

1-8-2019

## Integrated Modeling for Time Delay Stability Analysis in GCPS

Jianbo Jiang

1. School of Information, Yunnan University, Kunming 650091, China;;

Li Peng

1. School of Information, Yunnan University, Kunming 650091, China;;

Aimin Miao

1. School of Information, Yunnan University, Kunming 650091, China;;

Cao Min

2. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Corp., Kunming 650217, China;

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Integrated Modeling for Time Delay Stability Analysis in GCPS

### Abstract

**Abstract:** *According to the separation problems of physical and cyber modeling in time delay stability analysis for grid cyber-physical system (GCPS), an integrated modeling method is presented and proved by single machine infinite bus system (SMIBS). The time delay and stability of GCPS are analyzed and discussed, and the physical and cyber models of SMIBS are established respectively. The dynamic linking library by EA and VS based on information model (CIM) are generated, and the united simulation platform is achieved by MATLAB. The results of the simulation show that *the unified structure of information flow and physical flow for calculation and analysis in GCPS is implemented by the integrated modeling method, and the co-simulation for the time delay and stability analysis including information layer and physical layer is realized.**

### Keywords

grid cyber physical system, single machine infinite bus system, time delay stability, integrated modeling

### Authors

Jianbo Jiang, Li Peng, Aimin Miao, Cao Min, Songhai Zhang, Tan Lei, and Kerun Li

### Recommended Citation

Jiang Jianbo, Li Peng, Miao Aimin, Cao Min, Zhang Songhai, Tan Lei, Li Kerun. Integrated Modeling for Time Delay Stability Analysis in GCPS[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3274-3282.

## GCPS 时滞稳定性分析的整体建模方法

蒋建波<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 苗爱敏<sup>1</sup>, 曹敏<sup>2</sup>, 张松海<sup>1</sup>, 檀磊<sup>1</sup>, 李柯润<sup>1</sup>

(1. 云南大学信息学院, 云南 昆明 650091; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

**摘要:** 针对电力信息物理融合系统(GCPS)时滞稳定性建模及分析中, 物理模型及信息模型相互孤立的问题, 以单机无穷大系统为例, 提出了一种面向 GCPS 系统时滞稳定性分析的整体建模方法。对 GCPS 系统产生时滞的原因进行分析和讨论, 分别建立了单机无穷大系统的信息模型和物理模型, 并通过 CIM 模型及动态链接库作为沟通信息模型和物理模型的桥梁, 实现了 GCPS 系统的整体建模。仿真结果表明, 提出的 GCPS 系统整体建模方法, 构建了其信息流与能量流相统一的计算及分析架构, 实现了 GCPS 系统信息层和物理层时滞稳定性的联合仿真。

**关键词:** 电力信息物理融合系统; 单机无穷大系统; 时滞稳定性; 整体建模

中图分类号: TM743; TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 09-3274-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809006

## Integrated Modeling for Time Delay Stability Analysis in GCPS

Jiang Jianbo<sup>1</sup>, Li Peng<sup>1</sup>, Miao Aimin<sup>1</sup>, Cao Min<sup>2</sup>, Zhang Songhai<sup>1</sup>, Tan Lei<sup>1</sup>, Li Kerun<sup>1</sup>

(1. School of Information, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Corp., Kunming 650217, China)

**Abstract:** According to the separation problems of physical and cyber modeling in time delay stability analysis for grid cyber-physical system (GCPS), an integrated modeling method is presented and proved by single machine infinite bus system (SMIBS). The time delay and stability of GCPS are analyzed and discussed, and the physical and cyber models of SMIBS are established respectively. The dynamic linking library by EA and VS based on information model (CIM) are generated, and the united simulation platform is achieved by MATLAB. The results of the simulation show that the unified structure of information flow and physical flow for calculation and analysis in GCPS is implemented by the integrated modeling method, and the co-simulation for the time delay and stability analysis including information layer and physical layer is realized.

**Keywords:** grid cyber physical system; single machine infinite bus system; time delay stability; integrated modeling

## 引言

智能电网是电力系统与信息系统结合的产物,



收稿日期: 2017-01-06 修回日期: 2017-03-30;  
基金项目: 国家自然科学基金(61364024), 云南省科技计划基础研究(2014FB112), 云南省教育厅重点科学研究基金(2015Z014);  
作者简介: 蒋建波(1992-), 男, 云南保山, 硕士, 研究方向为电力信息物理融合系统。

它通过先进的通信、传感和测量技术, 先进的设备技术、控制方法和决策支持系统, 实现电力流、信息流和业务流高度融合, 从而构建可靠、安全、经济、高效、环境友好的电网系统<sup>[1]</sup>。特别是随着广域测量系统、新能源与分布式发电系统、智能微网、能源互联网等新兴智能电网技术的发展, 以及大数据、云计算、物联网等先进的信息技术在智能电网

<http://www.china-simulation.com>

• 3274 •

中的应用, 智能电网已将大量的电力设备、传感装置和控制系统通过电力网和通信网两个实体网络进行互连, 实现能源节点间能量流的高效交换与共享<sup>[2-6]</sup>, 从而使之发展成为由信息网和物理网构成的相互依存、耦合的电力信息物理融合系统(Grid Cyber-Physical Systems, GCPS)<sup>[1,7]</sup>。但 GCPS 系统具有地域分布广、通信节点数量多和传输数据量大等特点, 大大增加了其信息系统的复杂性, 因此电力通信网络的稳定性、安全性和可靠性成为 GCPS 系统所面临的巨大挑战<sup>[7-8]</sup>。特别是 GCPS 系统中各类测量信号的传输、交换与处理的时滞问题, 往往会成为导致电网系统不稳定的主要因素<sup>[9-14]</sup>。2001 年美国 El Paso 电力公司停电事故的起因就是通信系统的不正常延时导致的保护误动作<sup>[8]</sup>。

针对 GCPS 系统通信网络的数据丢包、延迟等导致的电力系统失稳及不可靠问题, 文献[11]提出了特征根聚类的广域测量系统时滞稳定性分析方法; 文献[12]利用单机无穷大系统, 分析和讨论了单时滞环延时常数对系统小扰动稳定性的影响; 文献[13-14]通过建立广域测量系统的微分方程, 得出并分析了电力系统的稳定性裕度。

但上述研究成果在建立信息系统时滞与电力系统稳定性关系模型时, 主要还是基于 Matlab 等物理建模工具, 单独从电力侧分析 GCPS 系统的时滞稳定性问题, 缺乏从“信息”及“物理”的整体视角对 GCPS 系统的时滞稳定性进行建模和分析<sup>[8,15]</sup>。

本文提出了一种面向 GCPS 系统时滞稳定性分析的整体建模方法, 构建了 GCPS 系统信息流与能量流相统一的计算及分析模型, 并以单机无穷大系统<sup>[16]</sup>为例, 实现了 GCPS 系统时滞稳定性的信息层和物理层的联合仿真及分析。

## 1 单机无穷大系统时滞稳定性分析

### 1.1 时滞产生原因及分析

本文以单机无穷大系统为例, 讨论 GCPS 系统

时滞产生的原因及对系统稳定性的影响, 它的结构框架如图 1 所示。通过广域测量系统对电力系统的各个组件进行测量并将数据通过互联网传输到应用层, 应用层发布的指令也能通过互联网传输到电网系统, 这样就实现了电力系统与控制中心之间的交互。

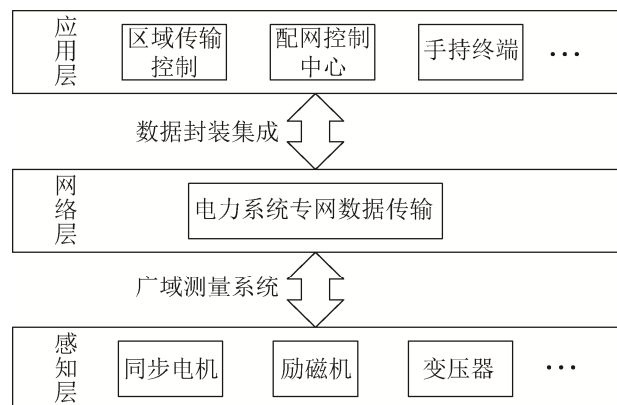


图 1 单机无穷大系统结构框架

Fig. 1 Structural framework of single machine infinite bus system

广域测量系统是以 GPS 为采样基准, 通过向量测量单元 PMU 同步采集机组和线路的电压、电流等信号, 并通过相应的通信系统将采集到的数据传输到控制中心。文献[17]中介绍了广域测量系统的体系结构, 并指出测量数据在送往控制中心之前需要经过传感器采集、同步采样、向量计算和数据封装、子站通信模块、通信链路等环节, 每个环节都会产生延迟。其中传感器采集阶段到向量计算和数据封装阶段产生的延迟都为微秒级, 可忽略不计; 主要的延迟产生于数据网络传输环节。

广域测量系统的网络通信系统采用 TCP/IP 协议<sup>[18]</sup>, 在该协议构成的通信系统中, 数据包从本地主机传输到远程主机需要通过路径选择, 这一功能是有路由器来完成的, 如图 2 所示。在这一过程中, 本地主机数据处理、物理路线信号传输、中间路由器数据处理和远程主机数据处理都会产生时延, 其中, 中间路由器数据处理过程是产生时延的主要因素<sup>[19]</sup>。

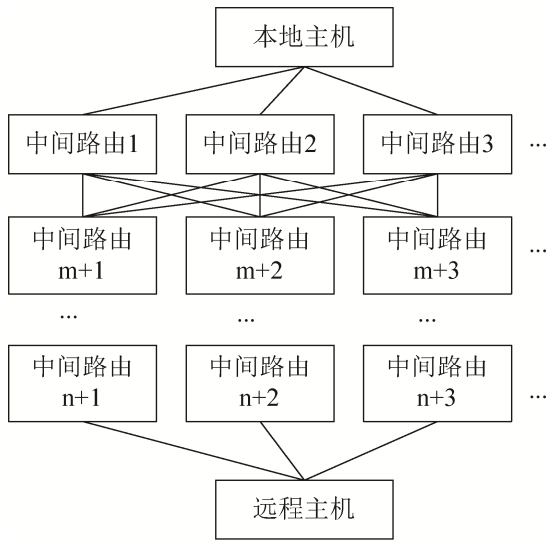


图2 TCP/IP 协议通信原理  
Fig. 2 Communication theory of TCP/IP protocol

在广域 IP 网络中，链路和中间节点之间进行数据传输均会产生分组时延。定义数据从子站通信模块传输到主站通信模块所需要的时间为  $\tau$ ，每个相邻节点之间的分组时延包括串行化时延、传播时延和交换时延，分别用  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  表示串行化时延、传播时延和交换时延的大小<sup>[17]</sup>，假设数据从子站通信模块传输到主站通信模块需要经过  $m$  个节点和  $n$  个链路，则有：

$$\tau = \sum_{i=1}^m (\alpha_i + \gamma_i) + \sum_{i=1}^n \beta_i \quad (1)$$

式中： $\alpha$  与数据分组大小成正比，与带宽成反比； $\beta$  和  $\gamma$  与带宽无关。设带宽为  $W$ ，数据分组大小为  $G$ ，则(1)式可表示为：

$$\tau = \frac{G}{W} + \sum_{i=1}^m \gamma_i + \sum_{i=1}^n \beta_i \quad (2)$$

文献[17]最后得出结论，即使在空闲时段，时延平均值也高达 13 ms。随着数据量的增大，传输网络复杂性增加，时延也会随之增长，进而导致电力系统失稳。

### 1.2 物理系统模型

本文采用如图 3 所示的单机无穷大系统的物理模型作为对象进行研究。

考虑励磁系统电压输出环节存在时滞，结合文

献[16]中提出的单机无穷大系统的数学模型，则系统状态方程可表示为：

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_b \omega \\ \dot{\omega} = \frac{P_m - P_e}{2H} \\ \dot{E}_q = \frac{1}{T_{d0}} [E_{fd}(t - \tau) - E_q - (x_d - x'_d)i_d] \\ \dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_A} [K_A(V_{ref} - V_t) - E_{fd}] \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\delta$ 、 $\omega$ 、 $E_q$ 、 $E_{fd}$  分别代表发电机功角、角速度、电抗后电势和励磁电势； $\omega_b$  为系统额定转速； $P_m$ 、 $P_e$  分别为原动机功率和发动机输出功率； $T'_{d0}$  为发电机定子时间常数； $x_d$ 、 $x'_d$  分别为发电机稳态和暂态电抗； $i_d$  为纵轴电流； $T_A$ 、 $K_A$  分别为励磁回路时间常数和放大系数； $V_{ref}$  为机端电压参考值； $V_t$  为机端电压。

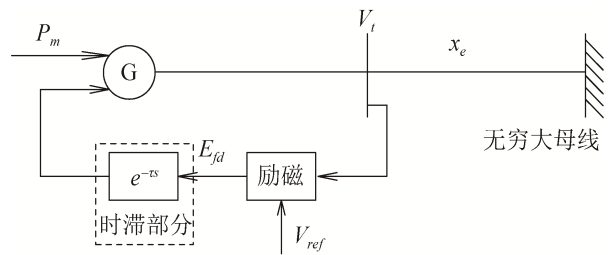


图3 单机无穷大系统物理模型  
Fig. 3 Physical model of single machine infinite bus system

参照文献[14]中稳定裕度的求解方法，首先，系统特征方程可表示为：

$$\Gamma(s, \tau) = \det(sI - A - A_d e^{-s\tau}) = 0 \quad (4)$$

式中： $A$  和  $A_d$  为系统的状态空间矩阵；由于大部分电力系统控制器为单输入反馈控制<sup>[14]</sup>，因此(4)式可写为：

$$\Gamma(s, \tau) = f(s) + e^{-s\tau} g(s) = 0 \quad (5)$$

若对某时滞  $\tau_a$ ，方程(5)有纯虚根， $s = \pm \omega_a i$  ( $\omega_a > 0$ )，则进一步消去指数项后得：

$$\Delta(\omega_a^2) = f(\omega_a i) f(-\omega_a i) - g(\omega_a i) g(-\omega_a i) = 0 \quad (6)$$

通过对指数项的分解可以得到每一个  $\omega_a$  相对应的时滞的计算公式：



$$\tau^* = \frac{1}{\omega_a} \arctan \left( \operatorname{Im} \left( \frac{f(\omega_a i)}{g(\omega_a i)} \right) \right) \operatorname{Re}^{-1} \left( -\frac{f(\omega_a i)}{g(\omega_a i)} \right) + \frac{2\pi r}{\omega_a} \quad (r = 0, 1, \dots, \infty) \quad (7)$$

每个纯虚特征根  $\omega_a i$  所对应的  $\tau$  的灵敏度定义为:

$$S_{\tau}^s |_{s=\omega_a i} = \frac{ds}{d\tau} |_{s=\omega_a i} \quad (8)$$

上式两边对  $\tau$  求导可得:

$$\frac{ds}{d\tau} = \frac{se^{-s\tau} g(s)}{f'(s) + e^{-s\tau} g'(s) + \tau f(s)} \quad (9)$$

由此可延伸出:

$$R_k = \operatorname{sgn} \left( \operatorname{Re} \left( S_{\tau}^s |_{s=\omega_a i} \right) \right) \quad (10)$$

$R_k$  可表示系统特征根穿越虚轴的情况,  $R_k=1$  表示系统在相应特征根处由  $s$  复平面左半平面穿越到右半平面,  $R_k=-1$  表示系统在相应特征根处由  $s$  复平面右半平面穿越到左半平面。

其次, 根据如下步骤即可计算出系统稳定裕度: 1) 对方程(6)求解可以得到所有可能的纯虚特征根; 2) 根据式(7)求解相应的  $\tau^*$ , 按照从小到大顺序列表; 3) 根据式(8)~(10)求出相应的  $R_k$ ; 4) 根据  $\tau=0$  可求出  $Nu(0)$ ; 5) 从最小的  $\tau^*$  开始, 分别根据  $R_k$  判断系统不稳定特征根的数目  $Nu(\tau)$ ,  $R_k=1$  则  $Nu$  增加 2,  $R_k=-1$  则  $Nu$  减少 2; 6) 观察上述建立的列表, 在  $Nu(\tau)=0$  的区间内系统稳定, 其他区间内系统不稳定。

## 2 GCPS 系统整体建模方法

### 2.1 系统框架

本文提出的 GCPS 系统整体建模方法的架构如图 4 所示。整个系统分为三层, 分别是信息层、物理层和融合层。信息层主要由面向对象工具 EA(Enterprise Architect)和 VS(Visual Studio)构成, 可进行信息系统的 CIM(Common Information Model)搭建。物理层主要由 MATLAB/Simulink 仿真工具构成, 用于仿真电力系统的实际物理模型。融合层的主要作用是沟通信息层与物理层之间的

桥梁, 实现信息层与物理层之间的交互。

根据上一节单机无穷大系统的数学模型, 在 MATLAB/Simulink 环境下进行电力系统仿真模型搭建, 实现物理过程的仿真。另一方面, 可利用 EA(Enterprise Architect)软件通过 UML 对信息模型进行描述, 然后利用 EA 将图形化语言转换为非图形化的语言(本文转换为 C++语言), 进而利用 VS(Visual Studio)软件生成动态链接库(.dll)文件, 该文件可以实现信息模型和物理模型之间的数据传输, 根据信息模型中的控制命令对物理过程进行感知和影响。

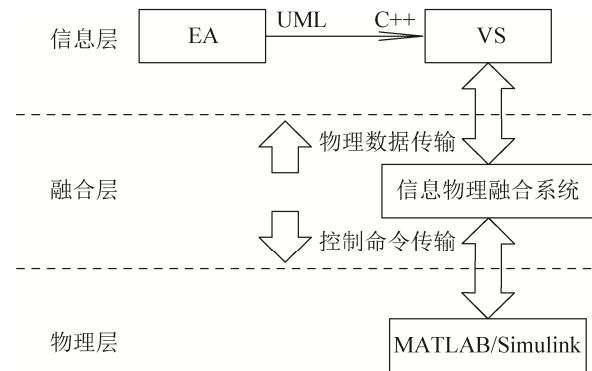


图 4 GCPS 系统整体建模架构

Fig. 4 GCPS integrated modeling framework

### 2.2 信息系统模型

单机无穷大系统的信息模型是基于 IEC 61970 原有的信息模型包的基础上扩展而来, 目前正式发布的 CIM 模型还不能覆盖控制中心各种应用领域。单机无穷大系统包含了一个励磁系统, 可是该系统在现有的 CIM 模型中并没有相关的描述, 因此需要对其进行扩展<sup>[20]</sup>。

本文结合励磁系统的原理和特点<sup>[18]</sup>, 对现有的 CIM 模型进行扩展。首先, 建立一个励磁系统类(ExcitationSystem), 它继承自 RegulatingCondEq 类。其次, 一般励磁系统都含有励磁调节器和整流器装置, 因此需要建立一个自动励磁调节器类(AutoVoltageRegulator)。最后, 每个电力系统都需要包含一个电力系统稳定器类(PowerSystem Stabilizer)。建立起这些必要的类后, 需要将他们与原有 CIM 模型关联起来, 如图 5 所示。

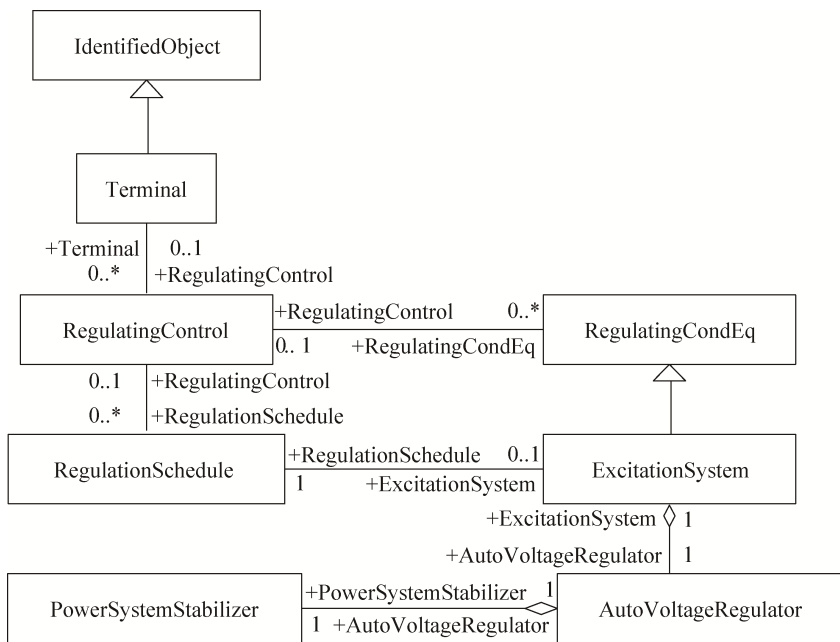


图 5 励磁系统在公共信息模型中的描述  
Fig. 5 Description of the excitation system in common information model

综合扩展后的励磁系统信息模型和原有的 CIM 模型，可以得到单机无穷大系统的信息模型，如图 6 所示。其中，Generator 为发电机实例化对象，Exciter 为励磁机实例化对象。

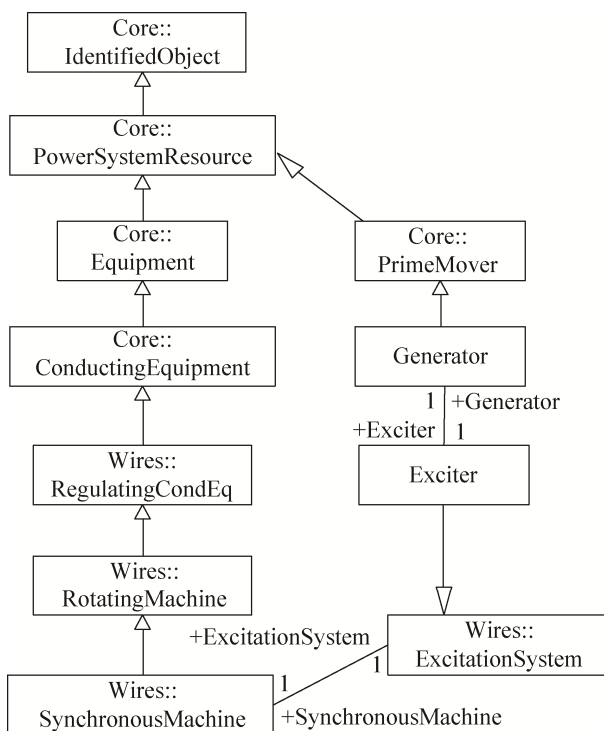


图 6 单机无穷大系统信息模型  
Fig. 6 Information model of single machine infinite bus system

图 5 和图 6 中所示的不带箭头直线表示简单关联关系，带“+”的字符串表示关联作用的名称(一般为类的名称)，每个关联作用还有一个基数，用来表示多少对象可以参加到给定的关系中；带三角形箭头的连线表示普遍化关系，是一个较普遍的类与一个较具体的类之间的一种关系，箭头指向的一方为父类，另一方则为子类，子类从父类中继承所有属性，子类也可以用属于自己的属性；带菱形箭头的连线表示聚集的关系，表示类与类之间是一种整体与部分的关系，箭头指向的一方为整体类，另一方则为部分类，整体类是由部分类构成或包含部分类，而部分类是整体类的一部分，部分类不能从整体类中继承所有属性。

表 1 列出了单机无穷大系统信息模型中与物理模型参数所对应的属性。

### 2.3 信息物理融合系统仿真模型

由 2.1 节可知，GCPS 主要由信息层和物理层构成，并通过融合层作为沟通二者之间的桥梁，融合层主要由信息模型生成的动态链接库文件构成。GCPS 的整体建模过程如图 7 所示。

表 1 信息模型各参数属性

| 属性名称      | 所属类       | 描述对象      |
|-----------|-----------|-----------|
| delta     | Generator | 发电机功角     |
| Eq        | Generator | 电抗后电势     |
| Id        | Generator | 纵轴电流      |
| Pe        | Generator | 发电机输出功率   |
| Pm        | Generator | 原动机输出功率   |
| tao       | Generator | 励磁输出时滞    |
| Td0       | Generator | 发电机定子时间常数 |
| vref      | Generator | 机端电压参考值   |
| vt        | Generator | 机端电压      |
| w         | Generator | 发电机角速度    |
| wb        | Generator | 发电机额定转速   |
| xd        | Generator | 发电机稳态电抗   |
| xdl       | Generator | 发电机暂态电抗   |
| Efd       | Exciter   | 励磁电势      |
| kFeed     | Exciter   | 励磁回路放大系数  |
| teExciter | Exciter   | 励磁回路时间常数  |

本文利用 Enterprise Architect 软件建立基于 SMIB 的公共信息模型, 将建立好的模型转换为 C++代码框架, 并通过 Visual Studio 软件在生成的框架中写入相应代码并生成动态链接库文件, 为后续联合仿真做准备; 使用 MATLAB/Simulink 仿真

工具搭建 SMIB 物理系统仿真模型, 并通过调用信息模型编译生成的动态链接库文件, 该文件可以实现信息模型和物理模型之间的数据传输: 信息模型可以根据采集到的物理模型运行数据, 进行相应的决策并发布控制命令对物理过程进行相应地控制, 实现联合仿真。

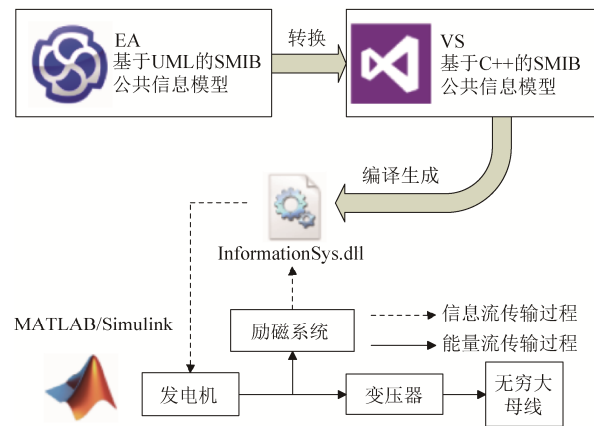


图 7 GCPS 整体建模过程  
Fig. 7 Integrated modeling process of GCPS

利用 MATLAB/Simulink 建立的单机无穷大系统的信息物理融合系统仿真模型如图 8 所示。

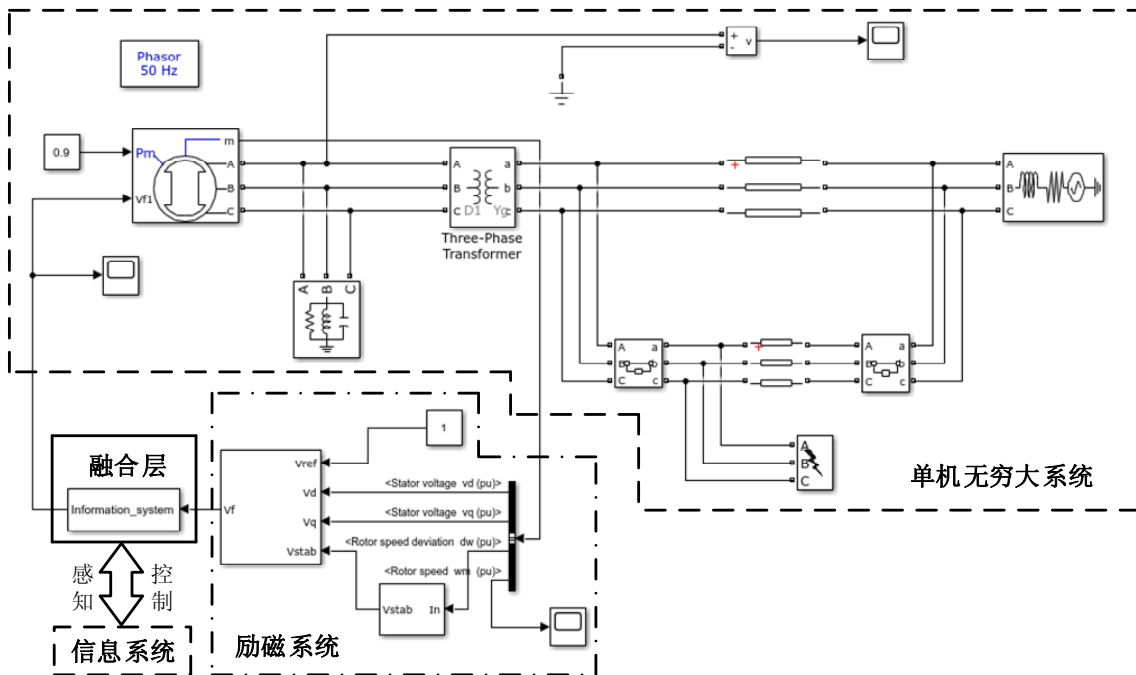


图 8 信息物理融合系统仿真模型  
Fig. 8 Simulation model of cyber physical system



整个模型分为两大部分, 分别是物理系统模型和融合层模型, 物理系统模型是由单机无穷大系统模型和励磁系统模型构成, 如图 8 中虚线部分所示; 融合层模型是由 S 函数封装而成的模块, 用于仿真单机无穷大系统中信息的传输部分, 该部分中包含对信息模型生成的动态链接库的调用, 也包含了信息数据传输过程中产生的时滞, 调用格式为: Vf\_delay = InformationSys(Vf), 其中 Vf 为励磁电压, Vf\_delay 为经过信息系统传输过程后带有时滞的励磁电压, InformationSys 为由信息模型编译生成的动态链接库文件的文件名。由此实现了信息系统和物理系统的联合仿真。

### 3 实例仿真

将各系统参数带入 1.2 节所描述的物理系统数学模型中<sup>[13]</sup>:  $x_d=1.79, x_d'=0.169, x_q=1.71, P_m=0.9, T_{d0}'=4.3s, H=5, \omega_b=377 \text{ rad/s}, x_e=0.4, R_e=0, K_A=200, T_A=0.05s, V_{\theta}=1.0, V_{ref}=1.0$ 。可以确定系统的平衡点为:  $x_0=[1.264, 0, 0.773, 0.275]$

上述系统在平衡点线性化以后的模型可表示为:

$$\dot{x} = Ax + A_d x(t - \tau) \tag{11}$$

带入系统的参数值以及  $x_0$  后可以得到:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 \\ -0.14558 & 0 & -0.16658 & 0 \\ -0.62797 & 0 & -0.89508 & 0 \\ -75.197 & 0 & -1796.8 & -20 \end{bmatrix}$$

$$A_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.23256 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{12}$$

根据上述线性化模型可得到系统的时滞稳定区间为<sup>[13]</sup>:  $0 \leq \tau \leq 58.2 \text{ ms}$ 。

根据图 7 所示的 GCPS 整体建模过程, 首先将单机无穷大系统信息模型转换为 C++ 语言, 其中的

每一个类都要转换为一个源文件(.cpp)和一个头文件(.h), 利用 VS 软件在这些文件中添加相应代码; 其次, 新建一个 DLL 工程, 将上述头文件和源文件添加进去, 编译并生成动态链接库文件(.dll); 另一方面, 在 MATLAB 中先进行一系列的初始化工作, 然后搭建 SMIB 的物理仿真模型, 包括编写调用动态链接库文件的 S 函数模块; 将上一步生成的动态链接库文件拷贝到 MATLAB 仿真程序所在的文件夹下, 运行 MATLAB 程序即可实现信息物理系统的联合仿真。

在仿真过程中, 通过不断改变励磁系统输出时滞的大小, 根据观察发电机 A 相电压的实时数据波形, 即可得出时滞稳定区间, 图 9~11 分别显示了不同时滞影响下的发电机 A 相电压输出波形。图 9~11 的下半部分分别展示了不同时滞下 A 相电压的输出波形, 同时和上半部分无时滞的理想状态下 A 相电压的输出波形进行了对比。从这三个图中可以看出, 当时滞不超过 58.2 ms 时系统在经历初期的波动后最终处于稳定状态; 当时滞超过 58.2 ms 后系统处于逐渐发散的不稳定状态。因此, 我们根据这三个图可以得到该系统的时滞稳定区间为:  $0 \leq \tau \leq 58.2 \text{ ms}$ , 与上述理论计算得到的稳定裕度相吻合。

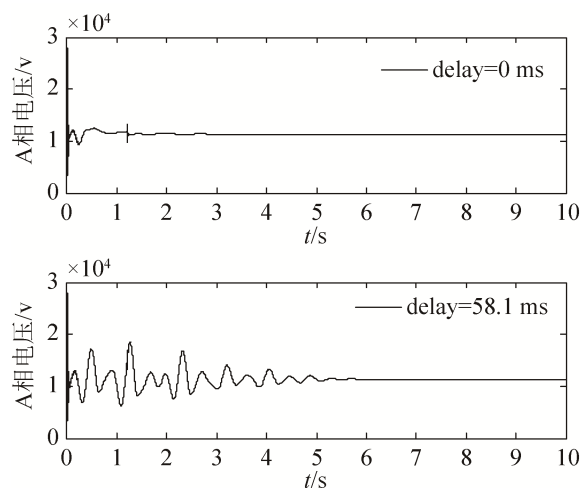


图 9 时滞为 58.1 ms 时发电机 A 相电压输出波形  
Fig. 9 Output waveform of A phase voltage of generator when delay is 58.1 millisecond

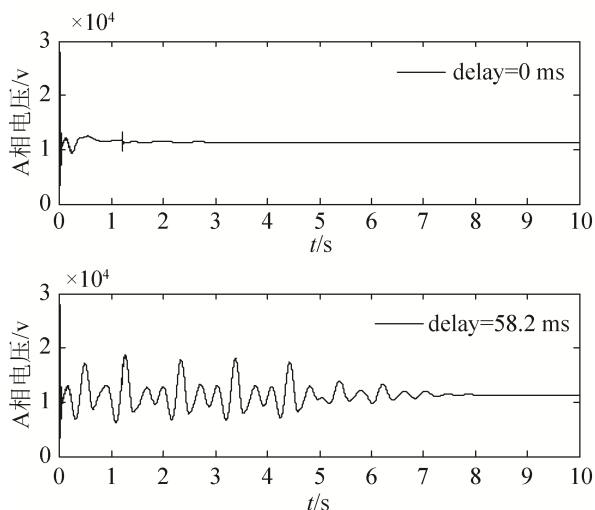


图 10 时滞为 58.2 ms 时发电机 A 相电压输出波形  
Fig. 10 Output waveform of A phase voltage of generator when delay is 58.2 millisecond

整个仿真过程既包含了从“物理”侧对 SMIB 的仿真, 模拟了能量流在各部分组件之间的运行过程; 也包含了对“信息”侧的仿真, 利用动态链接库文件作为沟通信息层和物理层之间的桥梁, 模拟了信息流传输中产生时滞的过程。进而构建了其信息流与能量流相统一的计算及分析架构, 实现了 GCPS 信息层和物理层时滞稳定性的联合仿真。

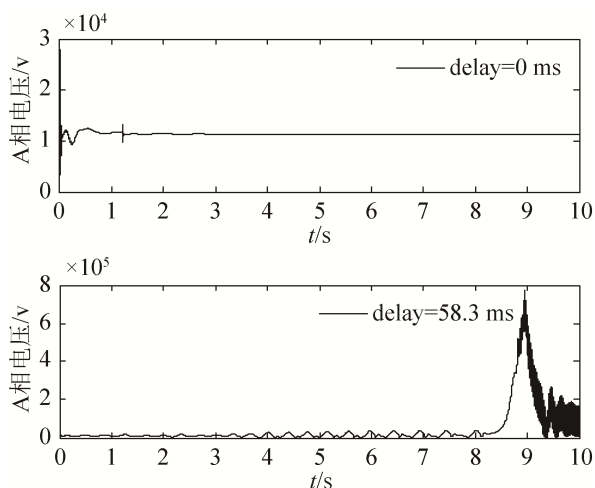


图 11 时滞为 58.3 ms 时发电机 A 相电压输出波形  
Fig. 11 Output waveform of A phase voltage of generator when delay is 58.3 millisecond

## 4 结论

本文以单机无穷大系统为例, 首先对 GCPS 系

统产生时滞的原因进行分析和讨论, 然后分别建立了单机无穷大系统的信息模型和物理模型, 并通过 CIM 模型及动态链接库作为沟通信息模型和物理模型的桥梁, 实现了 GCPS 系统的整体建模。仿真结果表明, 本文提出的 GCPS 系统整体建模方法, 构建了其信息流与能量流相统一的计算及分析架构, 实现了 GCPS 系统信息层和物理层时滞稳定性的联合仿真。

## 参考文献:

- [1] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 1-8.  
Zhao J H, Wen F S, Xue Y S, et al. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 1-8.
- [2] 薛禹胜, 徐伟, 董朝阳, 等. 关于广域测量系统及广域控制保护系统的评述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 1-5.  
Xue Y S, Xu W, Dong Z Y, et al. A Review of Wide Area Measurement System and Wide Area Control System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 1-5.
- [3] 李鹏, 王成山, 黄碧斌, 等. 分布式发电微网系统暂态时域仿真方法研究—(一)基本框架与仿真算法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 33-39.  
Li P, Wang C S, Huang B B, et al. Methodology of transient simulation in time domain for DG and microgrid(1): Basic framework and algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 33-39.
- [4] 余昆, 曹一家, 倪以信, 等. 分布式发电技术及其并网运行研究综述[J]. 河海大学学报, 2009, 37(6): 741-748.  
Yu K, Cao Y J, Ni Y X, et al. Review of research on distributed generation technology and its integrated operation[J]. Journal of Hohai University, 2009, 37(6): 741-748.
- [5] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.  
Dong Z Y, Zhao J H, Wen F S, et al. From smart grid to energy internet: Basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [6] 王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究

- 综述[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(5): 1109-1126.
- Wang J Y, Meng K, Cao J W, et al. Information technology for energy internet: A survey[J]. Journal of Computer Research & Development, 2015, 52(5): 1109-1126.
- [7] 梅生伟, 王莹莹, 陈来军. 从复杂网络视角评述智能电网信息安全研究现状及若干展望[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 672-679.
- Mei S W, Wang Y Y, Chen L J. Overviews and prospects of the cyber security of smart grid from the view of complex network theory[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 672-679.
- [8] 郭庆来, 辛蜀骏, 孙宏斌. 电力系统信息物理融合建模与综合安全评估: 驱动力与研究构想[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1481-1489.
- Guo Q L, Xin S J, Sun H B. Power System Cyber Physical Modelling and Security Assessment: Motivation and Ideas[J]. Proceedings of the Csee, 2016, 36(6): 1481-1489.
- [9] 江全元, 白碧蓉, 邹振宇, 等. 计及广域测量系统时滞影响的 TCSC 控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 21-25.
- Jiang Q Y, Bai B R, Zou Z Y, et al. TCSC Controller Design in Consideration of Time Delay in Wide-Area Measuring System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20): 21-25.
- [10] 江全元, 邹振宇, 曹一家, 等. 考虑时滞影响的电力系统稳定分析和广域控制研究进展[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 1-7.
- Jiang Q Y, Zou Z Y, Cao Y J, et al. Overview of Power System Stability Analysis and Wide-area Control in Consideration of Time Delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 1-7.
- [11] Z Y Liu, Q Y Jiang, Y J Cao. Stability of Power System in Consideration of Signal Time Delays[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24, Tampa, FL, USA, 2007: 1246-1252.
- [12] 贾宏杰, 陈建华, 余晓丹. 时滞环节对电力系统小扰动稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 5-8, 17.
- Jia H J, Chen J H, Yu X D. Impact of Time Delay on Power System Small Signal Stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 5-8, 17.
- [13] Hongjie Jia, Xiaodan Yu, Yixin Yu, et al. Power system small signal stability region with time delay[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2008, 30: 16-22.
- [14] 刘兆燕, 戚军, 苗轶群, 等. 单时滞电力系统时滞稳定裕度的简便求解方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 8-13.
- Liu Z Y, Qi J, Miao Y Q, et al. A simple method to compute delay margin of power system with single delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(18): 8-13.
- [15] 曾俸颖, 刘东. 光伏储能协调控制的信息物理融合建模研究[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1506-1513.
- Zeng Z Y, Liu D. Study on Cyber-Physical System Modeling on Coordinated Control of Photovoltaic Generation and Battery Energy Storage System[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1506-1513.
- [16] W Ji, V Venkatasubramanian. Hard-limit Induced Chaos in a Fundamental Power System Model[J]. Electrical Power and Energy Systems, 1996, 18(5): 279-295.
- [17] 胡志祥, 谢小荣, 肖晋宇, 等. 广域测量系统的延迟分析及测试[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 39-43.
- Hu Z X, Xie X R, Xiao J Y, et al. ANALYSIS AND TEST ON DELAYS IN THE WIDE AREA MEASURING SYSTEM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 39-43.
- [18] 郑建辉, 孟昭勇, 林馨. 基于 IEC61970/61968 的发电厂资源 CIM 建模[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 106-109.
- Zheng J H, Meng Z Y, Lin X. CIM of power plant resource based on IEC61970 /61968[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 106-109.
- [19] 修震, 吴平东, 黄杰, 等. 基于因特网的远程控制中网络延时特性分析[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(3): 129-131.
- Xiu Z, Wu P D, Huang J, et al. Analysis of Network Time-delay Property in Internet-based Telecontrol System[J]. Computer Engineering & Applications, 2004, 40(3): 129-131.
- [20] 黄小庆, 白纯, 曹一家, 等. 基于公共信息模型的输电设备全景信息扩展建模[J]. 高压电技术, 2015, 41(12): 3929-3936.
- Huang X Q, Bai C, Cao Y J, et al. Panoramic information model extension for transmission equipment based on common information model[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 3929-3936.