

华北电力大学

硕士学位论文

ADPSS 与 PSCAD 电磁暂态模型自动转换系统 的研究与开发

Research on Electromagnetic Transient Model Automatic Conversion System between ADPSS and PSCAD

胡海洋

2018 年 3 月

国内图书分类号：TM74
国际图书分类号：621.3

学校代码：10079
密级：公开

硕士学位论文

ADPSS 与 PSCAD 电磁暂态模型自动转换系统 的研究与开发

硕士研究生：胡海洋

导师：刘崇茹教授

申请学位：工学硕士

学科：电气工程

专业：电力系统及其自动化

所在学院：电气与电子工程学院

答辩日期：2018年3月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM74

U.D.C: 621.3

Thesis for the Master Degree

**Research on Electromagnetic Transient Model
Automatic Conversion System between ADPSS and
PSCAD**

| | |
|---------------------------------------|--|
| Candidate: | Hu Haiyang |
| Supervisor: | Prof. Liu Chongru |
| Academic Degree Applied for: | Master of Engineering |
| Speciality: | Power System and Its Automation |
| School: | School of Electrical & Electronic Engineering |
| Date of Defence: | March, 2018 |
| Degree-Conferring-Institution: | North China Electric Power University |

摘 要

PSCAD/EMTDC 作为最早一批电力系统分析软件,其精确性已经受到研究人员的认可,大量的系统模型是在 PSCAD/EMTDC 环境下建立的。而 ADPSS 作为具有我国自主知识产权的全数字实时仿真系统,具有性价比高、扩展性好等优点,越来越多的模型需要在 ADPSS 上建立,因此在这两个软件间实现数据文件相互转换是非常必要的。然而对于研究人员来说,人工完成二者模型间转换不仅效率低,而且出错率高。为解决两种软件间模型转化困难的问题,本文提出了一种 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 的电磁暂态模型双向自动转换方法,从图形转换与参数转换两个角度对模型转换进行了研究。

对于图形,本文针对两个方向的转换分别进行了研究。在将模型的图形由 PSCAD/EMTDC 转到 ADPSS 时,由于 ADPSS 中一次系统与二次系统拓扑组织形式不一致,需分别对一次系统与二次系统进行拓扑解析。首先对一次系统形成节点关联矩阵,筛选出母线节点,最后合并多余母线,完成母线的解析;对于二次系统,本文采用由输出节点搜索其输入节点的方法,可避免回溯以加快解析速度;最后以深度优先搜索算法解析出元件端点的相位以及母线的基准电压。在将模型的图形由 ADPSS 转到 PSCAD/EMTDC 时,本文基于元件端口动态特性,对其端点坐标进行计算,并提出一种可避免错误交叉连接的自动布线方法。最后以 IEEE14 节点算例对双向的图形转换进行验证。

对于参数,本文针对电力系统仿真软件 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 模型上的差异,主要以发电机、变压器、换流器等几种典型元件为例,对参数转换的基本思路与难点进行了阐述。通过对两者间的模型进行对比研究,对其具体参数进行转化,最后开发了 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 间模型自动转换软件。

最后,本文提出一种基于 PRONY 变换的模型转换可信度评价方法。通过 PRONY 分析,分别从频率、阻尼、幅值三个方面对转换前后仿真波形的可信度进行了定量分析。以 CIGRE 和 IEEE14 标准算例为例,对转换前后波形的可信度进行了对比。仿真结果基本一致,验证了所提出的转换方法的正确性。

关键词: 电磁暂态; ADPSS; PSCAD/EMTDC; PRONY 变换; 模型转换

Abstract

Owing to that PSCAD/EMTDC is one of the earliest batch of power system analysis software, a large number of system models are established in PSCAD/EMTDC. ADPSS, as a all-digital real-time simulation system with Chinese independent intellectual property rights, has many advantages, such as high cost performance and good expansibility. Hence more and more models need to be built in ADPSS. Therefore, it is necessary to transform data files between these two softwares. However, it is a big challenge for researchers to realize the interconnection between ADPSS and PSCAD/EMTDC. To solve the difficulties of conversion between the two software, this paper presents an automatic conversion method of electromagnetic transient model between PSCAD/EMTDC and ADPSS. The research was developed from graph transformation and parameter transformation.

For graphics, this paper studies the conversion of two directions respectively. When the graph of the model is transferred from PSCAD/EMTDC to ADPSS, because of the inconsistency of topology organization between the primary system and the secondary system in ADPSS, topological analysis is needed respectively for the primary system and the secondary system. First, establish a node incidence matrix system; then search the bus nodes; finally merge the redundant buses. For the secondary system, we search the input node from the output node, which can avoid backtracking to speed up the analysis. The depth-first search algorithm is implemented to analysis the phase of the element endpoint and the reference voltage of buses. When the model is transferred from ADPSS to PSCAD/EMTDC, we calculates the terminal coordinates based on the dynamic characteristics of component ports, and proposes an automatic wiring method that could avoid wrong connection. Finally, the IEEE14 is performed as an example to verify graphics conversion on the two directions.

For the difference of parameters between PSCAD/EMTDC and ADPSS model, the generator, transformer, converter and several typical components are comparative studied to elaborate parameters transformation. Also, the automatic conversion software between PSCAD/EMTDC and ADPSS is developed.

Finally, a reliability evaluation method of model transformation based on PRONY transformation is proposed. Through PRONY analysis, the credibility of transformation is quantitatively analyzed from frequency, damping and amplitude. Taking CIGRE and IEEE14 standard examples for example, the reliability of conversion is compared. The results show that the simulation results are basically the same, which verifies the correctness of the proposed transformation method.

Keywords: electromagnetic transient; ADPSS; PSCAD/EMTDC; PRONY method; model transformation

目 录

| | |
|--|-----------|
| 摘 要..... | I |
| Abstract..... | II |
| 第 1 章 绪论..... | 1 |
| 1.1 选题背景和意义..... | 1 |
| 1.2 模型转换的国内外研究现状..... | 2 |
| 1.3 论文的主要工作..... | 3 |
| 第 2 章 电磁暂态模型图形转换研究..... | 4 |
| 2.1 PSCAD/EMTDC 向 ADPSS 图形转换算法..... | 4 |
| 2.1.1 一次系统拓扑分析..... | 4 |
| 2.1.2 二次系统拓扑分析..... | 7 |
| 2.1.3 解析元件端点相位..... | 9 |
| 2.1.4 解析母线基准电压..... | 11 |
| 2.2 ADPSS 向 PSCAD/EMTDC 图形转换算法..... | 12 |
| 2.2.1 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 拓扑组织形式..... | 12 |
| 2.2.2 基于端口动态特性的端点坐标计算方法..... | 12 |
| 2.2.3 避免错误连接的自动布线方法..... | 14 |
| 2.3 算例分析..... | 15 |
| 2.3.1 PSCAD/EMTDC 转 ADPSS 拓扑转换验证..... | 15 |
| 2.3.2 ADPSS 转 PSCAD/EMTDC 拓扑转换验证..... | 17 |
| 2.4 本章小结..... | 18 |
| 第 3 章 电磁暂态模型参数转换研究..... | 19 |
| 3.1 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 系统元件概述及对应关系..... | 19 |
| 3.2 典型元件的模型对比及参数转换..... | 20 |
| 3.2.1 Park 同步电机..... | 20 |
| 3.2.2 三相两绕组变压器..... | 24 |
| 3.2.3 六脉冲换流器..... | 26 |
| 3.2.4 三相时控开关..... | 29 |
| 3.2.5 三相分布参数线路..... | 30 |
| 3.2.6 值控开关..... | 32 |
| 3.3 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 共同支持的元件模型..... | 33 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| 3.4 本章小结..... | 33 |
| 第 4 章 基于 PRONY 变换的模型转换可信度分析..... | 34 |
| 4.1 残差分析..... | 34 |
| 4.2 基于 PRONY 变换的模型转换可信度分析..... | 35 |
| 4.2.1 PRONY 变换原理..... | 35 |
| 4.2.2 频率可信度指标..... | 35 |
| 4.2.3 阻尼可信度指标..... | 37 |
| 4.2.4 幅值可信度指标..... | 37 |
| 4.3 算例分析..... | 38 |
| 4.3.1 PSCAD/EMTDC 转 ADPSS 算例分析..... | 38 |
| 4.3.2 ADPSS 转 PSCAD/EMTDC 算例分析..... | 44 |
| 4.4 本章小结..... | 49 |
| 第 5 章 总结..... | 50 |
| 参考文献..... | 51 |
| 攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果..... | 54 |
| 攻读硕士学位期间参加的科研工作..... | 55 |
| 致 谢..... | 56 |

第 1 章 绪论

1.1 选题背景和意义

ADPSS 是具有我国自主知识产权的大型电力系统全数字实时仿真装置,可实现机电暂态实时仿真、外接物理装置仿真、大型交直流混合电力系统机电-电磁暂态的实时仿真等功能^[1]。其技术特性为:

1) 可实现机电-电磁暂态混合仿真,利用机电暂态仿真规模大的优势,对交流网络用机电暂态仿真;利用电磁暂态仿真准确的优势,对 FACTS 系统或 HVDC 系统等电力电子元件采用电磁暂态仿真^[2];

2) 可通过本地高速网络充分利用机群的多节点结构优势,对大型计算任务进行分解,在对多个任务并行计算时可进行实时与同步控制^[2];

3) 拥有良好的可扩展性以及灵活的软硬件接口,可与调度自动化系统相连接取得在线数据进行仿真,可外接 PSASP 用户自定义模型、Matlab/Simulink 模型以及物理模型等进行计算^[2]。

目前该仿真装置在电力系统继电保护、安全自动装置、故障在线分析和直流输电控制装置等诸多领域得到了越来越广泛的应用^[3]。

PSCAD/EMTDC 由加拿大曼尼托巴水电局 (Manitoba Hydro) 开发,是一款功能强大、拥有灵活用户交互图形界面的离线仿真程序^[4]。其计算内核为 EMTDC,主要在时域中建立并求解微分方程,进行电磁暂态仿真计算,算法准确优良、数值稳定度高;为用户提供了完备的电力系统元件模型库,同时用户根据特殊需要可利用 FORTRAN 代码自行定义元件模型,具有良好的开放性。PSCAD/ETMDAC 非常适用于研究交直流电力系统问题、变压器饱和效应以及完成电力电子仿真及非线性控制等任务^[5],是目前世界上应用最为广泛的电磁暂态仿真程序之一。

目前,随着 ADPSS 中电磁暂态软件的日趋成熟,其应用需求不断扩大,所积累的工程数据也日益增多;而 PSCAD/EMTDC 作为一款应用已久的电力系统离线仿真软件,其精确性已经获得了世界范围内的认可^[6]。因此,为了进行模型仿真结果的对比性研究,提高已建立模型的精确性,有时需要将 ADPSS 的工程数据转换为 PSCAD/EMTDC 工程文件,对仿真结果进行对比分析。与此同时,由于大多数模型是在 PSCAD/EMTDC 环境中搭建的,由于 ADPSS 仿真速度快等优势,越来越多的模型需要在 ADPSS 中建立。而对于系统规模和工程量较大的实际电网,无论是在 ADPSS 中还是在 PSCAD/EMTDC 中直接建模的工作量

都将非常巨大，而且容易出错^[7]。因此，如果能搭建两种软件电磁暂态模型的图形及参数的自动转换平台，解决 ADPSS 工程模型与 PSCAD/EMTDC 工程模型的自动转换问题，将会最大限度地减少人工参与的工作量，保证模型转换的准确性，提高对比仿真分析的效率；同时，也会提高 ADPSS 程序使用的延展性，进一步完善 ADPSS 程序，促进 ADPSS 更广泛的应用。

1.2 模型转换的国内外研究现状

目前常用的电力系统分析软件种类繁多，各自有不同的适用领域。但在一个软件上所搭建的工程模型无法在其余软件上通用^[8]，这使得从不同侧面分析同一个工程模型的工作难以开展。因此，不同软件之间接口与模型转换的开发工作有很大的应用需求，关于这方面的研究工作也在不断展开。

KEPS Real Time Digital Simulator(RTDS)是韩国电力公司开发的一款仿真软件，在软件内部可实现由 PSS/E 数据文件的导入功能。它可由 PSS/E 的 ASCII 文件导入成 KEPS RTDS 的仿真页面文件，用户可根据仿真需要对其进行修改^[10]。

除此之外，Manitoba HVDC Research Centre 也做了 BPA 向 RTDS 和 PSS/E 向 RTDS 的模型转换接口。该接口功能可把 BPA 和 PSS/E 格式的数据文件转换成 RTDS 格式下的文件，以供用户使用^[11]。

文献[12]与文献[13]提出了 BPA 模型到 PSCAD/EMTDC 模型的转换方法。其中文献[12]主要对比了 BPA 与 PSCAD/EMTDC 中各种常用电气元件和交直流混合系统的稳态特性和动态特性，提出了 BPA 向 PSCAD/EMTDC 元件参数转换的方法，根据 BPA 模型数据手动搭建了 PSCAD /EMTDC 模型，通过仿真结果的对比验证了模型转换的可行性^[12]；文献[13]基于电网络理论中的节点-支路关联矩阵以及图论中的深度优先搜索算法，开发了能够自动实现 BPA 到 PSCAD/EMTDC 工程模型转换的程序，在完成元件参数转换的基础上，重点完成了 BPA 工程模型拓扑到 PSCAD/EMTDC 工程模型拓扑的转换，并进行了算例验证^[13]。

文献[14]实现了 BPA 与 DIgSILENT 动态模型的比较与数据转换。文章详细比较了 BPA 和 DIgSILENT 两种商业软件中的机电暂态模型，实现了发电机和负荷的模型匹配^[14]。利用 Frame 和 Block 的双层结构，在 DIgSILENT 中搭建了同步机控制系统框架和模型，实现同步机控制系统的模型匹配。利用 DIgSILENT 支持的 Python 语言编写暂态数据转换程序实现数据匹配。基于模型匹配和数据匹配实现大规模电力系统数据自动转换^[14]。

目前对 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 间模型转换仍采用人工手动建模方法。

该方法不仅耗时,而且由于 PSCAD/EMTDC 中的元件模型功能及参数与 ADPSS 中的元件模型功能及参数不完全相同,需要根据不同的模型原理将意义相同的参数进行对应;此外,当模型拓扑较复杂时,手动搭建模型非常容易出现错误^[15],这使得模型在两个软件之间的移植十分困难,但目前还没有能够实现将 ADPSS 工程模型与 PSCAD/EMTDC 工程模型的自动转换工具。

1.3 论文的主要工作

本文的主要内容是研究一种 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 电磁暂态模型自动转换系统,能根据现阶段存在的模型转换的需求,实现模型转换过程中的图形与参数两方面的转换。论文所做的工作有以下几个方面:

第 2 章介绍了 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 两个方向转换的图形转换算法。对于从 PSCAD/EMTDC 转到 ADPSS 的图形转换,将一次系统的拓扑解析分为判断连接关系、解析母线、合并母线三大步骤;二次系统的拓扑解析的主要思想是“由输入节点搜索输出节点”,采用避免回溯的深度优先搜索算法进行解析;另外,从具有相位信息的元件端点出发,利用深度优先搜索算法对各元件端点相位进行解析;类似地,从发电机等元件出发,利用深度优先搜索算法对各母线电压等级进行了解析。对于从 PSCAD/EMTDC 转到 ADPSS 的图形转换,本文对 PSCAD 元件端口的动态特性进行了阐述,并提出基于该动态特性的端点坐标计算方法;并针对传统简单布线逻辑会出现的问题,提出一种可避免错误连接的自动布线方法。最后,以 IEEE14 标准算例对两个方向的图形转换进行拓扑验证,证明了拓扑转换的正确性与可靠性。

第 3 章首先对 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 两个仿真软件中的元件对应关系进行了简要的概述;之后通过几种典型的元件为例,对参数转换的基本思路与难点进行了阐述;最后给出了 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 所有一次元件与二次元件的元件对应关系。

第 4 章提出了一种基于 PRONY 变换的表征转换可信度的方法,并对所提出的 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 自动换系统可信度进行了验证。由于简单的残差相似度仅能表征信号的整体差异水平,为此采用 PRONY 变换对转换前后的信号的特征量进行解析,得到各信号的频率、幅值和阻尼向量,再分别对转换前后每种特征量进行排序,根据相应的权重得到频率可信度指标、幅值可信度指标与阻尼可信度指标。最后,根据所提出的表征转换可信度的方法,以 CIGRE 和 IEEE14 标准算例验证了所提出的 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 自动转换系统的转化可信度,验证了转换的正确性与合理性。

第 5 章,对本文所做的工作及其创新点进行了总结。

由于 PSCAD/EMTDC 中各元件间均通过连接线相连或直接相连，本章首先对各元件以及各连接线端点坐标进行解析，得到各个元件与各个节点间的连接关系；其后，遍历各节点，根据其拓扑关系初步判断其是否为母线；初筛母线后，遍历所有元件端点，如果该端点未连接到母线上，根据节点拓扑关系，沿连接线搜索母线，若找不到母线，则新增母线；至此，所有元件端点均连接到母线，为了避免连接线两端均连到母线上情况的发生，遍历所有连接线，如果遇到该种情况，合并两母线。图 2-1 为对 PSCAD/EMTDC 仿真模型的拓扑流程图，以下分小节分别讲述各具体流程。

2.1.1.1 判断连接关系

遍历所有元件与连接线，为每个端点建立节点对象（node）。其中节点对象（node）中除了其坐标信息外，主要包含以下拓扑信息：

- 1) 与该节点直接相连的元件 ID 号（component_id）；
- 2) 与该节点直接相连的连接线 ID 号（wires_id）；

为了得到节点在模型中的拓扑关系，以节点坐标作为关键字，将节点 ID 存入关联容器 map 中。在元件与连接线端点的遍历过程中，若该端点坐标已存在于 map 容器中，将该元件 id 号或连接线 id 号记录到 node 对象中；若在 map 容器中未找到该端点坐标，新建 node 对象，将其坐标信息存入到 map 容器中。每遍历到一个端点，将其所对应的 node 对象 id 号存入该元件端点信息中。

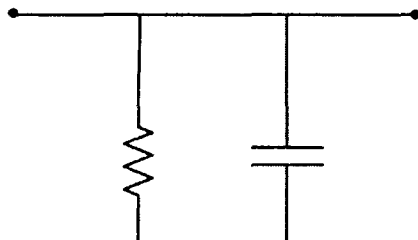


图 2-2 元件端点接到连接线中部

然而，在 PSCAD/EMTDC 中元件或者连接线间相连不是只能通过端点这一种方式。如图 2-2，元件的端点未连到连接线两侧的端点，而是连到连接线的中间部分。对于这种情况，需将位于连接线中央的节点 node 合并。做法是：遍历所有连接线，如果有节点坐标位于连接线上，将该节点合并至连接线最近的端点上。

至此，模型中节点对象包含与其所联接的元件或连接线 id 号，各元件与各连接线端点信息中也包含相应节点信息。换句话说，程序已经解析出模型中各个元件间的连接关系。

2.1.1.2 判断母线

ADPSS 中元件的端点必须直接或通过连接线连接在母线上，且只有一条确

定的母线。所以一个普通节点不能同时连接在两条以上的母线上，只有母线上的节点能与多条母线相连，最后合并为一条母线。

ADPSS 中元件的连接规则为：从元件端点出发连到相应母线上。不能从一元件端点直接连到另一元件端点，也不能从母线出发连到元件的端点。连接线连接的方向、连接的对象均不能错。而目前所解析出的拓扑关系中，节点间可以由连接线直接相连，所以，需遍历节点，筛选出真正的母线。

在实际判断母线过程中，根据已解析出的连接关系，即 node 节点的与其直接相连的元件个数 ($n_component$) 和与其直接相连的连接线条数 (n_wires)，本文将所有节点共分成以下 7 类：

- a) $n_component \geq 2$: node 连接两个及以上的元件；
- b) $n_component = 1, n_wires \geq 2$: 即 node 出线度大于或等于 3；
- c) $n_component = 1, n_wires = 1$: 该节点出现度为 2；
- d) $n_component = 1, n_wires = 0$: 该元件端点悬空；
- e) $n_component = 0, n_wires \geq 3$: 即 node 出线度大于或等于 3；
- f) $n_component = 0, n_wires = 2$: 此类节点为纯连接线间节点，只起连接作用；
- g) $n_component = 0, n_wires = 1$: 该连接线端点悬空；

以上这七大类，能准确覆盖元件和连接线间节点可能出现的所有情况，因此只要遍历节点判断其是否为母线节点即可得到母线的位置。

首先进行母线初筛。遍历所有节点，由判断出的连接关系可知各节点的出线度，若该节点的出线度大于 2 或者该节点为元件间的连接点，即 a 类、b 类或 e 类节点，则判定该节点为母线节点。

然而对母线的初筛不能确保每个元件端点都找到母线节点，需进一步筛选母线，即二次筛选。遍历所有元件端点，该端点未连接到母线节点，则从该端点处沿连接线向系统内部搜索：若该节点悬空，即 g 类节点，则停止搜索；若搜索到连接线间节点，即 f 类节点，则沿着下一条连接线继续搜索母线；若搜索到母线节点，则认为该元件与母线相连；若搜索到另一元件仍未找到母线节点，即 c 类节点，表明两元件间为连接线相连，则于两元件连线中点处添加母线，并将两元件拓扑信息添加到母线节点中。

至此，所有元件端点均连接到确定母线上。

2.1.1.3 合并母线

ADPSS 中的连线规则：只能由元件端点连到相应类型的母线中^[20]。而目前对 PSCAD/EMTDC 模型的处理并不能保证能满足 ADPSS 中的拓扑连线规则。因此，需将多余母线进行合并。

(1) 合并由连接线相连的母线

即使保证了所有元件端点均连接到确定母线上，然而却不能保证不存在有由连接线连接的母线，而这是违反 ADPSS 连接规则的。由这样的拓扑结果转换的 ADPSS 模型，本该在一条母线下的元件会连在两条割裂的母线中。因此，需合并由连接线连接的母线。

因此，遍历所有连接线，若其端点均为母线节点，合并之，并对相关元件端点母线信息进行修正。

(2) 合并一转三母线

在 PSCAD/EMTDC 中，一转三是作为一个元件处理；而在 ADPSS 中，一转三是作为一类母线。换句话说，ADPSS 中没有元件与 PSCAD/EMTDC 中的一转三元件相对应，而程序在对 PSCAD/EMTDC 模型处理时，一转三元件是作为四端元件处理，其四个端点连接到四条母线中。因此，需将一转三的四条母线合并为一条一转三母线。

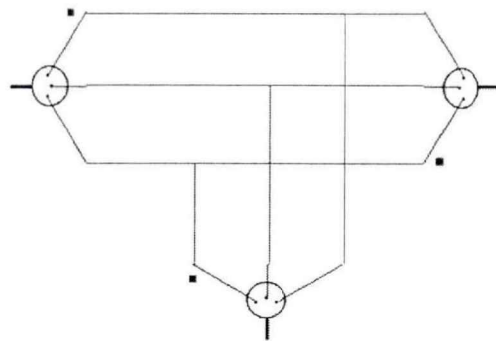


图 2-3 多个一转三相连

对于如何处理一转三母线的难点是：如图 3-3 所示，当多个一转三直接相连，即两个一转三端点母线会出现重叠，单纯的对一转三四个端点母线进行合并会出现母线重复合并的问题，致使出现多余母线、元件端点母线位置不正确等问题发生。

对此，本文的处理方案为：建立名为 bus2bus 的 map 关联容器，将具体母线合并的路径存储到 map 容器中，在每次合并母线时，对操作母线与目标母线在 bus2bus 中进行搜索，若找到该母线，则意味着该母线已被合并过，找到最终将其合并的那条目标母线，对这条母线进行操作。遍历 PSCAD/EMTDC 中一转三元件，将其单相端点母线合并至其三相端点母线，并将相关元件端点母线信息进行修正。

2.1.2 二次系统拓扑分析

在 ADPSS 中，与一次系统不同的是，二次系统中元件之间不需要母线作为

中介，元件之间可以直接用连接线连接。但 ADPSS 中没有导线的概念，对于一次元件，需给出它的热点连接到哪条母线^[20]，而对于二次元件，在转换出的中间文件中需给出拓扑连接信息包括（1）该热点连接到哪个元件（2）连接到这个元件的哪个热点。

在 PSCAD/EMTDC 中，各元件间仅通过连接线连接，各元件中仅有参数信息没有拓扑信息，其拓扑仅通过连接线体现。因此需先对 PSCAD/EMTDC 中各元件进行二次拓扑分析，得出各元件拓扑信息。

2.1.2.1 二次拓扑流程

不同于 ADPSS, PSCAD/EMTDC 对于一次与二次元件并没有完全割裂开来，一次系统与二次系统的主要区别就在于元件的端点类型。PSCAD/EMTDC 中元件的端点分为“electrical”、“input”和“output”三种类型。其中 electrical 端点主要用于一次系统的连接，input 端点和 output 端点主要用于二次系统间控制信号的传递。以六脉动换流器为例，黑色的节点即为 electrical 端点，即 DN、DP 节点；绿色的和蓝色的节点即为为输入输出节点，即 AM、GM 为输出节点，AO、KB、CB 节点为输入节点。见下图。为得到二次系统的全部拓扑信息，需对所有元件的输入输出端点进行一次拓扑，由于是针对二次系统进行拓扑，本文称之为“二次拓扑”。

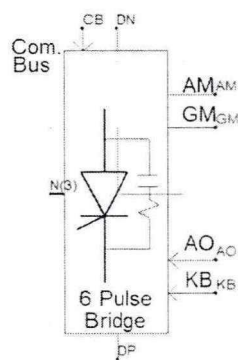


图 2-4 六脉动换流器不同类型的节点

二次拓扑分析是根据“一个输入节点有且仅有一个输出节点”的特性进行开展的。PSCAD/EMTDC 中一个元件的输出信号可以作为输入信号传递到多个元件，也就是意味着一个“output”节点可以与多个“input”节点相连；而一个元件的输入信号只能有一个来源，也就是说一个“input”节点只能与一个“output”节点相连。根据这个特点，就可以得到每个元件的拓扑信息。

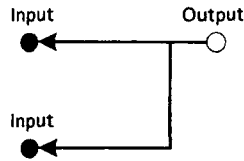


图 2-5 二次拓扑搜索原理示意

二次拓扑分析的主要思想是“由输入节点搜索输出节点”，由于一个输入节点只能搜索到一个输出节点，相较于“由输出节点搜索输入节点”的搜索算法可大大减少搜索量。即遍历所有元件的输入节点，沿着连接线，进行搜索，直到找到“output”节点。

2.1.3 解析元件端点相位

由于 PSCAD/EMTDC 中元件分为两类，相位元件与非相位元件。非相位元件，如电阻，在可直接接入三相电路与单相电路中，对元件单独解析无法得到其端点相位；相位元件，如变压器、一转三元件，对元件单独解析即可得到端点的相位信息。而在 ADPSS 中每个元件均需端点相位信息，为此，需根据解析出的拓扑结果确定 PSCAD/EMTDC 中非相位元件的端点相位。本文采用深度优先搜索算法，从相位元件的端点出发得到系统中非相位元件的端点相位。

2.1.3.1 深度优先搜索原理

深度优先搜索(Depth-First Search)，在遍历过程中以深度为优先准则，遍历到树的端点再回溯。如果给定图所有顶点均未曾被访问过，随机选择一顶点 v_i 作为出发点^[21]。深度优先搜索算法可以定义为：第一步，从 v_i 出发，将其标记为已访问过；第二步，随机选择 v_i 的邻接点 v_j ，若 v_j 未曾被访问过，则以 v_j 为新的出发点继续进行向下搜索，这个过程即为深度优先搜索^[22]。

显而易见，深度优先搜索法通过递归方法完成的，非常符合计算机编程的思想。由于其尽可能先对纵深方向进行搜索，因此称之为深度优先搜索^[23]。例如，按深度优先搜索方法，如果刚访问过 v_i ，下一步将从 v_i 出发搜索一条未被访问过的边 (v_i, v_j) 。若顶点 v_j 已被访问过，则返回 v_i ，重新从 v_i 出发的未检测过的边中选择一条；若顶点 v_j 未曾被访问过，则沿此边从 v_i 到达 v_j ，访问 v_j ，并将其标记为已访问过，然后从 v_j 开始搜索，搜索方式与 v_i 一致，直到搜索完从 v_j 出发的所有路径，才回溯到顶点 v_i 。最后从 v_i 出发的搜索一条未检测过的边，重复以上过程，直到从始发点 v_i 出发的所有边都已检测过为止。此时，若 v_i 不是初始出发点，则回溯到在 v_i 之前被访问过的顶点；若 v_i 是初始出发点，则整个搜索过程结束^[24]。

如果对于一个连通无向图或强连通的有向网的图，从始发点开始的搜索过程结束，也就意味着完成了对图中该岛的完整遍历。但对于一个非连通无向图或非

强连通的有向图，从始发点出发的一次遍历只能访问到图中的一个连通分量，因此，需遍历各个连通分量才能将一个非连通图完整遍历。

对于无向图，从定点 v_i 出发进行一次深度优先搜索的遍历过程见图 2-6。

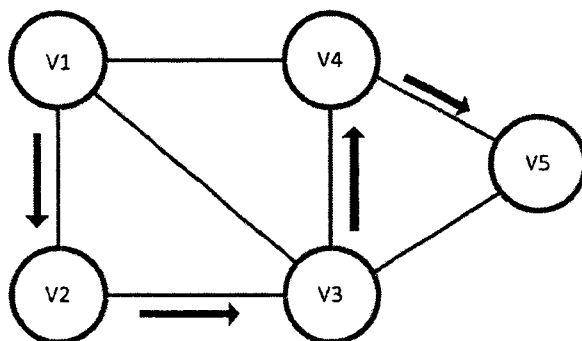


图 2-6 深度优先搜索示意图

以深度优先搜索算法遍历某个图时，该图的深度优先搜索遍历序列为按遍历到的顶点先后顺序所得到的序列^[25]。一个图的访问序列不唯一，它不仅与算法有关，还与图中各点存储结构以及始发点的选择有关^[26]。

2.1.3.2 解析元件端点相位流程

ADPSS 元件模型中包括每个端点的相位信息，在元件模型的拓扑连接过程中，不同相位的端点不能直接相连，因此在连接的过程中需对端点相位进行匹配与校验。而 PSCAD/EMTDC 算例文件中却不包括相位信息，它对于相位的处理体现在程序内部。除此之外，PSCAD/EMTDC 元件库中包含很多不区分单相与三相的元件，例如电阻、电感和电容。因此对这些元件端点相位解析无法得到其真正相位。

本文在解析 PSCAD/EMTDC 元件端点坐标的同时，区分出该元件是否为相位元件，并解析出元件端点相位。解析元件端点相位，换言之，就是利用已知的相位元件端点相位确定非相位元件端点相位的过程。

所谓确定端点相位，实际上就是找到与该端点相连的相位元件端点的相位。换言之，也就是根据个别已知相位的元件端点，从一个节点找到下一个节点，直到找到相位元件为止，或有电气联系的节点都被访问过为止。访问路径上的所有节点，其相位均与起始节点相位一致。

设计深度优先搜索的程序，其目的是让所有元件端点均能找到确定的相位。由于相位元件相较非相位元件少，因此，将深度搜索起点定在相位元件端点。在搜索过程中，如遇相位元件，其处理方法与节点悬空的处理方法一致。

我们还可以发现深度优先搜索是一个深入到末端再回溯的过程，可以理解为是每次搜索得到一条链状结构的连接线，然后回溯到前一个节点，以此节点为顶点，再搜索出若干条链状支路。设计一个子函数 `find_singlebus`，其作用为以当前节点为顶点向下搜索另一节点，并对相应端点相位赋值。在主函数中，每回溯

到一个节点,只要该节点附近还有未被访问过的节点,就调用一次 `find_singlebus` 函数,找到该节点延伸出的其它支路。若找到相位元件,回溯,其处理方法相当于该节点悬空。被访问过的节点可以被重复搜索到,但不可以重复同一条连接线,避免在一条环状支路上循环搜索,因此访问过的线路要及时在拓扑数组中删除。在不断回溯的过程中可以保证每一个节点都被搜索到。这样就实现了深度优先搜索中向末端不断深入和回溯过程的思想。

2.1.4 解析母线基准电压

通过拓扑分析,可以解析出母线位置;通过解析元件端点相位,可以解析出母线类型;但是,没有得到母线的基准电压。

考虑到 ADPSS 中元件的连接特性,以及 PSCAD/EMTDC 中只有少数元件由基准电压的特点,本文采用深度搜索的算法对母线电压进行解析。

2.1.4.1 解析母线基准电压流程

解析母线基准电压的基本思想是:以发电机等可以确定基准电压的元件出发,向网络搜索,到变压器、悬空或者接地节点终止,得到以基准电压为标准的电气岛。

电路中可以确定额定电压的元件有三类,分别是发电机、电压源、变压器。与发电机相连的母线的基准电压为变压器的额定电压,与电压源相连的母线的基准电压为电压源的额定电压,与变压器一、二次侧相连的母线的基准电压分别为变压器一、二次侧的额定电压。按照发电机、电压源、变压器的顺序,分别以这三种元件为起点,对与其相连的母线解析基准电压。

例如:发电机 1 的额定电压为 10kV,发电机 2 的额定电压为 35kV。与发电机 1 相连的母线的基准电压解析为 10kV,再从该母线开始深度搜索找到与该母线相连的其他母线,依次赋值基准电压为 10kV。对已经解析的母线不再解析,或者碰到变压器元件,都停止该条支路的搜索。对以发电机 1 为起点搜索完毕后,再以发电机 2 为起点解析母线基准电压,将母线电压赋值为 35kV,对已经解析的母线不再解析,或者碰到变压器元件,都停止该条支路的搜索。依次类推,直到搜索完所有发电机。然后以各电压源为起点解析母线,最后以变压器为起点解析母线。由此,解析完所有母线基准电压。

母线的深度搜索依赖于网络拓扑结构^[27]。然而在网络拓扑的存储数据里,对于元件,只知道与其相连的母线的存储位置,对于母线,只知道与其相连的元件的存储位置。所以从一条母线搜索相邻母线的方式是从母线找到元件,再从元件找到另一条母线。

由于网络电路拓扑按图层分别存储,外电路以一个图层存储,其中的每个子电路元件的内部电路以另外的图层存储,即每一个子电路元件还对应着一个图层

电路，所以当母线搜索时碰到子电路元件，情况略有差别。例如解析母线 A 基准电压后，遇到与此相连的子电路元件 B。考虑到子电路元件存在内部电路，并不从子电路元件 B 搜索到另一条与此相连的母线 C，而去搜索子电路的内部电路。先查询与母线 A 相连的是子电路 B 的 H 端口，然后跳到子电路 B 对应的与此同名的图层 B 中，以图层 B 里与端口 H 对应的外节点元件 M 为起点，继续解析母线基准电压。

当母线搜索时碰到外电路节点元件时，过程与上述相反。例如在图层 A 中解析母线 B 基准电压后，遇到与此相连的外电路节点元件 C。先查询图层 A 所属的外电路图层 D，跳到图层 D 中，然后搜索图层 A 在图层 D 中对应的子电路元件 E，再搜索子电路元件 E 中与外电路节点元件 C 对应的端口 F，以与端口 F 相连的母线 H 为起点，继续解析其他母线基准电压。

2.2 ADPSS 向 PSCAD/EMTDC 图形转换算法

对于 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 的仿真文件，其拓扑组织形式有着本质的区别，因此需要对 PSCAD/EMTDC 中的一次系统与二次系统分别进行拓扑分析，得到 PSCAD/EMTDC 仿真文件所需的连接关系。

2.2.1 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 拓扑组织形式

ADPSS 中两个电气元件端口只能通过母线相连。每一条母线拥有自己的 id 号，若两个元件端口所连接的母线 id 号相同，则证明两个端口相连，信号可以在两端口之间传递。

PSCAD/EMTDC 中一次系统与二次系统元件没有完全割裂开，其元件端口之间有效的连接方式有三种：端口直接相连、通过连接线相连以及通过母线相连。在 PSCAD 程序内部，只要两个端口的坐标相同，这两个端口之间便能够传递信号。其中，连接线与母线可以完成信号在自身端口之间的传递，因此元件之间通过连接线或母线相连等同于直接相连，信号可以在其中传递。

因此，若想实现在 PSCAD/EMTDC 中重现 ADPSS 工程拓扑结构，需将母线 id 号信息解析成 PSCAD/EMTDC 能识别的坐标信息，根据坐标信息建立相应的连接线。

2.2.2 基于端口动态特性的端点坐标计算方法

2.2.2.1 端口动态特性

在 PSCAD/EMTDC 中，每个元件的端口数量与位置是随着参数的变化而发

生变化的。在 PSCAD/EMTDC 的 master 库文件中，对每个元件的图形进行了详细的描述，其中，对每个端口的描述举例如下：

```
<port model="Transfer" name="OUT" x="72" y="0" dim="1" mode="Output" type="Real" internal="false"><![CDATA[(INTR==0)&&(Conv==0)]]></port>
```

其中，包含着每个端口的相对坐标，端口类型等信息。最重要的是 CDATA 表达式，该表达式与这个元件的实际参数值有关，如果表达式的值为真，则该端口有效，否则端口无效。由于参数的值是会发生变化，因此 PSCAD/EMTDC 中端口的个数及其顺序也会发生相应改变。而在 ADPSS 中，每个元件的端口个数及其数量是固定不变的。在转换前后也就不把端口简单的对应起来。

2.2.2.2 端点坐标计算方法

确定端点坐标，首先应该确定转换前后其端口对应关系。由于 PSCAD 中端口个数及数量是变化的，因此在转换时不能简单的将端口一一对应起来。本文采用配置文件的形式来说明在不同参数情况下对于各个元件在转换前后的端口对应情况。其对端口的描述举例如下，

```
<component psctype="gain" adptype="GAIN">
  <ports>
    <port pscport="IN:Dim" adpportname="x" adpportid="1"/>
    <port pscport="OUT:Dim" adpportname="y" adpportid="2"/>
  </ports>
</component>
```

这样处理有以下好处。首先，便于解决 ADPSS 中一个元件转换为多种元件。对于某些元件，标志位不同，在 PSCAD/EMTDC 中对应的元件也就不同，采用配置文件的形式便于解决一对多种元件的端口对应问题。其次，可以解决转换前后端口顺序几个数不一致的问题。

在 PSCAD/EMTDC 中，为了方便用户连线，将画纸用离散的小点组成，用户在连线的时候会自动将线的首尾端点放到小点上。在转换过程中，如果机械的将 ADPSS 中元件坐标直接赋值给 PSCAD/EMTDC 元件，会造成 PSCAD/EMTDC 元件的端点会不在小点上，用户将无法对该点进行连线。因此需对元件坐标进行预处理，处理方法为：

$$x_{pscad} = \left(\left\lfloor \frac{x_{adpss}}{18} \right\rfloor + 1 \right) \times 18 \quad (2-1)$$

$$y_{pscad} = \left(\left\lfloor \frac{y_{adpss}}{18} \right\rfloor + 1 \right) \times 18 \quad (2-2)$$

式中, $\left[\frac{y_{adpss}}{18} \right]$ 为不大于 $\frac{y_{adpss}}{18}$ 的最大整数。

表 2-1 不同方向时端口坐标计算公式

| 方向 | 定义 | 端口坐标 (x_{ter}, y_{ter}) |
|----|-------------|------------------------------------|
| 0 | —— | $(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y)$ |
| 1 | 右转一次 | $(x_0 - \Delta y, y_0 + \Delta x)$ |
| 2 | 右转两次 | $(x_0 - \Delta x, y_0 - \Delta y)$ |
| 3 | 右转三次 | $(x_0 + \Delta y, y_0 - \Delta x)$ |
| 4 | 左右镜像一次 | $(x_0 - \Delta x, y_0 + \Delta y)$ |
| 5 | 左右镜像一次+右转一次 | $(x_0 - \Delta y, y_0 - \Delta x)$ |
| 6 | 上下翻转一次 | $(x_0 + \Delta x, y_0 - \Delta y)$ |
| 7 | 上下翻转一次+右转一次 | $(x_0 + \Delta y, y_0 + \Delta x)$ |

表中, x_0, y_0 为元件中心点坐标, $\Delta x, \Delta y$ 为元件端点的相对坐标。

2.2.3 避免错误连接的自动布线方法

拓扑连接的基本思路是将母线视作一个点, ADPSS 中两个通过母线相连的元件端口在 PSCAD /EMTDC 中均通过连接线与此点相连, 则两个端口便实现了连接。

建立连接线时, 连接线首端点取自元件的一个端点, 末端点为与该元件该端点所连接母线的中心坐标 (遍历母线 id 号, 直至找到与元件连接信息中 id 号相同的母线, 取出母线位置信息); 连接线的首末端点位置存在两种情况:

- (a) 两点在同一水平线或同一垂直线上;
- (b) 两点没有在同一水平或垂直位置。

由于 PSCAD/EMTDC 中连接线只能为水平或垂直弯折而不能出现斜线, 因此对于情况 1), 建立两个端点的连接线; 对于情况 2) 建立三个端点的连接线, 如图 2-7 所示。

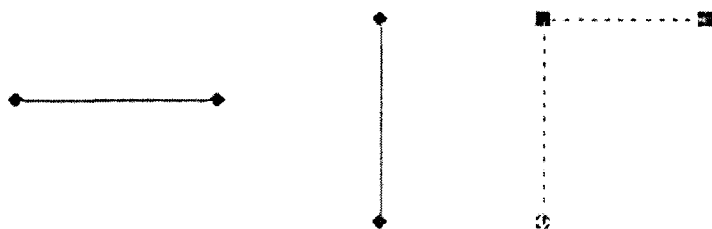


图 2-7 初步建立连接线的三种情况

PSCAD/EMTDC 中两条不相连的连接线可以在图形上交叉，但是一旦元件端口落在连接线上，该端口就会与连接线相连。为了避免发生错误的相连，建立连接线后需要判断连接线是否经过了元件端口，若有元件端口落在了连接线上，需要修改连接线走势，直至不经过任何元件端口修改方式如图 3-8。修改后，原 2 端点连接线变为 4 端点，原 3 端点连接线变为 5 端点。

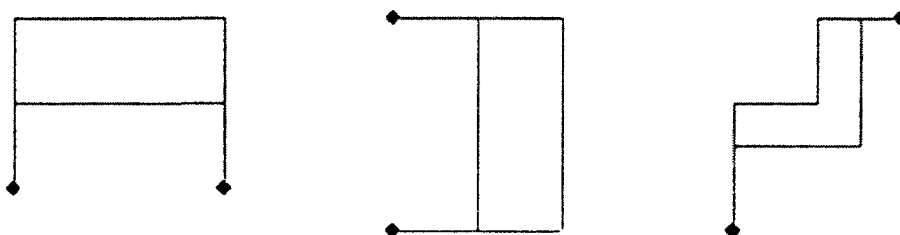


图 2-8 修改连接线走势方式

经过上述对连接线的修正，可实现方便快捷地对元件自动布线，同时可避免错误连接以至于引发错误的电气关系。

2.3 算例分析

2.3.1 PSCAD/EMTDC 转 ADPSS 拓扑转换验证

本文采用 IEEE14 标准算例进行转换前后的拓扑验证，该算例包含 14 条三相母线、4 台 Park 方程同步电机、11 条 π 型线路、3 台三相两绕组变压器、23 个负荷元件、1 台三相电压源。本文测试算例。图 3-9 与图 3-10 为转换前后 IEEE14 标准算例主电路图。

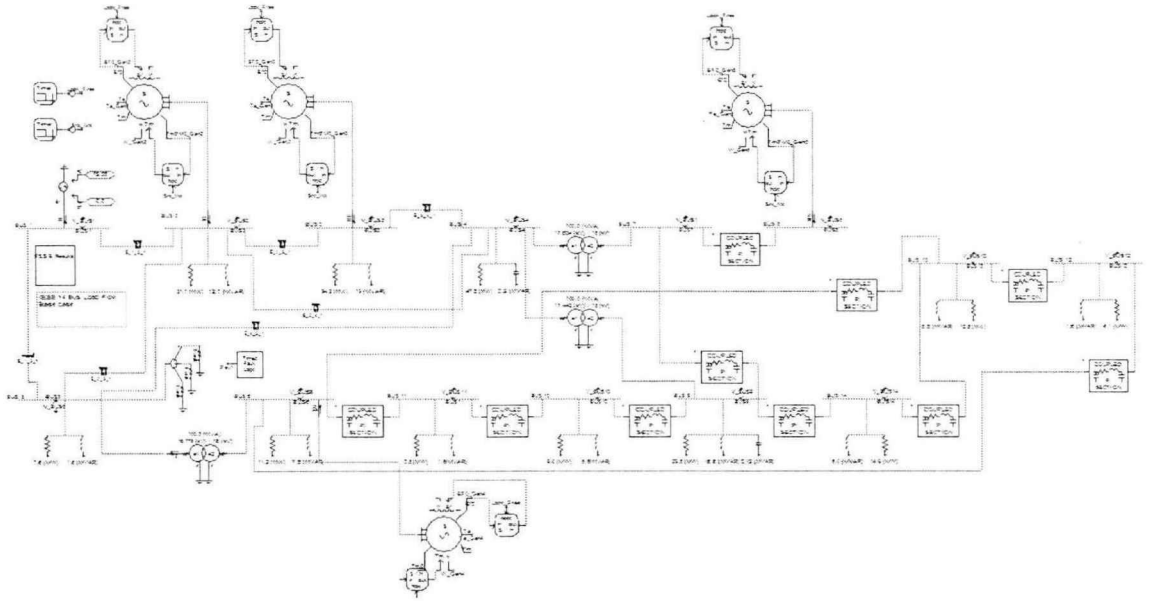


图 2-9 PSCAD/EMTDC 中 IEEE14 标准算例电路拓扑

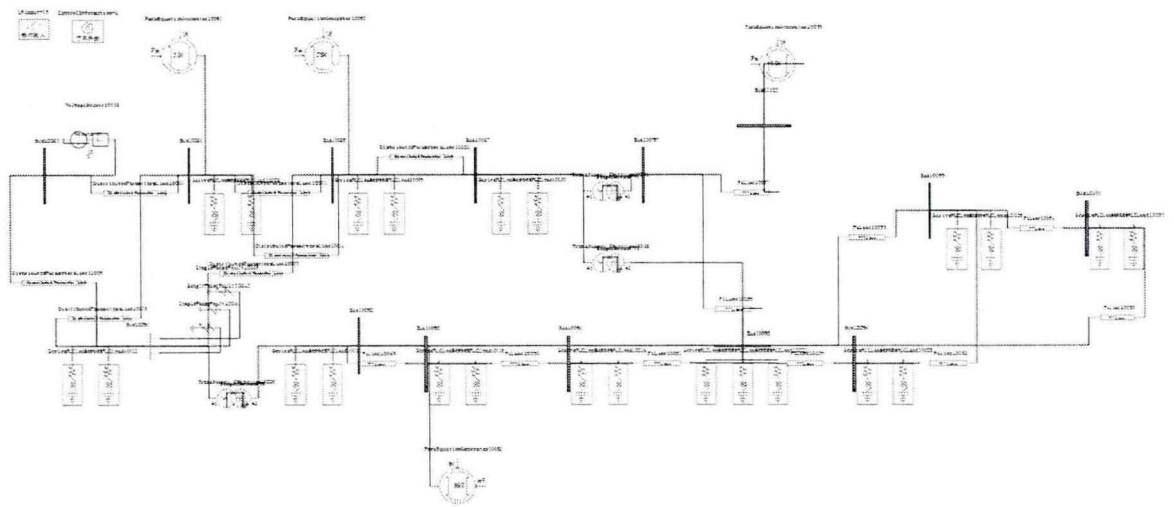


图 2-10 ADPSS 中 IEEE14 标准算例电路拓扑

IEEE 标准算例在转换前后两个电路的拓扑图可简化为如下图。

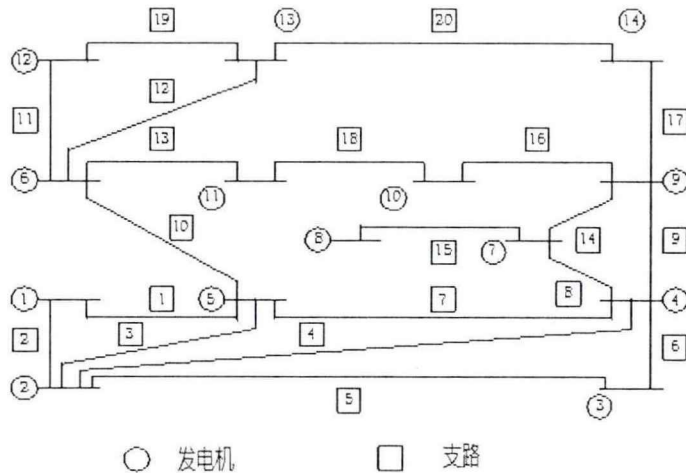


图 2-11 IEEE14 标准算例拓扑图

比较可知，转换后的拓扑结果与原算例拓扑结果一致，验证了所提出电磁暂态模型图形转换方法的正确性。

2.3.2 ADPSS 转 PSCAD/EMTDC 拓扑转换验证

在验证 ADPSS 转向 PSCAD/EMTDC 的图形转换算法时，本文采用 IEEE14 标准算例。该算例包含 14 条三相母线、4 台 Park 方程同步电机、11 条 π 型线路、3 台三相两绕组变压器、23 个负荷元件、1 台三相电压源^[28]。图 2-12、2-13、2-14 分别为 ADPSS 中 IEEE14 标准算例拓扑，转换而成的 PSCAD/EMTDC 中 14 节点拓扑，以及 PSCAD/EMTDC 中原始 IEEE14 标准算例拓扑。图中可看出电路拓扑转换正确。

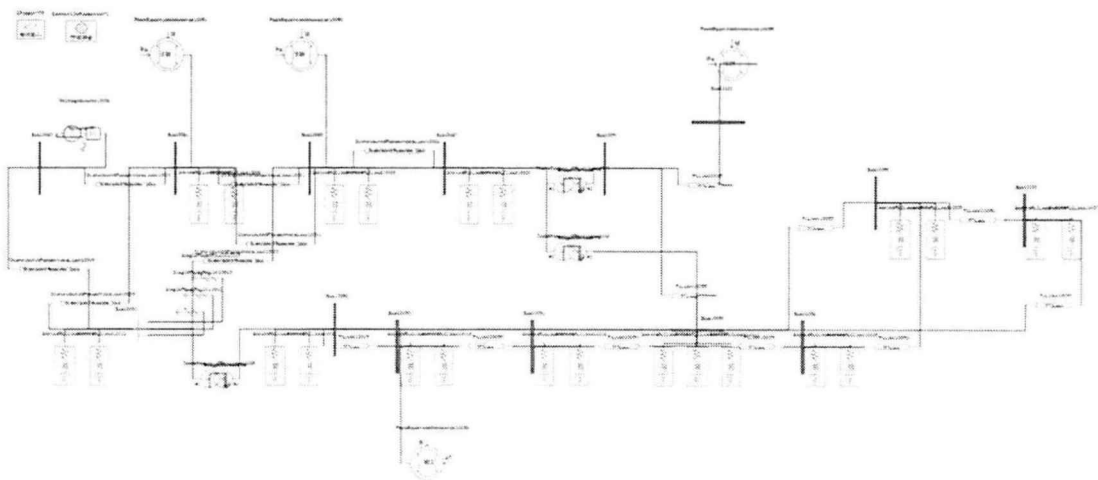


图 2-12 ADPSS 中 IEEE14 标准算例电路拓扑

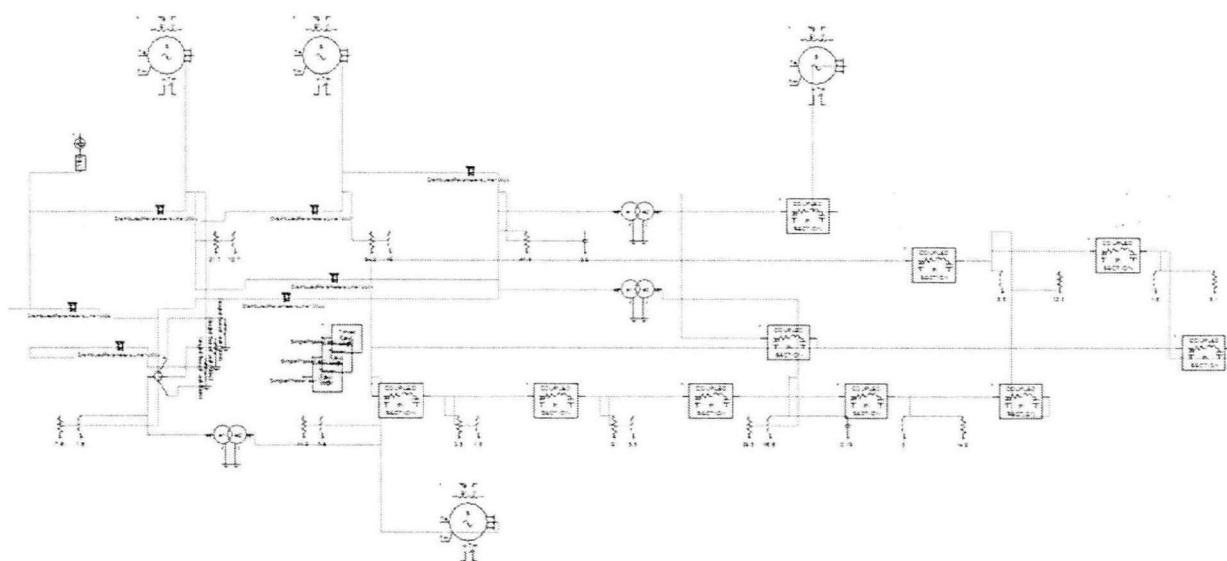


图 2-13 转换而成的 PSCAD/EMTDC 中 IEEE14 标准算例电路拓扑

比较可知，转换后的拓扑结果与原算例拓扑结果一致，验证了所提出电磁暂态模型图形转换方法的正确性。

2.4 本章小结

本章系统地介绍了从 ADPSS 转到 PSCAD/EMTDC 的图形转换算法，以及从 PSCAD/EMTDC 转到 ADPSS 的图形转换算法。对于从 PSCAD/EMTDC 转到 ADPSS 的图形转换，一次系统的拓扑解析分为判断连接关系、解析母线、合并母线三大步骤；二次系统的拓扑解析的主要思想是“由输入节点搜索输出节点”，采用避免回溯的深度优先搜索算法进行解析；另外，从具有相位信息的元件端点出发，利用深度优先搜索算法对各元件端点相位进行解析；类似地，从发电机等元件出发，利用深度优先搜索算法对各母线电压等级进行解析。对于从 PSCAD/EMTDC 转到 ADPSS 的图形转换，对 PSCAD/EMTDC 元件端口的动态特性进行了阐述，并提出基于该动态特性的端点坐标计算方法；并针对传统简单布线逻辑会出现的问题，提出一种可避免错误连接的自动布线方法。最后，以 IEEE14 标准算例对两个方向的图形转换进行拓扑验证，证明了拓扑转换的正确性与可靠性。

第3章 电磁暂态模型参数转换研究

3.1 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 系统元件概述及对应关系

ADPSS 软件中,电力系统一次元件库主要包括:母线类、RLC 元件类、变压器类、交流线类、电源类、旋转电机类、开关类、故障类、直流线类、继电保护类、接口类、监视类、子电路类、电力电子类等 16 类元件;每一大类中包含数目不等的各种常用模型,可满足大多数电力系统仿真需求。

PSCAD/EMTDC 模型元件数量非常多,几乎包含了目前电力系统输配变电的所有元件。在第 4 代版本的 PSCAD/EMTDC 软件中,主要元件模型库包括:无源支路元件库,电源模型库,输电线模型库,高压直流输电元件库,电力电子元件库;继电保护模型库,测量元件模型库,输入输出元件库,断路器和故障模型库,逻辑电路模型库,旋转电机模型库,控制环节模型库。PSCAD/EMTDC 中,不仅有完整的元件库,每个库中还有非常多的元件。除此之外,许多模型参数中又有很多选项,不同选项可以模拟不同的元件特性。可以说,PSCAD/EMTDC 的元件库可以说非常的完备,科研人员可以利用这些元件,进行大多数电力网络的建模和仿真研究。

ADPSS 元件大部分可在 PSCAD/EMTDC 中找到对应元件或者可通过某些元件组合和参数设定来等效。由于 PSCAD /EMTDC 中提供的元件模型较多,只需要从相似的元件模型中选一种最接近的模型来对应 ADPSS 元件即可,常用元件对应关系表如表 3-1。

表 3-1 ADPSS 与 PSCAD /EMTDC 元件对应关系

| ADPSS 元件类别 | ADPSS 元件 | PSCAD/EMTDC 元件 |
|------------|---------------|--------------------------------|
| 继电保护和电源 | 三相正弦函数电压源 | source_3 |
| | 单相正弦函数电压源 | source_1 |
| | 三相正弦函数独立电流源 | (Src_ccin_1)*3+breakout*3 |
| | 单相正弦函数独立电流源 | Scr_ccin_1 |
| 开关及故障元件 | 三相时控开关 | breaker3+tbreakn*3+datalabel*3 |
| | 单相时控开关 | breaker1+tbreakn+datalabel |
| | 三相故障 | tpflt+tfaultn |
| | 单向故障 | fault_sw+tfaultn+ground |
| 交流线和变压器 | 三相两绕组普通/理想变压器 | xfmr_3p2w+ground |

| | | |
|--------|------------------|--|
| | 三相三绕组普通/理想变压器 | xfmr_3p3w+ground |
| | 单相两绕组普通/理想变压器 | xfmr_2w |
| | 单相三绕组普通变压器 | xfmr_3w |
| RLC 元件 | 三相 pi 型集中参数电路 | newpi |
| | 三相分布参数线路 | tLine+line_berg_options+line_manualYZ |
| | 线间互耦双回线 | pi_double_cct |
| | 三相/单相电阻 | resistor |
| | 三相/单相电感 | inductor |
| | 三相/单相电容 | capacitor |
| | 三相/单相串联 RLC | filter |
| | 三相/单相并联 RLC | filter_band |
| | 三相耦合 RL | coupled_3lines |
| | 三相串联 RLC 负荷 | reactive_load+capacitive_load+resistive_load |
| 子电路元件 | 子电路 | module |
| 旋转电机 | PARK 方程模型交流同步发电机 | sync_machine+multimass |
| | 简单模型交流同步发电机 | sync_machine |
| | 绕线感应电动机 | wound_rotor+multimass |
| | 双笼感应电动机 | sqc100+multimass |
| | 单笼感应电动机 | sqc100+multimass |
| 电力电子元件 | 晶闸管 | peswitch |
| | GTO/IGBT | peswitch |
| | 二极管 | peswitch |
| | 六脉冲换流器 | G6p2oo+xfmr_3p2w+ground |

3.2 典型元件的模型对比及参数转换

由于 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 中元件种类极其繁多，由于篇幅有限，本文只阐述几种典型元件的模型参数对比关系：一次系统元件中的 Park 同步电机、三相双绕组变压器、三相分布参数线路、以及六脉动换流器，二次系统元件中的值控开关。

3.2.1 Park 同步电机

(1) 数学模型对比

ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 中同步电机均采用 Park 模型描述,基本方程(采用 x_{ad} 标么值系统) 如下:

磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_g \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d & 0 & 0 & x_{ad} & x_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & x_q & 0 & 0 & 0 & x_{aq} & x_{aq} \\ 0 & 0 & x_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{ad} & 0 & 0 & x_f & x_{ad} & 0 & 0 \\ x_{ad} & 0 & 0 & x_{ad} & x_D & 0 & 0 \\ 0 & x_{aq} & 0 & 0 & 0 & x_g & x_{aq} \\ 0 & x_{aq} & 0 & 0 & 0 & x_{aq} & x_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_g \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \\ u_f \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_g \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\psi}_d \\ \dot{\psi}_q \\ \dot{\psi}_0 \\ \dot{\psi}_f \\ \dot{\psi}_D \\ \dot{\psi}_g \\ \dot{\psi}_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega\psi_q \\ \omega\psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

PSCAD/EMTDC 中有两种参数输入形式——等效电路数据形式和发电机数据形式^[29]。其中等效电路数据形式基于 Park 模型中 dq 轴等效电路,输入参数为: $r_a, r_f, r_D, r_Q, x_\sigma, x_{f\sigma}, x_{D\sigma}, x_{Q\sigma}, x_q, x_d, x_{fd}$ 等; 发电机数据形式输入参数为: $r_a, x_p, x_q, x_d, x'_q, x'_d, x''_q, x''_d, T_{d0}', T_{q0}', T_{d0}'', T_{q0}''$ 等。

ADPSS 中数据输入形式近似同 PSCAD/EMTDC 中发电机数据形式,因此在转换时将 PSCAD/EMTDC 发电机的数据输入形式定为“发电机数据形式”,则两模型中大部分参数均可直接对应,需特殊处理的参数见表 3-2。

表 3-2 同步电机特殊处理参数列表

| ADPSS 参数 | PSCAD/EMTDC 参数 | 转换关系 |
|----------------|----------------|----------------------|
| 漏抗 X_σ | 普梯耳电抗 X_p | $X_p = X_\sigma / K$ |
| | 气隙因数 K | |
| 转子惯性时间常数 T_j | 惯性常数 H | $H = T_j / 2$ |

另外, ADPSS 中同步电机模型未考虑饱和特性,因此 PSCAD/EMTDC 中

“D-axis Saturation”参数设为“Disabled”；PSCAD/EMTDC中“Q轴阻尼绕组数量(No.of Q-axis Damper Windings)”为“one”和“two”是分别代表凸极机和隐极机。

(2) 模拟耦合轴系模型功能对比

大型同步发电机与电力系统交互时可产生诸如次同步谐振(SSR)的现象^[30]。若次同步谐振产生的电磁转矩的频率与轴系扭振的自然振荡频率相接近,就会产生电气系统与轴系机械系统之间的共振,造成发电机轴系损坏。为研究该现象,需要十分详尽的涡轮机、发电机等耦合的轴系模型。

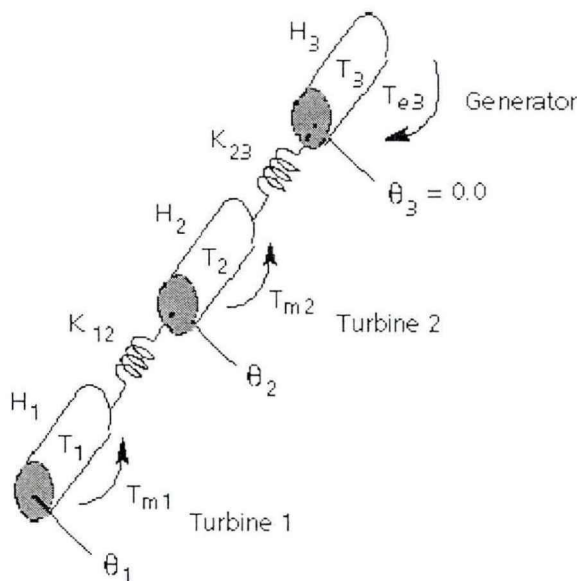


图 3-1 发电机轴系模型

ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 均通过质量块来建立耦合轴系模型。其模型如图 2-1, 图中 H 为惯性常数, K 为轴扭转系数, T_m 为涡轮机械转矩, T_e 为发电机电磁转矩, θ 质量块相对发电机的角度^[31]。

弹簧代表轴系间的扭转作用, 扭转系数 K 与相邻质量块之间的相对机械角度成比例; 自阻尼系数代表每个质量块的摩擦与风阻, 产生与转速成比例的制动转矩, 该系数在稳态和暂态情况下均存在; 互阻尼系数将产生与两个质量块之间转速差成比例的转矩, 只有在发生震荡时才会出现; 每个质量块还具有与其自身相关的惯性常数, 用于衡量该质量块对整个轴系作用的大小^[32]。施加于轴系上的总机械转矩(例如来自调速器)可按比例分配在每个质量块之间, 但注意电力系统产生的电磁转矩仅能施加于发电机质量块上, 励磁机的输入转矩应该为 0。

加上质量块后, 同步电机的轴系方程为:

的到达稳态，可设置电压源幅值达到设定值的斜率。当网络到达稳态后，在用户设定的时刻，元件完成由电压源模型到恒定转速发电机模型的转换。

ADPSS 中，网络只能从输入的稳态潮流值开始仿真，不能自行启动。因此 ADPSS 中没有与 PSCAD/EMTDC 启动参数相对应的参数，无法给 PSCAD/EMTDC 赋启动条件。这可能会使仿真波形出现较大的差异。

3.2.2 三相两绕组变压器

(1) 数学模型对比及参数转换

ADPSS 中三相两绕组普通变压器元件由三台单相两绕组变压器组成。在计算时，该变压器模型用 R-L 耦合支路来表示，其单相等值电路如下：

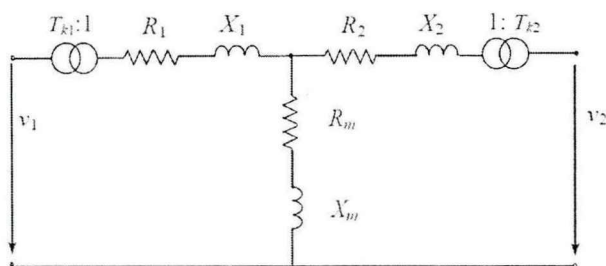


图 3-2 变压器单相等值电路

图中 T_{k1} 、 T_{k2} 分别为变压器绕组 1、2 的标么变比， R_1 、 X_1 分别为变压器绕组 1 的电阻和漏抗， R_2 、 X_2 分别为变压器绕组 2 的电阻和漏抗， R_m 、 X_m 分别为变压器励磁支路电阻和电抗。输入参数有两种形式，一种为“标么值”，需要输入上述电路图中的电路参数(pu)以及两侧的额定线电压；另一种为“物理参数”，需要输入短路损耗(kW)、短路电压百分比、空载损耗(kW)、空载电流百分比以及两侧额定线电压^[33]。

PSCAD/EMTDC 变压器模型分为经典模型和 UMEC 模型两种。其中经典模型与 ADPSS 中变压器相对应，需要输入的参数为正序漏电抗(pu)、空载损耗(pu)、短路损耗(pu)以及两侧额定线电压^[34]。参数转换关系如表 3-3 和表 3-4。

表 3-3 ADPSS 参数形式为“标么值”时参数转换关系

| ADPSS 参数形式为“标么值”时 | | |
|--------------------------|--------------------|-------------------------|
| ADPSS 参数(pu) | PSCAD/EMTDC 参数(pu) | 转换关系 |
| 绕组 1、2 的漏抗 X_1 、 X_2 | 正序漏电抗 X_T | $X_T = X_1 + X_2$ |
| 励磁支路电阻 R_M | 空载损耗 P_0 | $P_0 = \frac{1}{R_{M}}$ |
| 绕组 1、2 的电阻 R_1 、 R_2 | 短路损耗 P_k | $P_k = R_1 + R_2$ |

表 3-4 ADPSS 参数形式为“物理参数”时参数转换关系

| ADPSS 参数形式为“物理参数”时 | | |
|--------------------|--------------------|-------------------------|
| ADPSS 参数(pu) | PSCAD/EMTDC 参数(pu) | 转换关系 |
| 短路电压百分比 $U_k\%$ | 正序漏电抗 X_T | $X_T = U_k\%$ |
| 空载损耗 P_{0a} | 空载损耗 P_{0p} | $P_{0p} = P_{0a} / S_N$ |
| 短路损耗 P_{ka} | 短路损耗 P_{kp} | $P_{kp} = P_{ka} / S_N$ |

(2) 绕组连接方式转换

ADPSS 中两个绕组各有 4 中连接方式: Y, YG, D1, D11, 分别代表星形连接中性点不接地、星形连接中性点接地、角形连接 1 点钟接线、角形连接 11 点钟接线。

PSCAD/EMTDC 中依靠绕组 1 接线方式、绕组 2 接线方式、角形滞后或超前于星形三个参数确定接线关系, 其中接线方式可选择星形或角形。因此由 ADPSS 向 PSCAD/EMTDC 转换时, 针对每一个绕组处理如表 3-5。

表 3-5 绕组连接方式处理

| ADPSS | PSCAD/EMTDC |
|-------|------------------|
| Y | 星形连接 |
| YG | 星形连接, 并将接地标志标为 1 |
| D1 | 角形连接, 并选择“滞后” |
| D11 | 角形连接, 并选择“超前” |

(3) 绕组分接头设置

ADPSS 和 PSCAD/EMTDC 的变压器模型均可调节分接头。不同的部分在于:

PSCAD/EMTDC 中分接头可连续调节; ADPSS 中需设置“抽头极差”, 只能按照抽头极差一级一级调节, 不可以连续调节。

PSCAD/EMTDC 中分接头可在线调节; ADPSS 中只能离线调节。

因此有关分接头设置参数不转换, 需手动调试。

(4) 变压器饱和特性

PSCAD/EMTDC 中经典变压器模型既可模拟线性铁芯, 又可模拟饱和铁芯。在模拟饱和铁芯时, 如图 3-3, 将一个补偿电流源加在靠近铁芯的一侧绕组上用来等效加在两个互耦绕组上的饱和特性, 电流源输出的电流为绕组两端电压的函数^[35]。函数曲线由输入参数中气隙电抗、膝点电压以及饱和电流三个参数确定。如图 3-4, 气隙电抗决定了曲线的渐近线斜率, 膝点电压决定了渐近线在 Vs 轴的截距, 饱和电流是当 Vs 达到额定电压时对应的电流, 它决定了饱和特性曲线

的陡度。

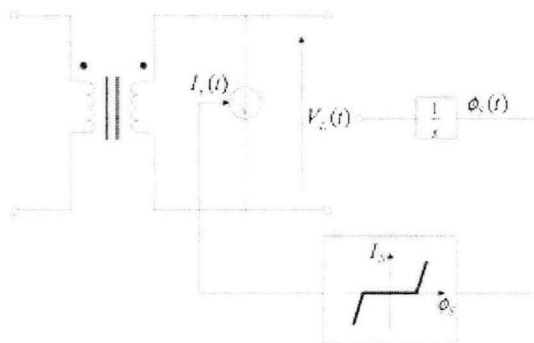


图 3-3 补偿电流源模拟饱和特性

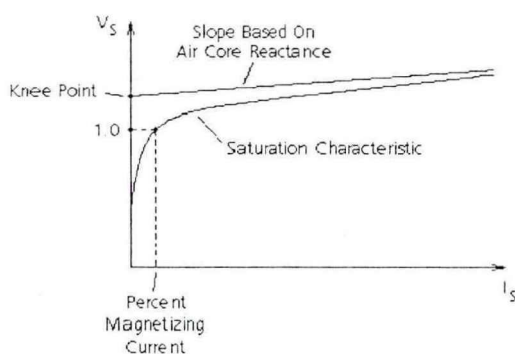


图 3-4 铁芯饱和特性曲线示意图

在 ADPSS 中，不考虑铁芯饱和。因此在转换时，将 PSCAD/EMTDC 中将“Saturation Enabled”参数设为“No”。

3.2.3 六脉冲换流器

ADPSS 中六脉冲换流器采用 6 个阀臂元件、2 个外部单相电气节点、1 个一转三元件、1 个三相两绕组换流变压器元件及 1 个外部母线元件在子电路内搭建。用户可以右键单击图符选择“显示参数”，进行六脉冲换流器的工作状态设置（控制、闭锁、锁相环等），还可以通过双击六脉冲换流器元件的图符，进入到子电路中，通过设置开关动作或者添加故障元件的方式，设置换流器内部故障。

PSCAD/EMTDC 中六脉冲换流器为一个封装元件，不能接触到其内部结构，里面包括六脉冲换流桥、内置锁相振荡器、触发及闭锁控制以及触发角/关断角测量等模块。

(1) 换流桥

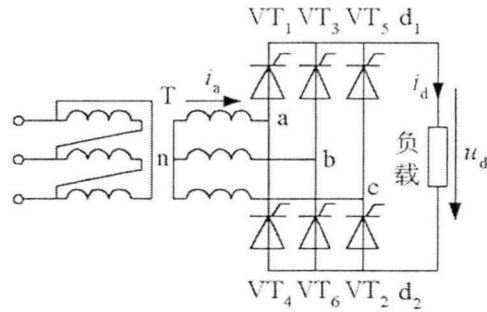


图 3-5 三相桥式半控换流器原理图

两个软件中换流桥结构均采用三相桥式半控换流电路，其基本结构如图 3-5。电路中开关型器件为晶闸管，确定触发角后 6 个开关按照顺序间隔 60° 依次触发并按照电网换流方式关断，以此来改变电路拓扑结构，输出 6 脉动的电压波形 [36]。

电路中一个桥臂包含一个晶闸管和与其并联的缓冲电路。缓冲电路由一个串联的电阻电容支路模拟，PSCAD/EMTDC 中晶闸管元件自带缓冲电路而 ADPSS 中缓冲电路需外加 RLC 元件（L 一般设为 0）。两个软件中晶闸管元件模型的基本特性均为：

导通条件：a. 晶闸管两端电压大于正向转折电压且门极信号为 1；b. 从晶闸管关断到两端电压上升至正向转折电压这段时间小于最小关断时间时，晶闸管将重新导通 [37]。

关断条件：流经晶闸管的电流小于等于 0。

但 ADPSS 中导通的晶闸管使用小电阻模拟（阻值由用户给定），晶闸管断开时直接将连接点断开；PSCAD/EMTDC 中导通和关断的晶闸管分别用小电阻和大电阻模拟，阻值均由用户给定。

(2) 锁相环

锁相环是实现相位自动控制的负反馈系统。在高压直流输电系统中，阀触发模块通过 PLL 使内部的相位压控振荡器与交流母线电压相角保持同步，从而实现对换流阀的精确触发。锁相环主要由鉴相器（PD）、环路滤波器（LF）和压控频率振荡器（VCO）组成 [38]，PSCAD/EMTDC 中锁相环结构如图 3-6。图中坐标变换部分完成鉴相器的功能，三相电压通过 Clark 变换，再使用反馈相角进行 dq 变换，可产生一个与相角差相关的正弦信号；PI 调节器相当于环路滤波器，正弦信号经过 PI 调节器并与 ω_0 比较后产生 ω_{err} ；积分环节 $1/s$ 为压控频率振荡器，角速度误差信号 ω_{err} 调节其振荡频率，使其加速或减速振荡以与母线相位变化保持一致，最后输出与母线 A 相电压相角保持同步的锯齿波。用户可调节 PI 控制器的比例系数与积分系数。

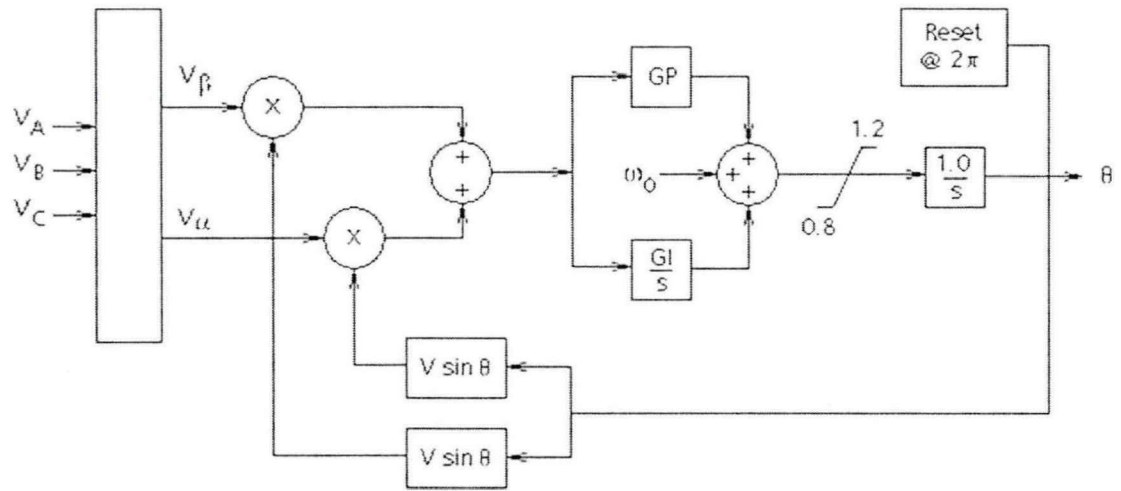


图 3-6 PSCAD/EMTDC 锁相环原理

ADPSS 中锁相环模型大致同 PSCAD/EMTDC，不同的地方是其压控振荡器为带增益的积分环节，还需设置其放大倍数。

(3)换流变压器

ADPSS 中换流变压器内嵌于六脉冲换流器的子电路中而 PSCAD/EMTDC 中换流器与变压器为相互独立的元件，因此在转换过程中，除完成换流器本身参数的对应之外，还需添加换流变压器^[39]。

变压器的参数对应方法同普通的三相两绕组变压器。另外，PSCAD/EMTDC 中换流器还有与变压器相关的参数“Transformer Phase Config”，赋值方法如表 3-6。

表 3-6 PSCAD/EMTDC 六脉冲换流器“Transformer Phase Config”设置方法

| | 阀侧 Y | 阀侧 Δ (超前) | 阀侧 Δ (滞后) |
|-----------|------|-----------|-----------|
| 原边 Y | -30° | 0° | -60° |
| 原边 Δ (超前) | -60° | -30° | - |
| 原边 Δ (滞后) | 0° | - | -30° |

(4)触发、闭锁与丢脉冲模拟

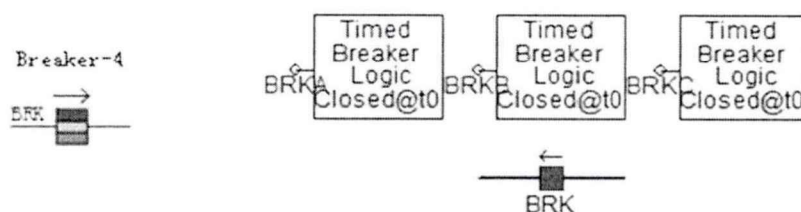
表 3-7 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 六脉冲换流器触发、闭锁与丢脉冲模拟功能对比

| | ADPSS | PSCAD/EMTDC |
|--------|--|-------------|
| 触发信号类型 | “触发角”或“触发序列” | |
| 丢脉冲 | 既可在内部模拟各个阀臂丢脉冲的状态（状态改变次数最多为 4 次），又可以让丢脉冲阀接 | 不可模拟丢脉冲情况 |

| 受外部控制 | |
|-------|--|
| 闭锁 | <p>可模拟简单闭锁和 XYZS 闭锁</p> <p>简单闭锁：闭锁发生后，换流器停发脉冲，导通的晶闸管将自然关断；设置闭锁初始状态后，可设置最多 4 次闭锁状态改变时刻，还可让闭锁状态接受外部控制；</p> <p>XYZS 闭锁：可 XYZS 闭锁，还可关联旁通开关、换流器隔离开关以及直流电流信号来源来外部控制闭锁。</p> |
| | <p>只能模拟简单闭锁，通过 KB 端口完成几种简单的控制：</p> <p>KB=0：闭锁所有触发脉冲</p> <p>KB=1：解锁</p> <p>KB=-1 至-6，闭锁数字对应的阀</p> <p>KB=-7 闭锁所有阀，投旁通对。</p> |

3.2.4 三相时控开关

三相时控开关模型用于模拟实际系统中三相断路器的功能，负责开断正常负荷电流以及短路状态下故障电流。两个软件中三相时控开关如图 3-7 所示。



(a) ADPSS 的断路器模型 (b) 转换到 PSCAD/EMTDC 后的断路器模型

图 3-7 由 ADPSS 转换而成的 PSCAD/EMTDC 断路器模型

(1) 数学模型及相关参数对比

两个软件中断路器模型均为简单开关模型，即一个可控可变电阻，通过控制信号的作用在断路器闭合时呈现一个小电阻，断路器断开时呈现一个大电阻，电阻值必须在运行前由用户给出，不能在线调节，不能模拟实际断路器运行时高度非线性的弧特性。但两个软件中均可设置“瞬时断开”和“电流过零时断开”两种断开方式。

ADPSS 中只需设置开关闭合状态下的“开关内阻”，且开关内阻可以设置为 0；PSCAD/EMTDC 中需同时设置“开关闭合电阻”和“开关断开电阻”，且为了防止导纳矩阵、阻抗矩阵中出现无穷大元素，理想支路的电阻不能低于

0.0005 欧姆，不能高于 106 欧姆（虽然也可以处理 0 电阻，但是计算过程会复杂，计算时间较长）。

（2）时间控制功能差异

ADPSS 中断路器时间控制功能内嵌在断路器元件中，可设置开关初始状态，每次动作跳向与原状态相反的状态，最多可模拟 4 次动作；每相可单独设置是否动作及动作时间；在模拟小于四次的开关动作时，可将其余开关动作时刻设置为大于仿真总时间的某一个值。

PSCAD/EMTDC 中断路器元件自身没有时间控制功能，需要添加断路器时间逻辑元件对其进行控制，断路器时间元件与断路器之间的对应关系通过数据标签（datalabel）标识；断路器可设置三相同时动作或分开动作，当选择三相分开动作时，需要为所有动作相命名并添加对应的时间逻辑元件与数据标签。PSCAD/EMTDC 中时间逻辑元件也可设置开关初始状态，且每次动作也为跳至与原状态相反状态，但可选择动作次数最多可模拟 2 次动作^[40]。

因此在转换过程中，除完成 PSCAD/EMTDC 断路器固有参数转换之外，还需添加时间逻辑元件与数据标签。为了使得模型能够更好地对应，将 PSCAD/EMTDC 断路器设置为三相分开动作，然后分别为三相命名、并建立对应的控制元件和数据标签。当判断 ADPSS 中动作次数大于 2 次时，显示提示信息。

3.2.5 三相分布参数线路

三相电力线路实质上是分布参数的线路，沿导线每一长度单元各相都存在电阻、电感、对地电容和漏电导，各相之间有互感、电容和漏电导。在线路长度较长时，线路的分布参数特性不能忽略，不能使用集总参数的 pi 型等值电路，因此需要分布参数线路模型。分布参数模型用在长度至少为 15km 的线路上。

（1）分布参数线路数学模型

ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 分布参数线路均采用 Bergeron 模型。Bergeron 模型中电感和电容采用分布参数，用来模拟长线路的分布特性^[41]；但是在模拟线路损耗时，用串联的集中参数电阻来表示，具体方法是将线路分为 3 段，两端各串联 $1/4R$ ，中间串联 $1/2R$ ，如图 3-8 所示。

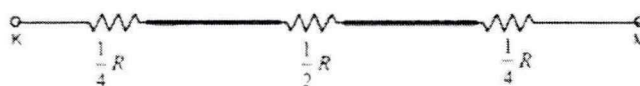


图 3-8 贝杰龙模型中电阻损耗表示方式

利用 Bergeron 模型计算的大体思路是：将线路的特性线法与数值计算梯形法相结合，利用线路的波过程将线路简化成只含有电阻和电流源的集中参数网络，然后将时间离散化，利用电路上一时刻的解迭代求此时此刻的电流电压状态。设线路首端为 k，末端为 m，则等效的线路模型如图 3-9。

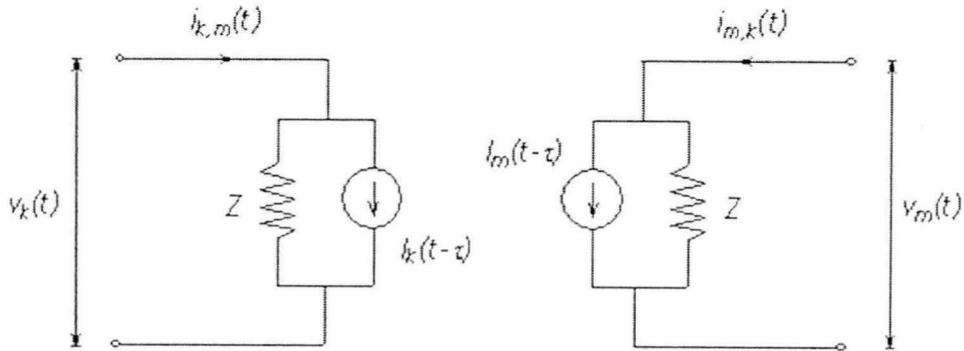


图 3-9 单相线路等效 Bergeron 模型

图中，

$$\begin{aligned}
 I_k(t-\tau) &= \left(\frac{1+H}{2}\right) \cdot \left(-\frac{1}{Z} \cdot V_m(t-\tau) - i_{m,k}(t-\tau)\right) + \left(\frac{1-H}{2}\right) \cdot \left(-\frac{1}{Z} \cdot V_k(t-\tau) - i_{k,m}(t-\tau)\right) \\
 I_m(t-\tau) &= \left(\frac{1+H}{2}\right) \cdot \left(-\frac{1}{Z} \cdot V_k(t-\tau) - i_{k,m}(t-\tau)\right) + \left(\frac{1-H}{2}\right) \cdot \left(-\frac{1}{Z} \cdot V_m(t-\tau) - i_{m,k}(t-\tau)\right)
 \end{aligned}
 \tag{3-6}$$

式 3-6 中 τ 为波在这段线路上的传播时间：

$$Z = Z_c + \frac{R}{4}
 \tag{3-7}$$

$$H = \frac{Z_c - \frac{R}{4}}{Z_c + \frac{R}{4}}
 \tag{3-8}$$

a) 参数转换关系

ADPSS 中三相分布参数线路的输入参数为线路单位长度的序参数，且有标么值和有名值两种输入形式；PSCAD/EMTDC 中使用 Bergeron 模型的 T-Line 需要配合 Manual Entry Data 元件使用，可有六种参数输入形式，其中与 ADPSS 对应的为“R, XL, Xc(pu)”和“R, XL, Xc(ohm)”形式，参数转换见表 3-8 和表 3-9。

表 3-8 ADPSS 参数形式为“标么值”时参数转换关系

| ADPSS 参数 | PSCAD/EMTDC 参数 | 转换关系 |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 标么值 | R, Xl, Xc(pu) | —— |
| 正序或零序电阻 R_a (pu/km) | 正序或零序电阻 X_p (pu/m) | $R_p = \frac{R_a}{1000}$ |
| 正序或零序电感 L_a (pu/km) | 正序或零序感抗 X_{Lp} (pu/m) | $X_{Lp} = \frac{L_a}{1000}$ |
| 正序或零序电容 C_a (pu/km) | 正序或零序感抗 X_{Cp} (pu * m) | $X_{Cp} = \frac{1000}{C_a}$ |

表 3-9 ADPSS 参数形式为“有名值”时参数转换关系

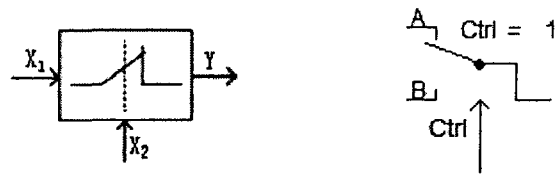
| ADPSS 参数 | PSCAD/EMTDC 参数 | 转换关系 |
|------------------------|--------------------------------|--|
| 有名值 | R, Xl, Xc(ohm) | —— |
| 正序或零序电阻 R_a (ohm/km) | 正序或零序电阻 R_p (ohm/m) | $R_p = \frac{R_a}{1000}$ |
| 正序或零序电感 L_a (H/km) | 正序或零序感抗 X_{Lp} (ohm/m) | $X_{Lp} = \frac{100\pi \cdot L_a}{1000}$ |
| 正序或零序电容 C_a (uF/km) | 正序或零序感抗 X_{Cp} (Mohm * m) | $X_{Cp} = \frac{1000}{100\pi \cdot C_a}$ |

b) 图层转换关系

PSCAD/EMTDC 中 tline 不是一个元件，而是一个自定义模型，若进行相关参数设置，必须在其子图层里添加相应的模型元件，如”Bergeron Model”，“Manual Entry of Y,Z”等。所以在转换分布参数线路模型时，除转换 tline 固有参数外，还需在其下面增加相应的子图层、在子图层中添加应有的模型元件并进行图层参数的设置。此外在 pscx 文件中，专门有针对 tline 图层定义的字段，因此在写出 pscx 文件时，也要按照相应字段格式书写。

3.2.6 值控开关

在二次系统元件中，值控开关是一个典型的控制元件，可以通过输入的值来信号的传递关系。该元件在两种软件中的模型基本功能类似。其图形在两种仿真软件中如图所示：



a)ADPSS 中值控开关 b)PSCAD/EMTDC 中值控开关

图 3- 值控开关在 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 图形对比

A) ADPSS 中值控开关元件特性:

当 $x_l \leq x_2 \leq x_h$, $y = x_l$

当 $x_2 < x_l, x_2 > x_h$, $y = 0$

其中, x_l 为驱动信号下阈值, x_h 为驱动信号上阈值。共有两个输入参数, 一个输出参数。

B) PSCAD/EMTDC 中值控开关元件特性:

当 $ctrl = 1$ 时, $y = x_A$;

否则, $y = x_B$

其中, x_A 为 A 端输入信号, x_B 为 B 端输入信号, $ctrl$ 为控制信号。

可以看出, 值控开关在两个软件中特性并不完全一致。在转换的过程中, 只有当 ADPSS 中 x_h 与 x_l 相等时才可进行等效, 而且需在 PSCAD/EMTDC 的 B 端补充一个零值信号。对于不满足此条件的情况, 本文的自动转换系统给出相应的提示信息。

3.3 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 共同支持的元件模型

本文对 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 所有共同支持的元件均进行了转换关系的研究, 由于篇幅有限, 仅在上一小节以几个典型元件为例说明转换思路及方法。双方共同支持的元件及转换的特殊处理见附录。

3.4 本章小结

本章首先对 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 两个仿真软件中的元件对应关系进行了简要的概述; 之后通过几种典型的元件为例, 对参数转换的基本思路与难点进行了阐述; 最后给出了 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 所有一次元件与二次元件的元件对应关系。

第 4 章 基于 PRONY 变换的模型转换可信度分析

对转换后两种仿真软件计算结果的验证是验证本文提出的 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 模型自动转换方法的重要一步。转换可信度评估的方法主要有两类：定性分析和定量分析两类。目前大多数文献在验证可信度时采用定性分析，但这种方法对研究员的自身素质提出了很高的要求，有些波形的细小差别只有资历较深的研究员才能看得出。当仿真结果差异性较大时，利用该方法可快速的得出结论；但当仿真波形比较复杂，通过定性分析得出的结论就会显得单薄。

定量分析则克服了定性分析的弊端，它可对一些较为复杂，关系不是很明确的信号差异进行量化，给出数值指标。本章基于 PRONY 变换，以 IEEE14 和 CIGRE 为例，对转换前后的仿真波形进行定量对比，给出转换可信度指标，以验证所提出转换方法的可行性。

4.1 残差分析

残差是转换后信号与转换前信号的差值，在此可认为残差为转换前后误差的观测值。本文对残差信号进行分析，得出相应的量化指标。残差相似度指标为

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \gamma_i x_i \quad (4-1)$$

其中， x_i 为信号中第 i 点的相似度，将转换前信号第 i 点的幅值与所有采样点幅值之和的比值作为该点的权重，即为 γ_i 。其具体可表示为：

$$\gamma_i = \frac{|y_i|}{\sum_{i=1}^N |y_i|} \quad (4-2)$$

$$x_i = 1 - \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\max(|y_i|, |\hat{y}_i|)} \quad (4-3)$$

式中， $\{y_i, i=1, 2, \dots, N\}$ 和 $\{\hat{y}_i, i=1, 2, \dots, N\}$ 分别为转换前与转换后的仿真信号序列。

不难看出，残差相似度指标反映的是两信号序列整体上的差异，对于信号的具体特征，则无法体现，因而不能给研究人员提供的全面的评价指标^[42]。为了分析转换前后信号的某具体特征的差异，仍需要对信号做进一步解析。

4.2 基于 PRONY 变换的模型转换可信度分析

对于特征提取方法，目前电力系统常用的有小波变换、FFT 变换和 PRONY 变换等。其中，PRONY 变换被广泛应用于控制器设计、低频振荡、以及参数识别等方面，对于电力系统的参数特征量识别方面有很多优点。

4.2.1 PRONY 变换原理

十七世纪九十年代，普朗尼（PRONY）针对等间距采样数据，提出用指数函数的线性组合表示，即 PRONY 变换。该方法能够直接解析出给定信号的幅值、频率、衰减和初始相位等信息^[43]。

设输入信号为 $x(0), x(1), \dots, x(N-1)$ ，PRONY 算法认为模型是由一系列的具有任意幅值、频率、衰减因子和相位的指数函数线性组合而成^[43]。即：

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=1}^p b_m z_m^n, (n=0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (4-4)$$

$$b_m = A_m \exp(j\theta_m) \quad (4-5)$$

$$z_m = \exp[(\alpha_m + j2\pi f_m)\Delta t] \quad (4-6)$$

式中， A_m 为振幅， θ_m 为相位， α_m 为衰减因子， f_m 为振荡频率， Δt 代表采样间隔， p 为模型阶数^[44]。以拟合前后的误差最小为原则，对各信号的振幅、频率、衰减因子和初始相位进行求解^[45]，即最小二乘法。

$$\min(\varepsilon = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n) - \hat{x}(n)|^2) \quad (4-7)$$

经过 PRONY 变换，可分别针对频率、阻尼与幅值三个特征量提出相应的相似度指标，具体指标构成见下文。

4.2.2 频率相似度指标

利用 PRONY 变换，可得转换前仿真信号各组成分量的频率与能量。分别为：

$$F_m = (f_{m1}, f_{m2}, \dots, f_{mn}) \quad (4-8)$$

$$E_m = (\lambda_{m1}, \lambda_{m2}, \dots, \lambda_{mn}) \quad (4-9)$$

其中， f_{mi} 和 λ_{mi} ($i=1, 2, 3, \dots, n_1$) 分别是转换前信号第 i 个分量的频率和能量。对转换后信号也进行相同的处理，可得其各组成分量的频率、能量，为

$$F_s = (f_{s1}, f_{s2}, \dots, f_{sn}) \quad (4-10)$$

$$E_s = (\lambda_{s1}, \lambda_{s2}, \dots, \lambda_{sn}) \quad (4-11)$$

其中， f_{si} 和 λ_{si} ($i=1, 2, 3, \dots, n_2$) 分别是转换后信号第 i 个分量的频率和能量。转换前后仿真结果的频率相似度是通过比较两者的频率向量得到的。信号能

量表征了该信号分量在整个信号中的权重。但 F_m 与 F_s 的维数不一定相等，而且 Prony 分析结果的阶数通常很高^[46]，因此，需要寻找一种方法使两者维数降低并且相等。本文采取基于信号能量的向量维数统一方法。首先忽略信号中那些能量占信号总能量小于 0.1% 的那些分量，保留信号能量较大的分量，并将信号分量按照其信号能量排序得到新的频率向量分别为：

至此，得到模型在转换前后仿真信号的频率向量。目前的问题是：两频率向量的维度不一样，而且其中的信号顺序不一致。这就导致这两个频率向量不具有可比性，因而无法得出频率相似度指标。为此，我们利用信号的能量对频率向量进行排序，能量大则意味着对波形的贡献大，去除能量较小的分量（小于总能量 0.1%）。经过此处理，新的频率向量变为：

$$F_m' = (f_{m1}', f_{m2}', \dots, f_{mm}') \quad (4-12)$$

$$F_s' = (f_{s1}', f_{s2}', \dots, f_{sn}') \quad (4-13)$$

式中， $f_{mi}' (i=1, 2, 3, \dots, n_3)$ 为转换前信号的频率向量经过上一步处理后的第 i 个元素的频率， $f_{si}' (i=1, 2, 3, \dots, n_4)$ 为转换后信号频率向量经过上一步处理后的第 i 个元素的频率。

但目前两频率向量中各分量的顺序可能会不一致，因此对 F_s' 进行改造。找到 F_s' 中距离 F_m' 中第 i 个分量最近的分量，令其作为新的频率向量 F_s'' 第 i 个分量，分量间距离可由下式可得：

$$d_{ij} = \sqrt{(f_{mi}' - f_{sj}')^2 + \alpha(A_{mi}' - A_{sj}')^2} \quad (4-14)$$

式中， d_{ij} 为 F_m' 中第 i 个分量与 F_s'' 中第 j 个分量之间的距离； α 为一个常系数，可根据人为调整幅值所占的比重； A_{mi}' 、 A_{sj}' 分别为该分量在转换前后的幅值。

至此， F_s'' 与 F_m' 维数相等，经大量实例分析可知，保留在 F_s'' 或 F_m' 向量中信号能量占信号总能量的百分比大于 99%，说明简化后的频率信号足以代表原信号。新的频率向量表示为：

$$F_s'' = (f_{s1}'', f_{s2}'', \dots, f_{sm}'') \quad (4-15)$$

因为非周期信号对于分析频率相似度无用，在下面计算信号权重时非周期分量的存在可能会出现将残差淹没的情况，从而影响对该特征量残差的量化，所以在频率相似度的计算中去掉了非周期信号。将实测信号中各个信号的能量作为每个信号在计算频率相似度时的权重。

在计算频率相似度时，由于非周期分量的存在，在计算信号权重时可能会出现将残差淹没的情况，从而影响对该特征量残差的量化。因此需将非周期分量剔除。与计算残差相似度类似，可通过各分量的能量作为其权重：

$$w_i = \frac{\lambda'_{mi}}{\sum_{i=1}^{n_3} \lambda'_{mi}} \quad (4-16)$$

频率相似度的定义如式所示：将每个分量的频率相似度记为 σ_i ，有

$$\sigma_i = 1 - \left| \frac{f'_{mi} - f''_{si}}{\max(f'_{mi}, f''_{si})} \right| \quad (4-17)$$

由各分量权重与相似度，可得整体的频率相似度，为：

$$\varphi_f = \sum_{i=1}^{n_3} w_i \sigma_i \quad (4-18)$$

该值越接近于1，说明转换前后信号越相近，从而证明转换的可信度越好。

4.2.3 阻尼相似度指标

与频率相似度不同，阻尼相似度的计算需要考虑非周期分量。按照频率相似度的计算方法得到维数相同的2个向量 D'_s 与 D'_m ，在2个向量中分别添加相应的非周期信号，将向量中各频率值替换为相应信号的衰减系数。类似于频率相似度的计算方法，将各个分信号的能量作为计算阻尼相似度时各个信号分量的权重。计算方法如式(6-24)，阻尼相似度定义式如下：

类似的，可参照频率相似度的方法，得到具有可比性的 D'_s 与 D'_m ，即二者维度相同，且对应元素距离最近。可得每个分量的阻尼相似度为：

$$\eta_i = \begin{cases} 1 - \left| \frac{\zeta'_{mi} - \zeta''_{si}}{\max(\zeta'_{mi}, \zeta''_{si})} \right|, & \zeta'_{mi} \times \zeta''_{si} > 0 \\ 0, & \zeta'_{mi} \times \zeta''_{si} < 0 \end{cases} \quad (4-19)$$

其中当两信号衰减因子异号时，说明两分量完全相反，相似度置为零。可得阻尼相似度 φ_ζ 为：

$$\varphi_\zeta = \sum_{i=1}^{n_3} w_i \eta_i \quad (4-20)$$

同样的，该指标越接近于1，转换前后信号越接近。

4.2.4 幅值相似度指标

类似地，可得幅值相似度指标，其定义如下式所示：

$$\sigma_i = 1 - \left| \frac{f'_{mi} - f''_{si}}{\max(f'_{mi}, f''_{si})} \right| \quad (4-21)$$

$$\varphi_j = \sum_{i=1}^n w_i \sigma_i \quad (4-22)$$

该指标越接近于1，转换前后的信号越接近。

在对转换前后信号的相似度进行评估时，我们首先进行定性分析，如果两信号特征不明显，则需要定量分析得到一些具体指标来对其相似度进行评估。首先可以通过残差相似度，整体地对转换前后信号的相似程度进行量化；利用 PRONY 分析，可得转换前后信号的频率、幅值、阻尼相似度。

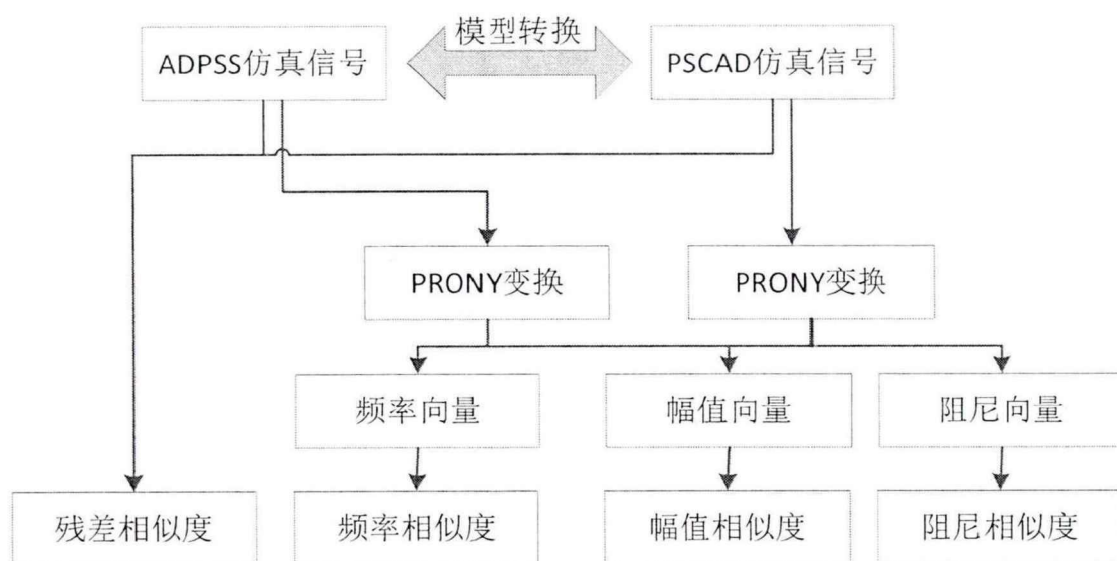


图 4-1 基于 PRONY 变换的转换可信度评价指标

图 4-1 为基于 PRONY 变换的转换可信度评价指标总体方法。通过以上转换可信度分析，可以客观地评价转换前后信号间的差异。下面将通过仿真算例利用所提出的基于 PRONY 分析的转换可信度评价指标对转换前后模型进行验证。

4.3 算例分析

4.3.1 PSCAD/EMTDC 转 ADPSS 算例分析

该算例采用单极 500kV、1000MW 直流输电，整流侧和逆变侧都采用 12 脉波的换流器，联于弱交流系统（频率为 50Hz 时短路比为 2.5）。图 4-2 与图 4-2 为转换前后 Cigre 标准算例主电路图。

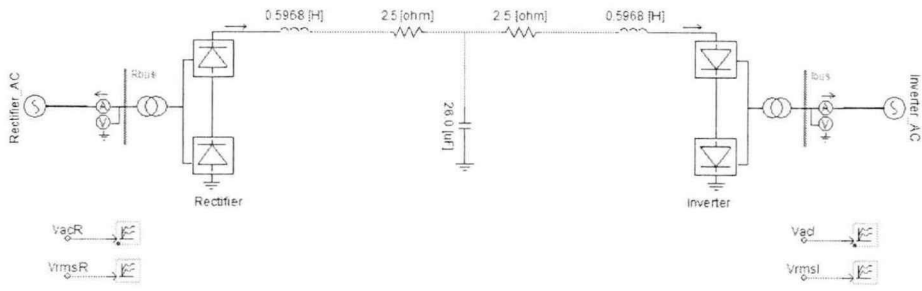


图 4-2 PSCAD/EMTDC 中 CIGRE 算例电路拓扑

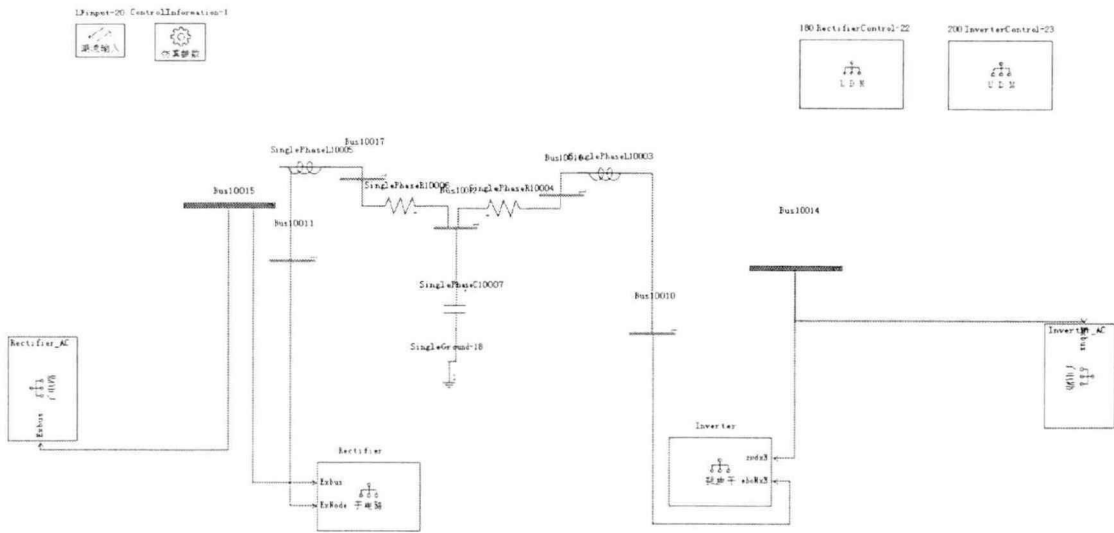
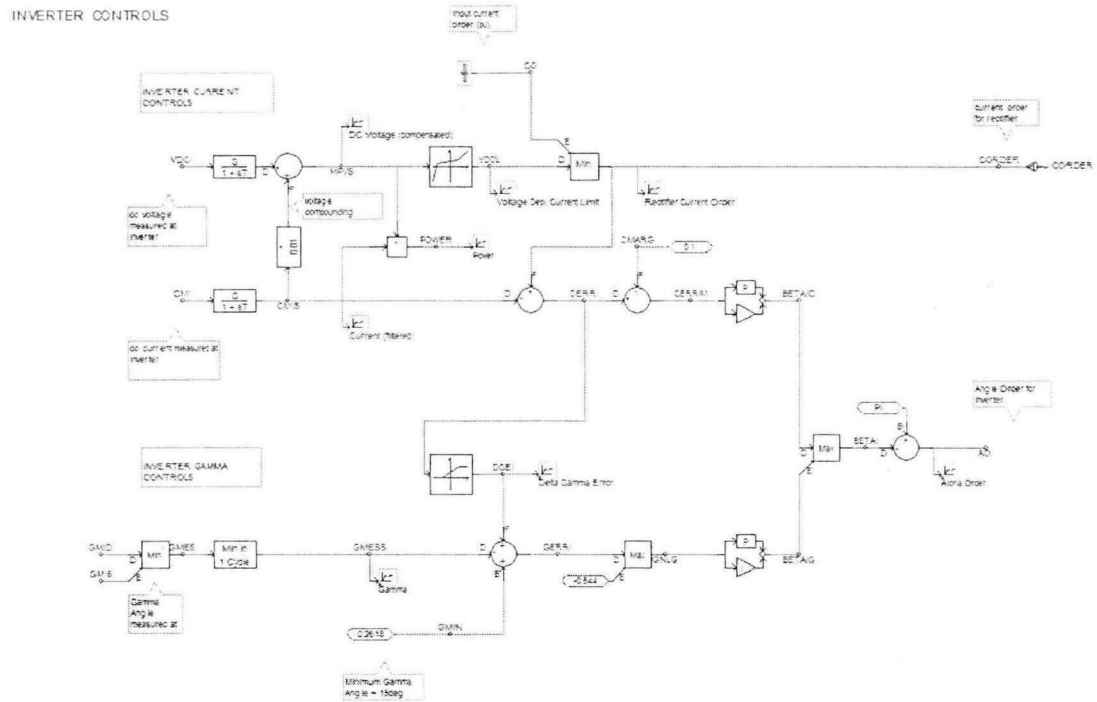
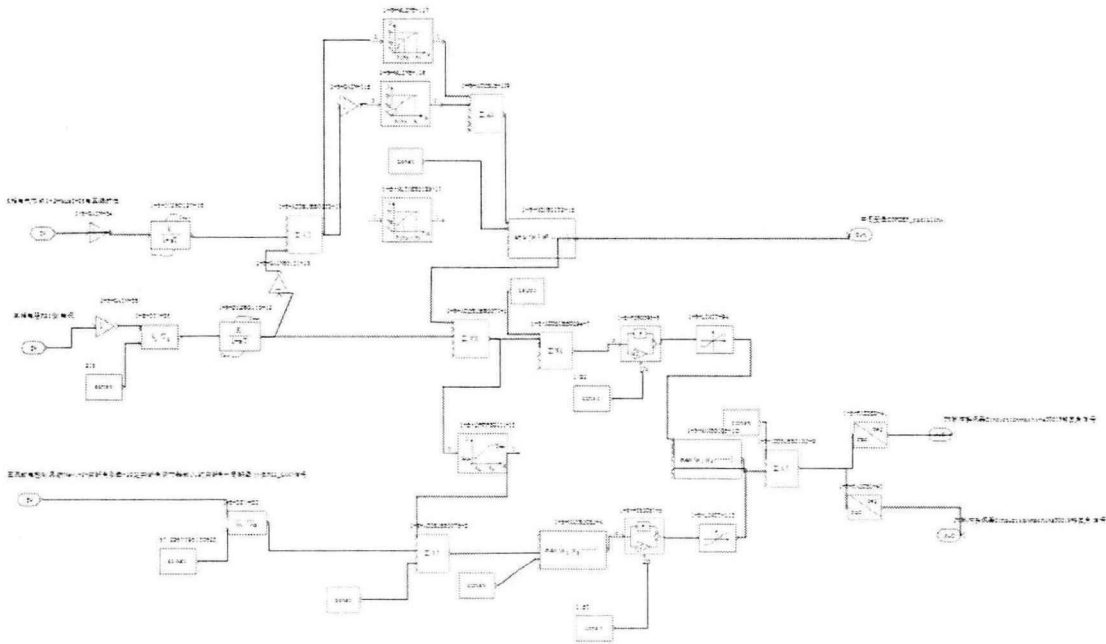


图 4-3 ADPSS 中 CIGRE 算例电路拓扑

CIGRE 标准算例中不仅有一次系统，而且有控制系统，对应到 ADPSS 中就是 UDM 元件。CIGRE 直流输电标准测试系统的理想控制方式是：整流侧配备有定电流控制^[47]；逆变侧配备定关断角控制^[47]。除此基本控制方式外，整流侧还有最小触发角控制，逆变侧配备有定电流控制。另外，为避免故障扩大，VDCOL 控制在两侧均有配置，逆变侧还配有 CEC 控制^[47]。整流侧控制系统与逆变侧控制系统在转换前后的对比图分别见图 4-2 与图 4-3。

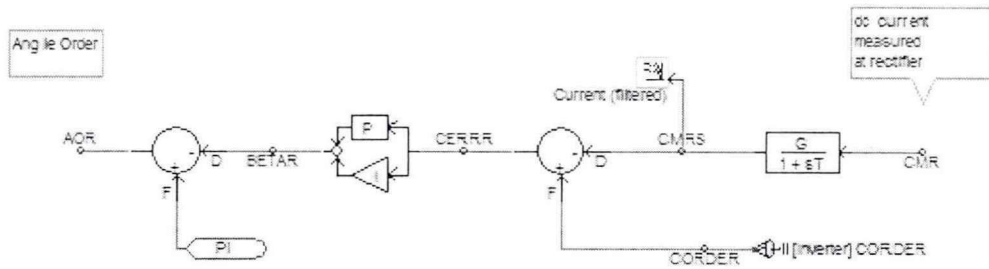


a) PSCAD/EMTDC 电路图

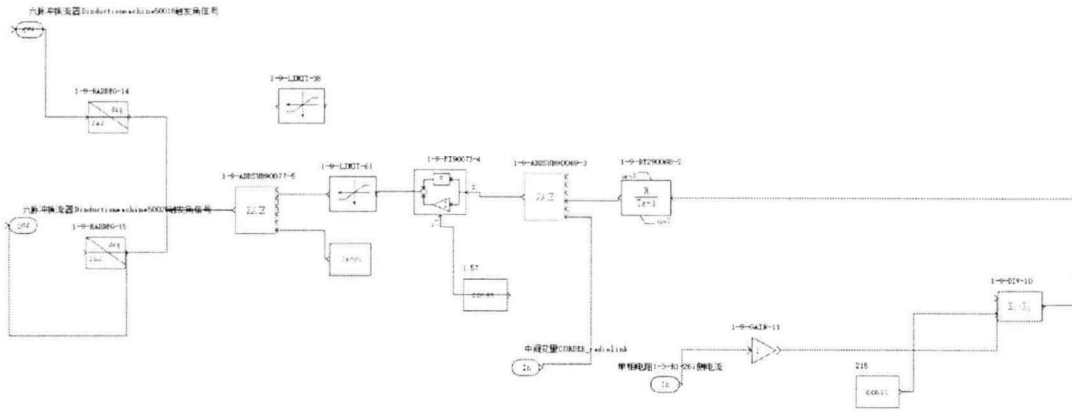


b) ADPSS 电路图

图 4-4 CIGRE 标准算例由 PSCAD/EMTDC 转换到 ADPSS 逆变侧控制电路前后对比



a) PSCAD/EMTDC 电路图



b) ADPSS 电路图

图 4-5 CIGRE 标准算例由 PSCAD/EMTDC 转换到 ADPSS 整流侧控制电路前后对比

本算例主要对整流侧直流电压电流波形（取 Bus50039）进行了观察比较，如图 4-6 所示；逆变侧直流电压电流波形（取 Bus30040）进行了观察比较，如图 4-7 所示；对整流侧交流电压、电流波形及逆变侧交流电压、电流波形分别进行了观察比较，如图 4-8 和图 4-9 所示；对整流侧交流有功功率以及逆变侧交流有功功率波形分别进行了观察比较，如图 4-10；对整流侧交流无功功率以及逆变侧交流无功功率波形分别进行了观察比较，如图 4-11。其中仿真总时间 10s，计算步长为 100 微秒。

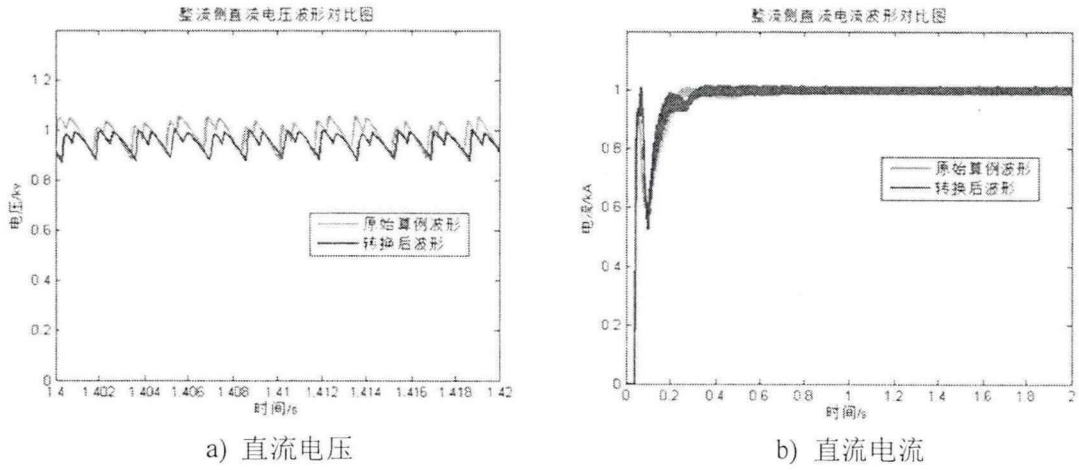


图 4-6 整流侧直流电压和电流波形对比图

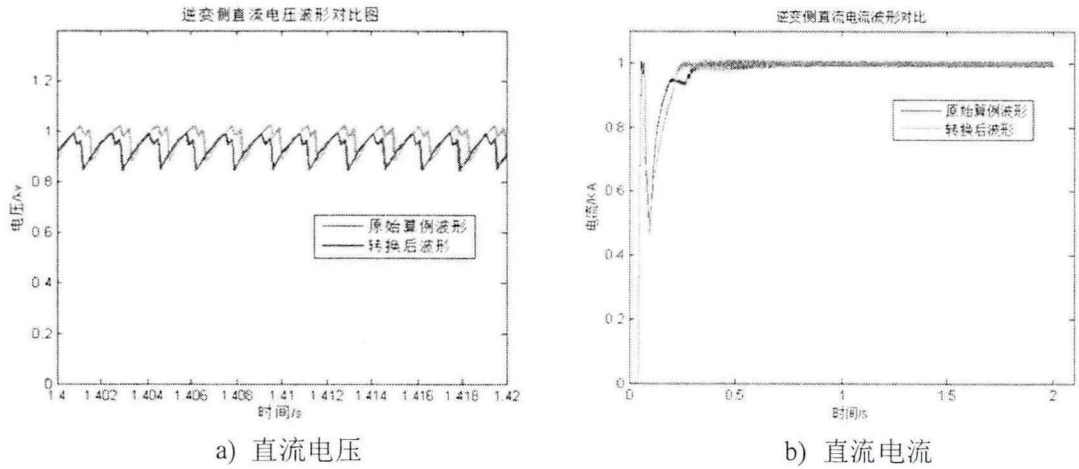


图 4-7 逆变侧直流电压和电流波形对比图

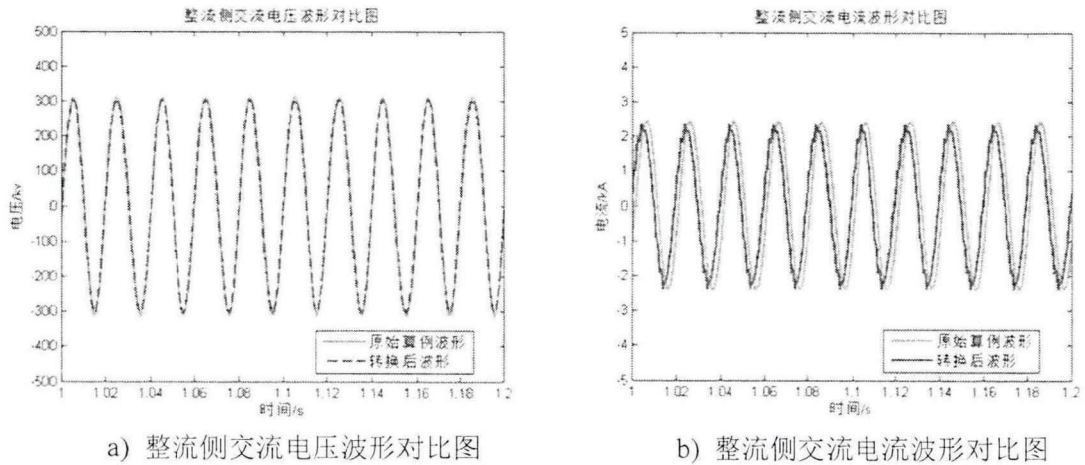
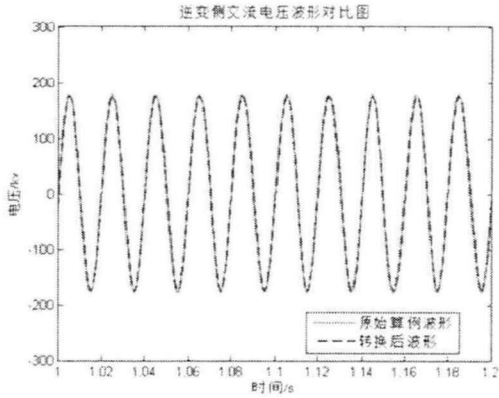
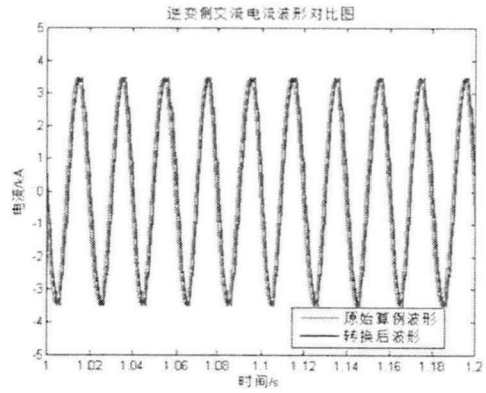


图 4-8 整流侧交流电压和电流波形对比图

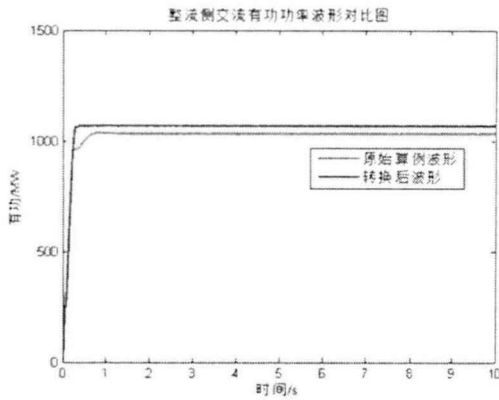


a) 逆变侧交流电压波形对比图

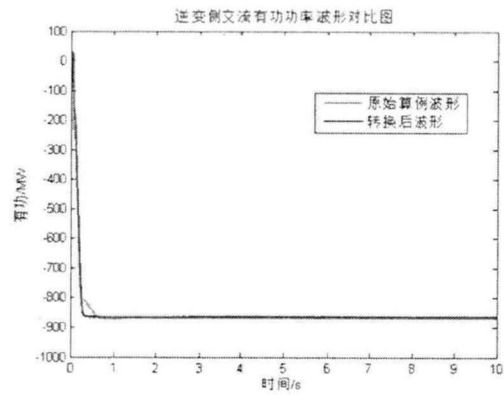


b) 逆变侧交流电流波形对比图

图 4-9 逆变侧交流电压和电流波形对比图

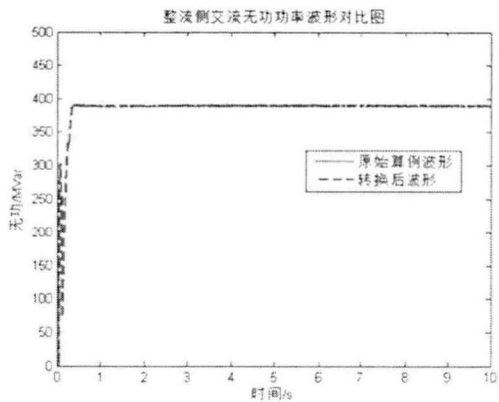


a) 整流侧交流有功功率波形对比图

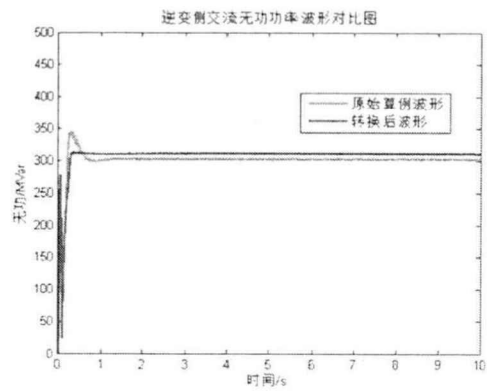


b) 逆变侧交流有功功率波形对比图

图 4-10 整流侧和逆变侧交流有功功率波形对比图



a) 整流侧交流无功功率波形对比图



b) 逆变侧交流无功功率波形对比图

图 4-11 整流侧和逆变侧交流无功功率波形对比图

表 4-1 整流侧电气量转换可信度指标

| 参数 | 频率相似度 | 阻尼相似度 | 幅值相似度 | 残差相似度 |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 直流电流 | 98.48 | 96.45 | 96.48 | 96.64 |
| 直流电压 | 98.26 | 97.68 | 95.23 | 95.26 |
| 交流电压 | 99.02 | 98.27 | 97.89 | 98.15 |
| 交流电流 | 98.75 | 98.64 | 98.54 | 98.11 |
| 交流有功 | 98.12 | 96.56 | 95.47 | 97.23 |
| 交流无功 | 99.30 | 98.59 | 97.94 | 98.01 |

从整流侧电气量的转换可信度中可以看出，转换前后波形相似度均在 95% 以上。经对比发现，出现误差的原因不是转换过程，而在于模型本身。在 ADPSS 中，对于换流器中的阀参数并没有体现，包括关断电阻、反向击穿电压等参数，而这些参数在 PSCAD/EMTDC 均可由用户自由设置；另一方面，有关变压器的饱和曲线相关参数，在 ADPSS 中也没有体现，也就是说这是模型本身的差异，并不是由转换过程而引入的误差。

从参数的波形比较来看，可以看出各项变量的大小与变化趋势基本一致，证明转换前后模型的动态响应基本一致，从而证明了转换的正确性。

4.3.2 ADPSS 转 PSCAD/EMTDC 算例分析

该算例包含 14 条三相母线、4 台 Park 方程同步电机、11 条 π 型线路、3 台三相两绕组变压器、23 个负荷元件、1 台三相电压源。图 4-12、4-13 分别为 ADPSS 中 IEEE14 标准算例拓扑，转换而成的 PSCAD/EMTDC 中 14 节点拓扑。图中可看出电路拓扑转换正确。

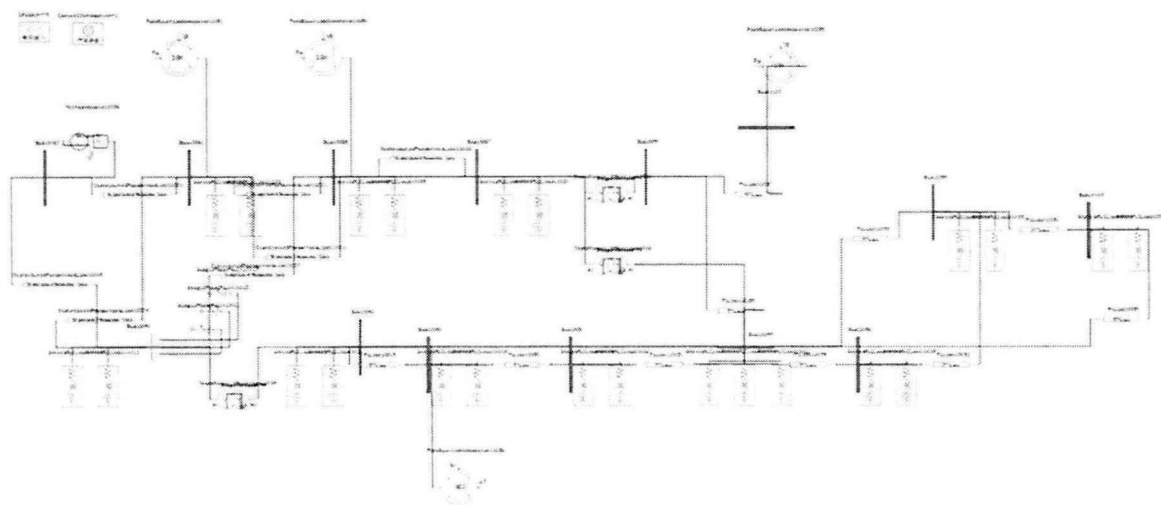


图 4-12 ADPSS 中 IEEE14 标准算例电路拓扑

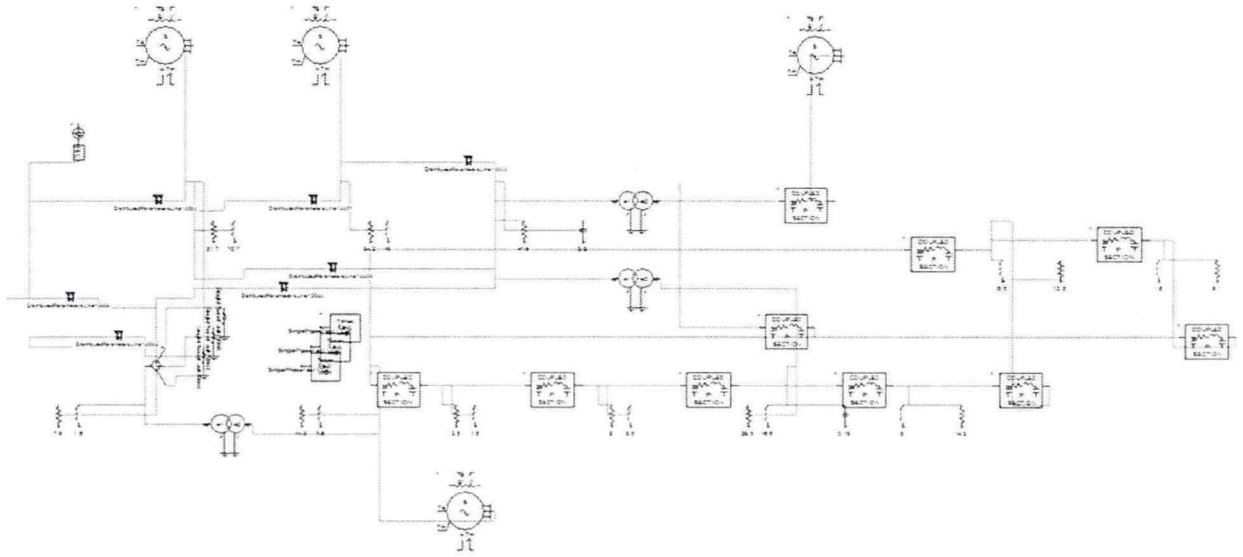
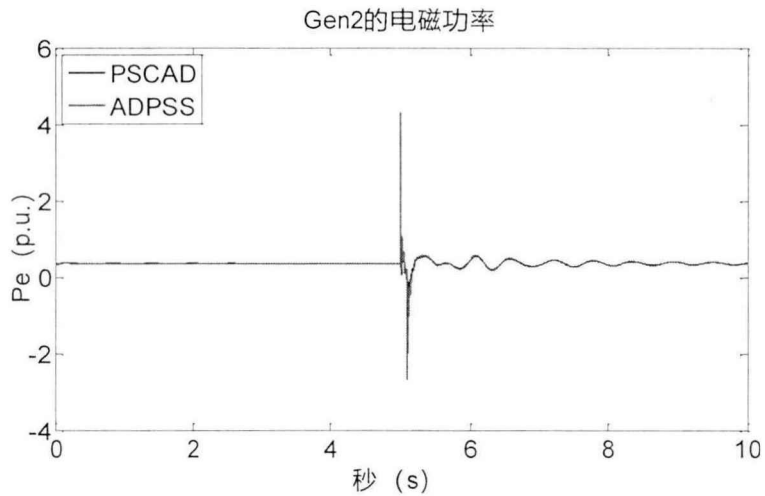
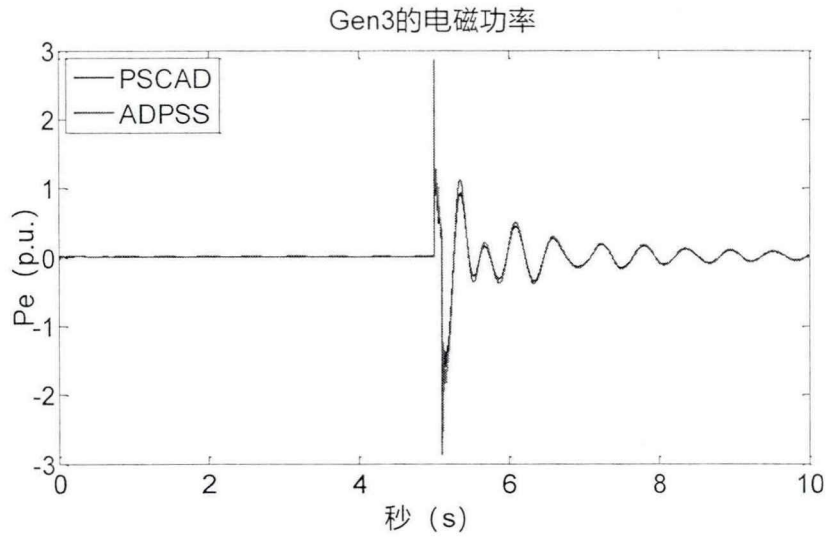


图 4-13 转换而成的 PSCAD/EMTDC 中 IEEE14 标准算例电路拓扑

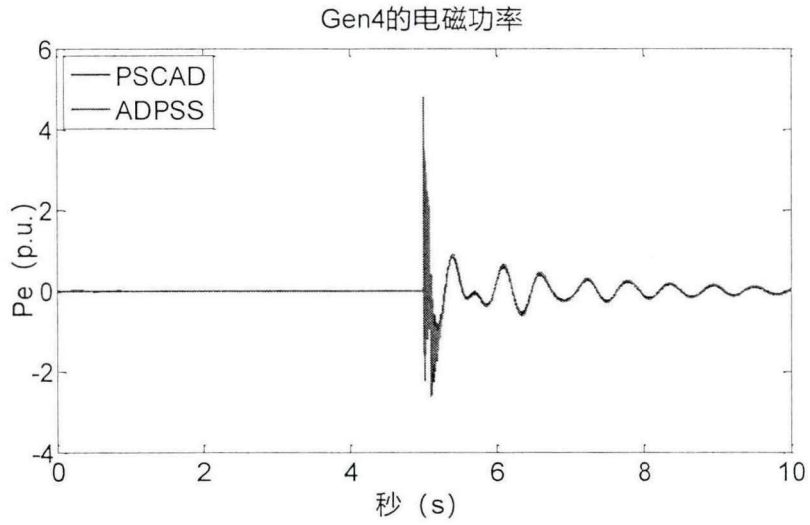
本文在转换前后的模型中设置故障为 5s 时刻，母线 Bus5 发生三相接地短路故障，故障电阻为 0.01Ω ，故障持续时间为 0.1s，断开方式为瞬时断开，仿真总时间为 10s。PSCAD 中，仿真步长为 100ms，仿真从稳态 30s 处开始 ADPSS 中，仿真步长为 50ms，阻尼因子为 0.1。分别对几台典型发电机的电磁功率、典型母线的三相电压、以及故障点电流进行了观测。



a) Gen2 的电磁功率



b) Gen3 的电磁功率



c) Gen4 的电磁功率

图 4-14 发电机电磁功率变化趋势

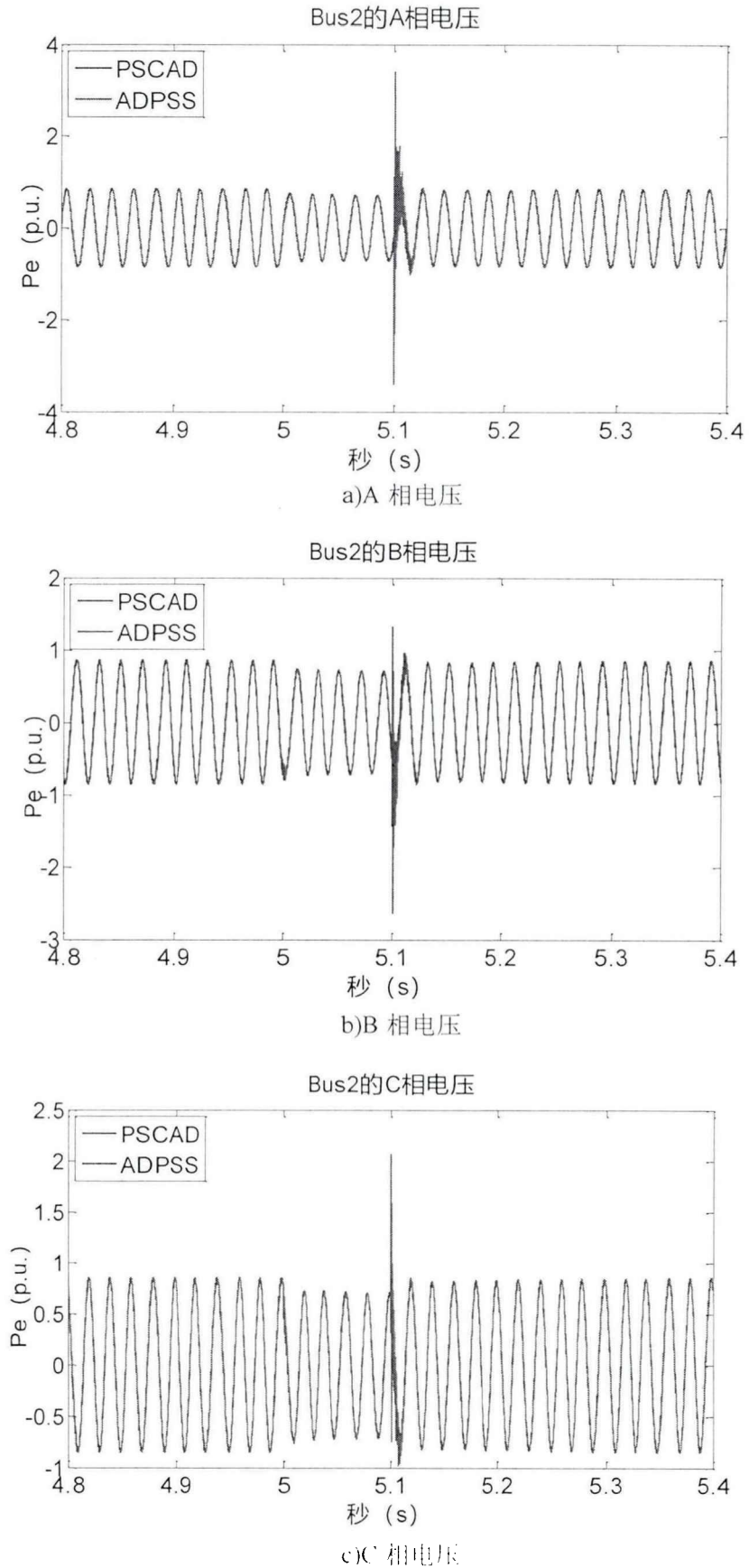
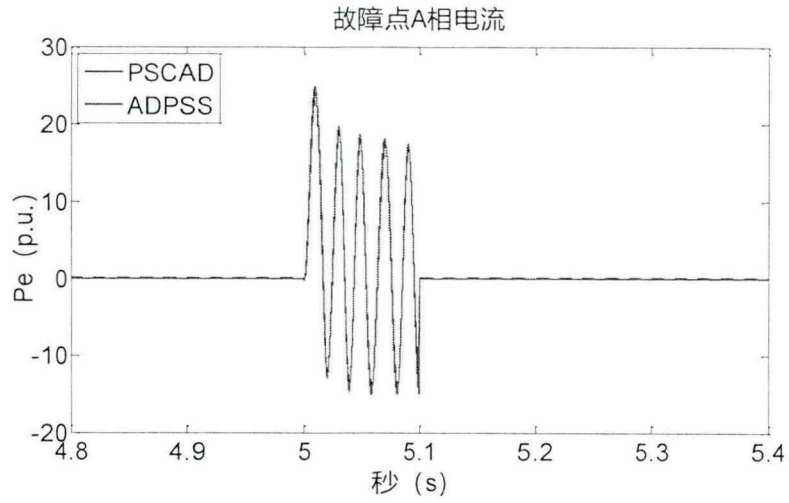
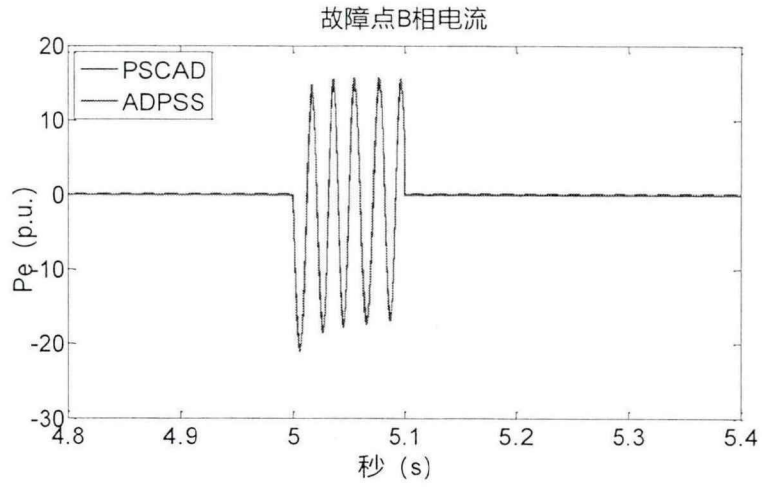


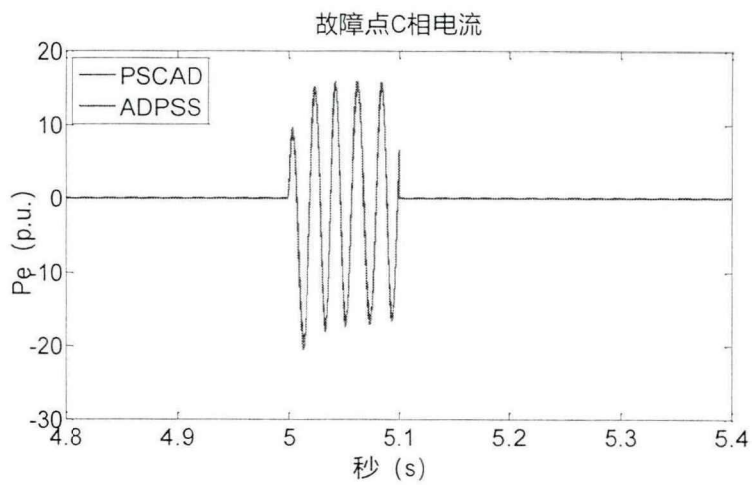
图 4-15 Bus2 各相电压



a)故障点 A 相电流



b)故障点 B 相电流



c)故障点 C 相电流

图 4-16 故障点各相电流

此外，根据所提出的转换可信度评估方法，对三条母线的 A 相电压瞬时值

的转换可信度进行量化。

表 4-2 母线 A 相电压转换可信度指标

| 参数 | 频率相似度 | 阻尼相似度 | 幅值相似度 | 残差相似度 |
|------|-------|-------|-------|-------|
| Bus1 | 98.67 | 98.94 | 98.46 | 98.64 |
| Bus4 | 98.26 | 99.01 | 98.43 | 98.20 |
| Bus6 | 99.02 | 98.27 | 98.14 | 98.17 |

由表可知，各电气量相似度均在 97%以上，证明模型转换正确。

4.4 本章小结

本章提出一种基于 PRONY 变换的表征转换可信度的方法，并对所提出的 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 自动换换系统的可信度进行了验证。简单的残差相似度仅能表征信号的整体差异水平，为此采用 PRONY 变换对转换前后的信号的特征量进行解析，得到各信号的频率、幅值和阻尼向量，再分别对转换前后每种特征量进行排序，根据相应的权重得到频率可信度指标、幅值可信度指标与阻尼可信度指标。最后，根据所提出的表征转换可信度的方法，以 CIGRE 和 IEEE14 标准算例验证了所提出的 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 自动转换系统的转化可信度进行了检验，验证了转换的正确性与合理性。

第 5 章 总结

PSCAD/EMTDC 作为最早一批电力系统分析软件,大量的系统模型是在 PSCAD/EMTDC 环境下建立的。而 ADPSS 作为具有我国自主知识产权的全数字实时仿真系统,具有性价比高、扩展性好等优点,越来越多的模型需要在 ADPSS 上建立,因此实现数据文件在这两个软件间相互转换是非常必要的。然而对于研究人员来说,人工完成二者模型间转换不仅效率低,而且出错率高。为解决两种软件间模型转化困难的问题,本文提出了一种 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 的电磁暂态模型自动转换方法,完成的主要工作总结如下:

(1) 完成了 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 元件图形拓扑的精确转换。由于 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 拓扑组织形式有着本质的差别,本文分别对一次系统与二次系统的拓扑进行了解析。通过节点关联矩阵初筛母线,最后合并多余母线,完成一次系统的拓扑解析;根据输入节点搜索输出节点,可解析二次系统拓扑关系,同时可避免回溯过程以加快解析速度;根据深度优先搜索算法对元件端点相位与母线基准电压进行解析。当由 ADPSS 转向 PSCAD/EMTDC 时,提出了一种基于元件端口动态特性的端点坐标计算方法,并利用可避免错误连接的自动布线方法对其进行拓扑连接。

(2) 对 ADPSS 与 PSCAD/EMTDC 所有元件对应关系与参数转换原则进行了详细研究。针对电力系统仿真软件 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 模型上的差异,主要以发电机、变压器、换流器等几种典型元件为例,阐述其参数在两种软件间的差异,并说明其具体参数转化的过程,同时开发了从 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 间模型自动转换软件。

(3) 提出了一种基于 PRONY 变换的转换可信度量化指标。将 PRONY 变换用于检验模型转换可信度的研究,解析出同一个系统模型在转换前后波形的频率、阻尼、幅值等特征量,以该信号点的能量为权重计算出各特征量的可信度指标。该方法不仅可以应用在模型转换的场合,对于其他仿真结果对比也同样适用。以 IEEE14 节点算例和 CIGRE 算例为例,对转换前后仿真波形进行了定性和定量的分析,验证了所提出的 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 电磁暂态模型自动转换方法的可行性与正确性。

本文对 PSCAD/EMTDC 与 ADPSS 的电磁暂态模型图形与参数转换问题进行了深入细致的探讨。由于数据转换的复杂性,在两软件中还有一部分模型难以对应起来,因此在实际的使用中,用户需根据研究需要,对此类元件采用自定义模型手动进行处理。

参考文献

- [1] Ting-Lu Y E, Wang X W, Gao J, et al. Applying and debugging of ADPSS in Hebei electric power grid[J]. Power System Protection & Control, 2009, 37(13):104-108
- [2] 陈磊, 张侃君, 夏勇军,等. 基于 ADPSS 的高压直流输电系统机电暂态-电磁暂态混合仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013(12):136-142
- [3] Lei C, Zhang K J, Xia Y J, et al. Electromechanical-electromagnetic transient hybrid simulation on HVDC power transmission system based on ADPSS[J]. Power System Protection & Control, 2013, 41(12):136-142
- [4] 林良真, 叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC[J]. 电网技术, 2000, 24(1):65-66
- [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] 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
- [7] 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
- [8] 马龙义, 武志刚, 侯冠基,等. BPA 与 PSS/E 的暂稳态模型比较和数据转换[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(5):128-134
- [9] 梁志成, 马献东, 王力科,等. 实时数字仿真器 RTDS 及其应用[J]. 电力系统自动化, 1997(10):61-64
- [10] Manitoba HVDC Research Centre Inc. RTDS 使用手册[Z].加拿大: Manitoba HVDC Research Centre, 2003:1-560
- [11] Han S, Rong N, Sun T, et al. Study on conversion between the common models of PSD-BPA and PSS/E[C]. IEEE, International Conference on Electronic Measurement & Instruments. IEEE, 2014:64-69
- [12] 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
- [13] 陶华. BPA 向 EMTDC/PSCAD 模型转换方法的研究[D].华北电力大学(北京), 2010
- [14] 董炜等, BPA 与 DIgSILENT 动态模型比较与数据转换[J].电力系统自动化, 2016(08): 140-146
- [15] 鞠平, 卫志农. 电力负荷特性的在线测辨--模型转换及静特性参数[C]. 中国电机工程学会电力系统分析与控制学术年会. 1992

- [16] 谢国超, 刘崇茹, 胡海洋,等. 基于 XML 的电磁暂态工程模型转换方法研究[J]. 内蒙古电力技术, 2017, 35(3):14-18
- [17] Ma C, Zhang W, Xu Q, et al. AC/DC power system fault simulation based on ADPSS[C]. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. IEEE, 2011:514-518
- [18] 王艺璇, 陈绪江, 张星,等. 一种基于 adpss 的直流输电系统中电磁暂态仿真方法[P]. 中国专利:105701303. 2016
- [19] Xu L, Han Y. Dynamic modeling and power swing damping control (PSDC) of SVC using ADPSS-based hardware-in-the-loop (HID) approach[J]. International Review of Electrical Engineering, 2013, 8(1):305-313
- [20] 徐得超, 刘崇茹, 邹卫美,等. 一种由 pscad 到 adpss 的电磁暂态模型和元件图形的自动转换方法[P]., 中国专利:104699907. 2015
- [21] Otten L, Dechter R. Anytime AND/OR Depth-First Search for Combinatorial Optimization[J]. Ai Communications, 2014, 25(3):211-227
- [22] 徐子珊. 从算法到程序[M]. 清华大学出版社, 2015, 62-78
- [23] Cho G, Dong X S. A Depth-First Dynamic Programming Algorithm for the Tree Knapsack Problem[J]. Informs Journal on Computing, 2017, 9(4):431-438
- [24] 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(2):120-124
- [25] 殷剑宏. 图论及其算法[M]. 中国科学技术大学出版社, 2003, 56-67
- [26] Kay E. Graph Theory with Applications[J]. Journal of the Operational Research Society, 1977, 28(1):237-238
- [27] Satyanarayana C. Applied graph theory: Graphs and electrical networks[J]. Proceedings of the IEEE, 1976, 66(10):1299-1300.
- [28] Srikanth P, Rajendra O, Yesuraj A, et al. Load Flow Analysis Of Ieee14 Bus System Using MATLAB[J]. International Journal of Engineering, 2013.
- [29] Rahman S A, Varma R K. PSCAD/EMTDC model of a 3-phase grid connected photovoltaic solar system[C]. North American Power Symposium. IEEE, 2011:1-7
- [30] Cheng C H, Hsu Y Y. Damping of generator oscillations using an adaptive static VAR compensator[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 7(2):718-725
- [31] 晏水平, 韩守木. 大型汽轮发电机组机电耦合轴系扭振模型研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 1993(1):137-143
- [32] Ellison A J. Electric Motor Handbook[J]. Electronics & Power, 2013, 24(9):679
- [33] 周鹗. 电机学第三版[M]. 水利电力出版社, 1995:137-139
- [34] 朱雨晨. 基于 ADPSS 的变压器模型开发及电网仿真分析[D]. 华北电力大

- 学(北京) 华北电力大学, 2013.
- [35] Abu-Siada A, Islam S. A Novel Online Technique to Detect Power Transformer Winding Faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2):849-857
- [36] Zhang S, Yin X, Chen X, et al. Research on the user-defined modeling of HVDC converter firing control based on ADPSS/ETSDAC[C]// International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. IEEE, 2016:346-351
- [37] Zonetti D, Ortega R, Benchaib A. Modeling and control of HVDC transmission systems from theory to practice and back[J]. Control Engineering Practice, 2015, 45:133-146.
- [38] Rolim L G B, Costajr D R D, Aredes M. Analysis and Software Implementation of a Robust Synchronizing PLL Circuit Based on the pq Theory[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(6):1919-1926.
- [39] Huang D, Ji S, Lee F C. LLC Resonant Converter With Matrix Transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8):4339-4347.
- [40] 王勇, 赵锦成, 解璞. 基于 PSCAD/EMTDC 的开关元件的暂态仿真算法研究[J]. 电气开关, 2008, 46(5):17-18.
- [41] 林富洪, 曾惠敏. 基于分布参数模型的高压输电线路单相接地故障单端测距方法[J]. 电网技术, 2011, 35(4):201-205.
- [42] 张进. 电力系统动态仿真可信度研究[D]. 华北电力大学(北京), 2005:26-29
- [43] Osborne M R, Smyth G K. A modified Prony algorithm for exponential function fitting[M]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1995:89-92
- [44] Kumaresan R, Tufts D W, Scharf L L. A Prony method for noisy data: Choosing the signal components and selecting the order in exponential signal models[J]. Proceedings of the IEEE, 1984, 72(2):230-233.
- [45] Yu P, Li J, Peng H. A Least Square Method for Parameter Estimation of RSC Sub-Codes of Turbo Codes[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(4):644-647.
- [46] 王铁强, 贺仁睦, 徐东杰,等. Prony 算法分析低频振荡的有效性研究[J]. 中国电力, 2001, 34(11):38-41.
- [47] 吴丽颖, 王增平, 王雪,等. 高压交直流混合输电直流线路远后备保护研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2006, 33(5):1-5.

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

学术论文:

- [1] 谢国超, 刘崇茹, 胡海洋,等. 基于 XML 的电磁暂态工程模型转换方法研究 [J]. 内蒙古电力技术, 2017, 35(3):14-18.
- [2] Liu C, Wu M, Xu W, et al. Optimisation model for online generators when a new generator is about to get started during power system restoration process[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(1):57-63.

发明专利:

- [1] 徐得超, 刘崇茹, 邹卫美, 等. 一种由 pscad 到 adpss 的电磁暂态模型和元件图形的自动转换方法:, CN 104699907 A[P]. 2015. 已授权.

软件著作权:

- [1] 刘崇茹, 胡海洋, 黎晓, 谢国超. ADPSS 到 PSCAD 电磁暂态模型与图形智能转换软件 V1.0. 已授权. (登记号: 2017R11L699734)
- [2] 刘崇茹, 胡海洋, 谢国超, 黎晓. PSCAD 到 ADPSS 电磁暂态模型与图形智能转换软件 V1.0. 已授权. (登记号: 2017R11L699784)
- [3] 刘崇茹, 徐伟, 胡海洋, 黎晓. 李欣蔚. 考虑发电机详细启动时间模型的电网系统恢复软件. 已授权. (登记号: 2016SR264964)
- [4] 钱峰, 胡海洋, 罗钢, 徐伟, 刘崇茹. 基于系统恢复时间最短的 FCB 机组布点软件. 已授权. (登记号: 2017R11L699826)

攻读硕士学位期间参加的科研工作

- [1] 中国电力科学研究院“电磁暂态模型与图形的自动转换功能研发”，2014.6-2016.11，主要完成人。
- [2] 中国电力科学研究院“电压源换流器与直流电网数字仿真相似性科学工程方法研究”，2017.03-2017.12，主要参与人。
- [3] 广东省电力调度控制中心“交直流混联电网智能解列控制与自愈恢复技术研究”，2015.06-2017.04，主要参与人。
- [4] 广东省电力调度控制中心“计及多种直流模型的受端电网仿真建模分析”，2017.05-2017.12，主要参与人。

致 谢

衷心感谢导师刘崇茹教授在我读研的三年学习生活中对我的关心、指导与督促。刘老师治学研究严谨求实，待人处事严格公正，这些深深地影响了我。平日里，刘老师经常教导我，不要看不起身边的小事、杂事，只有从点滴做起，才能掌握到科研的真谛。从选题到完成论文，刘老师对我进行了悉心的帮助和指导。刘老师的言传身教将使我终生受益，她宽厚待人的学者风范更是令我无比感动。在此谨向刘崇茹老师致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

感谢我的父母和所有亲人，没有你们的关心和爱护就没有我的今天，在这一刻，将最崇高的敬意献给你们！

感谢吴旻昊、洪国巍、负飞龙、王嘉钰、李越和师弟师妹们，感谢你们在我失落和彷徨时给予我的关心和帮助。尤其是吴旻昊师兄和王嘉钰师姐，为我的科研道路留下了了无数宝贵财富。

感谢所有关心我的朋友们，谢谢你们！

附录

附表 1 ADPSS2.1 与 PSCAD X4 共同支持的电磁暂态一次元件

| 元件分类 | 元件 | 备注 |
|--------|-------------|----|
| 节点 | 母线 | |
| | 单相电气节点 | |
| | 三相接地节点 | |
| | 单相接地节点 | |
| | 一转三元件 | |
| RLC 元件 | 三相串联 RLC 元件 | |
| | 三相电阻 | |
| | 三相电感 | |
| | 三相电容 | |
| | 三相并联 RLC 元件 | |
| | 三相耦合 RL 元件 | |
| | 三相串联 RLC 负荷 | |
| | 单相串联 RLC 元件 | |
| | 单相电阻 | |
| | 单相电感 | |
| | 单相电容 | |
| 变压器 | 单相并联 RLC 元件 | |
| | 三相两绕组普通变压器 | |
| | 三相三绕组普通变压器 | |
| | 三相两绕组理想变压器 | |
| | 三相三绕组理想变压器 | |
| | 单相两绕组普通变压器 | |

| | | |
|------|----------------------|---------------|
| | 单相两绕组理想变压器 | |
| | 单相三绕组普通变压器 | |
| 交流线 | 三相 Π 型集中参数线路 | |
| | 三相分布参数线路 | 贝杰龙模型 |
| | 线间互耦双回线 | |
| | 频率相关的分布参数线路 (单回) | |
| | 频率相关的分布参数线路 (双回) | |
| | 单相分布参数线路 | |
| 电源 | 三相正弦函数电压源 | |
| | 三相正弦函数独立电流源 | |
| | 单相正弦函数电压源 | |
| | 单相正弦函数独立电流源 | |
| | 可控电压源 | 需手动添加 |
| | 可控电流源 | 需手动添加 |
| 旋转电机 | 简单模型交流同步发电机 | |
| | Park 方程模型交流同步发电 机 | |
| | 双笼感应电动机 | |
| | 单笼感应电动机 | |
| | 绕线感应电动机 | |
| 开关 | 三相时控开关 | 已转, 需人为加入时间参数 |
| | 单相时控开关 | 已转, 需人为加入时间参数 |
| | 单相刀闸 | PSCAD 中无对应模型 |
| | 单相断路器 | |
| 故障元件 | 三相故障元件 | |
| | 单相故障元件 | |

| | | |
|------|------------|---------|
| 直流线 | 三相两绕组换流变压器 | |
| | 6 脉冲换流器 | |
| | 六脉冲换流器 | |
| 其他元件 | 仿真参数 | |
| | 潮流输入 | 需手动输入初值 |
| 子电路 | 子电路 | |
| | 外部母线 | |
| | 外部单相电气节点 | |
| | 控制系统输入节点 | |
| | 控制系统输出节点 | |
| | 晶闸管 | |
| | 二极管 | |
| | GTO | |

附表 2 ADPSS2.1 与 PSCAD X4 共同支持的二次元件

| 元件分类 | 元件 | 备注 | |
|------|--------|------------------|--------------------------------------|
| | | PSCAD 到 ADPSS | ADPSS 到 PSCAD |
| 信号源 | 电平 | | |
| | 正弦波 | 若单位是度数, 需手动修正为弧度 | |
| | 正弦波 2 | 若单位是度数, 需手动修正为弧度 | |
| | 脉冲发生器 | | |
| | 三角波发生器 | | |
| 代数运算 | 加减法 | | ADPSS 中系数只能为-1,0,1; PSCAD 中多余端口需手动关闭 |

| | | |
|------|------|--|
| | 乘法 | 若 ADPSS 中输入端口数大于 2, PSCAD 中需手动配置 |
| | 除法 | |
| | 转换 | |
| | 平方 | |
| | 增益 | |
| | 微分 | |
| | 积分 | 端口 y0、k 信息丢失, 参数 Yo、T 分别需手动赋值; 若 y0 为可变信号, 模型功能不完全对应 |
| 传递函数 | 比例积分 | 端口 y0 信息丢失, 参数 YINIT 需手动赋值; 若 y0 为可变信号, 模型功能不完全对应 |
| | 惯性 | |
| | 动态 | |
| | 微分惯性 | |
| | 滤波 1 | |
| | 滤波 2 | |
| | 限幅 | |
| | 平方根 | |
| 基本函数 | 绝对值 | |
| 运算 | 正弦 | 若单位是度数, 需手动修正为弧度 |

| | | |
|--------|-----------------|---------------------------------------|
| 余弦 | 若单位是度数,需手动修正为弧度 | |
| 正切 | 若单位是度数,需手动修正为弧度 | |
| 反正弦 | 若单位是度数,需手动修正为弧度 | |
| 反余弦 | 若单位是度数,需手动修正为弧度 | |
| 反正切 | 若单位是度数,需手动修正为弧度 | |
| 对数 | | |
| 指数 | | ADPSS 中的参数 A、B 都为 1 时, PSCAD 中有直接等效元件 |
| 幂 | | |
| 求角度 | | |
| 最大值 | | PSCAD 中多余端口需手动关闭 |
| 最小值 | | PSCAD 中多余端口需手动关闭 |
| 其他功能模块 | 累加器 一周期内最小值 | 周期频率默认值为 50Hz |

| | | |
|-----------|------------------|---|
| 计数器 | 输入端 Y0 需手动配置 | PSCAD 中, 输入为正加计数, 输入为负减计数; ADPSS 中, 输入为正复位, 输入为负加计数, 最小值为 0 初始值设为 0; |
| 可加减计数器 | | PSCAD 中, 输入为正加计数, 输入为负减计数; ADPSS 中, 输入为正减计数, 输入为负加计数, 最小值为 0 |
| 实部虚部转幅值相角 | 若单位是度数, 需手动修正为弧度 | |
| 幅值相角转实部虚部 | 若单位是度数, 需手动修正为弧度 | |
| ABC 转 DQ0 | 端口 wt 需手动配置 | 参数 Theta 需手动设置 |
| DQ0 转 ABC | 端口 wt 需手动配置 | 参数 Theta 需手动设置 |
| 直角坐标转极坐标 | | |
| 单相相位差计算 | | |
| 相角差值器 | | |

| | | |
|---------------------|---|---|
| 多线段插值 | 端口 k1、k2 信息丢失，需通过 PSCAD 中的参数 x1、x2、y1、y2 与 x5、x6、y5 来确定连接元件 | 端口 A1~A6、B1~B6 信息丢失，参数 x1~x6、y1~y6 需手动赋值；若 A1~A6、B1~B6 为可变信号，模型功能不完全对应； |
| 多线段 MAPTABLE 映射表 | | |
| 延时 2 | | 端口 x2 信息丢失，参数 T 需手动赋值；若 x2 为可变信号，模型功能不完全对应 |
| 延时 1 | | |
| 速度限制器 | | |
| 上坡 | | |
| 下坡 | | |
| 比较 | | |
| 波段 | | |
| 值控开关 3 | | |
| 输入变量选择 | | |
| 边沿检测器 | 参数 TP、NT、TN 需手动赋值 | |
| 过零检测 | | |

| | | |
|---------|-----------------------------|--|
| 单稳态触发器 | | 端口 IS 需置为 1; 端口 R 需置为 0; ADPSS 中端口 T 信息丢失, PSCAD 中参数 T 需手动赋值; 若 T 为可变信号, 模型功能不完全对应 |
| 定间隔采样 | | |
| 脉冲采样 | | |
| 在线频率分析 | | |
| 传统锁相环 | | |
| RS 触发器 | | ADPSS 中端口 x3 信息丢失, PSCAD 中参数 QInit 需手动赋值; 若 x3 为可变信号, 模型功能不完全对应 |
| RSS 触发器 | | |
| RSR 触发器 | | |
| 触发脉冲插值 | | |
| 元件 2 | | |
| 值控开关 1 | 端口 InB 需手动接入常量 0, 否则模型不完全对应 | 只有当上阈值与下阈值相等的时候, 模型才能相互转换, 否则请按提示信息进行修改 |

| | | |
|--------|-------------|------------|
| | 端口 InA 需手动接 | 只有当上阈值与下阈 |
| | 入常量 0, 否则模型 | 值相等的时候, 模型 |
| 值控开关 2 | 不完全对应 | 才能相互转换, 否则 |
| | | 请按提示信息进行修 |
| | | 改 |

| | |
|------|----|
| | 与门 |
| 逻辑运算 | 或门 |
| | 非门 |
| | 异或 |
