

第 5 章 结论与展望

5.1 结论

作为国际主流的电磁暂态仿真软件，PSCAD/EMTDC 广泛应用于电力系统建模，积累了许多的工程模型。为降低国外技术垄断风险并推动国产化替代，亟需将 PSCAD/EMTDC 模型迁移至我国自主研发的仿真平台 ADPSS 中。本文针对电力系统电磁暂态仿真模型跨平台转换的技术需求，提出一种基于分层拓扑解析与基准电压继承的转换方法，构建 PSCAD/EMTDC 至 ADPSS 的模型兼容机制，以实现高效、准确的跨平台自动转换，减少人工干预带来的误差。本文的主要工作和创新点如下：

(1) 提出了基于分层拓扑解析拓扑转换方法。针对电力系统一次设备拓扑转换，提出基于 PSCAD/EMTDC 端点连接特征的拓扑单元抽象方法，通过参数映射与母线重构连接关系，在 ADPSS 内实现与 PSCAD/EMTDC 相同的物理连接关系。针对多层封装、复杂嵌套的子电路结构，设计了基于深度优先搜索的嵌套拓扑解析算法，逐层解析封装电路，确保连接关系与功能逻辑的完整转换。对于二次系统，提出基于信号流向的拓扑连接方法，遵循“多输入单输出”原则，实现二次系统控制逻辑的拓扑转换。针对 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 信号传输系统的差异，通过信号分类和流向解析，解决了控制信号在转换过程中的兼容性问题，实现了信号传输系统的无损还原。以 Cigre 直流算例为例，对转换前后的拓扑关系进行了对比，结果表明所提拓扑转换方法能够自动实现物理连接关系的准确转换。

(2) 提出基于电气岛分区的基准电压动态继承方法，定义了基于基准电压的电气岛概念，并利用改进的 shortcutting 算法对电力网络进行自动分区。针对复杂多图层电路，设计了基于深度优先搜索的基准电压传播算法，通过变压器、六脉冲换流器等边界元件的电压变换特性，建立跨电压等级、跨层级的基准电压继承关系，确保了母线基准电压的动态一致性与继承完整性。以 IEEE14 节点系统和 Cigre 算例为例，验证所提方法的有效性，为复杂电力网络的建模提供了可靠电气参数支撑。

(3) 提出时频域结合的转换质量评价方法，从时域和频域两个角度全面评估模型转换的质量。该评价方法在时域上使用欧式距离欧氏距离量化转换前后数据的空间距离，直观反映转换误差。使用 Spearman 相关系数捕捉转换前后时序变量的动态趋势一致性，增强准确度评估的全面性。在频域层面，本文利用傅里叶变换将时序信号转换到频域，基于幅值设定权重，从频率特性、相位匹

配、功率谱密度 3 个角度，分别评价信号的主要成分、时序特征、能量分布的一致性。本文选取 Cigre 标准算例、IEEE39 节点算例和吉泉工程算例，分别在不同工况下进行仿真对比分析。结果表明，所提分析方法能够反映电磁暂态模型转换过程中的信息保真度与动态特性复现能力，验证了所提出转换方法的正确性与可靠性，为推动我国电力系统仿真软件国产化替代提供了关键技术支撑。

5.2 展望

本研究在以下几个方面仍存在进一步探索与完善的空间：

(1) 本文提出的分层拓扑解析与基准电压继承方法，虽然以 PSCAD 与 ADPSS 的模型转换为主要研究对象，但相关方法并不局限于这两个平台。其核心思路与技术流程对其他电磁暂态仿真软件同样具有较强的适用性和推广价值。未来可结合不同平台的特点逐步形成面向多平台的转换方法，为电力系统跨平台联合仿真和复杂场景分析提供更加灵活可靠的技术支撑。

(2) 未来研究可进一步探索人工智能与图论分析技术的深度融合，提升复杂电力网络分层拓扑解析的自动化水平和智能化能力。尤其是针对新能源并网等复杂系统场景，构建更加智能、高效的拓扑解析方法，为跨平台模型转换提供更强技术支撑。

(3) 本文所提出的转换方法只针对模型本身的转换，未考虑不同软件计算方法的差异。未来可考虑 PSCAD 与 ADPSS 的求解器特性，研究计算方法对仿真结果的影响，考虑两款软件的特点，实现联合仿真或者工程上的互补，以进一步提高跨平台仿真的一致性和精度。

参考文献

- [1] 李广凯, 李庚银. 电力系统仿真软件综述[J]. 电气电子教学学报, 2005, (03): 61-65.
- [2] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化, 2002, (17): 66-70.
- [3] 瞥鹏, 李轶群, 谭贝斯, 等. 大电网仿真工具现状及其在华北电网推广应用的思考[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(09): 199-205.
- [4] 冯谟可, 王傲群, 袁帅, 等. 国产化电磁暂态仿真平台发展方向分析及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 64-74.
- [5] Faruque M. O., Zhang Y., Dinavahi V. Detailed modeling of CIGRE HVDC benchmark system using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK[J]. IEEE transactions on power delivery, 2005, 21(1): 378-387.
- [6] Tant J, Driesen J. On the Numerical Accuracy of Electromagnetic Transient Simulation with Power Electronics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018: 1-1.
- [7] 刘青. 基于 PSCAD/EMTDC 与 C 语言接口的 H 桥级联 STATCOM 数字化仿真技术研究[D]. 武汉工程大学, 2017.
- [8] Reeve J, Adapa R. A new approach to dynamic analysis of AC networks incorporating detailed modeling of DC systems. I. Principles and implementation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(4): 2005-2011.
- [9] Eghtedarpour N, Farjah E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE transactions on smart grid, 2014, 5(3): 1494-1505.
- [10] Ali A, Petr T, Jan K. Modelling and Testing of Phasor Measurement Unit in PSCAD[J]. 2024 24TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON ELECTRIC POWER ENGINEERING, EPE 2024, 2024: 138-143.
- [11] 傅国斌, 王学斌, 吴静超, 等. 基于 ADPSS 的电池储能系统电磁暂态建模与校核方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(17): 190-199.
- [12] Aihong T, Zhijian L, Huiyuan Y, et al. Digital/Analog Simulation Platform for Distributed Power Flow Controller Based on ADPSS and Dspace [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(1): 181-189.
- [13] Zheng W, Yan J, Chen X, et al. Technology and engineering application of cross area HVDC interconnection system high-precision simulation modeling based on ADPSS[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(05):

627-635.

- [14] 王玘, 李亚楼, 陈绪江, 等. 基于 ADPSS 新一代仿真平台的大规模交直流电网数模混合仿真[J]. 电网技术, 2021, 45(01): 227-234.
- [15] 唐爱红, 高梦露, 黄涌, 等. 协调分布式潮流控制器串并联变流器能量交换的等效模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(07): 30-36.
- [16] 南东亮, 王维庆, 张路, 等. 广域型保护控制设备分布式协同测试技术研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 155-161.
- [17] Chao Z, Mengyao L, Yan G, et al. Modeling and Fault Diagnosis of Distribution Networks Cyber Physical System Based on IEC61850[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53: 102609-102609.
- [18] Yongjing H, Zhuang L, Guying Z, et al. Research on Automatic Modeling Method for Large-scale Grid Based on BPA-ADPSS[J]. 2023 5th International Conference on Power and Energy Technology(ICPET), 2023:1-6.
- [19] Eghtedarpour N, Farjah E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE transactions on smart grid, 2014, 5(3): 1494-1505.
- [20] 张星, 徐得超, 李亚楼, 等. 基于超算的大电网数字并行仿真系统构建及应用[J]. 电网技术, 2019, 43(04): 1144-1150.
- [21] 张凌云. PSASP 与 PSS/E 模型比较及元模式支持下的转换研究[D]. 华北电力大学(北京), 2016.
- [22] 林久通. 基于E文本的DIgSILENT自动建模研究[D]. 华北电力大学, 2015.
- [23] 曹斌, 原帅, 王琪, 等. PSD-BPA 至 PSCAD 电网模型自动转换技术研究[J]. 内蒙古电力技术, 2020, 38(04): 1-8.
- [24] 陶华, 许津津, 邹文聪. BPA 向 PSCAD 模型转换的研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(08): 152-156.
- [25] 陶华, 杨震, 张民, 等. 基于深度优先搜索算法的电力系统生成树的实现方法[J]. 电网技术, 2010, 34(02): 120-124.
- [26] 滕洪燕. 大型交直流系统的 PSCAD 建模与仿真[D]. 华北电力大学(北京), 2010.
- [27] 王桢, 吕凯, 郭力. PSD-BPA 程序电网在线模型自动转换技术研究[J]. 电工技术, 2023, (21): 74-76.
- [28] 程改红, 陆韶琦, 邵冲, 等. 大规模交直流电力系统电磁暂态仿真高效建模方法[J]. 电网技术, 2017, 41(06): 1919-1926.
- [29] 郭杏叶. PSASP 模型向 PSCAD 软件转换方法研究及应用[D]. 重庆大学, 2015.
- [30] 张娜娜. 电网模型由 PSASP 向 ATP-EMTP 的转换方法研究与应用[D]. 西安科技大学, 2019.

- [31] 刘庆, 张东英, 刘燕华, 等. BPA 电网模型自动导入 DIgSILENT 的研究和开发[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 112-117.
- [32] 董炜, 潘秋萍, 雷金勇, 等. BPA 与 DIgSILENT 动态模型的比较与数据转换[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(08): 140-146.
- [33] 程改红, 陆韶琦, 邵冲, 等. 大规模交直流电力系统电磁暂态仿真高效建模方法[J]. 电网技术, 2017, 41(06): 1919-1926.
- [34] 胡涛, 朱艺颖, 李柏青, 等. 基于 BPA-HYPERSIM 的大电网自动建模软件开发[J]. 电网技术, 2019, 43(05): 1666-1674.
- [35] 徐树文, 卓谷颖, 李壮, 等. 基于 PSD-BPA 数据的 ADPSS 大电网电磁暂态转换建模方法与软件实现[J]. 中国电力, 2024, 57(08): 182-189.
- [36] 胡海洋. ADPSS 与 PSCAD 电磁暂态模型自动转换系统的研究与开发[D]. 华北电力大学(北京), 2018.
- [37] Jiayu W, Chongru L, Min L, et al. The Study Of Automatic Conversion Of Electromagnetic Transient Models From Pscad To Adpss[C]. International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE 2015), 2015:541-547.
- [38] Chao L, Maomi U. An Extended Depth-First Search Algorithm for Optimal Triangulation of Bayesian Networks[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2016, 80: 294-312.
- [39] Yan D, Fangxing L, Tongxin Z, et al. Fast Cascading Outage Screening Based on Deep Convolutional Neural Network and Depth-First Search[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2704-2715.
- [40] Jinling L, Hongwei C, Yang L. On Algorithms for State Feedback Stabilization of Boolean Control Networks[J]. Automatica, 2017, 84: 10-16.
- [41] 毕瀚文, 范晓舟, 肖海, 等. 支撑电力系统全环节碳流追踪的节点导纳矩阵算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(20): 7881-7892.
- [42] 徐成司, 董树锋, 孙洲, 等. 基于网络简化和深度优先遍历的配电网路径搜索算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 170-176.
- [43] 向小蓉, 刘涤尘, 向农, 等. 基于并行禁忌搜索算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2012, 36(08): 100-105.
- [44] Saif U R, Noha A, Jawad A, et al. Efficient Top-K Identical Frequent Itemsets Mining Without Support Threshold Parameter from Transactional Datasets Produced by IoT-Based Smart Shopping Carts[J]. Sensors, 2022, 22(20): 8063-8063.
- [45] Dangdang N, Bin L, Minghao Y, et al. A New Local Search Algorithm with Greedy Crossover Restart for the Dominating Tree Problem[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 229.

- [46] Jianhua W, Jianye Y, Chengyuan Z, et al. Efficient Maximum Edge-Weighted Biclique Search on Large Bipartite Graphs[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2023, 35(8): 7921-7934.
- [47] 郭慧, 汪飞, 张笠君, 等. 基于撮合交易的能源互联网最小网损路由算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 172-179.
- [48] 马静, 张侯好, 马伟, 等. 基于关联矩阵标记法与回路矩阵的电网拓扑分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 74-80.
- [49] 刘博, 陈佳璇, 李江. 基于 SEM-MIP 状态估计的配电网拓扑辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 69-77.
- [50] 王超杰, 任建文, 徐伟男, 等. 基于距离向量的失电孤岛供电路径搜索算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(06): 65-70+143.
- [51] 倪程捷, 房鑫炎, 赵文恺, 等. 基于图论的移动应急电源孤岛划分及最优接入点搜索[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(06): 34-40.
- [52] Reinhard D. Extremal Graph Theory[J]. Graduate Texts in Mathematics Graph Theory, 2024: 179-226.
- [53] Bernard H. Graph Theory and Its Applications[J]. WORLD SCIENTIFIC eBooks, 2024: 127-142.
- [54] Chartrand G, Zhang P. Chromatic Graph Theory[J]. acm, 2019.
- [55] Florian D, John W. Simpson-Porco, Francesco Bullo. Electrical Networks and Algebraic Graph Theory: Models, Properties, and Applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(5): 977-1005.
- [56] Blelloch G E, Maggs B M. Parallel algorithms[M]// Blelloch G E, Maggs B M. Algorithms and theory of computation handbook: special topics and techniques. 2010: 2010:25-25.
- [57] DU Z, Oliver A R, LI F, Mohammad D, David A B, et al. Minimum-Mapping Based Connected Components Algorithm[J]. semanticscholar, 2023.
- [58] Karthik S K. Scalable asynchronous connected components detection based on a parallel union-find algorithm[J]. 2018.
- [59] Patwary M M A, Refsnes P, Manne F. Multi-core spanning forest algorithms using the disjoint-set data structure[C]. 2012 IEEE 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium. 2012: 827-835.
- [60] 白皓. 面向大规模图计算的连通分量算法优化与应用[D]. 国防科技大学, 2021.
- [61] Chirag J, Patrick F, Tony P, et al. An Adaptive Parallel Algorithm for Computing Connected Components[J]. Computing Research Repository, 2017, 28(9): 2428-2439.
- [62] Cyrus H, Jordan W, Ryan B, et al. A Distributed-Memory Algorithm for

- Connected Components Labeling of Simulation Data[J], Mathematics and visualization, 2015: 3-19.
- [63] Ning L, Dong-sheng L, Yi-ming Z, Xiong-lve L, et al. Large-scale Graph Processing Systems: a Survey[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2020, 21(3): 384-404.
- [64] Robinson R M. Recursion and double recursion[J]. Bulletin of the American Mathematical Society. 1948, 54(10): 987-993.
- [65] 张大海, 武传健, 和敬涵, 等. 利用测量波阻抗欧几里得距离的柔性直流输电线路后备保护方案[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3895-3906.
- [66] Guobing S, Junjie H, Bing G, et al. Pilot Protection of Hybrid MMC DC Grid Based on Active Detection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-15.
- [67] 徐岩, 程姝, 薛艳静. 基于故障暂态电流 Pearson 相关系数的直流配电网保护[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2021, 48(4): 11-19.
- [68] 刘健, 刘磊, 林圣. 基于波形相似度检测的换相失败预测控制改进方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 132-139.
- [69] 李斌, 张纪航, 刘海金, 等. 基于波形相似度分析的直流输电线路故障测距[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 27-32.
- [70] 翁汉琍, 王胜, 林湘宁, 等. 基于波形相似度的抗电流互感器饱和和变压器相位差动保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(04): 132-138.
- [71] 李珊瑚, 黄林峰, 王文圣, 等. 零电压矢量作用时间对间接矩阵变换器输出电压共模分量与谐波分量的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7943-7955.
- [72] 李新年, 付颖, 张庆武, 等. 基于极间耦合特性的特高压直流换相失败预防方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 170-177.
- [73] 梁远升, 徐征, 丁佳彦, 等. 基于复域暂态解析的柔性直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(24): 155-165.