

# 数字物理混合仿真系统的建模及理论分析

## (一) 系统结构与模型

陈 磊, 闵 勇, 叶 骏, 李国杰, 梁 旭

(清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京市 100084)

**摘要:** 数字物理混合仿真结合了数字仿真和物理模拟的优点, 是仿真发展的新方向。接口算法是混合仿真中的关键问题。分析了混合仿真系统的结构, 对串行时序和并行时序进行了比较。综述了已有的 5 种接口方法, 并推导出其中 4 种方法的统一形式。最后建立了混合仿真系统的离散动态模型, 该模型为混合仿真系统的理论分析提供了基础。

**关键词:** 数字物理混合仿真; 接口算法; 理想变压器模型; 阻尼阻抗法

**中图分类号:** TM743

## 0 引言

电力系统仿真是研究电网动态行为、保证电网安全稳定以及优化运行的重要手段, 从方法上可以分为物理模拟与数字仿真两种。物理模拟利用实际电力系统采用的系统元件, 经过等值折算, 对实际电力系统进行模拟和仿真, 不需要确定设备的数学模型, 但它存在建设投资巨大、参数更改困难、模拟规模有限等缺点, 无法模拟大规模电网的运行和试验。应用数学模型来研究电力系统物理过程的仿真属于数字仿真。该方法可实现大规模电网的仿真和计算, 广泛用于科学研究和实际运行中<sup>[1]</sup>, 但仿真结果受模型、参数、算法的影响较大, 无法完成对模型、参数和算法的实际校验, 与真实电力系统运行存在的差距需要凭经验或故障录波结果进行反复修正。数字仿真严重依赖设备的数学模型, 建模的好坏直接影响结果的精度和可信性。

结合数字仿真和物理模拟的混合仿真(又称硬件在环仿真(hardware-in-the-loop simulation))能够兼顾以上两种方法的优点, 用物理装置模拟建模效果不理想或模型未知的元件, 而用数字仿真模拟大规模的电力系统, 是电力系统仿真领域的一个新的发展思路。最早的混合仿真主要用于研究控制和保护装置的特性, 物理侧采用实际的控制和保护装置, 数字侧用数字仿真模拟电网的动态<sup>[2-5]</sup>。电力一次设备的混合仿真, 要将功率设备放在物理侧作为仿真对象<sup>[6-11]</sup>, 接口处有功率的流动, 接口装置的设

计与实现是其中的关键环节。文献[10-12]中采用四象限变压变频变换器作为接口设备, 利用数字物理混合仿真对电能质量、风电机组、舰船用推进电机进行研究。

接口算法是混合仿真中的关键问题<sup>[2,9,13-15]</sup>。文献[2]采用电压预测技术提高高压直流(HVDC)混合实时仿真系统接口的稳定性。文献[9]对多种接口方案进行了研究并对输电线解耦方案进行了改进。文献[13]对物理侧动态采用一阶近似, 提出了一种新的接口算法。文献[14]建立了一个一阶电路的混合仿真系统的离散动态模型, 从理论上对接口算法的稳定性进行了分析。文献[15]利用传递函数, 研究比较了 5 种不同接口算法的稳定性。但从目前的研究现状看, 对接口算法的研究还不够系统, 而且以仿真实验研究为主, 理论上的研究还有待进一步深入。

本文首先分析混合仿真系统的结构和时序, 在综述现有接口算法的基础上, 推导了其中 4 种接口算法的统一形式, 然后基于文献[14]中的建模方法, 在一个简单电路中建立混合仿真系统的模型, 以该模型为基础进行后续的理论分析。

## 1 混合仿真系统结构

以图 1 所示的典型电路为研究对象。该电路虽然简单, 但方便进行接口算法的理论分析, 被广泛采用<sup>[13-15]</sup>。在虚线处将电路分解, 左边数字侧采用数字仿真, 右边物理侧采用实际的物理装置模拟。最直接的接口方案如图 2 所示, 文献[15]中称其为理想变压器模型法。数字侧用受控电流源等效物理侧电路, 电流源电流等于测量得到的物理侧电流  $i$ ; 物理侧用受控电压源等效数字侧电路, 电压源电压等

收稿日期: 2009-07-05; 修回日期: 2009-08-04。

国家电网公司科技项目(电力一次系统数字物理动态交互混合仿真的研究)。

于数字侧计算得到的电压  $\hat{u}$ 。本文中,上角带符号“ $\hat{\cdot}$ ”的变量表示数字侧的离散变量。

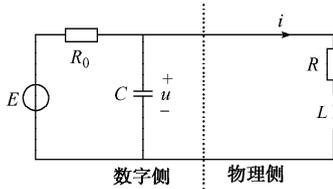


图 1 典型电路  
Fig. 1 A typical circuit

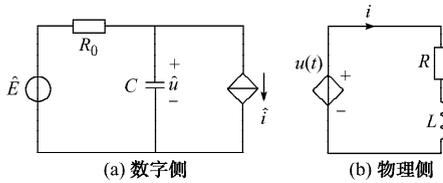


图 2 理想变压器模型接口  
Fig. 2 Ideal transformer model interface

混合仿真系统结构示意图如图 3 所示。



图 3 混合仿真系统结构  
Fig. 3 Structure of hybrid simulation system

假设接口无误差,而且 D/A 转换和信号放大环节具有零阶保持器的特性。采用串行时序<sup>[14]</sup>时,混合仿真步骤如下:

步骤 1:  $t_k$  时刻,进行测量和 A/D 转换,测量物理侧的电气量并转换为数字信号;在图 2 所示接口方案中,即实现  $\hat{i}_k = i(t_k)$ 。

步骤 2: 数字仿真程序读取测量值,并进行数字仿真,得到下一步数字侧的状态变量以及物理侧接口电路的输出,即得到  $\hat{u}_{k+1}$ 。

步骤 3: 经过 D/A 转换和信号放大,  $t_k + \tau$  时刻物理侧接口电路输出发生变化,  $\tau$  为接口的总延时,此时,  $u(t_k + \tau) = \hat{u}_{k+1}$ 。

步骤 4:  $t_k + h$  时刻,再次从步骤 1 开始,重复上面的步骤,进行下一步的混合仿真,  $h$  为混合仿真的步长。

接口总延时  $\tau$  主要由以下几个部分组成: 测量及 A/D 转换的延时、数据通信延时、数字仿真耗时、D/A 转换及信号放大的延时。延时  $\tau$  由系统的硬件性能和数字仿真算法决定,为不可控量,可估计出  $\tau$  的范围。混合仿真的步长  $h$  为可控量,可进行调整以得到最优的仿真效果。

此外,还有一种并行时序<sup>[9]</sup>,与上面的串行时序

相比,两者物理侧接口电路输出的时序存在区别,如图 4(b)所示,  $t_k$  时刻同时启动 A/D 转换和 D/A 转换,随后同时进行下面 2 个步骤。

步骤 1: 后向通道(物理侧到数字侧),A/D 转换后的信号送入数字侧,进行数字仿真,得到下一步的输出  $\hat{u}_{k+1}$ 。

步骤 2: 前向通道(数字侧到物理侧),上一步数字仿真结果经 D/A 转换和信号放大后输出,物理侧接口电路输出在  $t_k + \tau'$  时刻发生变化,变为  $\hat{u}_k$ ,  $\tau'$  仅是前向通道的总延时。

并行时序的优点是前向通道和后向通道同时进行,一个步长内只包括后向通道延时和数字仿真耗时,  $h$  可以取较小的值。实际上,  $\hat{u}_{k+1}$  是在  $t_k + h + \tau'$  时刻在物理侧的输出,令  $\tau = h + \tau'$ ,并行时序和串行时序可以统一起来进行建模和分析,后面会进行具体的分析。

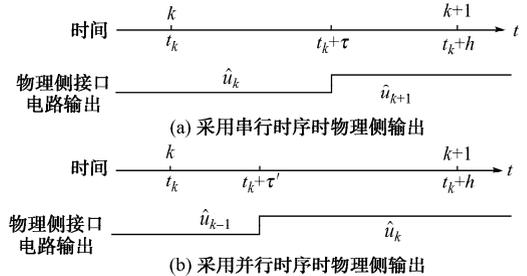


图 4 接口电路时序  
Fig. 4 Time series of interface circuit

## 2 接口算法

本节介绍文献[15]中的 5 种接口算法,分别为: 理想变压器模型(ideal transformer model, ITM)法、时变一阶近似(time-variant first-order approximation, TFA)法、传输线模型(transmission line model, TLM)法、阻尼阻抗(damping impedance method, DIM)法、部分电路复制(partial circuit duplication, PCD)法。

### 2.1 ITM 法

ITM 法接口如图 2 所示,接口原理在第 1 节中进行了说明,此处不再重复。

### 2.2 TFA 法

TFA 法假设物理侧动态能够用一阶线性系统近似。将物理侧电路动态近似为:

$$\frac{di}{dt} = ai + bu \quad (1)$$

式中:  $a, b$  可根据电路数据计算得到并在仿真中不断更新。

利用梯形积分法,推导可得:

$$i(t_k + h) = \frac{1}{1 - \frac{ah}{2}} \left[ \frac{bh}{2} u(t_k + h) + \left( 1 + \frac{ah}{2} \right) i(t_k) + \frac{bh}{2} u(t_k) \right] \quad (2)$$

TFA 接口算法如图 5 所示,物理侧受控电压源和 ITM 法相同,数字侧用诺顿等值表示物理侧电路,根据式(2)得诺顿等值的参数如下:

$$\begin{cases} G_{eq,k} = \frac{1}{1 - \frac{ah}{2}} \frac{bh}{2} \\ \hat{i}_{eq,k} = \frac{1}{1 - \frac{ah}{2}} \left[ \left( 1 + \frac{ah}{2} \right) i(t_k) + \frac{bh}{2} u(t_k) \right] \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)前推 2 步并整理得:

$$\begin{bmatrix} i(t_k) + i(t_k - h) & u(t_k) + u(t_k - h) \\ i(t_k - h) + i(t_k - 2h) & u(t_k - h) + u(t_k - 2h) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{ah}{2} \\ \frac{bh}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(t_k) - i(t_k - h) \\ i(t_k - h) - i(t_k - 2h) \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)即可计算出  $a, b$ 。

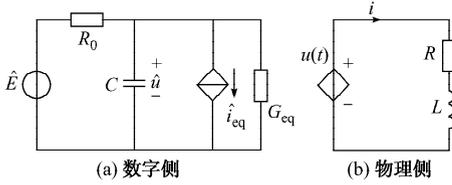


图 5 时变一阶近似接口

Fig. 5 Time-variant first-order approximation interface

### 2.3 TLM 法

TLM 法在传输线处将系统解耦,将线路用 Bergeron 模型表示,如图 6 所示。

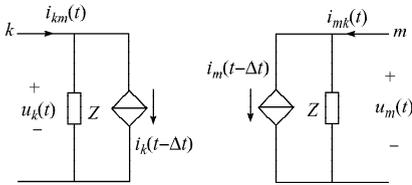


图 6 传输线 Bergeron 等值模型

Fig. 6 Bergeron equivalence model of a line

采用 TLM 接口时,在线路  $L_{km}$  处解耦,一侧用数字仿真,另一侧用物理模拟,在线路两端都采用图 6 所示的 Bergeron 等值,  $Z$  为线路波阻抗,  $\Delta t$  为电磁波从线路一端传到另一端的时间。详细情况可参见文献[9, 15]。

在 TLM 法中,线路行波传输时间  $\Delta t$  可用来补偿接口延时,接口算法稳定性好。但该方法必须在线路处解耦,而且物理侧要增加电阻,电阻参数与线

路有关,实现不够灵活,而且在高功率的混合仿真中,物理侧的电阻要消耗大量能量,有时很难实现。

### 2.4 DIM 法

DIM 法接口如图 7 所示,原电路中连接阻抗  $R_c$  在数字侧和物理侧被重复,并增加了一个阻尼阻抗  $R_d$ 。物理侧受控电压源输出为数字侧仿真得到的电压  $\hat{u}$ , 数字侧受控电流源  $\hat{i}_k = i(t_k)$ , 受控电压源  $\hat{v}_k = v(t_k)$ ,  $v(t_k)$  为图 7(b) 中所示的电压。

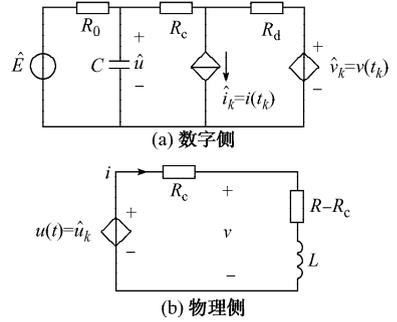


图 7 阻尼阻抗法接口

Fig. 7 Damping impedance method interface

### 2.5 PCD 法

DIM 法中,当  $R_d = 0$  时, DIM 法即为 PCD 法。因此, PCD 法可以看做是 DIM 法的一种特殊形式。

## 3 ITM 法、TFA 法、DIM 法接口的统一形式

TLM 法接口由于实现不方便,本文对其暂不加以研究,而 PCD 法是 DIM 法的一种特殊形式,因此本节分析 ITM、TFA 和 DIM 这 3 种接口算法。

ITM 法和 TFA 法的形式可以统一,数字侧都是用诺顿等值表示物理侧电路。对 DIM 法进行化简,数字侧电容右边的部分是物理侧电路的等值,将其化简为诺顿等值的形式,等值电流为  $(R_d i(t_k) - v(t_k)) / (R_c + R_d)$ , 等值导纳为  $1 / (R_c + R_d)$ , 同时注意到  $v(t_k) = u(t_k) - R_c i(t_k)$ , 则诺顿等值电路参数如下:

$$\begin{cases} G_{eq,k} = \frac{1}{R_c + R_d} \\ \hat{i}_{eq,k} = i(t_k) - \frac{1}{R_c + R_d} u(t_k) \end{cases} \quad (5)$$

通过上面的分析, ITM 法接口、TFA 法接口和 DIM 法接口可以统一表示成图 5 所示的形式,在物理侧用受控电压源等效数字侧电路,在数字侧用诺顿等值等效物理侧电路,记等值电流  $\hat{i}_{eq,k} = \gamma_1 i(t_k) + \gamma_2 u(t_k)$ , 等值导纳  $G_{eq,k} = \gamma_3$ 。

在不同的方法中系数不同,分别如下:

1) ITM 法:  $\gamma_1 = 1, \gamma_2 = \gamma_3 = 0$ 。

2) TFA 法:  $\gamma_1 = (1 + ah/2) / (1 - ah/2), \gamma_2 =$

$\gamma_3 = (bh/2)/(1-ah/2)$ 。

3) DIM 法:  $\gamma_1 = 1, \gamma_2 = -1/(R_c + R_d), \gamma_3 = 1/(R_c + R_d)$ 。

4) PCD 法:  $\gamma_1 = 1, \gamma_2 = -1/R_c, \gamma_3 = 1/R_c$ 。

从上面的分析可看出,混合仿真系统的接口,本质上就是在数字侧(物理侧)用等值电路等效物理侧(数字侧)电路。在物理侧的等值需要用硬件实现,因此一般采用最简单的等值形式,否则实现不方便,参数变化时调整也很困难,最简单直接的方法是用受控电压源作为数字侧电路的等值。而在数字侧,物理侧电路的等值是用软件实现的,十分灵活,因此是接口算法设计的重点,不同方法的主要区别就在于该处等值的不同。由推导不难发现,不同的方法虽然具体实现不同,但都可以统一为相同的表达形式,都是用诺顿等值表示物理侧的电路,不同的只是诺顿等值的参数不同,设计接口算法的重点是诺顿等值的参数选择。

#### 4 混合仿真系统的模型

基于文献[14]中的方法,建立混合仿真系统的模型,利用该模型可进行混合仿真系统的理论分析。

如图 1 所示电路,物理侧电路方程为:

$$\frac{di}{dt} = ai + bu \quad (6)$$

式中:  $a = -R/L; b = 1/L$ 。

首先研究串行时序,  $h \geq \tau$ , 在  $t \in [t_k, t_k + h)$  的时间段内,有

$$u(t) = \begin{cases} \hat{u}_k & t \in [t_k, t_k + \tau) \\ \hat{u}_{k+1} & t \in [t_k + \tau, t_k + h) \end{cases}$$

初值  $i(t_k) = \hat{i}_k$ , 求解式(6)可得:

$$i(t_k + \tau) = \left( \hat{i}_k + \frac{b}{a} \hat{u}_k \right) e^{a\tau} - \frac{b}{a} \hat{u}_k \quad (7)$$

$$i(t_k + h) = \left( i(t_k + \tau) + \frac{b}{a} \hat{u}_{k+1} \right) e^{a(h-\tau)} - \frac{b}{a} \hat{u}_{k+1} =$$

$$\hat{i}_k e^{ah} + \frac{b}{a} e^{ah} (1 - e^{-a\tau}) \hat{u}_k +$$

$$\frac{b}{a} (e^{a(h-\tau)} - 1) \hat{u}_{k+1} =$$

$$\alpha_1 \hat{i}_k + \alpha_2 \hat{u}_k + \alpha_3 \hat{u}_{k+1} \quad (8)$$

式中:  $\alpha_1 = e^{ah}; \alpha_2 = be^{ah} (1 - e^{-a\tau})/a; \alpha_3 = b(e^{a(h-\tau)} - 1)/a$ 。

式(8)中含有  $\hat{u}_{k+1}$ , 由数字仿真确定。不同的接口算法,不同的积分算法,  $\hat{u}_{k+1}$  具有不同的表达式。采用 ITM 法、TFA 法和 DIM 法的统一表达式进行分析。数字侧方程为:

$$R_0 \left( C \frac{du}{dt} + uG_{\text{eq}} + i_{\text{eq}} \right) + u = E \quad (9)$$

当积分算法采用最简单的欧拉法时,有

$$\hat{u}_{k+1} = \hat{u}_k + \frac{h}{R_0 C} (\hat{E}_k - \hat{u}_k - R_0 G_{\text{eq},k} \hat{u}_k - R_0 \hat{i}_{\text{eq},k}) =$$

$$\hat{u}_k + \frac{h}{R_0 C} (\hat{E}_k - \hat{u}_k - R_0 \gamma_3 \hat{u}_k - R_0 \gamma_1 \hat{i}_k -$$

$$R_0 \gamma_2 \hat{u}_k) = \beta_1 \hat{i}_k + \beta_2 \hat{u}_k + \beta_3 \hat{E}_k \quad (10)$$

式中:  $\beta_1 = -\gamma_1 h/C; \beta_2 = 1 - h(1 + R_0 \gamma_2 + R_0 \gamma_3)/(R_0 C); \beta_3 = h/(R_0 C)$ 。

将式(10)代入式(8),同时注意到  $\hat{i}_{k+1} = i(t_k + h)$ , 并联合式(10)即可得到如下的离散动态模型:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_{k+1} \\ \hat{u}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 + \alpha_3 \beta_1 & \alpha_2 + \alpha_3 \beta_2 \\ \beta_1 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_k \\ \hat{u}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_3 \beta_3 \\ \beta_3 \end{bmatrix} \hat{E}_k = \mathbf{A}_s \begin{bmatrix} \hat{i}_k \\ \hat{u}_k \end{bmatrix} + \mathbf{B}_s \hat{E}_k \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} \alpha_1 + \alpha_3 \beta_1 & \alpha_2 + \alpha_3 \beta_2 \\ \beta_1 & \beta_2 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_s = \begin{bmatrix} \alpha_3 \beta_3 \\ \beta_3 \end{bmatrix}$ 。

式(11)即为混合仿真系统的离散动态模型。当采用不同的显式积分算法(如 4 阶龙格库塔法)时,式(10)的表达式不同,但都可以写成式(11)的形式。隐式积分算法写不出式(10)所示的显式表达式。

式(11)的模型是基于文献[14]中建模方法得到。当图 1 中  $C=0$  时,数字侧不需要积分,式(11)与文献[14]中得到的模型是相同的,文献[14]中通过实验对该模型进行了验证。

采用并行时序时,  $\tau = h + \tau' > h$ , 不妨假设  $h < \tau \leq 2h$ , 其他情况下模型的推导过程是相同的。将  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  表达式中的  $\tau$  替换为  $\tau'$ , 同时  $\hat{i}_{k+1} = i(t_k + h)$ , 式(8)变为:

$$\hat{i}_{k+1} = \alpha_1 \hat{i}_k + \alpha_2 \hat{u}_{k-1} + \alpha_3 \hat{u}_k \quad (12)$$

数字侧方程不变,则系统的离散动态模型为:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_{k+1} \\ \hat{u}_k \\ \hat{u}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ 0 & 0 & 1 \\ \beta_1 & 0 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_k \\ \hat{u}_{k-1} \\ \hat{u}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \beta_3 \end{bmatrix} \hat{E}_k \quad (13)$$

对于  $nh < \tau \leq (n+1)h$  的其他情况,也可以写出式(13)所示的离散动态模型,模型阶数为  $n+2$ 。

#### 5 结语

本文研究了混合仿真系统的结构,分析、比较了串行时序和并行时序。对现有的 5 种接口算法进行了综述,推导得到了其中 4 种的统一形式,在物理侧用受控电压源等效数字侧电路,数字侧用诺顿等值等效物理侧电路。最后建立了混合仿真系统的离散动态模型,以该模型为基础可进行进一步的理论分析。

## 参考文献

- [1] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 66-70.  
TANG Yong. Present situation and development of power system simulation technologies. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 66-70.
- [2] 李函, 韩英铎, 王仲鸿, 等. 电压预测技术提高 HVDC 混合实时仿真器接口稳定性. 电力系统自动化, 2000, 24(16): 28-31.  
LI Han, HAN Yingduo, WANG Zhonghong, et al. Using voltage prediction method to enhance the interface stability of HVDC hybrid real-time simulator. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(16): 28-31.
- [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. 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. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(17): 28-31.
- [4] 郑三立, 黄梅, 张海红. 电力系统数模混合实时仿真技术的现状与发展. 现代电力, 2004, 21(6): 29-33.  
ZHENG Sanli, HUANG Mei, ZHANG Haihong. Present situation and development of hybrid real-time simulator for power systems. Modern Electric Power, 2004, 21(6): 29-33.
- [5] 梁旭, 张萍, 胡明亮, 等. 基于实时仿真技术的变电站数字物理混合仿真与培训系统. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 79-81.  
LIANG Xu, ZHANG Ping, HU Mingliang, et al. Hybrid simulating and training system of substation based on real-time simulation technology. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 79-81.
- [6] 高源, 陈允平, 刘会金. 电力系统物理与数字联合实时仿真. 电网技术, 2005, 29(12): 77-80.  
GAO Yuan, CHEN Yunping, LIU Huijin. Joint physico-digital real-time simulation of power system. Power System Technology, 2005, 29(12): 77-80.
- [7] 刘云, 印永华, 曾南超, 等. 数模混合式高压直流输电仿真系统的建立. 电力系统自动化, 2006, 30(18): 38-44.  
LIU Yun, YIN Yonghua, ZENG Nanchao, et al. Establishment of the digital-analogical hybrid HVDC simulation system. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(18): 38-44.
- [8] 刘云, 蒋卫平, 印永华, 等. 特高压交直流大电网的数模混合实时仿真系统建模. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 52-56.  
LIU Yun, JIANG Weiping, YIN Yonghua, et al. Modeling of analogue-digital hybrid real-time simulation system applied in the UHV AC/DC great power grid. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 52-56.
- [9] 胡涛. 交/直流电力系统数模混合仿真接口的研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008.
- [10] LIU Y, STEURER M, RIBEIRO P. A novel approach to power quality assessment; real time hardware-in-the-loop test bed. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1200-1201.
- [11] 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. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1144-1151.
- [12] STEURER M, WOODRUFF S, BALDWIN T, et al. Hardware-in-the-loop investigation of rotor heating in a 5 MW HTS propulsion motor. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 1595-1598.
- [13] WU X, LENTIJO S, MONTI A. A novel interface for power-hardware-in-the-loop simulation// Proceedings of IEEE Workshops on Computers and Power Electronics, August 15-18, 2004, Urbana, IL, USA: 178-182.
- [14] AYASUN S, FISHCHIL R, VALLIEU S, et al. Modeling and stability analysis of a simulation-stimulation interface for hardware-in-the-loop applications. Simulation Modelling Practice and Theory, 2007, 15(6): 734-746.
- [15] REN W, STEUER M, BALDWIN T L. Improve the stability and the accuracy of power hardware-in-the-loop simulation by selecting appropriate interface algorithms. IEEE Trans on Industry Applications, 2008, 44(4): 1286-1294.

陈磊(1982—),男,通信作者,在站博士后研究人员,主要研究方向:电力系统动态仿真及安全稳定分析。E-mail: chenlei08@mail.tsinghua.edu.cn

闵勇(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与实时监控技术。

叶骏(1985—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统混合仿真。

## Modeling and Theoretical Analysis of Hardware-in-the-loop Simulation

### Part One Structure and Model

CHEN Lei, MIN Yong, YE Jun, LI Guojie, LIANG Xu

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Hardware-in-the-loop simulation combines the merits of digital simulation and physical simulation, and is a new development direction of simulation technology. The interface algorithm is a key issue in the hardware-in-the-loop simulation. The structure of the hardware-in-the-loop simulation system is analyzed, and the time frames of series flow and parallel flow are compared. Five different interface algorithms are described, and the uniform expression of four algorithms is derived. At last, the discrete dynamic model of the hardware-in-the-loop simulation system is constructed to provide the foundation for theoretical analysis.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

**Key words:** hardware-in-the-loop simulation; interface algorithm; ideal transformer model; damping impedance method