第 41 卷　第 8 期　2017 年 4 月 25 日
DOI：10.7500/AEPS20160726003
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol.41 No.8 Apr.25，2017

现代电力系统大功率数模混合实时仿真实现

曾　杰[1]，冷　凤[2]，陈晓科[1]，陈　迅[1]，李俊林[2]，毛承雄[2]
（1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院，广东省广州市 510080；
2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室（华中科技大学），湖北省武汉市 430074）

摘要：数模混合实时仿真技术兼具数字仿真和物理模拟的优势，将成为未来电力系统仿真分析的有效手段。为了适应现代电力系统的发展需求，提出了通用型大功率数模混合实时仿真系统架构，采用基于理想变压器模型改进接口算法、基于电力电子变换器大功率物理侧接口和抗干扰信号交互系统，实现了 400 V/50 kVA 大功率数模混合实时仿真系统。同时，在所提出的数模混合实时仿真平台上开展了数模混合实时仿真实验，并与全数字仿真实验进行了对比，验证了系统的稳定性和准确性。

关键词：数模混合实时仿真；功率硬件在环；理想变压器模型接口算法；大功率接口

0　引言

随着大电网互联、特高压交直流混合输电、新能源及新设备并网、微网等多种新供电形式的出现，以及各种电力电子设备（静止同步补偿器、可控串联补偿器、静止无功补偿器、统一电能质量调节器、统一潮流控制器等）、新型控制装置和继电保护装置等的应用，电网中的各环节特性及其相互作用机理都发生了深刻变化，对电力系统实时仿真技术提出了更高的要求和挑战。目前采用的实时数字仿真技术和物理模拟仿真技术都有明显的优缺点，难以满足现代电力系统实时仿真的要求。数模混合实时仿真技术结合了实时数字仿真和物理模拟仿真，实现二者优势互补，将成为未来电力系统仿真分析的关键手段。

数模混合实时仿真又称硬件在环（HIL）仿真，根据接口交互量的不同可分为控制硬件在环（CHIL）和功率硬件在环（PHIL）。CHIL 交互低功率的控制信号量，多用于控制和保护系统等闭环测试，目前应用较为成熟，如继保测试与评估[1]、高压直流控制与保护[2-3]等；PHIL 交互大功率的物理功率量，可实现电力系统一次功率在环仿真，但需要四象限功率变换装置、测量元件和信号传输模块等物理装置构成功率接口，并考虑系统的稳定性、准确性、快速性等复杂问题，因此目前技术研发及应用尚存在诸多困难。

文献[4]提出了数模混合仿真“帧-步长时序”，并建立了离散动态模型，对数模混合仿真系统的设计具有指导意义。文献[5]基于传递函数研究了数模混合仿真的稳定性和准确性，并对比了五种主要算法的特性和适用范围。文献[6]建立了含采样频率和延时参数的接口模型，实验验证了延时是影响稳定性的主要因素。文献[7-9]通过配置大功率变换装置，构成了功能丰富的 HIL 测试平台，并应用于电能质量、风电、电机驱动等的评估、设计与测试，但是不涉及系统级数模混合仿真。文献[10-11]采用输电线路模型（TLM），物理侧包含高压直流物理仿真装置及其保护控制系统，将数模混合仿真技术成功应用于高压交直流输电工程，但是系统通用性尚不明确。文献[12]采用理想变压器模型（ITM）算法，提出了基于线性功率放大器的功率接口技术方案，并实现了数字系统与能量物理系统的闭环交互，但是其功率接口容量较小，且数字侧接口模型有待完善。

当前应用较多或较成熟的系统级数模混合实时仿真技术大多采用功率放大器作为功率接口，其容量为几千伏安，随着现代电力系统中新能源并网、微网、电力电子设备等物理模型容量增大，现有的功率放大器将不能满足系统级数模混合仿真需求，尤其是短路容量的要求。目前基于电力电子变换器的大功率数模混合实时仿真技术的研究或实现甚少，本文在提出通用型大功率数模混合实时仿真系统架构的基础上，采用基于 ITM 改进接口算法、基于电力

收稿日期：2016-07-26；修回日期：2016-11-10。
上网日期：2017-01-20。

电子变换器大功率物理侧接口和抗干扰信号交互系统，实现了 400 V/50 kVA 大功率数模混合实时仿真系统，并开展无源和有源物理仿真子系统的数模混合实时仿真实验，与全数字仿真实验对比，验证了系统的稳定性和准确性。

1　数模混合实时仿真原理

数模混合实时仿真将原系统分为数字仿真子系统和物理仿真子系统，考虑通用性和适应有源物理仿真子系统，二者均采用戴维南电路等效。基于替代定理，在数字仿真子系统内，可以不用关注物理仿真子系统的具体结构，而只关心其端口的电流（或电压），并用等效模型代替，直接与数字仿真子系统相连；在物理仿真子系统内也能得到类似的结论，只是物理和数字子系统的等效模型不同，其原理示意图见附录 A 图 A1。数模混合实时仿真按照“帧-步长时序”工作[4]，测量元件获取物理仿真子系统端口信息，经模数转换后，上传至数字仿真子系统，进行全数字实时仿真计算；计算得到新的数字仿真子系统端口信息，经过数模转换后，通过功率变换装置变换为功率量，在物理仿真子系统进行物理仿真，由此完成一次信息交互和混合仿真，此后重复上述过程。

数模混合实时仿真的首要问题是稳定性。原系统被分成两个仿真子系统，二者之间通过接口系统联系和信息交互，因此混合仿真系统与原系统特性不完全相同，即使在原系统稳定的条件下，混合仿真系统也不一定稳定。数模混合实时仿真的稳定性取决于子系统开环稳定性、接口系统稳定性和离散动态模型的绝对稳定性，一般子系统开环稳定性容易实现，接口系统的稳定性主要与接口延时和接口算法有关，离散动态模型是混合仿真一帧变化的离散模型，其绝对稳定性与接口是否解耦和数值仿真步长有关[13-14]。只要分别实现以上三者的稳定性，则数模混合实时仿真就稳定。

2　大功率数模混合实时仿真系统架构

数模混合实时仿真越来越受到关注，对其稳定性理论、接口算法、接口设计和具体应用等方面的研究，为构建电力系统大功率数模混合实时仿真系统提供了重要基础。为适应现代电力系统的发展，提出构建大功率通用性数模混合实时仿真系统，其总体架构如图 1 所示，主要包含四个部分：物理仿真子系统、数字仿真子系统、大功率接口系统和人机界面。

1）物理仿真子系统

物理仿真子系统主要包含电力系统的物理仿真模型和系统，可以是无源网络，也可以是有源网络，同时配有完整的物理仿真信息系统。一般由待仿真或待测试的物理仿真模型、新型电力设备或含新能源设备的微网实验室组成，实现物理模拟仿真。

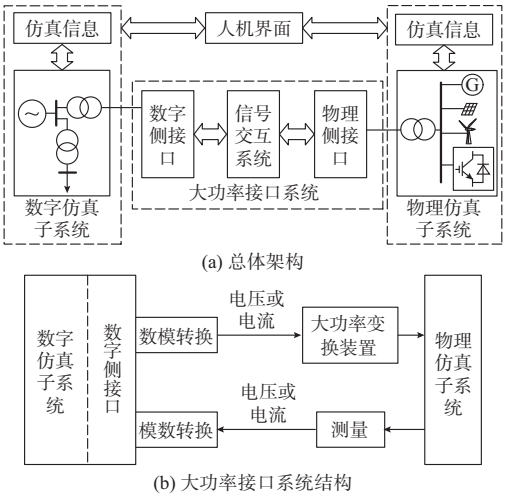

图 1　大功率数模混合实时仿真系统总体架构
Fig.1　Architecture of high power digital-analog hybrid real-time simulation system

2）数字仿真子系统

数字仿真子系统主要包含大部分电力系统模型，如发电机、变压器、线路、负荷等，同时配有完整的数字仿真信息系统。该部分网络通常比较庞大且数学模型比较确定，主要在全数字实时仿真设备（如实时数字仿真器（RTDS）、HyperSim、电力系统全数字实时仿真装置（ADPSS））中搭建虚拟仿真系统，实现实时数字仿真。

3）大功率接口系统

大功率通用性接口系统是连接数字和物理两个子系统的关键，直接决定混合仿真的功能、性能和适用性。接口系统包含数字侧接口、物理侧接口和接口信号交互系统三个部分，由于数字仿真子系统是信号系统，因此只需要将端口电流（或电压）测量后传送至实时数字仿真设备构成受控电流源（或电压源），以实现数字仿真子系统的边界条件。由于物理仿真子系统是能量系统，因此需要由四象限功率变换装置构成受控电压源（或电流源），功率变换装置可以根据容量的大小选择电力电子变换器或者功率放大器，以实现物理仿真子系统的边界条件。接口信号交互系统集成了信号调理、电压电流变换、模数转换等模块，提高了交互传输的抗干扰性和通用性。

4）人机界面

人机界面主要由相关的软硬件组成，实现混合仿真的总体协调控制和远程监视。

3　大功率数模混合实时仿真系统实现

3.1　数字侧接口

数字侧接口与数字仿真子系统相连，对上传的物理仿真子系统端口电压、电流信号进行处理和控制后获得受控源信号，以实现数字仿真子系统的边界条件。ITM 结构最简单，其理论依据是替代定理，普遍适用非线性电路，但算法为有条件稳定，需要改进以扩大稳定范围，兼顾准确性、通用性和易实现性等。考虑到电压源换流器比电流源换流器技术成熟，易于实现，本文选用电压型 ITM。

一般情况下，接口系统稳定性与仿真子系统的等效阻抗有关，文献[15]在数字侧接口的受控电流源两端并联一定数值的电阻 R_x，并对受控电流源的控制信号 i_x 进行相应的补偿，实质是减小了数字仿真子系统等效阻抗，以提高稳定性，但其推导过程仅考虑了纯电阻系统，对通用系统适用性不明确。本文将考虑如图 2 所示的含阻抗的通用系统，为书写简便，图中变量均表示 s 域内变量，受控电流源两端并联阻抗为 Z_X，相应地，受控电流源控制信号修改为 $i_S=i_P-u_P/Z_X$，其中 i_P 和 u_P 分别为物理侧电流和端口电压。接口系统仅考虑等效总延时 Δt 而忽略幅值误差，忽略电感电容的初始储能，以下推导在 s 域内进行。

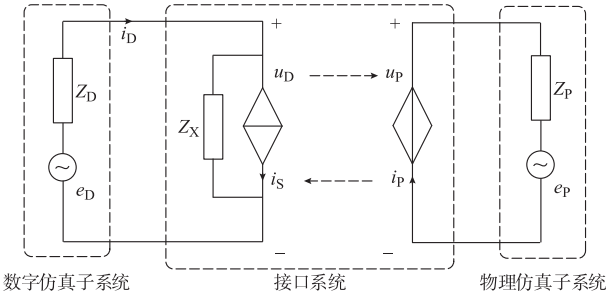

图 2　基于 ITM 的改进接口算法
Fig.2　Improved interface algorithm based on ITM

数字和物理仿真子系统方程如下：

$$\begin{cases} u_D(s)=e_D(s)-i_D(s)Z_D(s) \\ u_P(s)=e_P(s)+i_P(s)Z_P(s) \end{cases} \tag{1}$$

式中：u_D，e_D，i_D，Z_D 分别为数字侧端口电压、等效电源、电流和等效阻抗；e_P 和 Z_P 分别为物理侧等效电源和阻抗。

接口系统信号交互方程如下：

$$\begin{cases} u_P(s)=u_D(s)\mathrm{e}^{-s\Delta t} \\ i_D(s)=i_P(s)-\dfrac{u_P(s)}{Z_X(s)}+\dfrac{u_D(s)}{Z_X(s)} \end{cases} \tag{2}$$

取 e_D 为一个输入量，u_P 为一个输出量，由式(1)和式(2)可得系统的闭环传递函数为：

$$G_c(s)=\frac{u_P(s)}{e_D(s)}=\frac{\dfrac{Z_X(s)}{Z_X(s)+Z_D(s)}\mathrm{e}^{-s\Delta t}}{1+\dfrac{Z_D(s)(Z_X(s)-Z_P(s))}{Z_P(s)(Z_X(s)+Z_D(s))}\mathrm{e}^{-s\Delta t}} \tag{3}$$

由此可得系统开环传递函数为：

$$G_o(s)=\frac{Z_D(s)(Z_X(s)-Z_P(s))}{Z_P(s)(Z_X(s)+Z_D(s))}\mathrm{e}^{-s\Delta t} \tag{4}$$

根据奈奎斯特稳定判据，可以得到稳定性条件为：

$$\left|\frac{Z_D(s)(Z_X(s)-Z_P(s))}{Z_P(s)(Z_X(s)+Z_D(s))}\right|<1 \tag{5}$$

即

$$|Z_P(s)|>\left|\frac{Z_X(s)Z_D(s)}{2Z_D(s)+Z_X(s)}\right| \tag{6}$$

易知未改进的电压型 ITM 算法稳定性条件为 $|Z_P(s)|>|Z_D(s)|$，式(6)表明改进后稳定裕度得以提高。当系统简化为纯电阻网络时，式(6)变为 $R_P>R_XR_D/(2R_D+R_X)$，其中 R_P，R_D，R_X 分别为物理侧等效电阻、数字侧等效电阻和受控电流源两端并联电阻。在接口系统中实现时，Z_X 取为一个电阻 R_X，且 $R_X=|Z_D(\mathrm{j}\omega)|/4$，其中 $|Z_D(\mathrm{j}\omega)|$ 为数字仿真子系统等效阻抗模值，在数字仿真子系统中也易于获得，ω 为角频率。

ITM 算法本身不能进行延时补偿，而在实际的混合仿真过程中，信号传输、滤波调理、模数转换、物理侧接口控制等存在固有延时，将导致混合仿真波形畸变[16]和稳定性问题，有必要对其进行补偿。延时与相位相关联，因此用相位超前环节对延时进行补偿。相位超前环节的传递函数为：

$$G(s)=K\frac{1+\alpha Ts}{1+Ts}\qquad \alpha>1,K>0 \tag{7}$$

式中：T 为时间常数。

其频率响应的幅值增益和相位超前分别为：

$$l(\omega)=K\frac{\sqrt{1+(\alpha T\omega)^2}}{\sqrt{1+(T\omega)^2}} \tag{8}$$

$$\phi(\omega)=\arctan(\alpha T\omega)-\arctan(T\omega) \tag{9}$$

对式(9)求导，由 $\mathrm{d}\phi(\omega)/\mathrm{d}\omega=0$ 可得：

$$\omega=\frac{1}{\sqrt{\alpha}T} \tag{10}$$

式(10)表示最大相位超前所对应的角频率。在基频 f 为 50 Hz 时，使幅值增益为 1，相位超前为 $2\pi f\Delta t$，由式(8)至式(10)可以获得传递函数参数。由于 RTDS 具有强大的数字处理功能，可方便实现各种传递函数模型，因此在 RTDS 内的受控源信号处理中加入相位超前环节，如附录 A 图 A2 所示。

通过实际测量下发指令信号和上传信号之间的相位差获取了系统等效总延时为 116 μs，求得相位超前环节的参数分别为 $K=0.964\ 054$，$\alpha=1.075\ 963$，$T=0.003\ 069$。通过相位超前环节对系统延时进行补偿后可以满足混合仿真系统的实时性和稳定性要求。

3.2　物理侧接口

物理侧接口与物理仿真子系统相连，根据数字侧下发的指令信号，跟踪输出与指令信号波形相同的功率量，以实现物理仿真子系统的边界条件。为实现更大功率接口容量，尤其考虑系统 10 倍短路容量，选择电力电子变换器作为物理侧接口。物理侧接口为三个独立单相连接构成的三相系统，每个单相包含整流器、直流环节和跟随器三部分，为满足大容量要求，整流器采用 M 级三相脉宽调制（PWM）整流器并联，跟随器采用 N 级 H 桥并联，其中 M 和 N 为整数，且由系统容量和开关器件等决定，其结构如附录 A 图 A3 所示。

三相 PWM 整流器采用经典的双闭环直接电流控制方法，在保证直流环节电压恒定下，还能实现输入功率因数可调和三相输入电流正弦化。整流器控制效果可通过一级三相 PWM 整流器的低压实验进行验证，主回路包含交流电源、调压器、一级三相 PWM 整流器和直流电容，设定直流电压 $v_{dc}=30$ V，并实现输入功率因数可调，其结果如附录 A 图 A4 所示，图 A4(b)中电源电压与电流相位差 180°，实现功率倒送回电网。

跟随器要求既能跟踪 50 Hz 稳态正弦波，又能跟踪非周期分量，因此选用简单可靠、稳定性好的比例-积分（PI）控制。由于数字仿真子系统与物理仿真子系统的电量相差一个模拟比系数，RTDS 下发的指令信号需要经过系数 k 调整后，再进行 PI 控制。为减小直流电压 v_{dc} 波动的影响，提高跟踪速度，在 PI 控制的基础上增加了参考信号 v^* 和直流电压 v_{dc} 前馈环节，其控制框图如图 3 所示。

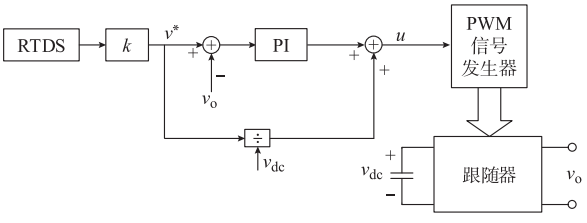

图 3　跟随器控制策略
Fig.3　Control strategy of follower

同样的，跟随器的控制策略通过低压实验进行了验证，主回路包含交流电源、调压器、一级三相 PWM 整流器、直流电容、两级并联 H 桥和电阻负载。附录 A 图 A5(a)和(b)分别为直流电压为 54 V 和 74 V 的实验结果，当直流电压变化时，跟随器输出电压 v_o 可较准确跟踪参考电压 v^*，需要指出的是，在低压实验时，并没有引入 RTDS 下发的指令信号，而是用数字信号处理器控制板产生的参考电压 v^* 作为指令信号。

由于跟随器采用 N 级并联结构，其控制脉冲序列可采用载波移相正弦脉宽调制，成倍提高等效开关频率，从而提高跟随输出的动态响应速度。

3.3　信号交互系统

信号交互系统完成数字侧与物理侧接口信号交互和长距离传输，集成信号调理、电压电流转换、模数转换等模块，可提高交互传输的抗干扰性和通用性。信号交互系统原理如附录 A 图 A6 所示，包含数字侧调理、模数转换、信号传输线、物理侧调理、测量元件等，可分为下发和上传两个通道，每个通道可传输多路电压、电流信号。

信号交互可采用电压形式和电流形式进行传输，电流形式传输受传输线分布电阻、噪声等的影响更小，适合长距离传输。比例转换和滤波调理模块对信号进行幅值校正、低通滤波和振荡抑制。

4　数模混合实时仿真实验

为了验证大功率数模混合仿真系统的稳定性和准确性，在 400 V/50 kVA 数模混合实时仿真平台上开展了数模混合实时仿真实验，平台以 RTDS 作为全数字实时仿真设备，具有 500 kVA 短路容量。分别考虑无源和有源物理仿真子系统，开展相关实验。

1）无源物理仿真子系统

基于某地区主干网络运行方式数据建立数模混合实时仿真模型，其中数字仿真子系统在 RTDS 中建模，其结构如附录 B 图 B1 所示，数字侧 D 点与数字侧接口相连，K_D 为数字侧故障设置点；无源物理仿真子系统采用 400 V 物理模型模拟 110 kV 实际网络，其结构如附录 B 图 B2 所示，但不含等值系统 G，负载为 2 kW 阻性负载和 1 kVA 感性负载，物理侧 P 点与物理侧接口相连。

数字侧 D 点与物理侧 P 点之间通过该大功率接口系统相连，构成数模混合实时仿真系统，在 K_D 处可设置不同的短路故障，进行数模混合仿真。为验证接口系统跟踪指令信号的准确性，以数字侧 K_D 点设置单相（A 相）接地短路故障为例，对比了 D 点和 P 点（即接口系统两侧）的三相电压和三相电流，D 点与 P 点的电量之差作为误差曲线 ΔU 和

ΔI，分别如附录 B 图 B3 和图 B4 所示，在稳态和故障期间 D 点和 P 点的波形基本重合，表明接口系统可较好地跟踪指令信号。

为进一步验证混合仿真的结果，在 RTDS 建立全部数字和物理仿真子系统模型，设置相同故障，进行全数字仿真，并将数模混合实时仿真和全数字仿真结果进行对比。以数字侧 K_D 点设置单相(A 相)接地短路故障为例，分别进行数模混合实时仿真和全数字仿真，物理侧 P 点的单相(A 相)电压 U 和电流 I 波形对比如图 4 所示，其中误差曲线 ΔU 和 ΔI 分别为全数字仿真与数模混合仿真的电压、电流之差。

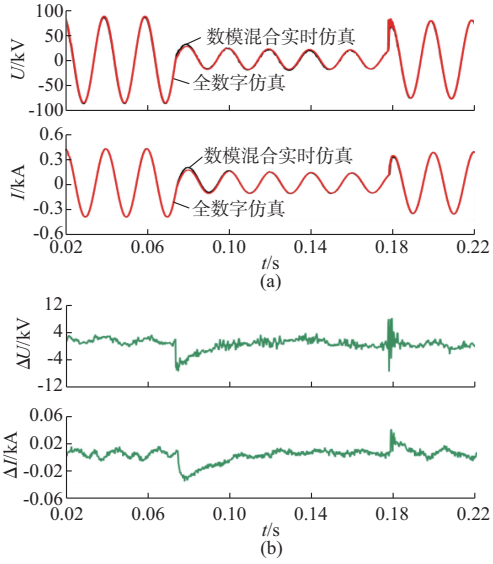

图 4　单相接地故障电压和电流波形对比(无源)
Fig.4　Comparison of voltage and current waveforms in single phase to ground fault (passive)

2)有源物理仿真子系统

数字仿真子系统同附录 B 图 B1，有源物理仿真子系统如附录 B 图 B2 所示，包含等值系统 G，仍采用 400 V 物理模型模拟 110 kV 实际网络，等值系统用一台 380 V 模拟发电机进行模拟。

同样的，以数字侧 K_D 点设置单相(A 相)接地短路故障为例，分别进行数模混合实时仿真和全数字仿真，物理侧 P 点的单相(A 相)电压、电流波形对比如图 5 所示。

从数模混合实时仿真和全数字仿真波形对比可知，对于稳态过程，二者波形基本重合，表明数模混合实时仿真准确性较高，波形幅值和相位误差很小；对于暂态过程，幅值误差较小，无源网络时相位误差不超过 1°(即延时不超过 50 μs)，有源网络时相位误差不超过 2°(即延时不超过 100 μs)，这是由于有源网络在 RTDS 内建模与物理模型相差较大，故有源网络结果比无源网络误差大。该数模混合实时仿真系统具有较高的准确性和稳定性，满足仿真应用要求。

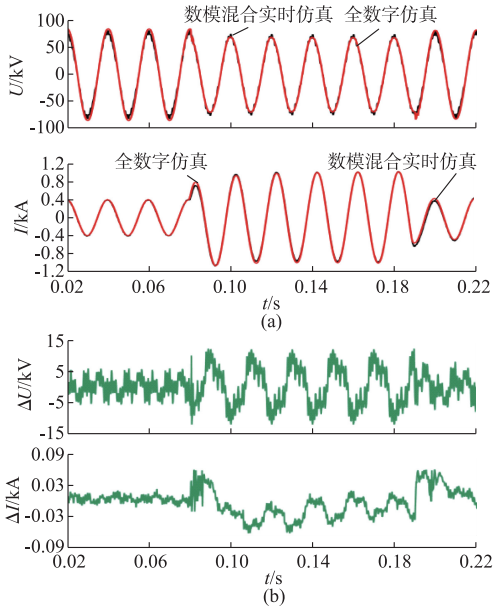

图 5　单相接地故障电压和电流波形对比(有源)
Fig.5　Comparison of voltage and current waveforms in single phase to ground fault (active)

5　结语

为满足现代电力系统更高的仿真要求，提出通用型大功率数模混合实时仿真系统架构，采用基于 ITM 改进接口算法、基于电力电子变换器大功率物理侧接口和抗干扰信号交互系统，实现了 400 V/50 kVA 大功率数模混合实时仿真系统，并在该平台上分别对无源和有源物理仿真子系统开展了数模混合实时仿真实验，与全数字仿真结果对比，验证了系统的稳定性和准确性。该系统的通用性主要体现在三方面：接口算法采用电压型 ITM 算法，简单可靠，理论上可在任一节点解耦，不存在接口参数依赖于原系统结构和特性的问题；物理仿真子系统可为无源和有源网络，允许物理仿真子系统与电网间能量双向流动；接口信号交互系统集成信号处理的一般环节和模块，可在现场复杂环境下实现抗干扰远距离信号传输。该系统有望为未来电力系统故障分析、新能源研究、微网及能源互联网发展、电网新技术研究等提供强有力的平台和手段。

ITM 算法的另一种形式是电流源型，具有与电压源型 ITM 算法相反的稳定条件和不同的适用场合，对应的物理侧接口为电流源型变换器，其控制和实现难度较大，需要进一步研究。由于没有原系统

的正确响应作为对比，数模混合实时仿真准度性评估比较困难，有必要研究有效的准确性评估方法，以进一步提升系统性能。

附录见本刊网络版（http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx）。

参考文献

[1] SHAM M V, VITTAL K P. Development of DSP based high speed numerical distance relay and its evaluation using hardware in loop power system simulator[C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, December 1-3, 2011, Kerala, India: 37-42.

[2] 郑三立，雷宪章，RETZMANN D，等.电力系统计算机及实时数字仿真(下)——电力系统实时数字仿真[J].电力系统自动化，2001，25(14)：40-44.
ZHENG Sanli, LEI Xianzhang, RETZMANN D, et al. Computer and real-time digital simulation of power systems: Part two　real-time digital simulation of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 40-44.

[3] 李函，韩英铎，王仲鸿，等.利用混合实时仿真器测试HVDC控制与保护[J].电力系统自动化，2000，24(17)：28-31.
LI Han, HAN Yingduo, WANG Zhonghong, et al. Verification of HVDC controller using an advanced hybrid real-time simulator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(17): 28-31.

[4] 叶骏，闵勇，闵睿，等.基于时序分析的数字物理混合仿真技术：(一)时序分析与离散动态模型[J].电力系统自动化，2012，36(13)：20-25.
YE Jun, MIN Yong, MIN Rui, et al. Hardware-in-the-loop simulation technology based on timing analysis: Part one timing analysis and discrete dynamic model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 20-25.

[5] REN W, STEURER M, BALDWIN T L. Improve the stability and the accuracy of power hardware-in-the-loop simulation by selecting appropriate interface algorithms[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2008, 44(4): 1286-1294.

[6] AYASUN S, FISCHL R, VALLIEU S, et al. Modeling and stability analysis of a simulation—stimulation interface for hardware-in-the-loop applications [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2007, 15(6): 734-746.

[7] LIU Y, STEURER M, RIBEIRO P. A novel approach to power quality assessment: real time hardware-in-the-loop test bed[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1200-1201.

[8] LI H, STEURER M, SHI K L, et al. Development of a unified design, test, and research platform for wind energy systems based on hardware-in-the-loop real-time simulation[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1144-1151.

[9] STEURER M, EDRINGTON C, SLODERBECK M, et al. A megawatt-scale power hardware-in-the-loop simulation setup for motor drives[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2010, 57(4): 1254-1260.

[10] 胡涛，朱艺颖，张星，等.全数字实时仿真装置与物理仿真装置的功率连接技术[J].电网技术，2010，34(1)：51-55.
HU Tao, ZHU Yiying, ZHANG Xing, et al. Power connection technology for full-digital real-time simulator and analogue simulator[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 51-55.

[11] 董鹏，朱艺颖，况虎，等.特高压电网建设初期“三华”电网数模混合实时仿真试验研究[J].电网技术，2012，36(1)：18-25.
DONG Peng, ZHU Yiying, GUO Hu, et al. Digital-analog hybrid real-time simulation for primary stage of North China-Central China-East China UHV power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 18-25.

[12] 蔡海青，郭琦，张建设，等.基于RTDS的数字与物理混合仿真接口设计与实现[J].南方电网技术，2015，9(11)：52-57.
CAI Haiqing, GUO Qi, ZHANG Jianshe, et al. Design and implementation of digital physical hybrid simulation interface based on RTDS[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(11): 52-57.

[13] 叶骏，闵勇，闵睿，等.基于时序分析的数字物理混合仿真技术：(三)稳定性分析[J].电力系统自动化，2012，36(15)：14-18.
YE Jun, MIN Yong, MIN Rui, et al. Hardware-in-the-loop simulation technology based on timing analysis: Part three stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 14-18.

[14] 陈磊，闵勇，叶骏，等.数字物理混合仿真系统的建模及理论分析：(二)接口、稳定性与相移分析[J].电力系统自动化，2009，33(24)：26-29.
CHEN Lei, MIN Yong, YE Jun, et al. Modeling and theoretical analysis of hardware-in-the-loop simulation: Part two　analysis of interface, stability and phase shift[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 26-29.

[15] 梅成林，张立冬，邵稳，等.数—模综合仿真接口算法分析[J].广东电力，2012，25(7)：22-26.
MEI Chenglin, ZHANG Lidong, SHAO Wen, et al. Analysis of digital-analogue integrated simulation interface algorithm [J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(7): 22-26.

[16] 胡昱宙，张沛超，方陈，等.功率连接型数字物理混合仿真系统：(一)接口算法特性[J].电力系统自动化，2013，37(7)：36-41.
HU Yuzhou, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Power hardware-in-the-loop simulation system: Part one characteristics of interface algorithms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 36-41.

曾　杰(1979—)，男，博士，主要研究方向：电力系统分析和可再生能源。E-mail: zjhust@gmail.com

冷　凤(1991—)，男，通信作者，硕士研究生，主要研究方向：大功率电力电子技术在电力系统中应用。E-mail: lengfeng@hust.edu.cn

陈晓科(1978—)，男，高级工程师，主要研究方向：电力系统分析与电网规划。E-mail: 13924284282@163.com

（编辑　万志超）

（下转第178页　continued on page 178）

(上接第 171 页　continued from page 171)

Implementation of High Power Digital-Analog Hybrid Real-time Simulation for Modern Power Systems

ZENG Jie[1], *LENG Feng*[2], *CHEN Xiaoke*[1], *CHEN Xun*[1], *LI Junlin*[2], *MAO Chengxiong*[2]

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co. Ltd., Guangzhou 510080, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and
Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: Digital-analog hybrid simulation technology combining the advantages of real-time digital simulation and physical simulation will be effective for simulation and analysis in future power systems. In order to meet the development need of modern power systems, this paper proposes a architecture of the universal high power digital-analog hybrid simulation system. And it adopts the improved interface algorithm based on ideal transformer model (ITM), the high power interface on the physical side based on power electronic converter and the anti-interference signal interface system, and achieves the 400 V/50 kVA high power digital-analog hybrid real-time simulation system. Digital-analog hybrid simulation experiments have been carried out on the digital-analog hybrid simulation platform, by comparing the results of real-time digital simulation, which verifies the stability and accuracy of the system.

Key words: digital-analog hybrid real-time simulation; power hardware in-the-loop (PHIL); interface algorithm based on ideal transformer model (ITM); high power interface