

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181231

交直流混联系统机电—电磁暂态混合仿真研究

刘洪波¹, 边 娣¹, 孙 黎¹, 运泽健¹, 李 尧²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 内蒙古呼伦贝尔发电有限公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘要: 大规模高压直流跨区输电、交直流混联使电力系统的动态特性更加复杂, 仿真分析成为研究交直流混联大电网的重要工具。传统电力系统暂态仿真主要分为机电暂态仿真和电磁暂态仿真。前者适用于开关切换不频繁、仿真步长较大的工频元件, 可实现大规模系统仿真。后者适用于开关频繁切换、小步长仿真的电力电子元件, 可实现对小系统的详细建模仿真。通常, 仿真的规模与仿真元件的精细程度之间存在矛盾。为研究直流系统控制模型对混联系统动态特性的影响, 兼顾两种仿真方法的优点, 采用中国电力科学研究院开发的 ADPSS 仿真软件, 分析了计及脉冲发生机制和定电压控制器的仿真差异。并用 IEEE39 节点为基础的扩展系统进行验证, 可为含有大量电力电子器件接入的交直流混合系统提供更高效、更准确的建模方式。

关键词: 高压直流输电; 交直流混联; 定电压控制器; ADPSS

Electromechanical transient-electromagnetic transient hybrid simulation of AC/DC hybrid system

LIU Hongbo¹, BIAN Di¹, SUN Li¹, YUN Zejian¹, LI Yao²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Inner Mongolia Hulunbuir Power Generation Co., Ltd., Hulunbuir 021000, China)

Abstract: Large-scale High Voltage Direct Current (HVDC) cross-region transmission and AC/DC hybrid transmission make the dynamic characteristics of power system more complex. Simulation is a powerful method for studying AC/DC hybrid grids. Electromechanical and electromagnetic transient simulation has been widely used in power system simulation analysis. Electromechanical transient simulation can use large-step to simulate the components of power frequency with infrequent switching, so it can simulate a large scale power system. Electromagnetic transient simulation is suitable for modeling the components' details considering frequent switching in the small scale power system by small-step. Usually it is a contradiction between system's scale and component's precision in the simulation. In order to analyze the influence of HVDC system control model in hybrid power system and combine advantages of two simulation methods, this paper establishes a large-scale AC/DC hybrid system in Advanced Digital Power System Simulator (ADPSS), which is developed by China Electric Power Research Institute. The simulation differences are analyzed considering the detail modeling of the pulse generator and the constant voltage controller. It is verified by the extended system based on IEEE 39-bus. It will provide a more efficient and accurate simulation modern for AC/DC hybrid systems with a large number of power electronic devices.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902000).

Key words: HVDC; AC/DC hybrid system; constant voltage controller; ADPSS

0 引言

在我国, 水能、煤炭资源较丰富, 石油、天然气资源稀缺, 整体表现为 3 个“2/3”态势: 全国可开发水电资源约 2/3 集中在西南地区, 煤炭保有储

量约 2/3 集中在西北地区, 用电负荷约 2/3 集中在东南地区^[1-2]。总体而言, 发电和需求严重错位, 能源资源与负荷需求中心呈反向分布, 决定了发展跨区域、大规模能源和电力流动的高压直流输电技术, 是大规模优化能源的必然选择^[3-4]。

随着国家电网“四交五直”、“五交八直”特高压项目陆续投入运营, 大规模直流跨区传输和全网

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902000)

交直流混联已成为国家电网的典型特征^[5-6]。

受网络结构、电源类型和支撑特性等多重因素影响,交直流混联电网动态过渡过程复杂^[7-10],仿真已成为研究电网之间相互影响的重要研究工具。根据规划,至2020年,国网公司将建成投运共计31回直流输电工程,其中包括18回特高压直流,需实现数十回直流、数千母线交直流混联电网的精细仿真,电网仿真节点规模将突破5万^[11-12]。

电力系统仿真技术经历了上世纪五六十年代以小型模拟设备代替大型原始设备的动态模拟、20世纪八九十年代的部分设备用物理模拟设备,其他大部分设备使用数字模型模拟的数模混合仿真、20世纪90年代后期的全数字仿真技术^[13]。前两者受硬件限制,仿真规模小、试验工作量大、效率低,但是可以模拟认知困难、数学模型难以建立的设备;后者不受硬件限制,受被研究系统规模和复杂性影响较小,使用灵活、扩展方便,成本较低,在电力系统试验研究中得到广泛应用,但是依赖于精确的数学模型和仿真算法。

传统电力系统的数字仿真可分为机电暂态仿真和电磁暂态仿真。机电暂态仿真规模可达数万节点,仿真步长通常为毫秒级,计算速度快;但难以对快速反应的新型电力电子器件进行准确仿真。而电磁暂态仿真虽建模详细,仿真步长为微秒级;但算例搭建复杂,计算量大,规模受限^[14]。兼顾仿真规模和仿真精度,有学者提出了一种从电磁暂态到机电暂态的全过程仿真研究方法,即机电—电磁混合仿真。它既能够对于大型电力电子器件的局部网络进行精确仿真,又可以考虑其相连的交流电网的暂态特性,成为了认知大电网运行机理特性的强有力工具。现有的混合仿真软件和平台主要有电磁暂态与机电暂态混合仿真程序 PSD-PSModel(Power System Department - Power System Model)、实时数字仿真仪 RTDS(Real Time Digital Simulator)、实时仿真器 RT-LAB(Real Time Laboratory)、电力系统全数字实时仿真系统 ADPSS 等。

PSD-PSModel 的使用过程需要常规的潮流、暂态稳定计算和电磁暂态、机电-电磁暂态计算同时参与,过程相对复杂;RTDS 的仿真节点有限,最多为100个,未考虑机电侧故障,在非对称工况的准确性上存在一定不足;RT-LAB 可达到10000个仿真节点,能够处理正序和不平衡网络^[12]。中国电力科学研究院研发的基于高性能服务器机群的全数字仿真系统 ADPSS,仿真最大规模为3000台机、30000个电气节点;在非对称故障的处理能力和机电侧的故障情况考虑等方面,一定程度上弥补了其

他混合仿真软件的不足。该仿真系统由机电暂态仿真子系统和电磁暂态仿真子系统组成,采用基于戴维南/诺顿等值的混合仿真接口将对方系统等值;以机电暂态步长为单位,进行机电暂态网络和电磁暂态网络之间的正、负、零序等值电势、电压、电流等数据交换;实现了大规模复杂交直流电力系统机电暂态和电磁暂态的实时和超实时仿真以及外接物理装置试验。

近年来,多位学者基于 ADPSS 仿真平台开展了研究工作,文献[15-17]通过混合仿真与机电仿真的对比分析,验证了混合仿真的正确性和准确性;文献[18]得出与将交流电网等效为理想电压源加等值阻抗的纯电磁暂态模型相比,混合仿真模型可更好地体现交流系统特性,更贴近实际工程的结论;但是,两种仿真结果均在分析仿真模型造成的本质差异性原因方面有所欠缺,同时,缺少混合仿真与电磁仿真的效率对比说明。

因此,本文为更准确地研究大规模交直流混合系统的运行特性,应用 ADPSS 混合仿真软件,搭建基于 IEEE39 机电标准系统的送受端均为10机39节点的交直流机电仿真模型。对直流系统分别采用 PSASP (Power System Analysis Software Package)机电建模、ETSDAC (Electromagnetic Transient Simulator for DC and AC power system)电磁建模;从两种仿真方式的脉冲发生机制及控制模型方面,理论分析二者的差异,并对对比分析逆变侧故障后两模型的动态差别响应,同时,对混合仿真与电磁仿真的效率加以说明。

1 交直流输电系统模型

为方便分析大电网的交直流混联特性,将直流线的两端等值为两个区域。两区域交直流互联系统等值模型^[19]见图1。

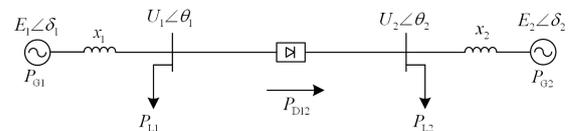


图1 两区域交直流互联系统等值模型

Fig. 1 Two-area AC/DC equivalent model

图中, E_1 、 E_2 和 δ_1 、 δ_2 分别代表等值发电机内电势及功角, U_1 、 U_2 和 θ_1 、 θ_2 为母线电压幅值及相角, x_1 、 x_2 为等值线路电抗, P_{G1} 、 P_{G2} 为等值发电机机械功率, P_{L1} 、 P_{L2} 为负荷功率, P_{D12} 为区域1、2之间的传输功率。

其中高压直流输电包括3个部分:整流侧、直

流输电线路和逆变侧, 基本结构如图 2, 系统参数见表 1。

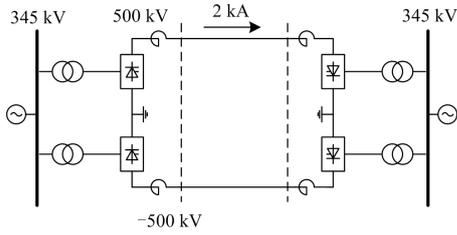


图 2 高压直流输电系统接线图

Fig. 2 Wiring diagram of HVDC system

表 1 直流输电系统参数

Table 1 HVDC transmission system parameters

参数	整流侧	逆变侧
交流系统电压/kV	345	345
直流电压/kV	500	500
直流电流/kA	2	2
触发延迟角 $\alpha/(^\circ)$	15	—
关断角 $\gamma/(^\circ)$	—	17
直流功率/MW	1 000	1 000

2 直流输电控制系统原理

整流侧和逆变侧的控制系统是直流输电系统的核心部分, 对高压直流输电系统的安全、稳定运行具有重要作用。本文直流系统整流侧采用定电流控制, 逆变侧采用定关断角/定电压控制, 均采用典型的 PI(Proportional Integral)控制器结构。整流站通过定电流控制器调节整流侧触发角 α , 保持直流电流 I_d 为定值。逆变站的电流控制器只有在整流站 $\alpha = \alpha_{\min}$ 时, 才起作用, 其他情况由逆变站经定电压控制器和定关断角控制器来输出逆变侧触发角 β 较大值(β 值较大, 不易发生换相失败), 参与 β 控制^[20]。

ETSDAC 直流系统电磁控制模型与 PSASP 直流系统机电控制模型主要差别之一是触发控制器响应的机制。电磁模型控制器通过脉冲发生器产生宽度、幅度和重复频率可调的矩形脉冲来控制 α 、 β , 使系统作出响应, 脉冲信号与时间相对关系上保持严格同步; 通过不同的脉冲信号可实现不同时间尺度电力电子元件的快速、高频开关控制, 完成多时间尺度的仿真。而机电模型受步长限制, 无法详细地模拟脉冲发生机制, 只能通过 α 、 β 的数值信号等效地模拟脉冲的发生, 从而使控制系统得到响应; 因此, 受仿真步长限制, 无法对电力电子器件实现准确控制。直流系统具体控制逻辑如图 3。

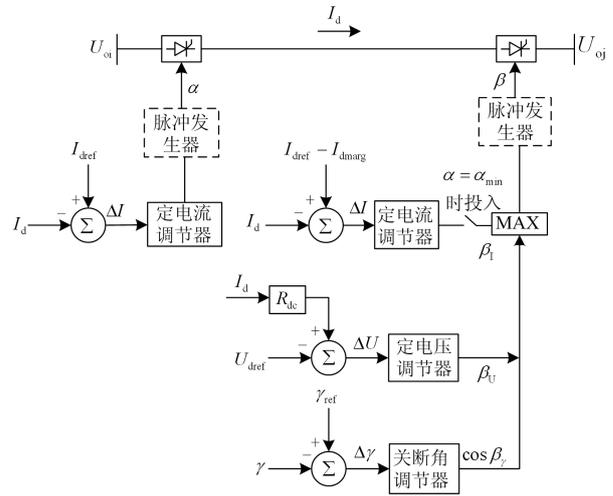


图 3 直流输电系统控制逻辑图

Fig. 3 Control logic diagram of HVDC

逆变站的控制中, 定电压控制方式优于定关断角控制, 通常起主要控制作用。一方面定电压控制的逆变器 $U_d - I_d$ 控制特性曲线与定关断角控制特性曲线相比是一条水平直线, 有利于提高逆变站交流电压的稳定性; 另一方面, 由于采用定电压控制时, 在增大直流电压方向上往往需要留有一定的调节裕量, 因而定电压控制保持的关断角 γ 通常比定关断角控制时要大($\beta = \mu + \gamma$), 换相失败的可能较小^[21-23]。

当逆变侧采用定电压控制时, U_d 可以表示为

$$U_d = U_{oj} \cos \beta + I_d R_{cj} \quad (1)$$

式中: U_{oj} 为逆变侧理想空载直流电压; β 为逆变器触发角; R_{cj} 为两侧换相电阻、接地引线电阻、接地电阻之和。

由式(1)可知, 当交流系统受到干扰时, 致使直流线路 U_{oj} 下降, U_d 将减小。为了确保 U_d 不变, 定电压控制将通过减小触发角 β 以增大 U_d , 提高逆变器的功率因数, 消耗的无功功率减小, 从而有利于换流母线电压的恢复, 防止交流电压进一步下降或阻尼电压振荡。

经机电仿真和电磁仿真的控制模型对比, 不同于机电仿真, 电磁仿真模型定电压控制中额外配有电流偏差引起的控制环节(如图 4)。

正常工况下电流偏差控制并不起作用, 故障发生时, 电流误差控制环节为控制系统特性提供一段斜率较小的直线(图 5 线段 AB), 使定电压控制和定电流控制之间平滑过渡, 以避免控制方式的不确定和来回摆动, 有助于控制系统从电压控制向电流控制平稳切换和电压的快速恢复。

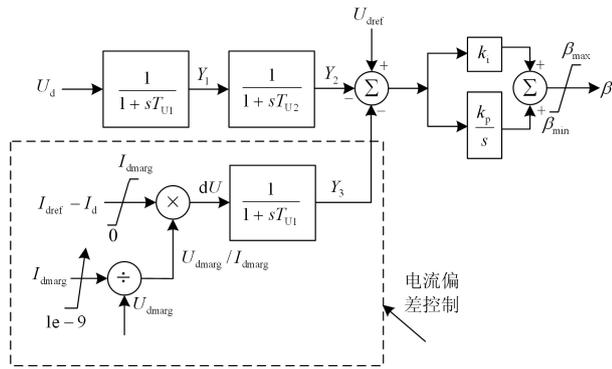


图 4 定电压控制器

Fig. 4 Constant voltage controller

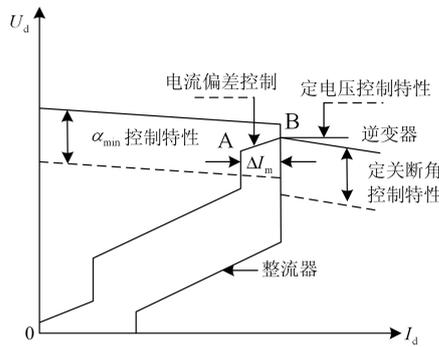


图 5 直流控制系统 U_d-I_d 特性

Fig. 5 HVDC control system U_d-I_d characteristics

上述分析表明，电磁仿真有更高的仿真精度，但仿真计算量大、复杂度增加，对大规模电网的建模存在一定困难。所以本文试图通过机电-电磁混合仿真，兼顾仿真规模与精度进行交直流混合系统分析。

3 混合仿真数据接口技术原理

电力系统机电暂态过程和电磁暂态过程是在模型处理、积分步长、计算模式上不同的物理过程。为了将大规模复杂电力系统的机电暂态仿真和局部系统的电磁暂态仿真集成在一个进程中，需要采用接口技术实现计算信息的随时交换。因此，数据接口技术在混合仿真中至关重要。本文以 ADPSS 混合仿真软件为例，从互联网络的等值和接口数据的交换两个方面介绍其原理。

3.1 混合仿真接口等值

根据所研究问题的不同，接口可以采用不同的处理方法，但基本思路都是采用将对方系统等值的办法。本文所应用的 ADPSS 混合仿真软件采用了一种基于戴维南/诺顿的等值接口方法。

如图 6(a)所示，在混合仿真时，将整个网络划分为机电暂态网络和电磁暂态网络两大部分。对电

磁暂态网络进行仿真时，接入机电暂态网络的戴维南等值电路，如图 6(b)所示；在对机电暂态网络进行仿真时，接入电磁暂态网络的诺顿等值电路，如图 6(c)所示^[24]。

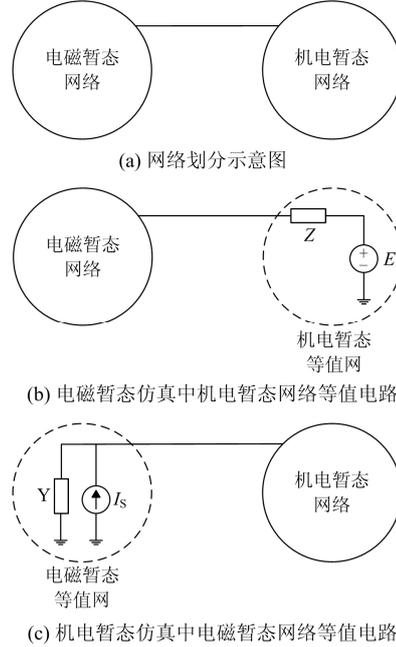


图 6 混合仿真接口示意图

Fig. 6 Hybrid simulation interface diagram

由于机电暂态网络为三序相量网络，而电磁暂态网络为三相瞬时值网络，因此，还需要进行序-相变换，瞬时量-相量变换。

3.2 混合仿真数据交换方式

由于电磁暂态仿真通常描述微秒级的系统快速暂态特性，而机电暂态仿真通常描述毫秒级的系统暂态特性，二者仿真步长相差甚远。混合仿真数据交换时，以机电暂态步长为单位进行并行计算，数据交换时序如图 7 所示(以机电暂态网络仿真步长为 $DT = 0.01\text{ s}$ ，电磁暂态网络仿真步长为 $dt = 0.001\text{ s}$ 为例)。

机电暂态网络和电磁暂态网络在每个机电暂态网络积分时段，即在 $t=0.01\text{ s}, 0.02\text{ s}, 0.03\text{ s}, 0.04\text{ s}, \dots$ 时进行一次数据交换。具体过程如下：首先程序进行初始化，初始化过程中机电暂态网络向电磁暂态网络发送一次数据；初始化完成之后机电暂态网络暂不做计算，电磁暂态网络采用初始的等值电势进行计算，在 $t=0.01\text{ s}$ 时两网络交换数据，其中电磁暂态网络接收的是机电暂态网络在 $t=0\text{ s}$ 时刻的值，机电暂态网络接收的是电磁暂态网络在 $t=0.009\text{ s}$ 时刻的值；数据交换完成后两网络分别开始进行 $t=0.01\text{ s}$ 时刻的计算，以后类推，在 $t = N \times DT$ 时刻，

两网络交换数据, 其中电磁暂态网络接收的是机电暂态网络在 $t-DT$ 时刻的值, 机电暂态网络接收的是电磁暂态网络在 $t-dt$ 时刻的值^[24]。

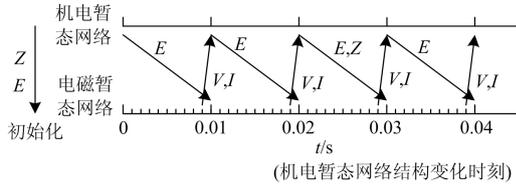


图 7 混合仿真数据交换时序及形式

Fig. 7 Sequence and form of data exchange in hybrid simulation

机电暂态网络和电磁暂态网络的数据交换采用如下的数据形式: 初始化时机电暂态网络向电磁暂态网络发送机电暂态网络的正、负、零序等值阻抗矩阵及正、负、零序等值电势的初始值; 在每一机电暂态网络积分步长, 机电暂态网络向电磁暂态网

络发送边界点的正、负、零序等值电势, 电磁暂态网络向机电暂态网络发送边界点的正、负、零序电压和电流。在故障或操作导致机电暂态网络结构发生变化时, 机电暂态网络还需向电磁暂态网络发送机电暂态网络的正、负、零序等值阻抗矩阵^[24]。

4 算例分析

4.1 算例 1

交直流混合系统是以 IEEE39 机电标准系统为基础的扩展的 39 节点模型(如图 8), 两端交流系统均为 10 台同步发电机, 送端系统有功出力为 8 215 MW, 有功负荷为 6 150 MW, 受端系统有功出力为 6 224 MW, 有功负荷为 8 100 MW; 直流系统额定传输功率为 2 000 MW, 额定运行电压为 ± 500 kV, 额定电流为 2 kA。

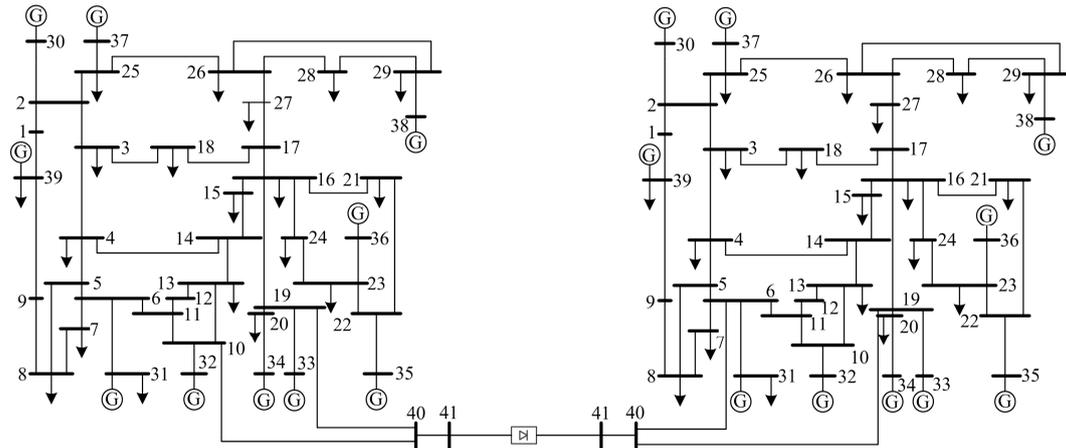
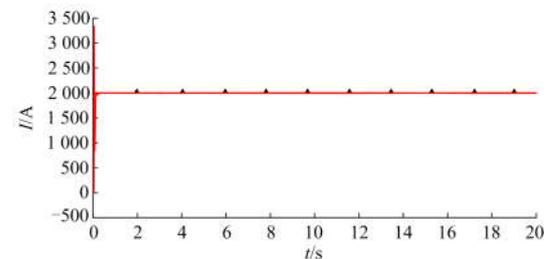
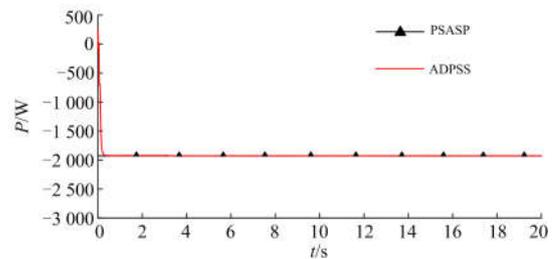
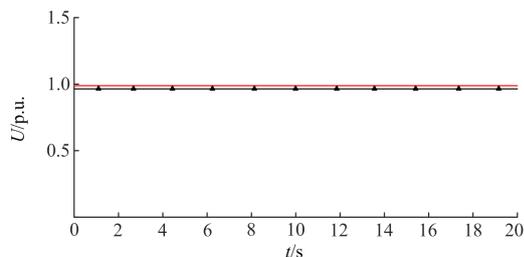


图 8 扩展的 39 节点仿真示意图

Fig. 8 Extended 39-bus simulation diagram

直流系统稳态运行时, 由机电仿真和电磁仿真实动态响应特性对比图(见图 9 所示)可知, 机电仿真与混合仿真在稳态下仿真效果基本一致, 说明混合仿真数据可靠。

为了进一步分析两种仿真的差别, 5 s 时在直流输电逆变侧近端母线 19 处施加三相短路故障, 故障时间 0.1 s, 对比分析 PSASP 机电暂态仿真与 ADPSS 机电—电磁混合仿真结果(见图 10、图 11 所示)。



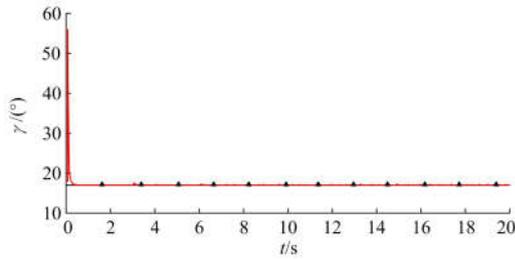


图 9 PSASP 和 ADPSS 模型逆变器稳态响应对比图
Fig. 9 Steady state response of PSASP and ADPSS model on inverter side

由图 10 可清晰地看出：故障时刻，电磁仿真下电压跌落时刻稍晚于机电仿真；逆变器有功功率较机电仿真相比，可以短暂地维持原有传输功率，保持系统稳定。

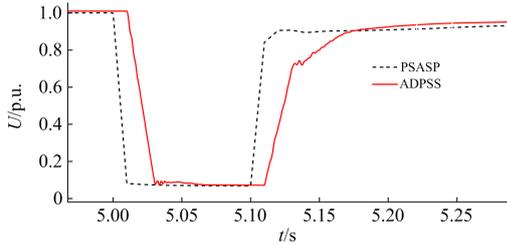


图 10 逆变器母线电压
Fig. 10 Bus voltage on the inverter side

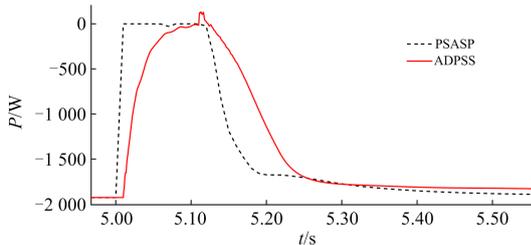


图 11 逆变器有功功率
Fig. 11 Active power on the inverter side

故障期间，由于逆变器母线电压骤然大幅下降至 0.1 p.u.(如图 10)，持续时间 0.1 s，换流器必然发生 5 次换相失败。通过图 12 逆变器关断角的仿真结果，对机电仿真和混合仿真结果统计得出表 2 的换相失败数据。仿真结果表明：混合仿真与电磁暂态仿真曲线基本重合，二者能够取得相似的精确度。换相失败数据表明：对比机电仿真，混合仿真可以更准确地模拟换相失败过程。

通过仿真分析可以得出机电—电磁混合仿真能有与电磁仿真相似的准确度，对于机电仿真它可以更准确地模拟、分析交直流混合系统的运行情况。

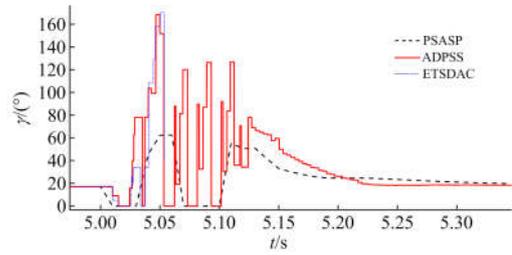


图 12 逆变器关断角 γ
Fig. 12 Extinction angle γ on the inverter side

表 2 直流换相失败数据统计

Table 2 Commutation failure data statistics

仿真方式	仿真步长/ ms	换相失 败次数	换相失败 开始时间/s	换相失败 持续时间/ms
ADPSS	10(机电) 0.05(电磁)	5	5.101 515	9.30
			5.035 20	2.00
			5.053 25	9.00
			5.073 25	8.15
			5.093 25	8.40
PSASP	10	2	5.00	40
			5.07	30

4.2 算例 2

鉴于电磁仿真建模复杂，而且受仿真节点限制，所以采用如图 13 所示的 4 机交直流混合系统进行电磁仿真和混合仿真的步长及效率分析。其中电磁仿真中同步电机均采用 Park 方程描述的交流同步发电机建模，未考虑发电机饱和特性。系统送端有功出力为 2 268 MW，有功负荷为 220 MW，受端有功出力为 560 MW，有功负荷为 2 478 MW；直流系统额定传输功率为 2 000 MW，额定运行电压为 ± 500 kV，额定电流为 2 kA。

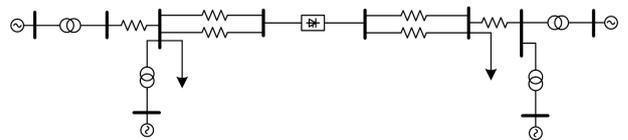


图 13 4 机系统仿真示意图

Fig. 13 4-machine power system simulation diagram

以直流系统逆变器传输功率为例，分别以 1 ms 和 10 μ s 为仿真步长梯度，选取部分具有代表性的仿真结果，分析暂态稳定状态下，本系统机电仿真、电磁仿真和机电—电磁混合仿真的最大有效步长。

如图 14 和图 15 所示，在机电仿真、电磁仿真状态下，当仿真步长达到 31 ms、120 μ s 时，系统失去暂态稳定，因此，对于本系统机电仿真的最大有效步长为 30 ms；电磁仿真的最大有效步长为 110 μ s。

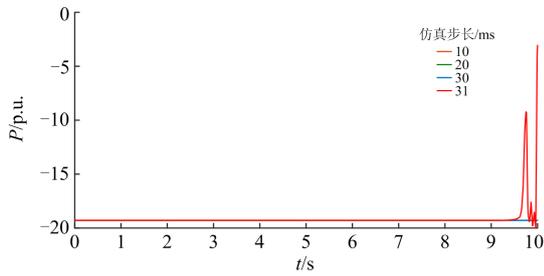


图14 不同步长下机电仿真逆变侧有功功率的暂态响应

Fig. 14 Transient response of PSASP under different step length

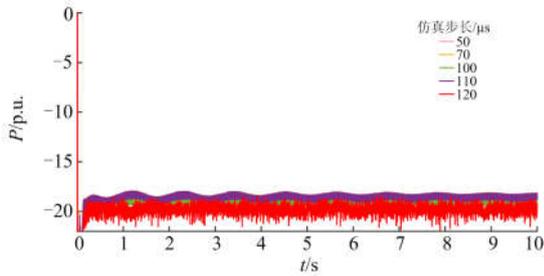


图15 不同步长下电磁仿真逆变侧有功功率的暂态响应

Fig. 15 Transient response of ETSDAC under different step length

选取机电仿真下最大有效步长, 即 30 ms, 进行混合仿真最大有效步长分析。如图 16 所示, 当混合仿真中, 电磁侧的有效步长达到 150 μs 时, 系统失去暂态稳定, 在电磁侧的有效步长达到 140 μs 时, 逆变侧传输功率随时间变化平稳, 即混合仿真电磁侧的最大有效步长为 140 μs 。

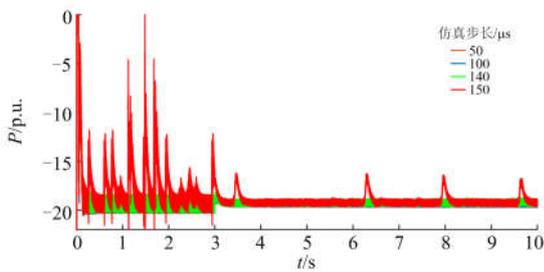


图16 不同步长下混合仿真逆变侧有功功率的暂态响应

Fig. 16 Transient response of ADPSS under different step length

表3为上述仿真过程仿真时间设置为10 s时的系统运算时间表, 表3中所示时间均为对于同一仿真过程3次仿真运算时间的平均值。由此可知, 机电仿真所消耗的时间最少, 选取电磁仿真和混合仿真暂态稳定下50 μs 、100 μs 两个步长, 对比二者的仿真运算时间可知, 混合仿真较电磁仿真效率约高38%。

鉴于计算机的配置是影响运算速度的重要因素, 另附表4对本仿真运算所使用的计算机配置情况加以说明。

表 3 不同仿真方式下的仿真运算时间

Table 3 Simulation time of different simulation modes

仿真方式及步长单位	仿真步长	仿真时间/s
机电仿真/ms	10	0.342
	20	0.295
	30	0.247
	31	0.226
电磁仿真/ μs	50	75.68
	70	56.97
	100	40.86
	110	36.56
	120	33.20
混合仿真/ μs	50	47.78
	100	25.49
	140	19.56
	150	18.34

表 4 计算机硬件配置

Table 4 Hardware configuration of the computer

计算机硬件	参数
处理器	Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU @ 2.50 GHz (4 CPUs) ~ 2.7 GHz
内存	8 GB DDR4-2133
硬盘	256 GB PCIe SSD
显卡	NVIDIA GeForce MX150 独立显卡 2 GB GDDR5 显存
分辨率	1 920 × 1 080 (16:9)
主板	TM1604

通过以上仿真分析可以得出, 机电—电磁混合仿真与电磁仿真相比, 具有建模简单、不受仿真节点限制、仿真效率高等优势, 更适合大电网和实际工程的建模分析需求, 具有更广泛的实用性。

5 结论

1) 直流系统机电仿真与电磁仿真仿真步长的差异, 使机电仿真中无法详细地模拟脉冲发生机制, 进而影响仿真结果。

2) 与直流系统的机电仿真控制器相比, 电磁仿真可以在定电压控制器中配有电流偏差控制, 有助于控制系统在故障发生时, 从电压控制向电流控制平稳切换, 并加强电压的控制效果, 使电压快速

恢复。

3) 机电-电磁混合仿真不仅可以对大规模电网进行建模,而且可以对电力电子器件等进行电磁详细建模;与电磁仿真相比,建模简单,不受仿真节点限制,具有明显的效率优势;可为研究高比例可再生能源接入的交直流混合系统联网运行提供更高效率的仿真平台。

参考文献

- [1] 王春亮, 宋艺航. 中国电力资源供需区域分布与输送状况[J]. 电网清洁与能源, 2015, 31(1): 69-74.
WANG Chunliang, SONG Yihang. Distribution of power resource demand and supply regions and power transmission in China[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 69-74.
- [2] 王丽, 蔡春霞, 王忠臣, 等. 我国能源结构及电力供需简析[J]. 能源环境保护, 2014, 28(2): 1-4, 8.
WANG Li, CAI Chunxia, WANG Zhongchen, et al. China's energy structure and electric power supply and demand analysis[J]. Energy Environmental Protection, 2014, 28(2): 1-4, 8.
- [3] CANIZARES C A, ALVARADO F L. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1): 1-8.
- [4] CANIZARES C A, ALVARADO F L. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1): 1-8.
- [5] 刘振亚, 张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of national power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10.
- [6] 李国栋, 毛承雄, 陆继明, 等. AC/DC 混合输电系统分散协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 37-42.
LI Guodong, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. Decentralized coordinated control of the AC/DC hybrid transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 37-42.
- [7] 邵瑶, 汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 24-30.
SHAO Yao, TANG Yong. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 24-30.
- [8] 汪娟娟, 张尧, 夏成军, 等. 交直流电力系统暂态电压稳定性综述[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 30-34.
WANG Juanjuan, ZHANG Yao, XIA Chengjun, et al. Survey of studies on transient voltage stability of AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 30-34.
- [9] TU J, ZHANG J, BU G, et al. Analysis of the sending-side system instability caused by multiple HVDC commutation failure[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(4): 84-91.
- [10] ADEUYI O D, CHEAH-MANE M, LIANG J, et al. Preventing DC over-voltage in multi-terminal HVDC transmission[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(1): 86-94.
- [11] 田芳, 黄彦浩, 史东宇, 等. 电力系统仿真分析技术的发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2151-2163.
TIAN Fang, HUANG Yanhao, SHI Dongyu, et al. Developing trend of power system simulation and analysis technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2151-2163.
- [12] 熊家祚, 张能, 翟党国, 等. 大规模电力电子设备接入的电力系统混合仿真接口技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 152-161.
XIONG Jiazuo, ZHANG Neng, ZHAI Dangguo, et al. Review of hybrid simulation interface technology for power system of large-scale power electronic equipment access[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 152-161.
- [13] 周孝信, 田芳, 李亚楼, 等. 电力系统并行计算与数字仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [14] BOOTH R R. Power system simulation model based on probability analysis[J]. IEEE Trans. PAS, 1972, 91(1): 62-69.
- [15] 陈跃辉, 昝虎, 张斌, 等. 基于 ADPSS 的机电——电磁混合与机电仿真对比分析[J]. 湖南电力, 2017, 37(3): 1-6.
CHEN Yuehui, GUO Hu, ZHANG Bin, et al. Comparative analysis of electromechanical-electromagnetic hybrid simulation and electromechanical simulation at Hunan Power Grid using ADPSS[J]. Hunan Electric Power, 2017, 37(3): 1-6.
- [16] 张侃君, 陈磊. 基于 ADPSS 的机电-电磁暂态混合仿

- 真[J]. 湖北电力, 2012, 36(1): 14-16.
- ZHANG Kanjun, CHEN Lei. Electromechanical-electromagnetic transient hybrid simulation based on ADPSS[J]. Hunan Electric Power, 2012, 36(1): 14-16.
- [17] 宿国良, 王渝红, 戴寒光, 等. 基于 ADPSS 的德宝直流电磁-机电暂态混合仿真[J]. 电测与仪表, 2016, 53(1): 26-31.
- SU Guoliang, WANG Yuhong, DAI Hanguang, et al. Electromagnetic-electromechanical transient hybrid simulation of Debao HVDC system based on ADPSS[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2016, 53(1): 26-31.
- [18] 蔡普成, 向往, 彭红英, 等. 基于 ADPSS 的含背靠背 MMC-HVDC 系统的交直流电网机电-电磁混合仿真研究[J]. 电网技术, 2014, 42(16): 3888-3894.
- CAI Pucheng, XIANG Wang, PENG Hongying, et al. Hybrid electromechanical-electromagnetic simulation of AC/DC power grid with back-to-back MMC-HVDC system based on ADPSS[J]. Power System Technology, 2014, 42(16): 3888-3894.
- [19] 屠竞哲, 张健, 王建明, 等. 大规模直流异步互联系统受端故障引发送端稳定破坏的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5492-5499.
- TU Jingzhe, ZHANG Jian, WANG Jianming, et al. Mechanism analysis on the sending-side instability caused by the receiving-side contingencies of large-scale HVDC asynchronous interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5492-5499.
- [20] 刘言实. 高压直流输电控制系统模型的研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2017.
- LIU Yanshi. Research on the model of HVDC transmission control system[D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [21] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [22] 刘颖, 戴栋, 汪娟娟, 等. 基于逆变侧定电压控制的 HVDC 系统稳态和暂态响应特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 1-8.
- LIU Ying, DAI Dong, WANG Juanjuan, et al. Transient and steady responses in HVDC system based on constant voltage control at inverter side[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 1-8.
- [23] 黄勇. 两类逆变侧控制策略对系统电压与直流主回路设计影响[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(8): 87-92.
- HUANG Yong. Effect of two inverter 8-side control strategies on system voltage and DC main circuit design[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2018, 30(8): 87-92.
- [24] 李亚楼. 电力系统仿真技术说明手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院, 2017.
-
- 收稿日期: 2018-09-29; 修回日期: 2019-03-01
- 作者简介:
- 刘洪波(1973—), 女, 博士, 副教授, 从事电力系统分析等方面的教学与研究; Email: liuhb@neepu.edu.cn
- 边 娣(1991—), 女, 硕士研究生, 从事新能源与电力系统分析方面的研究。E-mail: coco.bd@foxmail.com
- (编辑 周金梅)