

# Concept and Its Frame of Internet-Based Virtual Computing Environment to Power System

Zhongxu Han<sup>1</sup>, Xinshou Tian<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>China Electric Power Research Institute, Beijing

<sup>2</sup>North China Electric Power University, Beijing

Email: zhongxuh@epri.sgcc.com.cn, tianxinshou@epri.sgcc.com.cn

Received: Oct. 8<sup>th</sup>, 2012; revised: Oct. 25<sup>th</sup>, 2012; accepted: Nov. 4<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** Resources over internet on several sets of computer simulation system have such intrinsic characteristics as growth, autonomy and diversity, which have brought many challenges to the computer internet resource management of power system simulation. The basic concepts of internet-based virtual computing environment to power system (iVCE-PS) is given, which is guided by the theory of internet-based virtual computing environment (iVCE), at the same time the concepts of power elements, power system simulation commonwealth and power system simulation executor are introduced. The architecture of iVCE-PS is established, and its basic function is resolved through layered approach.

**Keywords:** Power System; Simulation; Virtual Computing Environment; Resources

## 电力系统虚拟计算环境 iVCE-PS 的概念与构架

韩忠旭<sup>1</sup>, 田新首<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国电力科学研究院, 北京

<sup>2</sup>华北电力大学, 北京

Email: zhongxuh@epri.sgcc.com.cn, tianxinshou@epri.sgcc.com.cn

收稿日期: 2012 年 10 月 8 日; 修回日期: 2012 年 10 月 25 日; 录用日期: 2012 年 11 月 4 日

**摘要:** 多套计算机仿真系统的联网资源具有“成长性”、“自治性”和“多样性”的自然特性, 给电力系统全仿真计算机的联网资源管理带来巨大挑战。本文以虚拟计算环境 iVCE 为指导, 提出 iVCE-PS 的基本概念, 引入电力系统元件元素、电力系统仿真共同体和电力系统仿真执行体的概念, 构建电力系统虚拟计算环境 iVCE-PS 的体系结构, 并通过分层的方法解析其基本功能。

**关键词:** 电力系统; 仿真; 虚拟计算环境; 资源

### 1. 引言

生产领域的发展一方面引导与推动了科学技术的进步, 同时也带来了更深刻的问题和挑战。现代电力系统的发展使电网的规模不断扩大, 新的电力电子设备不断涌现, 特高压输电技术的发展, 以及交直流系统的并联运行。所有这些都增加了电力系统研究的复杂性。

人们在实际运行的电力系统上进行试验研究, 存

在较大的安全性风险, 通常受到约束, 开展电力系统仿真技术的研究十分重要, 一直倍受关注<sup>[1-11]</sup>, 真实可信的仿真可以提高电网运行的可靠性, 为经济性提供决策支持。采用仿真系统作为试验手段成为现实的选择。

自上世纪 80 年代初“网络就是计算机”的概念提出以来, 围绕更好共享网络资源的努力就一直没有停止<sup>[12]</sup>。以 Amoeba 和 Mach 为代表的分布式操作系

统<sup>[13]</sup>的实践表明,要在开放的网络计算环境中建立资源的统一全局视图几乎是不可能的,计算机操作系统中的有效资源管理机制在网络环境中不再有效。总体上讲,网络资源的共享和综合利用仍是一个突出的、亟待解决的现实问题。以互联网为例,其资源共享利用率低的问题较为突出<sup>[14]</sup>。

电力系统的可靠性决定了电力系统仿真的重要性,电力系统的复杂性决定了电力系统仿真的精确性。本文针对电力系统及仿真的特点,结合计算机网络技术的最新进展,提出以按需聚合和自主协同为核心机制的电力系统虚拟计算环境(internet-based Virtual Computing Environment to power system,以下简称 iVCE-PS)概念和体系结构。

## 2. 多机互联的资源共享与综合协调

随着电网容量的增大,对电力系统中长期稳定性的研究越来越显现出必要性和重要性,由于电力系统的复杂性,在暂态稳定分析中固定慢变量可能会得到错误的结果,原因是系统初值一般不会恰好落在不变的快流形上。事实上,慢动态(常为未建模动态)的存在是导致系统发生中长期失稳的重要原因<sup>[15]</sup>。由于全过程动态仿真涵盖机电暂态与中长期动态过程,仿真对象的时间常数差异很大,混合着快速和慢速动态过程,仿真时间从几秒到数十分钟甚至若干个小时,时间跨度大。作为电力系统中长期稳定研究的重要手段,全过程动态仿真必须面对混合仿真中存在着多时间尺度这一复杂的技术问题。

全过程动态实时仿真不仅需要研究混合仿真技术,还需要运用信息论、控制论等学科的理论及知识,结合计算机实时操作系统的运用,依据整个电力系统电磁暂态过程、机电暂态过程和种原动机能量转换过程中相关物理设备的工艺流程、运行特点以及时间常数、空间结构和现代电力系统的信息化调度与控制等作业的流程,设计具有不同任务的仿真装置或子系统,分别以各自不同的时间尺度,并行分布式进行仿真计算,协调不同仿真装置之间的信息交换过程,进而实现整个电力系统中各类物理设备和信息流的模拟与实时动态仿真。

为了较好的解决上述问题,本文着重阐述电力系统虚拟计算环境的设计概念、系统结构以及功能描述。

## 3. 电力系统仿真的技术基础

仿真实际上是在真实的时空中构造出一个虚拟的时空,并将仿真模型置于该虚拟时空环境中运行的过程,因此时间是仿真中的一个基本概念。仿真时间的一致性为仿真时空一致性问题中不可缺少的一环,是决定仿真品质的重要因素。

仿真系统对仿真时间<sup>[16]</sup>的控制包括两个方面。首先,仿真系统必须保证系统中所有仿真模型都维持仿真虚拟时空的一致性,即在任意的观测时刻,所有的仿真模型对仿真时间应该有一致的认同,这一要求是任何仿真系统都必须满足的。其次,仿真系统要恰当的处理仿真的虚拟时空和现实的自然时空之间的关系。

根据虚拟时空和自然时空的关系,可将仿真划分为两大类:即无约束仿真(指不受自然时间约束的仿真)和实时仿真。

在无约束仿真中所有参与仿真的对象都用软件算法建模,由这些软件模型构成一个闭合的仿真环境,仿真模型完全在独立的虚拟时空中运行。仿真的虚拟时空和自然时空没有信息交互,这时,仿真时间和自然时间的关系也无需有任何约束。这一类无约束仿真又称为分析仿真或数学仿真。

传统的实时仿真概念是指,只有部分参与仿真的对象是用软件算法实现,而另一些仿真对象是具体的物理模型,或者是真实的。通常称前者为半实物仿真(hardware-in-the-loop),称后者为人在回路仿真(man-in-the-loop)<sup>[17]</sup>,在这两种情况下,自然时空中的对象在客观上要融入到仿真的虚拟时空中,自然时间和仿真时间必须要相互关联起来。

电磁暂态仿真通常描述过程持续时间在纳秒、微秒、毫秒级的系统快速暂态特性,典型计算步长为 50  $\mu\text{s}$ ,而机电暂态仿真通常描述过程持续时间在几秒到几十秒的系统暂态稳定特性,典型计算步长为 10 ms<sup>[5]</sup>。

机电暂态仿真程序主要用于大规模电网稳定性研究,若不考虑电磁暂态过程,其计算时步大,仿真速度快,甚至可以达到超实时(加速比  $\lambda < 1$ )运行。但大多数机电暂态程序的实时仅是一种平均概念,其中某些时步计算时间比其它时步可能长得多<sup>[10,11]</sup>。原因在于,机电程序多采用隐式梯形积分法求解微分方

程, 而每个时步需要的迭代次数预先无法确定。尤其在故障/扰动时刻, 相应时步的迭代次数将会大大增加, 需要更长的计算时间。由于这样的仿真结果尚不能保证每个时步的计算时间均小于或等于理想的机器时间, 尽管某些情况下可以使得加速比  $\lambda < 1$ , 但却不能保证与自然时空的信息交互在时间上保持一致性。因此传统的机电暂态仿真程序还属于无约束仿真, 仅适合于离线分析。

由加拿大 Manitoba 开发的 RTDS, 是为实现实时电力系统电磁暂态仿真而专门设计的并行计算机系统<sup>[10,18,19]</sup>, 由计算软件 RSCAD、计算处理和接口等硬件设备组成。可以实时且连续地模拟电力系统电磁暂态、机电暂态现象, 其典型的仿真步长为 50~80  $\mu\text{s}$ 。

RTDS 硬件设备非常昂贵, 每个 Rack 计算能力有限, 不可能对整个电网进行仿真, 研究工作大多是根据现有的 RTDS 硬件资源和所研究问题的具体类型建立详细程度适当的电网模型。

时域仿真法计算电力系统动态元件及其控制系统的动态过程, 是典型的刚性非线性动态系统。采用自动变步长积分方法, 在系统的快变阶段(机电暂态)使用小步长计算, 而在慢变阶段(中长期动态)使用大步长。优点是暂态过程及中长期动态过程可以采用统一的模型和数值积分方法, 在中长期动态过程中可以大步长进行仿真。针对应用实践中该方法的主要缺点和问题: 1) 机电暂态过程中计算步长过小, 导致仿真效率很低; 2) 算法难以处理模型中的间断环节, 文献[11]提出了一种组合数值积分数值法, 结合固定步长的隐式梯形积分法和变步长的吉尔法的优点, 通过一定的切换策略, 使机电暂态过程中自动采用隐式梯形积分数值法, 而在中长期动态过程中自动采用变步长吉尔法。该算法可以解决变步长吉尔法在机电暂态阶段存在的计算速度过慢和间断环节处理复杂的问题, 为电力系统全过程动态实时仿真系统提供了有价值的参考。

结合节点分裂的划分思想<sup>[20]</sup>, 文献[21]提出树形节点分裂法进行网络分割: 将电力网络按地域进行拓扑, 以树形节点分裂法分割网络, 分割后的各个子网络在拓扑上以树形分层结构相联接。每个子网用一个树节点来表示, 该树节点称为网络节点。再将每一网络内部的发电机、负荷作为该网络节点的下层节点接

入计算树。最后将发电机的控制器(励磁调节器、电力系统稳定器和调速器等)作为发电机的下层节点接入计算树。

计算树体现了电力系统的电气结构, 分割后的电力网络、发电机、励磁器、电力系统稳定器(简称 PSS)、调速器、动态负荷(如电动机)等在计算树中表现为不同的计算节点。计算树的最上层子网节点称为根节点, 末梢节点称为叶节点。每一子网节点的下层节点包括了本子网内部的发电机节点、动态负荷节点以及从本子网分裂出去的所有下层子网节点。

节点分裂法进行网络分割的结果不是惟一的, 不同的分区方案会对仿真的计算效率造成影响, 如何进行区域分割使各个子系统的计算规模与接口通信计算量之间达到协调, 是采用该方法需要专门研究的优化问题。此外, 研究结果还表明, 随着分区数的增多, 计算效率的提高渐趋缓慢<sup>[21]</sup>。

节点分裂法的研究, 还可用于实现电磁暂态分网并行计算<sup>[6]</sup>, 该方法使网络中任意点都可以作为边界点进行网络分割, 即能保持长输电线解耦法并行计算的较高并行效率, 还能提高分网并行的灵活性。节点分裂法即可用于交直流电力系统实时仿真分网并行计算, 以实现交直流系统实时仿真。也可应用于电力系统电磁暂态仿真与机电暂态仿真接口计算中, 实现电力系统电磁暂态仿真与机电暂态仿真的混合仿真。为电力系统全过程动态实时仿真系统提供了计算方法方面的理论基础和必要的技术保证。

#### 4. 电力系统联网资源的“成长性”、“自治性”和“多样性”

现代电力系统仿真技术的研究内容, 主要围绕在以下几个方面: 1) 如何开发出快速计算的新方法, 以满足实时仿真的需要<sup>[1-4,6,7]</sup>; 2) 怎样解决仿真的接口, 使仿真能联合计算, 以扩大仿真规模<sup>[5,6]</sup>; 3) 对新型电力设备或运行方式的仿真研究<sup>[8]</sup>; 4) 实时仿真装置与物理设备闭环仿真的研究与应用<sup>[9,10]</sup>; 5) 全过程动态(机电暂态与中长期动态过程)仿真技术的研究<sup>[11]</sup>。研究的焦点在混合仿真, 这需要不同类型的仿真过程平滑连接, 同时又必须充分体现各类仿真对象的动态特性, 这也是仿真技术上一直没有很好解决的难点。由于现代电力系统是复杂大系统的这一特性, 决定了

仿真技术的多样型与混合型并存、研究方法的专业性与综合性并重的局面。

从计算机网络设施的角度来说<sup>[22]</sup>, 分布式 VR (Virtual Reality, VR) 有基于高速专用网络和基于 Internet 两类。前者用于军事训练和演练等大规模专门性质的虚拟现实应用, 后者适合个人性质的随机的虚拟现实应用, 如远程教育、娱乐等。

传统计算机资源管理模式的成功在于具有以下 3 个基本特点: 一是可以明确被管资源边界; 二是可以实施全局资源控制; 三是可以建立统一的资源描述。然而, 对于电力系统全仿真计算机的联网资源管理, 这三个基本特点不再存在, 传统计算机资源管理模式不再适用于多套计算机仿真系统的联网资源管理。

概括来说, 多套计算机仿真系统的联网资源具有“成长性”、“自治性”和“多样性”等 3 个相互联系的自然特性。

#### 4.1. 成长性

成长性是指联网资源的规模不断膨胀、资源关联关系不断变化的动态特性。电力系统是一个不断成长的开放系统, 其覆盖地域不断扩大, 大量的分布异构资源不断更新与扩展。随着网络应用的扩展与深入, 资源及其关联关系也在不断动态演化, 相应的资源特征信息(即有关资源属性的描述信息)也必将不断的扩充和变化, 这一特性导致资源管理的范围难以确定。

#### 4.2. 自治性

自治性是指联网资源具有局部自治、自主决策的特性。例如, 电力系统互联网络上很多资源面向特定的组织和个人, 一个组织(资源提供方)既可以根据另一个组织(资源需求方)的要求向它提供资源, 也可以拒绝提供资源。全局化的资源控制不再适用, 协同成为资源共享的重要形式。然而, 互联网络上很多局部自治资源之间缺乏有效的协同能力, 难以联合起来共同完成大型的应用任务, 这种相对独立的状态严重影响了联网资源综合效用的发挥。

#### 4.3. 多样性

多样性是指联网资源属性存在广泛差异的特性。这些差异增加了资源统一建模和管理的困难。例如,

联网资源既包括各种信息和数据资源, 也包括各种应用程序和服务等资源, 还包括各种计算和仪器等物理资源。这些资源在类型、属性上等多方面都存在显著差异, 难以给予完整一致的描述, 这导致资源的组织管理困难。

联网资源的自然特性给资源的有效共享和综合利用带来了巨大的挑战, 在联网环境下, 对成长、自治和多样的网络资源, 难以沿用传统的全局集中控制式的资源管理, 必须在计算环境的机理上有所突破。文献[23]指出联网资源管理思路需要 2 个转变, 即: 1) 从试图掌握系统全部资源状况, 转向面向需求依靠局部信息动态聚合资源; 2) 从传统的集中管理和控制全部系统资源, 转向通过分布自治资源间的自主协同来实现资源的共享和综合利用。进而提出以网络资源的按需聚合和自主协同为核心, 建立虚拟计算环境(iVCE)的思路。iVCE 将建立在开放的网络基础设施之上, 为终端用户或应用系统提供和谐、可信、透明的一体化服务。

电力安全问题的复杂性不但来自其高维、强时变、强非线性特性, 以及微分-差分-逻辑-代数混合系统, 还反映在多领域(物理、经济、信息)、多类稳定性(静态、动态、暂态、周期、结构)、多时间尺度(电磁暂态、机电暂态、中期、长期)、多物理量(电流、电压、频率、功角)和多空间尺度(局部模式、全局模式)等方面<sup>[24]</sup>。

纵观电力系统仿真的研究与实践, 可以观察并注意到, 联网环境与传统计算机环境存在本质差别, 传统的计算机资源管理模式已经不再适用互联网环境, 必须在概念和方法上寻求新的突破。我们认为, 缺乏适合整个电力系统仿真联网自然特性的计算环境是制约联网信息资源有效共享和利用的瓶颈。

### 5. 电力系统虚拟计算环境 iVCE-PS 的概念

电力系统虚拟计算环境 iVCE-PS 是指建立在开放的电力系统资源基础之上, 以电力系统仿真的按需聚合与自主协同为核心机制, 为用户或应用系统提供和谐、可信、透明的一体化服务环境, 实现有效资源共享和便捷合作工作。

其内容主要包括, 1) 构建资源的主体化模型, 体现资源的自治性; 2) 构建利益共同体, 支撑资源的按

需聚合; 3) 构建分布执行机制, 支撑资源间的自主协同。本文提出了 iVCE-PS 的 3 个重要概念: “电力系统元件元素”、“电力系统仿真共同体”和“电力系统仿真执行体”。

### 5.1. 电力系统元件元素

iVCE-PS 系统中, 资源专指电力系统中的各种元件及连接方式, 各种元件的种类、特点及性能等关键特性都可能有所区别。iVCE-PS 通过对电力系统元件元素的直接操作屏蔽了这种异构性, 例如, 不同电力系统元件的类型可能不同, 电力系统元件元素指定一个存储类, 所有的相关操作都以此作为基本单元。电力系统元件元素不仅仅是元件的一种基本抽象, 它还通过增加感知、动作和行为驱动部件, 将静态、被动的个体元件变成了能够独立提供服务的、活跃的行为主体。图 1 给出了电力系统元件元素的基本功能。

如图 1, 电力系统元件元素包括了对外界服务请求和对内存状态的感知, 并通过输出部件向外部环境反馈, 并通过中间行为驱动对输入信息进行处理。电力系统元件元素作为 iVCE-PS 中的自主元素, 不仅封装了元件的异构性, 还使元件具备了自主决策和可成长演化的能力。

### 5.2. 电力系统仿真分析共同体

由于电力系统的多样性, 在特定的任务中不需要获得系统全部资源状况, 仅需要依靠局部信息动态聚合资源。在 iVCE-PS 中, 只有对特定任务目标有共同利益需求的自主元素, 才有可能被纳入资源聚合的范围。为此提出电力系统仿真分析共同体的概念, 其描述了具有共同兴趣、遵从共同原则的自主元素的集合。包含了所有加入该共同体的电力系统元件元素、元件连接关系和操作关系等, 电力系统仿真分析需要这些自主元素的共同参与。

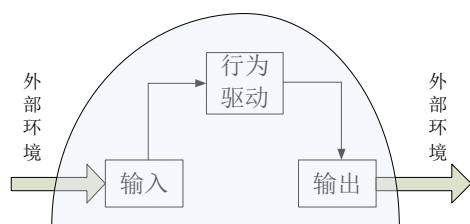


Figure 1. Elements of power system  
图 1. 电力系统元件元素

在电力系统仿真分析中, 同一电力系统仿真分析共同体内部的自主元素, 其所关注的资源都是确定和一致的。如关注电力系统新能源发电的可再生能源共同体, 其内部包含的风能发电、太阳能发电与地热发电等都围绕着新兴的能源发电这一共同特点而发挥不同的作用。而一个元素有可能属于多个虚拟共同体, 例如一个提供储能的自主元素, 有可能也同时提供了一种控制手段。

### 5.3. 电力系统仿真分析执行体

在 iVCE-PS 运行态, 需要根据任务选择和请求自主元素的服务, 实现自主元素与任务的动态绑定; 一个任务可能需要多个自主元素提供服务, 而单个自主元素也可能同时为多个任务服务。为了有效支持任务目标的达成, 需要对与特定任务相关的自主元素执行状态进行管理和协调, 为此给出电力系统仿真分析执行体的概念, 是指若干个电力系统元件元素在同一任务的指导下, 为完成该任务而形成的状态空间的总和。iVCE-PS 中的电力系统元件元素、元件连接关系和操作关系等之间的交互通过电力系统仿真分析执行体进行。

## 6. 电力系统虚拟计算环境 iVCE-PS 的系统构架

电力系统分析和仿真技术是电力系统规划、设计和运行必不可少的工具和手段。研究开发面向 21 世纪的电力系统仿真技术<sup>[25]</sup>, 需考虑下述几个重要的问题: 1) 电力电子技术在电力系统中的应用, 如 FACTS 装置的投入, 促使电力系统机电暂态分析与电磁暂态分析相结合; 2) 对大电网连锁反应事故的分析, 要求进行长期动态分析、电压稳定性分析, 并与暂态稳定分析相结合; 3) 电力市场化的发展趋势, 要求电力系统技术分析与经济分析相结合, 电力一、二次控制设备和系统多样化, 要求提供更精确的数学模型和用户自定义的建模方法; 4) 为实现大电网在线分析, 应研究更为快速的分析方法, 解决快速性与精确度的矛盾。

基于上述, 给出电力系统虚拟计算环境 iVCE-PS 的系统构架, 参见图 2。

### 6.1. 资源扩展和资源层

资源扩展和资源层由各种异构和多样的电力系



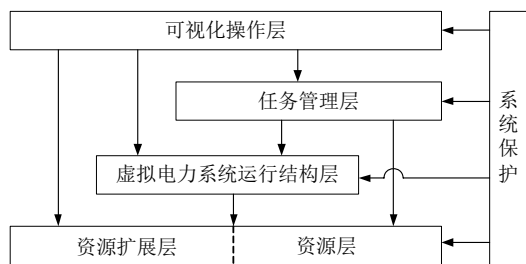


Figure 2. Configuration block frame on iVCE-PS system  
图 2. iVCE-PS 体系结构框图

统单元组成。这些单元不仅可包括各种发电机、线路、变压器和负荷等，也包括各类元件连接关系、计算程序和管理软件等。为了满足现代电力系统发展的需要，在资源层的基础上增加了资源扩展层，可以更好地满足新技术、新设备的建模等需要。并支持这些资源的有效共享和协同。

### 6.2. 可视化操作层

可视化操作层直接面向使用者，提供 iVCE-PS 之上的各种应用功能。

### 6.3. 系统保护

系统保护为了保护整个系统的完整性与安全性，直接作用于各层。在任何情况下监视整个体系的运行情况，一旦遇到非正常情况启动紧急操作预案，使整个系统免于不可恢复性破坏。

### 6.4. 虚拟电力系统运行结构层

虚拟电力系统运行结构层和任务管理层是 iVCE-PS 的核心，虚拟电力系统运行结构层如图 3 所示，展现了电力系统所有元件元素的组成关系，并可根据任务管理层的实际需要创建不同的电力系统仿真共同体与电力系统仿真执行体。

图 3 为虚拟电力系统运行结构概览。

调度自动化仿真分系统，即可以是传统的能量管理系统 EMS，也可以是具有闭环趋优控制功效的 A-EMS<sup>[26,27]</sup>。发电厂控制系统包括：水电厂控制仿真分系统；火电厂控制仿真分系统；风电场控制仿真分系统；核电站控制仿真分系统；各类新能源发电控制仿真分系统，可以接受 AGC 指令的机炉协调控制系统 CCS，和接受 AVC 指令的自动电压调节器 AVR 以及各种 PSS 等。可以提供原动机的机械功率和相关

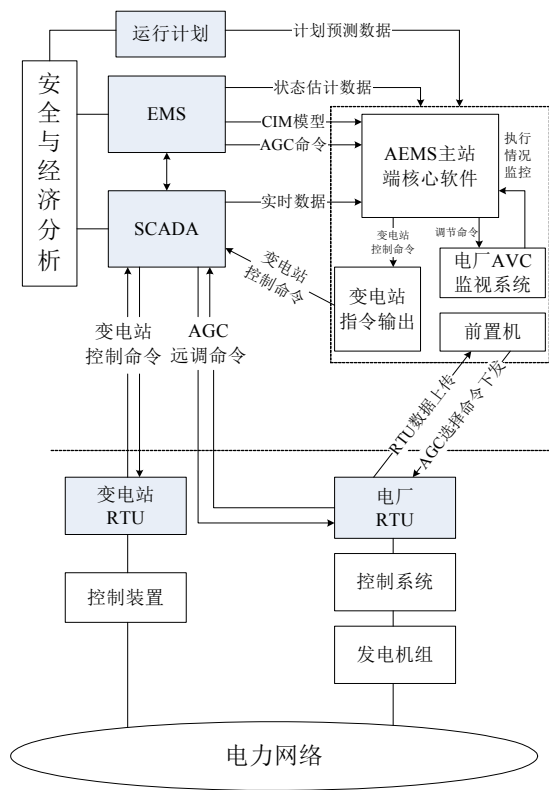


Figure 3. Overview of the operating structure on virtual power system  
图 3. 虚拟电力系统运行结构概览

参数。各类变电站控制仿真分系统模拟电网负荷侧的变化。电力系统全过程仿真(分)系统包括：机电暂态过程仿真分系统和电磁暂态过程仿真分系统，由于其“成长性”、“自治性”和“多样性”等 3 个相互联系的自然特性，可以根据实际情况或研究工作的需求，将 SVC 和各种 FACTS 装置、广域测量装置等仿真分系统纳入其中。

图 4 为虚拟电力系统仿真分系统框架。

程序初始化负责统一整个仿真网络的时间，各仿真分系统根据各自计算周期在相应的时刻交换彼此的信息。操作员手动干预或故障设置仿真分系统，用以模板人工干预，按照 hardware-in-the-loop 或 man-in-the-loop 的原则，进行人机交互的操作，或由研究工作的需求预置若干类故障场景，然后由相应的仿真分系统判断是否存在人工操作或者预置的故障，并以最高的优先级随时中断机电暂态程序，令其立刻响应网络故障或变化所引起的动态过程。在这两种情况下，自然时空中的对象在客观上要融入到仿真的虚拟时空中，自然时间和仿真时间必须要相互关联起来。

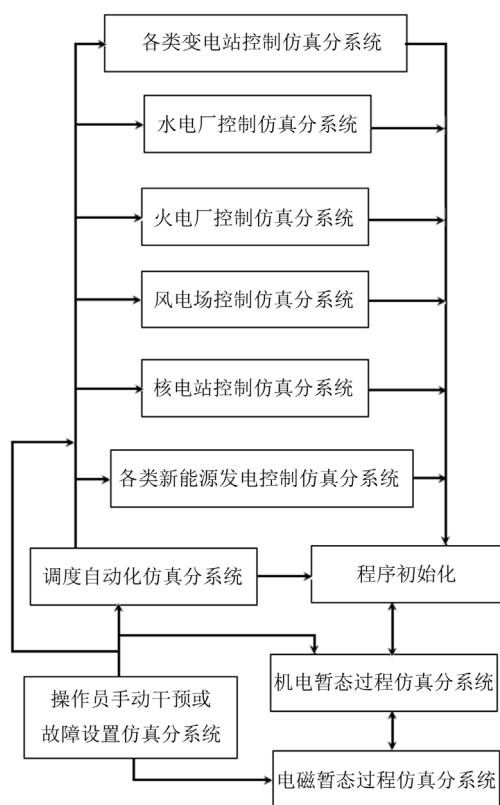


Figure 4. Block frame on simulation subsystem of virtual power system  
图 4. 虚拟电力系统仿真分系统框架

## 6.5. 任务管理层

任务管理层负责整个系统的管理与运行，在整个体系中起到至关重要的作用，可通过分层实现如下的基本功能。

1) 最高决策指挥层的模拟仿真：接收底层实时动态电力系统计算机仿真子系统模拟给出的各关键节点状态数据，进行数据处理，然后根据对信息的分析，由调度自动化系统计算机仿真分系统的各功能模块进行判断(包括调度员人工调度指令)，据此下达相应的控制命令 C (control command)以驱动中间层；

2) 中间处理与操作层的模拟仿真：接受调度自动化系统计算机仿真子系统下达控制指令 C 后，中间处理与操作层计算机仿真子系统综合考虑受控电力系统内部各种控制设备的运行情况，生成相应的合理操作指令 O(operation order)，并将指令下达给底层的受控装置；

3) 底层的模拟仿真：由各个区域电网的网络结构仿真子系统、发电厂计算机控制系统及其相应的受控

对象仿真分系统、变电站及其控制装置仿真分系统以及 SVC 和各种 FACTS 装置、广域测量装置等仿真分系统所组成。

## 7. 结论

现代电力系统越来越复杂，其在国民经济中的地位越来越重要，对电力系统安全可靠供电的要求也越来越高。这使得在实际运行的电力系统中进行试验研究，存在较大的安全性风险，难以开展。而真实可信的电力系统仿真可以为提高电网运行的可靠性提供决策支持。随着经济技术的发展，现代电力系统的复杂性与可靠性对先进仿真技术提出了更高的要求，也决定了更先进理论在电力系统仿真分析中应用研究的必要性。

本文借鉴 iVCE 的理论成果给出 iVCE-PS 的概念，并通过电力系统元件元素、电力系统仿真共同体和电力系统仿真执行体等概念，支持电力系统仿真环境下资源的按需聚合和自主协同，建立电力系统虚拟计算环境 iVCE-PS 的系统体系，并对其功能进行解析。

## 参考文献 (References)

- [1] 贺仁睦, 周庆捷, 郝玉国. 电力系统机-网暂态仿真的并行算法[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(3): 179-184.
- [2] 李亚楼, 周孝信, 吴中习. 基于 PC 机群的电力系统机电暂态仿真并行算法[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 6-12.
- [3] 李亚楼, 周孝信, 吴中习. 一种可用于大型电力系统数字仿真的复杂故障并行计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 1-5.
- [4] 薛巍, 舒继武等. 基于集群机的大规模电力系统暂态过程并行仿真[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 38-43.
- [5] 岳程燕, 田芳, 周孝信等. 电力系统电磁暂态-机电暂态混合仿真接口原理[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 23-27.
- [6] 岳程燕, 周孝信, 李若梅. 电力系统电磁暂态实时仿真中并行算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 1-7.
- [7] 李芳, 郭剑, 吴中习. 基于 PC 机群的电力系统小干扰稳定分布式并行算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 7-13.
- [8] 张晋华, 刘云, 印永华等. 特高压交/直流电网仿真技术研究[J]. 电网技术, 2007, 31(23): 1-5.
- [9] 田芳, 李亚楼, 周孝信等. 电力系统全数字实时仿真装置[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 17-22.
- [10] 贾旭东, 李庚银, 赵成勇等. 基于 RTDS/CBuilder 的电磁-机电暂态混合实时仿真方法[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 33-38.
- [11] 宋新立, 汤涌, 刘文焯等. 电力系统全过程动态仿真的组合数值积分算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 23-29.
- [12] 卢锡城, 王怀民, 王戟. 虚拟计算环境 iVCE: 概念与体系结构[J]. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2006, 36(10): 1081-1099.
- [13] S. T. Andrew. Distributed operating systems. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.

- [14] L. Gong. Jxta: A network programming environment. *IEEE Internet Computing*, 2001, 5(3): 88-94.
- [15] 刘永强, 雷文, 吴捷等. 多时间尺度电力系统的模型降阶及稳定性分析: (二) 电力系统的降阶与中长期失稳[J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(2): 45-51.
- [16] 姚新宇, 黄柯棣. 仿真中的时间和实时仿真[J]. *系统仿真学报*, 1999, 11(6): 415-417.
- [17] 郑利平, 刘晓平. 人在回路仿真运行有效性评估方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(7): 1417-1420.
- [18] R. Kuffel, J. Giesbrecht, T. Maguire, et al. RTDS-a fully digital power system simulator operation in real time. Winnipeg: *Conference Proceedings on Communications Power and Computing*, 15-16 May 1995: 30-305.
- [19] H. Duchon, M. Lagerkvist, R. Kuffel, et al. HVDC simulation and control system testing using a real-time digital simulator (RTDS). Texas: *First International Conference on Digital Power System Simulators*, 5-7 April 1995: 213.
- [20] J. Liu. A graph partitioning algorithm by node separators. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1989, 15(3): 198-219.
- [21] 房大中, 杨晓东. 基于模块双向迭代的电力系统仿真新算法研究[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2005, 35(9): 981-995.
- [22] 赵沁平. 虚拟现实综述[J]. *中国科学 F 辑: 信息科学*, 2009, 39(1): 2-46.
- [23] 卢锡城, 王怀民, 王戟. 虚拟计算环境 iVCE: 概念与体系结构[J]. *中国科学 E 辑: 信息科学*, 2006, 36(10): 1081-1099.
- [24] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架: (一)从孤立防线到综合防御[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(1): 8-16.
- [25] 周孝信. 研究开发面向 21 世纪的电力系统技术[J]. *电网技术*, 1997, 21(11): 11-15.
- [26] 卢强, 何光宇, 梅生伟等. AEMS 及其在上海电网试运行[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2008, 38(3): 476-480.
- [27] 何光宇, 孙英云, 阮前途等. 现代电力调度控制中心的革新——由 EMS 走向 AEMS[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2009, 39(4): 729-734.