

# 大规模交直流混联电网 RTDS 快速建模方法

杨林超<sup>1</sup>, 应超楠<sup>1</sup>, 徐政<sup>1</sup>, 楼伯良<sup>2</sup>, 董炜<sup>2</sup>, 华文<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

2. 国网浙江省电力有限公司 电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**为提高大规模交直流系统实时数字仿真器(RTDS)建模的效率,提出了一套将各种常用机电暂态数据文件统一转换为 RTDS 模型的成套流程方法。对 PSS/E-RSCAD 数据转换时关键元件的模型对应关系及存在的问题进行了对比分析,从电力系统抽象建模、动态等值、数据预处理和数据转换等方面详细介绍了大规模交直流系统 RTDS 建模的关键技术。开发了一套常用机电暂态软件至 RTDS 的数据移植软件,并成功应用于浙江电网的 RTDS 快速建模研究。对称故障下的仿真结果表明,系统转换前后稳态和暂态特性相一致,验证了 RTDS 快速建模方法的有效性。

**关键词:**大规模交直流混联电网;RTDS;快速建模;数据转换;电磁暂态仿真

**中图分类号:**TM 743

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.201909052

## 0 引言

随着区域电网的互联、高压直流输电的发展,我国已形成世界上规模最大、电压等级最高的交直流混联电网。在这种新形势下,分析交直流系统相互影响,研究大规模交直流混联电网的安全稳定性,已成为国内学术界和工程界关注的热点<sup>[1-3]</sup>。相比于传统机电暂态仿真,基于三相瞬时值的电磁暂态仿真能更加准确地模拟直流输电系统在不对称故障下的响应特性,准确判断高压直流输电是否发生换相失败,因此对大规模交直流混联电网进行全电磁暂态建模及仿真分析,已成为我国电网发展的必然要求<sup>[4-5]</sup>。

目前广泛应用的机电暂态仿真软件有美国西门子 PTI 公司开发的 PSS/E 和中国电力科学研究院引进并继续开发的 BPA, 现阶段的电网数据均以相关机电暂态仿真软件格式存储,而缺乏相应的电磁暂态仿真模型<sup>[6]</sup>。实时数字仿真器(RTDS)是目前公认的高效电磁暂态仿真工具,随着 RTDS 公司推出新一代硬件平台 NovaCor, 在降低硬件成本的同时,实时仿真规模大幅提升至万级节点,元件处理能力也得到大幅提高,使得利用 RTDS 实现大规模交直流混联电网全电磁暂态仿真具有更加广阔的应用前景<sup>[7]</sup>。用户和 RTDS 之间的交互通过 RSCAD 软件完成,但其图形化界面不便于大规模交直流电网的快速建模。手动搭建 RTDS 模型不仅工作量巨大,而且可能在网络拓扑连接、模型参数输入等方面产

生错误,建模效率低下。因此,有必要设计一套根据常用机电暂态仿真软件的数据文件快速搭建 RTDS 仿真模型的方法。

从国内外研究来看,受限于老一代 RTDS 硬件平台仿真能力的限制,基于 RTDS 的电磁暂态仿真研究着重于直流系统建模和接入实际控保装置的仿真模拟,通常忽略主网的动态特性,仅将主网根据短路比进行戴维南等效<sup>[8-9]</sup>。为研究大规模交直流电网间的相互作用,国内外研究学者更多地开展了基于 RTDS 的机电-电磁暂态混合仿真,然而交接母线的选取、瞬时值与基波相量间的相互转换和交互时序导致的迭代误差等问题尚未得到很好的解决<sup>[10-11]</sup>。相比于机电-电磁暂态混合仿真,全电磁暂态仿真不存在理论上的缺陷,现阶段基于 RTDS 的大规模交直流电网全电磁暂态仿真研究相对较少,RSCAD 软件自带数据转换接口,能将 PSS/E 数据文件转为 RSCAD 数据文件,文献<sup>[12]</sup>在小系统中验证了转换接口的可行性,但应用于经 Ward 等值后的大规模系统仍存在较多问题,转换后的等值系统仍需花费大量时间进行纠错与调试。而作为中国使用最频繁的 BPA 软件,虽有文献对比研究了 BPA 和 RTDS 的模型差异与参数对应关系<sup>[13-14]</sup>,提出了基于子图同构算法的实时仿真计算资源分配方案<sup>[15]</sup>,但仍旧是采用等值后的 BPA 数据文件手动搭建 RTDS 仿真模型,目前尚未有将 BPA 数据文件自动转换到 RSCAD 的成熟方案及实现方法。

针对以上问题,本文详细分析了 RSCAD 自带数据转换接口在数据转换时的模型对应关系及存在的问题,并给出了相应的解决方法。提出了一套将常用机电暂态数据文件自动统一转换为 RTDS 模型的成套流程方法,该方法对电力系统元件进行抽象建

收稿日期:2019-05-17;修回日期:2019-08-16

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS160-01S)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Zhejiang Electric Power Co.,Ltd.(5211DS16001S)

模,建立机电暂态仿真模型的RTDS自定义模型库,使得数据转换不再局限于某一款仿真软件。在RSCAD自带数据转换接口的基础上进行二次开发,开发了一套常用机电暂态软件至RTDS的数据移植软件,经动态等值和数据转换,实现了大规模交直流混联电网的RTDS快速建模。最后基于华东电网的BPA原始数据,以建立浙江电网的RTDS全电磁暂态模型为例,验证了本文所提RTDS快速建模方法的有效性。

## 1 技术分析

机电暂态仿真软件与电磁暂态仿真软件在元件模型结构及数据存储等方面有着较大差异。自动数据转换是高效建立大规模系统电磁暂态模型的有效途径。由机电暂态仿真软件至RTDS的数据转换过程中需解决元件模型、参数的对应选取、RTDS仿真资源的分配与子系统分割、元件模型的布局与布线等关键问题。由于RSCAD自带数据转换接口,虽然转换后的系统还存在一定问题,但基本解决了PSS/E-RSCAD数据转换过程中的上述关键问题,因此完全可以在此基础上进行二次开发,减少许多重复性工作。对于BPA等其他机电暂态仿真软件,可以通过对电力系统元件进行抽象建模,统一转换为PSS/E中间文件,针对不同软件间发电机控制器模型的不同,在RTDS中建立相应的自定义模型库,便可将不同机电暂态软件至RTDS的数据转换方法统一。虽然最新一代RTDS的仿真规模上限可达万级节点,但科研单位实际购置的RTDS台数有限,通常需对大规模系统进行等值简化,以适应仿真装置的计算能力,使得仿真规模在合理的范围内。常用机电暂态仿真软件至RTDS的统一转换方法流程如图1所示。

## 2 PSS/E-RSCAD数据转换模型对应及问题分析

### 2.1 发电机及控制器模型

RSCAD自带转换接口转换生成的同步发电机模型为7阶详细模型(If\_rtds\_sharc\_sld\_MACV31),

可通过参数设置与PSS/E中的发电机模型完全对应,发电机参数可直接移植。RTDS模型库中含有丰富的发电机控制器模型,除PSS/E中个别不常用的模型外,基本可实现发电机控制器模型的正确转换。对于RTDS中不含的PSS/E控制器模型及自定义模型,转换程序将对其忽略,采用滑块替代,放置在发电机相应的控制信号输入端。

### 2.2 变压器模型

RSCAD自带转换接口支持PSS/E两绕组和三绕组变压器的转换,分别转换为三相双绕组变压器(If\_rtds\_sharc\_sld\_TRF3P2W)和三相三绕组变压器(If\_rtds\_sharc\_sld\_TRF3P3W2BUS),其中对于发电机仅通过1台变压器连于高压母线的情况,该变压器将含于发电机模型中,并省去相应的发电机母线。转换结果存在的问题主要有以下2点。

(1)三相双绕组变压器模型无电阻参数,变压器电阻的缺失可能导致系统潮流与PSS/E中原系统潮流结果不一致,特别对于经等值后的大规模系统,流经等值变压器的潮流数值较大,变压器电阻所产生的有功损耗对系统潮流将产生较大影响。

(2)发电机模型中的变压器单元和三相双绕组变压器的零序参数未能正确转换,仅仅根据序文件设置了变压器绕组的接线方式。发电机模型中可直接设置变压器单元的零序阻抗参数,但转换得到的结果仍旧等于正序阻抗;三相双绕组变压器无法直接设置零序阻抗,其零序阻抗受变压器接线方式及中性点接地阻抗影响,但转换得到的变压器只有中性点直接接地,未能正确反映转换前的变压器零序阻抗。

### 2.3 负荷模型

在对大规模交直流系统进行稳定分析时,负荷通常采用考虑电压和频率特性的静态负荷模型。RSCAD自带转换接口可将负荷转为恒阻抗模型、恒功率模型和ZIP负荷模型。当选择恒阻抗负荷模型时,负荷将被转为无源并联支路,不占用实时仿真器的元件处理资源;当选择恒功率负荷模型时,负荷将被转为动态负荷元件,动态负荷占用10个元件处理资源;当选择ZIP负荷模型时,负荷同样将被转为动

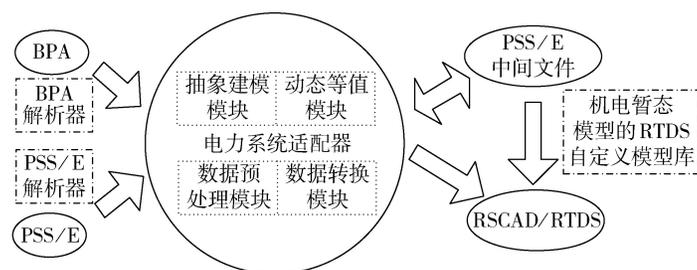


图1 统一转换方法流程图

Fig.1 Flowchart of unified transformation method

态负荷元件,并连有 ZIP 比例控制模块,比例系数取自潮流文件中的负荷部分,当不计及负荷的频率特性时, ZIP 负荷模型可与 PSS/E 中的静态负荷模型对应。由于 RSCAD 自带转换接口仅根据潮流文件对负荷进行转换,存在着无法识别动态文件中静态负荷模型的问题。

#### 2.4 线路模型

PSS/E 中线路采用基频下的集总参数 PI 模型,没有详细的线路参数和杆塔信息。在数据转换过程中,充电功率为 0 的线路将被转为 RL 支路,2 个分裂的 RL 元件分别放置在线路两侧的母线上,位于同一个子系统中;充电功率不为 0 的线路将被转为 T-line 传输线,其中当由线路 LC 参数计算所得的波传输时间大于仿真步长时,将采用 Bergeron 模型,反之将采用 PI 模型,只有采用 Bergeron 模型的传输线可用于分割子系统。

#### 2.5 直流模型

PSS/E 中的直流输电换流器模型为准稳态模型,直流控制系统也采取简化处理,仅仅通过设置典型参数来模拟换相失败及其故障恢复过程,无法为在电磁暂态环境下的直流系统建模提供详细参数。因此在数据转换时, PSS/E 中的直流将被忽略,直流系统还需另行搭建。在 RSCAD 中,6 脉动换流阀和换流变压器采用嵌入式阀组模型 (If\_rtds\_share\_sld\_VGRP6),直流输电的控制系统既可以根据实际的控制策略在 RSCAD 中手动搭建相应的控制器模型,也可以直接接入实际的直流输电控制保护装置,搭建硬件在环实验平台进行实时仿真。

### 3 大规模交直流电网 RTDS 建模关键技术

#### 3.1 动态等值

由于 RTDS 的仿真规模与硬件配置有极大关系,为实现大规模交直流混联电网的全电磁暂态仿真,通常需对大规模交直流系统进行等值简化,以降低系统规模。在对多馈入交直流系统动态特性的研究中,考虑到交直流系统间的相互作用主要取决于 500 kV 及以上电压等级的主干网架,可采用按电压等级分层的基于物理等效的动态等值方法对 220 kV 及以下电压等级的低压网络用标准等值结构替代<sup>[16]</sup>。在等值过程中,可通过设置等值变压器的接线方式和零序阻抗实现等值前后低压网络的等效零序阻抗相等<sup>[17]</sup>。该等值方法不会产生不符合实际情况的负电阻支路,保留主干网架的等值方法也留下了足够多的长线,便于 RTDS 建模时的子系统分割,避免了采用传统 Ward 等值方法在电磁暂态建模时的固有弊端。

电网数据大多以 BPA 格式存储,为方便等值后的系统直接转换为 RTDS 模型,本文通过解析 BPA

数据文件,在内存中对电力系统元件采用统一的抽象建模方法,采用上述等值方法对大规模交直流系统进行等值简化,等值后的系统按 PSS/E 数据格式直接保存为 PSS/E 中间文件。针对 BPA 和 PSS/E 间发电机控制器模型不对应的问题,可借用 PSS/E 自定义模型格式将 BPA 特有模型在 PSS/E 中保存成相应的自定义模型,从而实现等值后系统参数无损保存为 PSS/E 中间文件。在后续数据转换过程中,根据 PSS/E 中间文件记录的自定义模型信息,可以方便地添加 RTDS 自定义模型,从而避免了 BPA 到 RTDS 数据转换时的模型精度损失。

#### 3.2 数据预处理

为使得等值后生成的 PSS/E 中间文件更好地应用于 RSCAD 数据转换,通常需对三绕组变压器、直流和负荷进行预处理。

##### 3.2.1 三绕组变压器预处理

由于 BPA 中没有三绕组变压器模型,通常拆成 3 个双绕组变压器表示,此时存在着中压及高压母线间双绕组变压器电抗为负的情况。机电暂态仿真软件允许变压器负电抗的存在,然而电磁暂态仿真软件严格遵循物理约束,将无法填写双绕组变压器负电抗参数。此外,在 RSCAD 中一个三绕组变压器和一个双绕组变压器占用的实时仿真器处理资源是一样的,倘若用 3 个双绕组变压器表示 1 个三绕组变压器,将占用 3 倍的处理资源并多 1 个虚拟节点,减小了 RTDS 实际所能仿真的系统规模。因此,对三绕组变压器的预处理是十分必要的,在数据转换前需先将 PSS/E 中间文件的 3 个双绕组变压器还原为真实的三绕组变压器。

##### 3.2.2 直流预处理

由于在数据转换时, PSS/E 中的直流数据将被忽略,无法正确转换,转换后的系统将产生大量功率缺额,导致系统潮流无法收敛。因此可先对直流进行预处理,方便转换后的系统进一步调试。根据直流线路送受端的潮流结果,可将直流线路删去,在整流站母线用等效负荷替代,在逆变站母线用等效发电机替代,如图 2 所示,以保证直流处理前后系统潮流结果一致。等效发电机无需含有动态模型,在 RSCAD 数据转换时将被转为电源模型。后续需详细研究直流系统的动态特性时,删去等效负荷和等效电源,再添加详细的直流模型即可。

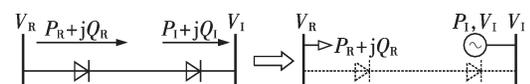


图 2 直流预处理

Fig.2 Preprocess of HVDC

##### 3.2.3 负荷预处理

在 PSS/E 的潮流数据文件中,负荷通常表示为恒功率负荷,其动态模型存储在动态数据文件中。

由于RSCAD转换程序仅根据潮流文件对负荷进行转换,无法正确表示动态文件中的静态负荷模型。因此,为在RSCAD中以ZIP负荷模型正确表示负荷,需对潮流文件中的负荷进行预处理,根据其在动态文件中的静态负荷模型,将潮流文件中的恒功率负荷乘以相应的比例系数,表示为恒阻抗、恒电流和恒功率负荷的组合,此时转换生成的负荷ZIP比例控制模块才具有正确的比例系数。

### 3.3 数据转换

前文分析了RSCAD自带转换接口在模型对应及参数转换等方面存在的问题,针对以上问题,需对生成的仿真文件(\*.dft)进行模型替换及参数修改。RSCAD仿真文件本质上是按一定规则存储的文本文件,通过对其文本结构分析可知,可将其依次分为工程设置和元件模型两部分,如图3所示。工程设置部分主要是对仿真文件的工作环境及仿真参数进行设置,包括文件版本信息、仿真步长、编译类型、子系统个数及名称等;元件模型部分按不同子系统依次排列,每个子系统以一定的标志开始,接着存储该子系统内的各个元件模型,每个元件模型按元件名称、位置坐标和模型参数的顺序以固定的格式记录。

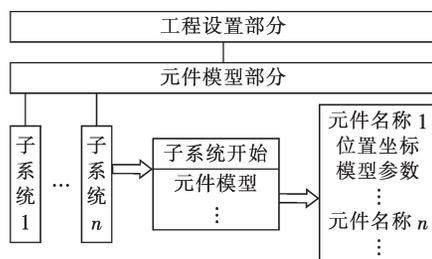


图3 RSCAD仿真文件格式

Fig.3 RSCAD simulation file format

可见,RSCAD仿真文件整体结构简单,很容易通过文本方式实现模型的添加、删除与修改,其效果与在RSCAD软件中进行可视化操作本质上是一样的。对于模块数量众多的大规模交直流系统而言,文本操作方式易于编程实现,可以大幅提高RTDS建模的效率。因此,针对RSCAD转换程序生成的仿真文件存在的问题,本文通过文本操作的方式进行批量化修改,具体修改方法如下。

(1)RSCAD软件具有强大的模型自定义功能,针对RSCAD转换程序无法识别PSS/E中自定义BPA模型的问题,需在RSCAD中自定义相应的BPA模型,该自定义模型同样具有固定的文本格式。在转换生成的仿真文件中,对发电机模型遍历,通过读取的PSS/E中间文件判断该发电机是否含有自定义控制器模型,若有,则删去用于替代自定义模型的滑块元件,并根据PSS/E动态文件记录的自定义模

型参数,结合发电机模型的位置坐标信息,将发电机的自定义控制器模型添加到合适的位置即可。

由于RSCAD页面内的元件采用 $xy$ 坐标定位,即左上角为坐标原点,向右和向下分别为 $x$ 轴和 $y$ 轴的正方向,画布一格间距32,根据发电机的位置坐标,相对移动 $\pm 32m$ ( $m$ 为移动的格数),即可将自定义模型放置到合适的位置,其余需添加的元件位置坐标可采用同样的方法确定。附录中图A1展示了通过文本方式添加自定义励磁和电力系统稳定器后的发电机模型前后对比。

(2)针对变压器转换存在的问题,需将无电阻参数的变压器模型(If\_rtds\_sharc\_sld\_TRF3P2W)替换为有电阻参数的变压器模型(\_rtds\_3P2W\_TRF.def)。此外,由于RSCAD中变压器模型无法直接填写零序参数,因此需根据变压器正序和零序等效电路,结合变压器绕组接线方式,通过设置变压器接地支路,以体现其零序阻抗。而发电机模型中的变压器单元可直接填写零序参数,因此根据序文件直接修改即可。附录中图A2展示了 $Y_0/\Delta$ 接法变压器经文本方式实现了模型的替换及接地阻抗的添加。

## 4 数据移植软件的开发

### 4.1 电力系统抽象建模

对于物理本质相同的电力系统元件,不同机电暂态仿真软件采用不同的组织形式进行描述。为将常用机电暂态仿真软件至RTDS的数据转换方法统一,有必要抽象出一套统一的数据结构,形成不同的电力系统元件类,在内存中表示电力系统模型,其中含有动态模型的发电机和负荷还定义了一个动态元件的内部类。当需要生成某种指定仿真软件的数据文件时,只需按相应的格式存储即可;当需要批量修改RSCAD仿真文件时,相关的模型参数也能方便地从内存中读取。对于软件支持的全部发电机、负荷动态模型,采用XML文档存储,该文档以固定的语法格式记录动态模型的名称、ID、整型参数个数、实型参数个数和是否自定义模型等信息,其中ID采用一个四位数“XXXX”字符表示,第一位表示动态模型类别,例如“1”表示发电机模型,“2”表示励磁模型等,后三位从“000”开始依次编号,用于区分同一类别中的不同模型。这样处理有利于动态模型的快速识别和归类,方便后续RTDS自定义模型的添加;同时当机电暂态仿真软件后期有新增发电机或负荷模型时,只需在该XML文档中添加新的模型记录即可,提高了软件的扩展性与适应性。XML文档中一条典型的励磁模型记录如下:

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<Library>
  <Model Name="ESAC1A">

```

```

<ID>2000</ID>
<Num_ICON>0</Num_ICON>
<Num_CON>19</Num_CON>
<USRMDL>False</USRMDL>
</Model>
</Library>

```

#### 4.2 软件整体流程设计

RSCAD 软件提供了 PSS/E-RSCAD 的数据转换功能,用户通过 RSCAD 数据转换的图形用户界面设置相关参数,RSCAD 便自动调用转换程序的可执行文件 pss2rscad.exe,从而实现数据转换。由于该可执行文件同样可以通过 Windows 命令行方式调用,因此无需通过 RSCAD 图形用户界面,同样可以实现 PSS/E-RSCAD 的数据转换,为在此基础上二次开发数据移植软件提供了可能。根据前文所述大规模交直流混联电网 RTDS 建模成套流程方法,采用 Qt/C++ 软件开发了一套常用机电暂态仿真软件至 RTDS 的数据移植软件,实现了 RTDS 的快速建模,具体软件流程如图 4 所示。

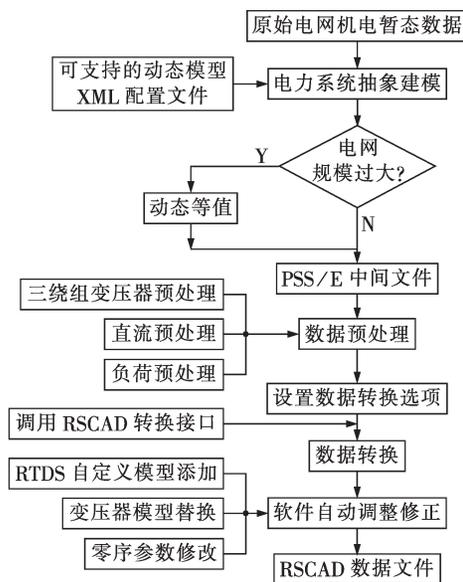


图 4 数据移植软件流程图

Fig.4 Flowchart of data conversion software

### 5 RTDS 快速建模在实际电网中的应用

本文以 2018 年华东电网 BPA 数据为例,采用按电压等级分层的基于物理等效的动态等值方法对其进行等值简化,直接保存为 PSS/E 中间文件。在等值的过程中,保留华东电网所有 1 000 kV 特高压网架、浙江地区所有 500 kV 主干网架和浙江电网与外网的联络线,等值后的系统共包含 219 条母线、45 台发电机和 170 台变压器。利用本文开发的数据移植软件将上述 PSS/E 中间文件快速转换为 RSCAD 仿真文件,并在此基础上手动添加浙江地区 2 回直流模型,最终得到由 6 个子系统组成的浙江电网 RTDS

全电磁暂态模型。相比于手动搭建交直流系统 RTDS 模型,采用本软件进行程序化操作大幅减少了建模的工作量和错误率,有利于模型的后续调试和运行。

#### 5.1 稳态结果对比

为验证本文提出的大规模交直流混联电网 RTDS 快速建模方法的有效性,需对转换前后系统的稳态潮流和动态特性进行对比分析。系统潮流结果的准确性是保证其动态特性一致的基本前提,表 1 和表 2 分别给出了 BPA 原始系统、PSS/E 等值系统和 RSCAD 仿真系统在稳态运行时主干网架上部分母线电压(标么值)和线路潮流对比情况。由表 1 和表 2 可知,等值和转换前后系统潮流结果几乎一致,验证了稳态结果的准确性。

表 1 母线电压对比

Table 1 Comparison of bus voltage

母线	母线电压		
	BPA	PSS/E	RSCAD
国安吉	0.994∠-8.46°	0.990∠-8.45°	0.990∠-8.45°
国兰江	0.998∠-8.18°	0.995∠-8.18°	0.995∠-8.19°
国莲都	1.002∠-7.57°	1.000∠-7.58°	1.000∠-7.58°
国金华	0.982∠-3.26°	0.982∠-3.26°	0.982∠-3.27°
国绍兴	0.957∠-8.98°	0.957∠-8.99°	0.957∠-8.99°

表 2 线路有功功率对比

Table 2 Comparison of line active power flow

线路	线路有功功率 / MW		
	BPA	PSS/E	RSCAD
国兰江—国安吉	204.6	203.7	198.8
国金华—浙双龙	3 180.2	3 182.7	3 183.5
国绍兴—浙诸北	2 628.4	2 626.8	2 630.0
浙苍岩—浙凤仪	358.9	359.8	357.1
浙瓯海—浙白鹿	778.2	777.8	777.3

#### 5.2 暂态结果对比

BPA 等机电暂态仿真软件可以较准确地模拟交直流系统在对称故障下的动态特性,因此可将 BPA 原始系统和 RSCAD 转换系统在三相对称故障下的仿真结果进行对比分析,以验证本文建模方法的有效性。选取浙江电网内一条主干线路浙苍岩—浙凤仪为例,1 s 时在浙苍岩侧施加三相短路故障,经过 0.1 s 跳开该线路,故障清除,并持续仿真至 10 s,仿真对比结果如图 5 所示,图中母线电压为标么值。

由于 RSCAD 和 BPA 这 2 种软件的核心程序不同,即使是对称故障下的仿真曲线也不可避免地存在一定的偏差。RSCAD 软件对元件模型参数更加严格的要求、更加详细的发电机模型、更加准确的直流输电系统控制器参数和计及波过程的传输线模型等都造成了 RTDS 和 BPA 暂态仿真曲线存在差异。

从图中可以看出,RSCAD 和 BPA 仿真得到的母线电压、主干网架发电机有功出力曲线基本一致,两

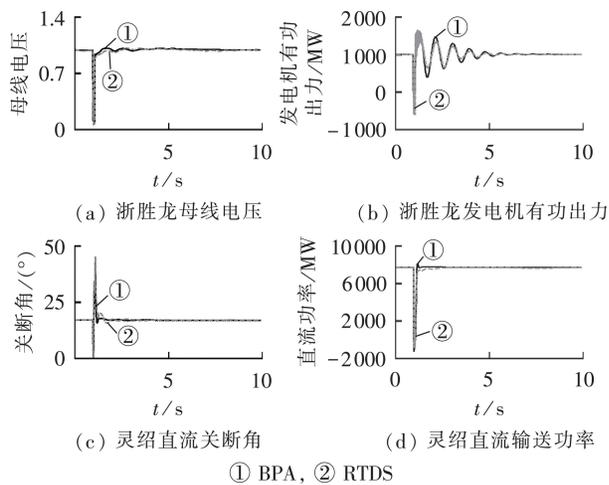


图5 浙苍岩—浙凤仪线路三相短路故障下的仿真结果  
Fig.5 Simulative results of three-phase short circuit fault in branch between ZheCangyan and ZheFengyi

者的振荡频率及幅值较为接近。在故障期间,灵绍直流发生了换相失败,关断角减小至 $0^{\circ}$ ,直流输送功率大幅跌落,在直流系统的响应方面,RSCAD和BPA的仿真结果也基本一致。对比结果显示,上述暂态仿真曲线误差均在可接受的范围内,从而验证了本文建模方法的有效性。

## 6 结论

(1)本文在对RSCAD自带转换接口详细分析的基础上,从电力系统抽象建模、动态等值、数据预处理和数据转换等方面详细介绍了RTDS建模的关键技术,提出了一套将各种常用机电暂态数据文件统一转换为RTDS模型的成套流程方法,并开发了相应的数据移植软件。

(2)相比于手动搭建RTDS模型的方式,应用本文所开发的数据移植软件,实现了基于RTDS的大规模系统快速建模,出错率极低,有效地减少了建模工作量及调试时间。仿真结果表明了本文提出的RTDS快速建模方法的有效性。

(3)机电暂态仿真软件无法准确模拟交直流系统在不对称故障下的动态特性,此时需采用电磁暂态仿真方法。本文提出的建模方法为从机电暂态数据搭建基于RTDS的全电磁暂态仿真模型提供了一种可行的思路,为在RTDS上准确模拟大规模交直流混联电网不对称故障下的动态特性提供了可能。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

[1] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.  
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.

[2] 董新洲, 汤涌, 卜广全, 等. 大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3107-3119.  
DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3119.

[3] 赵腾, 张焰, 叶冠豪, 等. 多回特高压直流分层馈入模式下交直流混联系统的稳态特性分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 157-164.  
ZHAO Teng, ZHANG Yan, YE Guanhao, et al. Steady-state characteristics analysis for AC-DC hybrid system in hierarchical-infeed mode of multi-loop UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 157-164.

[4] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 123.

[5] 董毅峰, 王彦良, 韩佶, 等. 电力系统高效电磁暂态仿真技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2213-2231, 2532.  
DONG Yifeng, WANG Yanliang, HAN Ji, et al. Review of high efficiency digital electromagnetic transient simulation technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2213-2231, 2532.

[6] 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(8): 152-156.  
TAO Hua, XU Jinjin, ZOU Wencong. Model conversion from BPA to PSCAD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 152-156.

[7] NOH H, LEE B, SONG J, et al. Automatic preprocessing scheme for real-time digital simulation[C]//2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting(IAS). Portland, OR, USA: IEEE, 2018: 1-7.

[8] 贾旭东, 李庚银, 赵成勇, 等. 基于RTDS的交直流混合系统实际故障再现分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 54-58.  
JIA Xudong, LI Gengyin, ZHAO Chengyong, et al. Real-time simulation studies of actual faults in AC/DC power system based on RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 54-58.

[9] 卫鹏, 刘建坤, 周前, 等. 基于RTDS特高压直流控保仿真平台的锦苏特高压直流建模及仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 134-139.  
WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Modeling and simulation of UHVDC transmission system from Jinping to Sunan based on the RTDS simulation platform of UHVDC control and protection[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 134-139.

[10] 欧开健, 张树卿, 童陆园, 等. 基于并行计算机/RTDS的混合实时仿真不对称故障接口交互与实现[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 178-185.  
OU Kaijian, ZHANG Shuqing, TONG Luyuan, et al. Interface method and implementation for asymmetric fault simulation on parallel computer/RTDS-based hybrid simulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 178-185.

[11] 杨洋, 肖湘宁, 王昊, 等. 电力系统数字混合仿真技术综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 203-210, 223.  
YANG Yang, XIAO Xiangning, WANG Hao, et al. Review and prospect of power system digital hybrid simulation technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 203-210, 223.

- [12] RAVINDRA H, FARUQUE M O, STEURER M, et al. Conversion of PSS®E models into RSCAD models: lessons learned [C]//40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Dallas, TX, USA: IEEE, 2014: 3743-3749.
- [13] 谭涛亮. 含特高压直流的多馈入直流电网RTDS建模[J]. 电力建设, 2013, 34(9): 55-60.  
TAN Taoliang. Modeling of multi-infeed DC grid including UHVDC based on RTDS[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(9): 55-60.
- [14] 张建设, 韩伟强, 张尧, 等. 含±800 kV云广直流的南方电网交直流系统RTDS仿真研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(1): 32-35.  
ZHANG Jianshe, HAN Weiqiang, ZHANG Yao, et al. RTDS simulation on AC/DC hybrid CSG with the ±800 kV Yun-Guang UHVDC transmission system in operation[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(1): 32-35.
- [15] 张建设, 钟庆, 武志刚, 等. 基于子图同构算法的实时数字仿真系统模块划分[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 53-56, 84.  
ZHANG Jianshe, ZHONG Qing, WU Zhigang, et al. Block division in RTDS system based on subgraph isomorphism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 53-56, 84.
- [16] 康义, 陆韶琦, 陈凌云, 等. 适用于电磁暂态仿真的大电网简化方法及在南方电网的应用[J]. 电力建设, 2017, 38(1): 31-38.  
KANG Yi, LU Shaoqi, CHEN Lingyun, et al. A reduction method of large power systems for electromagnetic transient simu-

lation and its application in China Southern Grid[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(1): 31-38.

- [17] 杨林超, 楼伯良, 徐政, 等. 适用于交直流系统电磁暂态仿真的三序网络动态等值方法及其在华东电网的应用[J]. 电力建设, 2019, 40(7): 57-64.

YANG Linchao, LOU Boliang, XU Zheng, et al. A dynamic equivalent method of three-sequence network for electromagnetic transient simulation of AC/DC system and its application in East China Power Grid[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(7): 57-64.

#### 作者简介:



杨林超

杨林超(1994—),男,福建三明人,硕士研究生,主要研究方向为大规模交直流电力系统分析(E-mail: yanglinchao@zju.edu.cn);

应超楠(1994—),男,浙江台州人,硕士研究生,主要研究方向为大规模交直流电力系统分析(E-mail: 417042242@qq.com);

徐政(1962—),男,浙江海宁人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、风电发电技术与风电场并网技术(E-mail: xuzheng007@zju.edu.cn)。

### Rapid RTDS modeling method of large-scale AC/DC hybrid power grid

YANG Linchao<sup>1</sup>, YING Chaonan<sup>1</sup>, XU Zheng<sup>1</sup>, LOU Boliang<sup>2</sup>, DONG Wei<sup>2</sup>, HUA Wen<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of modeling large-scale AC/DC systems in RTDS (Real Time Digital Simulator), a set of method for converting various commonly used electromechanical transient data files into RTDS models is proposed. The model correspondence of key components is compared, the existing problems in PSS/E-RSCAD data conversion are analyzed, and the key technologies of modeling large-scale AC/DC system in RTDS are introduced in detail from the following aspects: abstract modeling of power system, dynamic equivalence, data preprocessing and data conversion. A set of data transplantation software from the commonly used electromechanical transient software to RTDS is developed and successfully applied to the rapid RTDS modeling of Zhejiang Power Grid. Simulative results under symmetrical faults show that the steady-state and transient characteristics of the system are consistent before and after the conversion, which verifies the validity of the proposed rapid RTDS modeling method.

**Key words:** large-scale AC/DC hybrid power grid; RTDS; rapid modeling; data conversion; electromagnetic transient simulation

# 附录

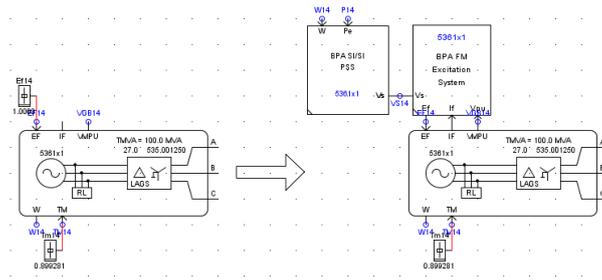


图 A1 发电机添加自定义控制器模型

Fig.A1 Generator adding user-defined controller model

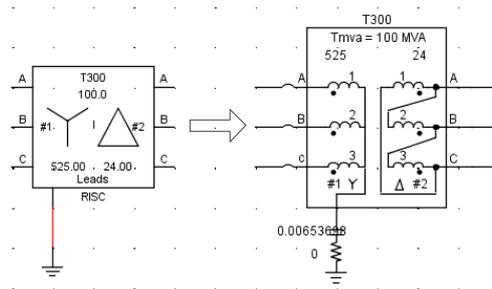


图 A2 变压器模型替换及接地阻抗设置

Fig.A2 Transformer model replacement and grounding impedance setting