

清华大学

综合论文训练

题目：智能电网混合仿真系统研究及设计

系别：信息学院自动化系

专业：自动化

姓名：杨刚

指导教师：吉吟东教授

2013年6月 7 日

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

(涉密的学位论文在解密后应遵守此规定)

签名：_____ 导师签名：_____ 日期：_____

中文摘要

信息物理系统（CPS）是近些年来发展迅速的前沿技术之一，智能电网被认为是 CPS 最典型的例子。智能电网是在现有电网基础设施基础上融合通信、计算机、自动控制技术，实现了电力流与信息流在电力生产方与用户之间高速的双向流通。智能电网的发展离不开仿真软件的应用，然而现阶段并没有一个单独的软件能够对于智能电网中各个组成部分进行仿真。

本课题通过对智能电网混合仿真系统的应用需求进行分析，结合已有的混合仿真系统，设计了全新的仿真系统结构，完成了一个结合电力系统和通信网络系统仿真软件以及电力控制器的混合仿真系统，并结合标准电网模型，通过对比实验验证了该仿真系统的完整性及准确性，为以后的研究工作奠定基础。

关键词：智能电网；混合仿真；时延；控制策略

ABSTRACT

Cyber-Physical Systems (CPS) has been proposed as one of the leading techniques recently. Smart grid is considered to be the most typical example of CPS. Smart grid is based on the existing grid infrastructure and has converged communications, computers, automatic control technology, so as to have realized the high-speed bidirectional flow of power flow and information flow in power between producers and users. The development of smart grid is dependent on the application of simulation software; however, at this stage there is not separate software that can simulate each component of the smart grid.

In this paper, through the analysis of application of smart grid hybrid simulation system, combining the existing hybrid simulation system, I have designed a new structure of simulation system, and completed a hybrid simulation system, which includes power system, communication network simulation software and power controller. Besides, this paper lays the foundation for later research work through the contrast experiment of verifying the completeness and accuracy of the simulation system, which is combined with the standard grid model.

Key words : Smart grid; simulation; delay; control

目录

第 1 章	绪论	1
1.1	课题研究背景及意义	1
1.2	研究现状	2
1.3	本文所做的工作	4
第 2 章	智能电网及混合仿真系统概述	6
2.1	智能电网的产生背景	6
2.2	智能电网的概念	7
2.2.1	智能电网的定义	7
2.2.2	智能电网的特点	8
2.3	智能电网混合仿真系统介绍	9
2.4	系统功能预期	11
2.5	本章小结	11
第 3 章	智能电网混合仿真系统的设计与实现	13
3.1	开发环境	13
3.1.1	硬件环境	13
3.1.2	软件环境	13
3.2	电力仿真模块的设计	13
3.2.1	仿真模型的选择	13
3.2.2	仿真软件接口介绍	16
3.2.3	数据采集模块的设计	18
3.2.4	受控模块的设计	19
3.3	通信网络仿真模块的设计	21
3.3.1	Estinet 软件的使用	21
3.3.2	通信网络的设计与搭建	21
3.4	电力监测控制器的设计	23
3.4.1	电力监测控制器功能设计	23
3.4.2	电力监测控制器具体实现	23
3.5	仿真时间与真实事件不同步处理方法	24

3.5.1	系统中各模块的时间同步性	25
3.5.2	时间同步性修正方法	26
3.6	本章小结.....	29
第 4 章	智能电网混合仿真系统实验验证	30
4.1	实验模型介绍.....	30
4.1.1	电力仿真模型	30
4.1.2	通信网络模型	30
4.2	混合仿真系统功能验证.....	30
4.2.1	电力仿真软件单独仿真	31
4.2.2	电力仿真软件与电力监测控制器混合仿真	32
4.2.3	电力仿真软件、通信网络仿真软件、电力监测控制器混合仿真	34
4.2.4	对比试验结果分析	36
4.3	本章小结.....	37
第 5 章	总结与展望	38
5.1	本文工作总结.....	38
5.2	未来工作展望.....	38

第1章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

新世纪以来，全球范围内的政治经济形式正在发生深入的变化，能源发展的格局，尤其是以电力行业为中心的体制革命的序幕已经拉开。现如今，伴随着能源需求的变化，例如正在进行的车辆电气化，组合式（混合动力）电动汽车（EVs）需要从电网给电池充电，因此它们会给电网附加负载。电动汽车需要大量的电力来给电池充电，而且充电的地点是不确定的，它们被称作是“移动的能源消费者”，因为它们对于能源的需求不是限制在一个单一的地方。

需求和供给的变化将会影响未来电力网络的发展，由于可再生能源的非持续性和需求模式的变化，供应规划将变得更加复杂。与此同时，各国正在推广可再生能源，如太阳能和风能。与传统能源如化石能源（如煤炭等）相比，可再生能源提供了一种更加环保的能源产出解决方案。然而，它们的非持续性使得平衡需求和供应非常困难，而这对于电力网络的正确操作是必不可少的。

传统上，发电是由主电厂来完成，功率流是单向的从生产者到消费者，然而，遍及整个电网的分布式能源的兴起使功率流呈现双向性。电网并不是为这些分布式能源和双向功率流而设计，所以对于这些能源的精密管理是必要的。

面对以上问题，在激烈市场竞争的情况下，电力系统的重组已经是不可避免。在新的系统中，了解电网是如何运行，特别是如何监听和控制它，是保证电网能够可靠并且平稳运行的必要的先决条件。

传统的保护系统其电网监测数据来源局限于本地测量，其采用的控制策略也仅限于调节本地系统，这种控制方式在电网实际输电负荷与电网极限输电负荷相比较小时有很好的控制效果，但是当实际输电负荷接近电网极限输电负荷时，控制的效果从全局来看往往不是最优的。然而，在过去的十年中，电力系统的运营已经开始接近其传输、产生和稳定的极限，保护和控制系统相应的面临更大的压力。电力工程师已经推断出使用基于互联网标准的网络通信是一个自然的选择，这将满足目前需要保护和控制系统要更快以及在更广的地理区域收集数据的工作需求[1]。

可以自然的推断出，拥有更多的监测数据和更快捷的通信网络的电力保护和控制系统将会比现有的系统更高效。这就将需要一种能够让电力工程师精确地模拟电力网络和通讯状况的新评估工具。这个工具需要能够模拟现实电网中面临的现实情况如负载震荡、电流中断以及通讯网络中的计算机通信协议的行为建模和

不同网络状态下数据传输的情况。通过使用这种工具电力工程师将在实验室中发现并解决智能电网可能存在的问题，避免现实生产中潜在的昂贵花费或有损害性事故发生。

1.2 研究现状

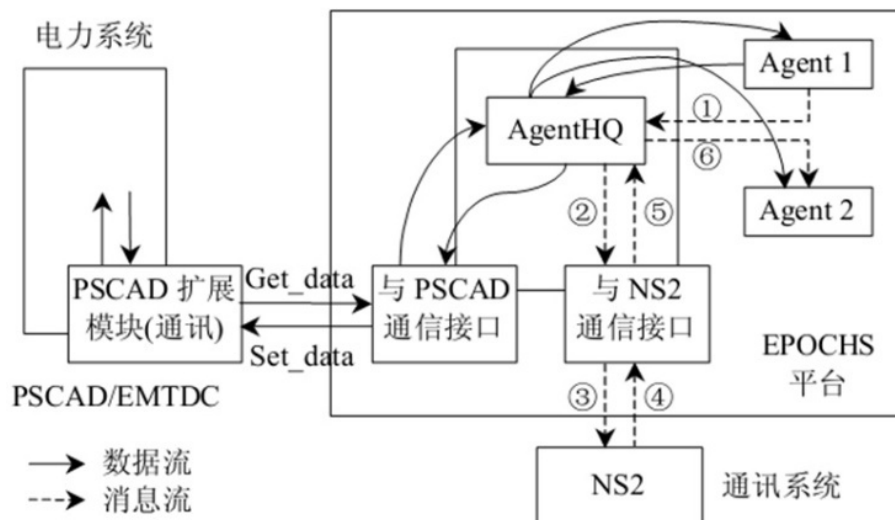
随着社会经济与技术的蓬勃发展，智能电网必将在世界普及，欧美国家本世纪初已经开展了对于智能电网的研究工作[2]，我国在这几年来也开展了对于智能电网的研究。智能电网可以保证电力系统安全、稳定和高效的运行，这对于国家的可持续发展具有重要意义。

通过对智能电网混合仿真系统的进行文献检索和调查研究，我总结出国内外的一些研究部门针对混合仿真所开发的一些软件系统。

文献[3]提出了一种基于 OpenDSS 和 NS2 的混合仿真系统，其中 OpenDSS 和 NS2 在平台中是各自独立的，两个仿真软件之间用一个脚本文件连接，所以仿真平台并不是闭环的，同时笔者提出了一些是真的假设。

文献[4]中作者在攻克两个不同仿真系统里时钟同步问题取得了很大的进步。他们用 UNIX 管线进行通信，并用 NS2 的内部事件来触发电网仿真。仿真的时间由 NS2 控制，以此保证了同步的可能。然而在这种条件下，某些唯一有物理系统出发的事件不能够被发现，这也导致了很多人仿真错误。

文献[5]介绍了一个经典的闭环混合仿真系统 EPOCHS，它将电力系统电磁暂态仿真软件 PSCAD/ EMTDC、网络通信仿真软件 NS2 集成在一起，这个系统通过非干涉技术实现了仅仅通过内嵌的应用程序编程接口来实现不同仿真平台之间的连接。其结构图如图 1.1 所示。



2
图 1.1 EPOCHS 混合仿真系统的基本构架

这个仿真系统中使用的电力仿真软件和网络仿真软件都是业界使用较多的软件，所以仿真结果的正确能够得到保证，此混合仿真系统也得到了广泛的认可和应用。

为了充分利用电力系统仿真软件与通信系统仿真软件仿真结果，该混合仿真系统在运行时需要不断进行 PSCAD 与 NS2 之间的数据交互。这时就会面对一个问题：电网仿真是定步长离散仿真而通信网络仿真是不定步长离散仿真，两者之间无法做到实时的数据交互。

为了解决这个问题作者引入了 RTI 机制，即加入全局的数据同步程序并设置了同步时间点。仿真过程中 PSCAD 和 NS2 各自独立运行，只有在同步点仿真暂停进行数据的交互，待数据更新以后再继续进行仿真。引入这种模式后，系统的构架如图 1.2：

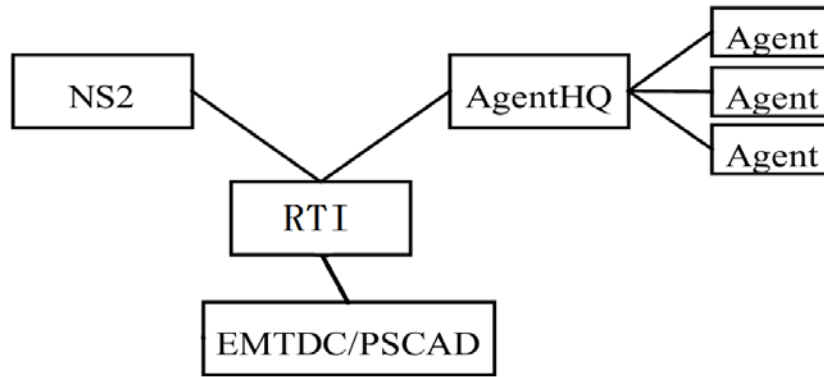


图 1.2 EPOCHS 系统构架图

这样的交互模式基本上能够保证数据的实时性，而且能够避免由于数据交互所带来的仿真速度的减慢。但是这种将同步的机制会引入时间上的误差，而且随着仿真的运行不断累积，示意图 1.3 表示了仿真运行过程中由于同步机制所带来的时间上的误差。

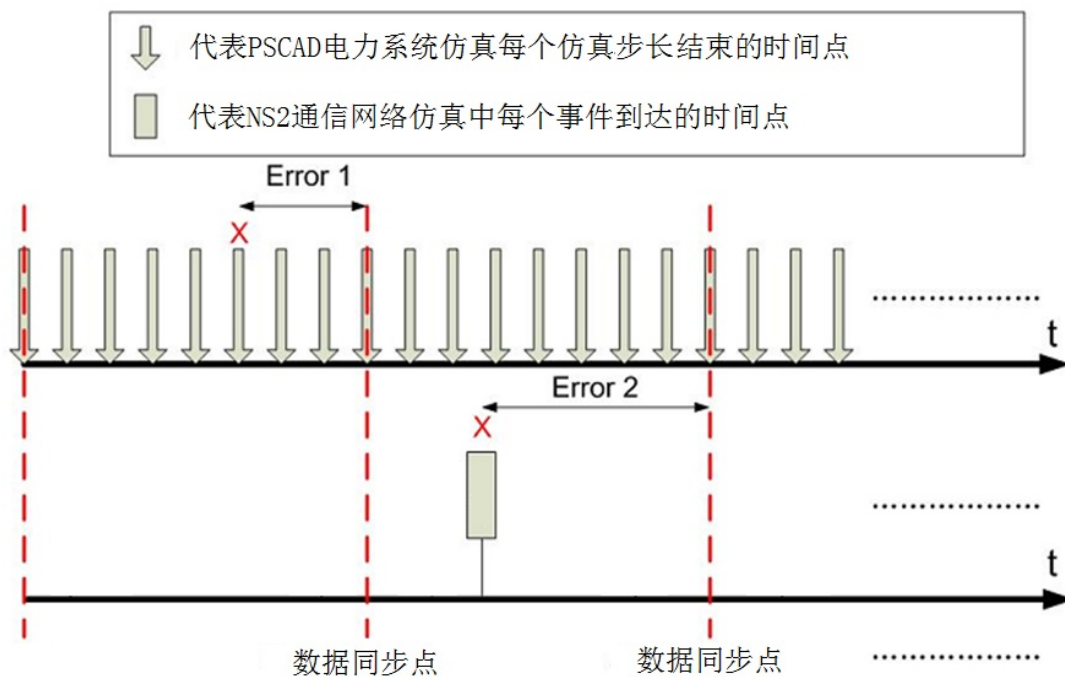


图 1.3EPOCHS 混合仿真系统的运行中数据同步示意图

图上显示了同步机制可能带来的两方面的时间误差。假设在两个数据同步点的间隔内电力系统发生了错误，这个错误的事件只能在下一个数据同步点到来时才能够发送到通信网络仿真器当中，这将带来 Error1 的时间误差。同样，如果在两个数据同步点的间隔内通信网络仿真传来了对于电力系统的控制命令，也只能等到下一个数据同步点才能够传送到电力系统仿真器当中，这样将带来 Error2 的时间误差。

对于一个闭环的控制系统，每一个事件都会引入 $Error1+Error2$ 的时间误差，当仿真系统运行时间较长时，较多的事件会重复引入误差，此误差会累计增长。

1.3 本文所做的工作

本文通过对智能电网产生背景及其特点进行分析，根据智能电网的应用背景确定智能电网混合仿真系统的功能需求，结合现有工作成果，对已有的智能电网混合仿真系统结构进行分析和改进，设计出全新的混合仿真系统结构，选用合适的电力仿真软件、通信网络仿真软件，完成混合仿真系统的搭建。并对该系统进行对比实验，比较仿真系统的实际效果，并与现有的智能电网混合仿真系统进行试验比较，提出改进意见。

第一章介绍了该课题的应用背景以及现有的研究成果，并着重对经典的闭环混合仿真系统 EPOCHS 的结构及其仿真误差进行分析。

第二章介绍了智能电网产生的背景及其特点，进而详细分析了智能电网混合仿真系统的应用背景和需求，并对于该课题中设计的混合仿真系统结构进行详细介绍和分析。

第三章详细阐述了混合仿真系统的设计以及实现过程，包括电力仿真模块、通信网络仿真模块、电力监测控制器的搭建，并重点介绍了时间同步性对于该系统的重要性，给出了可能产生时间不同步的解决办法。

第四章应用该混合仿真系统进行实验验证，由实验结果分析该系统的实际效果，并与其他混合仿真系统进行对比实验，分析该系统的优缺点。

第五章对该课题进行了总结，并给出了未来工作的发展方向。

第2章 智能电网及混合仿真系统介绍

2.1 智能电网的产生背景

在人类发明了电的一百多年来，电力工业已经彻底改变了人类的社会形态。与通信网络日新月异的更新相比，电力系统却仍然保持着几十年前的样子，其调度方法和控制模式一直以来没有发生大的变化。这并不是说电力系统已经完善到不需要改变了，而是因为电力系统特有的保守型使得新技术在电力系统内的应用速度比较缓慢。在现代社会，电力已经是无处不在。如今，电力网络已经成为世界上覆盖面积最广、结构最为复杂的人造网络系统之一，而这种大型网络系统运行与控制的难度也在与日俱增。

进入新世纪以来，全球范围内的电网频繁发生的一系列大停电事故证明现在的电网存在自身的脆弱性。仅以美国、加拿大 2003 年 8 月 14 日特大停电事故为例，根据 2004 年 4 月 5 日美加两国组成的联合调查组公布的调查报告显示[6][7]，这次大面积停电以美国北部五大湖为中心，波及到 8 个州以及加拿大的安大略省，美国局部地区停电达到 4 天，加拿大部分地区挺大时间长达一周多。停电涉及至少 21 座电厂、265 座电站、超过 508 台发电机组停运。停电范围 24000 平方公里，共计损失负荷 61800MW，共有 5000 万人受到影响。美国停电损失估计约 40 亿~100 亿美元，加拿大经济损失约为 23 亿加元。

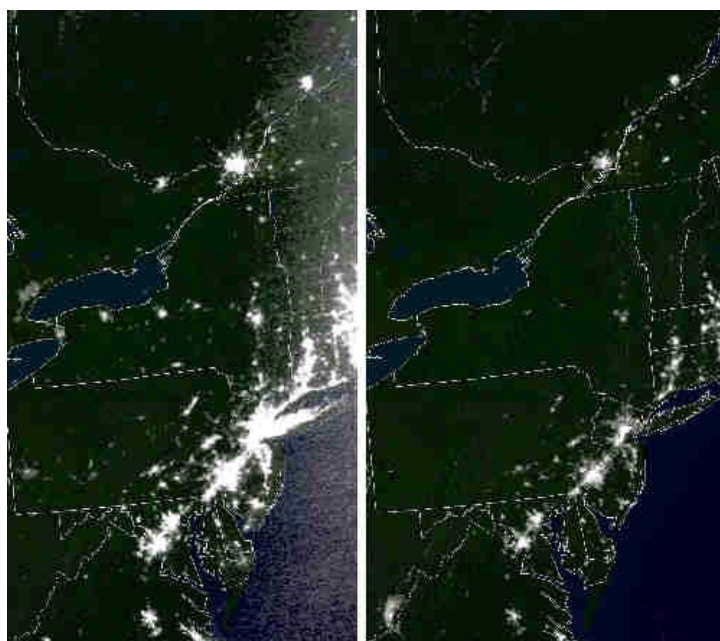


图 2.1 2003 年美加大停电停电前（左）和停电后（右）对比的卫星地图

近十年来，与美加大停电类似的停电事故在全球范围内屡屡发生，已经给社

会经济造成严重的影响和损失。对我国而言，随着电网规模的不断扩大，每次大停电事故所造成的平均符合损失也在与日俱增，如何确保大规模电力网络的可靠安全运行已经成为理论和实践上严峻的挑战。

另一方面，化石燃料的日益减少，将威胁电力的安全供应，同时，人们对于电能可靠性、供电质量以及发电和输电容量的要求却在不断增长；传统输配电系统的基础设施正在逐步老化，电网安全、可靠和优质供电的能力也越来越弱。不仅如此，由于化石燃料发电会导致二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物等温室气体的排放量不断增加，出于保护环境、节能减排的要求，电网需要风力发电、太阳能发电、生物质能发电等分布式可再生能源发电来代替传统的发电模式[8]。面对人们对于电能质量越来越高的需求，传统的电力系统已经难以满足要求。

2.2 智能电网的概念

2001年，美国电科院（EPRI）首次提出了 IntelliGrid 的概念来定义未来电网的发展方向。美国电科院认为未来的电网应该通过开放、标准化、基于用户需求，实现电网数据和设备的融合，并且提供大范围内的弹性控制和防范的需求响应。2005年美国能源部（DOE）提出了 Grid Wise 方案，指出未来电网应该整合发、输、配电系统以及中断电器设备。文献[9]中介绍的欧洲的未来电网被命名为 Smart Grid。现如今，智能电网——Smart Grid 这个名字已经被全世界广泛采用。

2.2.1 智能电网的定义

对于智能电网，目前并没有一个统一的定义，由于经济发展阶段、能源禀赋以及电网现有状况等具体国情的不同，各个国家对于智能电网内涵的阐述、发展的侧重方向以及发展路线的制定，呈现出共性特征和个性特点。在公共特征方面，各个国家对于智能电网的内涵和认识不断地趋于一致，智能电网建设的目标都涵盖了电力系统的各个环节，并最终希望实现整体电网能量流、信息流、业务流的高度融合。在个性特点方面，各国建设智能电网的出发点和侧重点呈现出差异化特点，并制定了各具特色的发展路线[10]。

我国对于智能电网的研究开展较晚，2008年天津大学余贻鑫院士首先将智能电网定义为一个完全自动化的供电网络，保证每一个用户和节点都得到实时监控，并实现从电力生产中到用户之间的每一个节点上电力流和信息流的双向流动。智能电网通过对于分布式互联网通信节点的应用，以及自动控制系统的集成，保证电力生产者与用户之间的实时互动。

通过文献检索可知，智能电网是将信息技术、通信技术、计算机技术、先进的电力电子技术、可再生能源发展技术和原有的输配电基础设施高度集成的新型电网。多技术的高度融合，可以极大地提升智能电网的智能化运行和管理水平，显著提高电网抵御日益频繁的自然灾害和外界干扰的能力，是电网的自愈成为可能。它还能使电网接入、输送、和消纳更多的清洁能源发电，降低设备的运营成本、促进节能减排[10]。

2.2.2 智能电网的特点

智能电网是新一代的智能电力网络系统，实现了将现代 IT 技术嵌入到包含可再生分布式能源的电力网，从而保证电网的高效运行的目标。这样的改变不仅是电力行业的革新，也会带动社会发展的前进。

2009 年 5 月国家电网公司首次提出我国智能电网的发展目标，正式对外公布名为“坚强智能电网”的发展规划，其基本构架如图 2.2 所示：

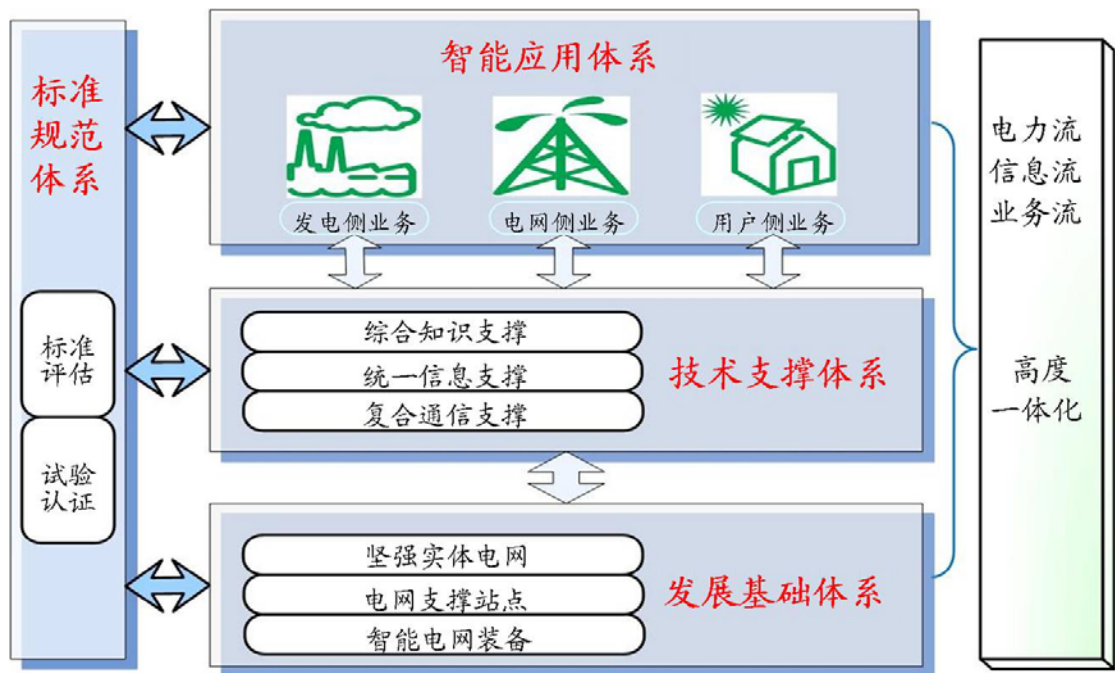


图 2.2 坚强智能电网基本构架

在未来智能电网具有以下几方面的特点[11][12]：

1. 自愈：实现无人干预时即可将电网中故障元件进行隔离，恢复电网到正常状态。
2. 安全：涉及到电网、设备和人身方面的安全，通过安全分析、优化网络设计从而增强抵御风险的能力。
3. 兼容：可以满足集中式大电源、分布式电源的接入以及电动汽车充放电

设备的接入要求。

4. 高效：实现资产优化配置，降低电能损耗，达到电力系统高效运行的目的。

5. 交互：将电力用户信息整合到电网运行当中，精细而完整的检测电网状态。

6. 优质：通过制定新的电能质量标准，保证电网提供优质的电能，也可以提供差别定价的电力供应。

2.3 智能电网混合仿真系统介绍

智能电网技术的成熟与推广势在必行，与之相匹配的仿真技术也在不断发展中。现有的仿真器所能实现的功能与智能电网仿真的要求相比都太过单一，现在已有高效的电力系统仿真软件，也有成熟的通信网络仿真软件，但是将电力与通信结合的软件目前还没有开发出来。与此同时，构建一个新的具有多功能的仿真工具是费时和昂贵的，而且由于技术以及资金的局限，新的仿真工具在性能上很可能难以满足实际生产的要求。

面对这种局面，一种可选方法是连接多个仿真工具使其成一个分布式的仿真环境。在业内这种将多个仿真工具结合起来使用的方法现在变得越来越普遍，甚至有人提议将这种体系标准化，尤其是高级体系结构（HLA）。现在有很多商用仿真系统由于其丰富的功能集、易用性以及低廉的使用费用在许多领域都深受欢迎。上文中提到的 EPOCHS 就是一个经典的混合仿真系统平台，它实现了智能电网闭环控制的仿真，很好的实现了电力与通信两个系统的数据交互。

通过文献和软件调研，我设计了联合电力系统电磁暂态仿真软件 EMTDC/PSCAD，网络通信仿真软件 Estinet 的智能电网混合仿真系统，其系统构架设计如图 2.3 所示：

电网仿真软件 PSCAD

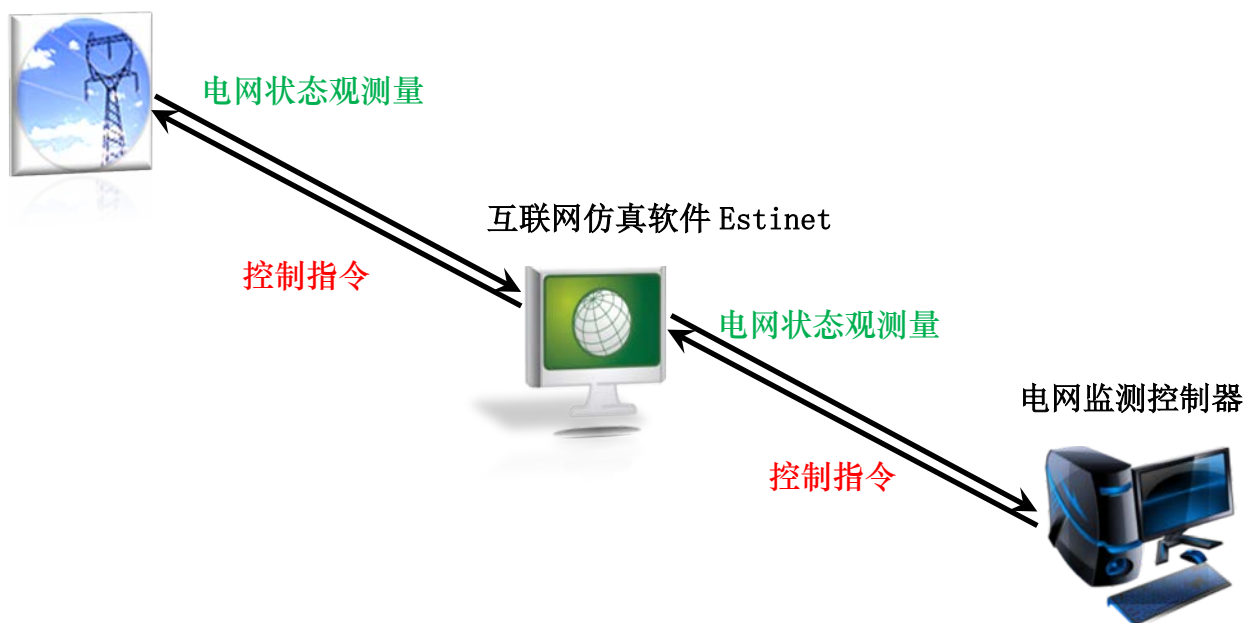


图 2.3 混合仿真系统构架图

该系统架构分为三个部分，每个部分的设计原因和实现的功能：

电力系统仿真：这部分仿真由 PSCAD 软件完成。这里选择 PSCAD 主要基于一下考虑：

1. PSCAD 拥有图形用户界面，准备和试验系统模拟的速度特别是计算大型复杂系统的速度，要比用 ATP 或 EMTP 快得多。

2. 对多串联和并联的电路元件被算术地分解，通过使用少得多的节点和支路来加速求解。求解更快、灵活并在数字上更稳定。

3. 由于在混合仿真系统中电力仿真软件要与通讯网络仿真软件进行实时通讯，所以需要电力仿真软件具有较短的计算步长。通常情况下电磁暂态仿真软件的计算步长为 50 微秒，而机电暂态仿真软件计算步长为 10 毫秒。同样进行 10 秒的仿真，机电暂态仿真只进行了 1000 步，而电磁暂态仿真能够进行 20 万步。当仿真步长增大以后，不仅采集的数据会减少，而且会削弱控制器对于电网的控制力，无形中增大了仿真的误差。作为一款电磁暂态仿真软件，PSCAD 相比于机电暂态仿真软件具有明显的短步长优势。

通信网络仿真：这部分仿真由 Estinet 软件完成。这款软件由台湾新竹交通大学进行开发，是一个基于 Linux 操作系统的网络仿真器。其前身为新竹交通大学开发的 NCTUns6.0。这款仿真软件虽没有 NS2 等仿真软件使用广泛，但时相比之下具有以下优点：

1. 由于其使用可重入内核的方法，利用操作系统真实的网络协议栈，模拟结果能够更逼真地体现实际网络的运行效果。

2. 整个模拟与仿真器构建在操作系统的系统调用之上，与真实使用的网络应用程序能够很好地进行协同处理，通过对模拟与仿真器参数进行不同的设置，能够很好地估计出不同情况下网络系统与应用程序的性能。

3. 软件能够直接使用现有的一些网络软件，这能够减少设计实验环境可能带来的巨大工作量。

电力监测控制器：这个控制器模拟检测电网的终端服务器。程序由 C 语言编写，其实现的功能如下：

1. 实时接收电网每个节点的传回的状态量。
2. 解析节点的状态量，判断是否发生异常情况。
3. 对于发生异常的节点给出控制命令。

2.4 系统功能预期

基于以上系统构架和各模块之间的功能组合，我们希望能够实现智能电网的混合仿真，在实验室环境下实现该系统的以下几个功能：

1. 对于电网的运行仿真，实现电网中关键节点数据的采集和传输，控制命令的接收，以及根据控制命令来对电网中关键模块进行控制。

2. 构建一个虚拟的复杂网络环境，通过该网络来进行电力仿真软件向控制器发送电网实时数据、控制器向电力仿真软件发送控制命令，实现网络仿真的模拟。

3. 对于电力仿真软件与真实时间不同步情况的进行处理，保证混合仿真系统的合理性。

4. 在电网稳定运行情况下加入扰动，记录有无控制器情况下电网恢复稳定过程的数据。

2.5 本章小结

本章回顾了智能电网的产生背景，阐述了其基本概念及特点，并对于智能电网混合仿真系统的构架进行介绍，明确了混合仿真系统的功能预期。

智能电网是新型的现代化电网，在现有电网设施的基础上，加入了先进的通信、传感测量、自动控制等技术手段，实现了电力流与信息流在电力生产方与客户间的双向高速流通。智能电网是电力行业的必然发展方向，代表了全世界人民

的愿望。为了保证智能电网的顺利建设，需要通过计算机仿真的手段对于智能电网进行仿真，由此引起对于相关仿真系统的研究，只有在实验室做好仿真工作，智能电网的理论完善以及后期的建设才能够顺利、安全、高效的进行，进而保证智能电网的正常运营。

本章正是基于智能电网的电力—通讯—控制三个基本组成方面，对智能电网混合仿真系统中的不同模块所要实现的功能进行说明，指出了软件选取的理由，为下面的混合仿真系统的具体搭建工作做了充足的准备工作。

第3章 智能电网混合仿真系统的设计与实现

3.1 开发环境

在实际的智能电网运行当中，电网的运行、电网数据的采集以及互联网传输数据都不需要计算机进行模拟，只有电力监测器需要运行在服务器上。在仿真系统当中，电力仿真软件和监测控制器都运行在电脑上，网络仿真软件由于系统的需要运行在服务器上。

3.1.1 硬件环境

笔记本电脑：

CPU: Inter(R)Core 2 Duo T6600 @ 2.2GHz

内存: 2.00GB

服务器：

CPU: Inter(R) Core(TM) 2 Quad CPU Q9400 @2.66GHz

内存: 1.00GB

3.1.2 软件环境

笔记本电脑操作系统: Windows 7 Professional 32 bit

服务器操作系统: Fedora 14 32 bit

电力仿真软件: PSCAD 4.2.0 Professional

通信网络仿真软件: Estinet 7.0

监测控制器: Microsoft Visual C++ 6.0

3.2 电力仿真模块的设计

现有的电力基础设施是未来智能电网的基础，同样，电力仿真模块也是混合仿真系统的基础部分。此次运用 PSCAD 电力仿真软件进行电力仿真，仿真的精度和速度都能够达到保证。

在该课题中电力仿真模块设计分为以下三方面：

3.2.1 仿真模型的选择

因为课题中混合仿真系统模拟了一个实际电网的运行过程，所以电力仿真需要依托在一个电网模型下进行，通过文献调研，我选取了 IEEE 14 母线节点标准

测试系统。其系统结构图如下图 3.1

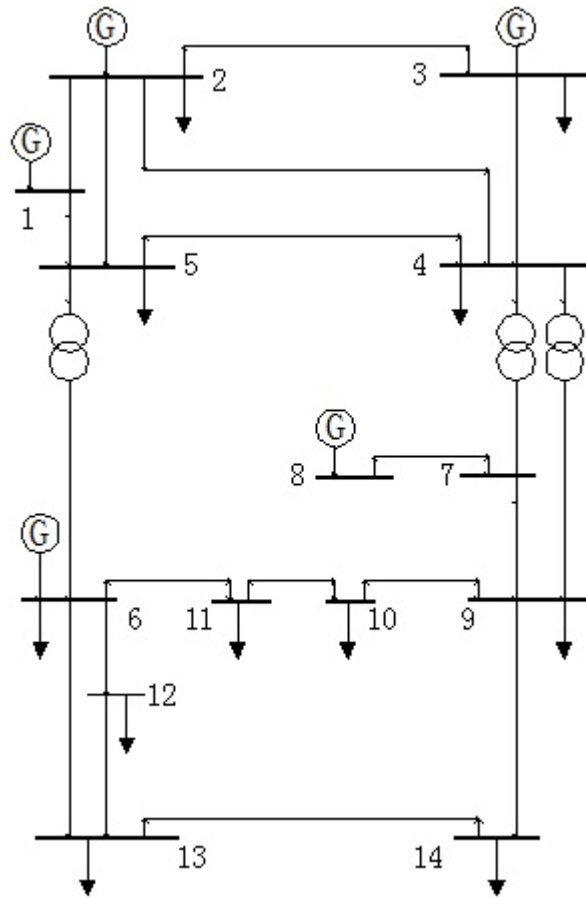


图 3.1 IEEE 14 母线节点标准测试系统系统结构图

图中 G 代表发电机，一共有 5 个发电机，分为两个发电区域。标有数字的位置为电力传输的节点。

通过调节参数，此电网已经能够实现平稳运行。图 3.2 至 3.4 显示了在电网上电到平稳运行过程中关键节点电压及发动机之间偏转角差值的变化过程。

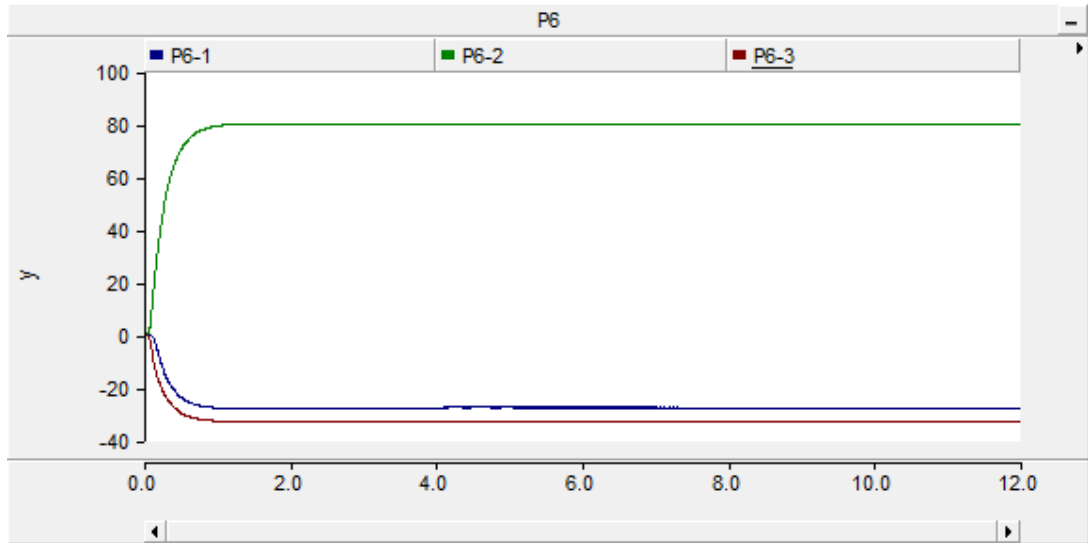


图 3.2 节点 6 附近 3 条支路的两项电压变化过程图

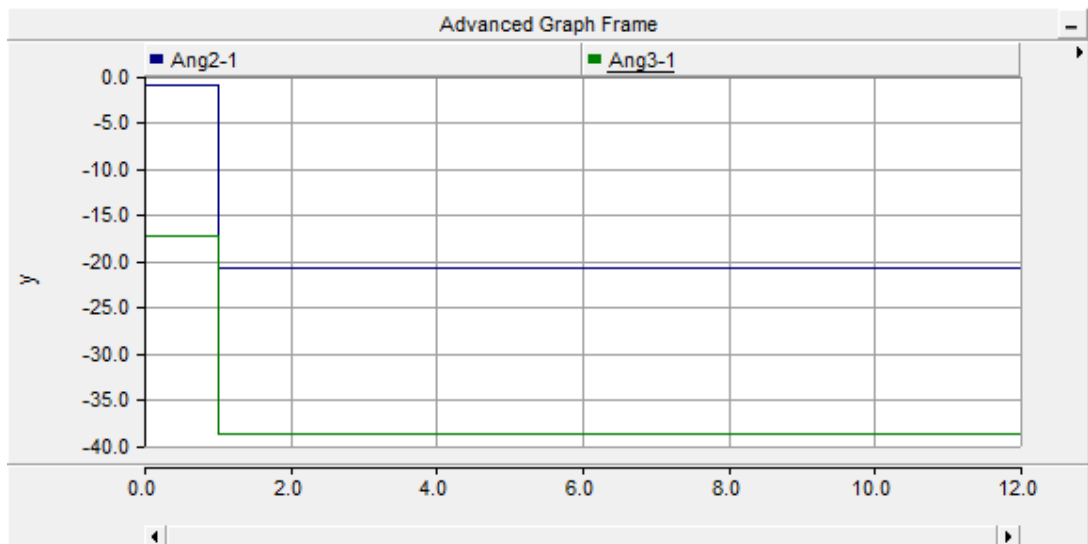


图 3.3 发电机 2 与发电机 1，发电机 3 与发电机 1 之间偏转角差值图

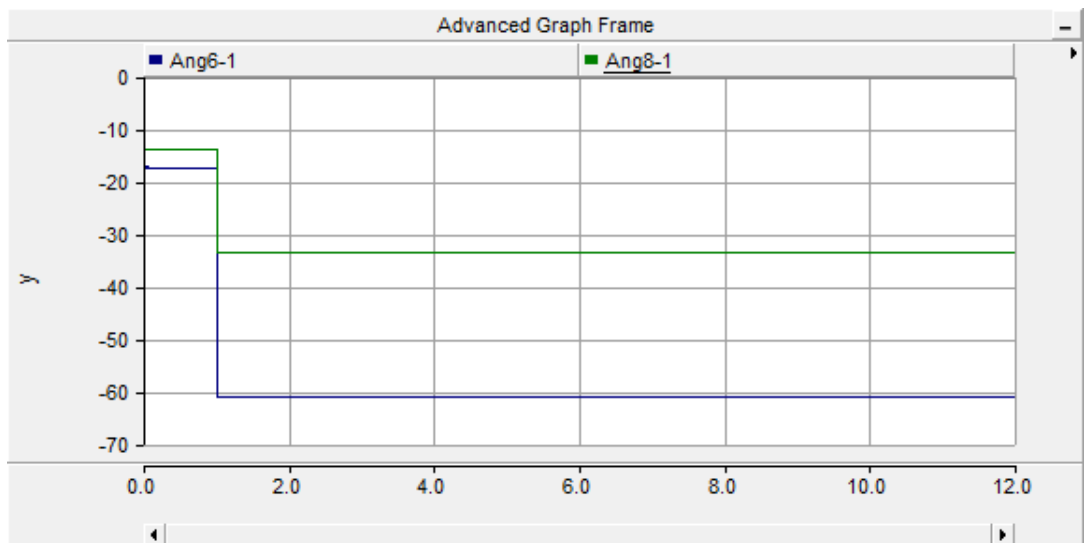


图 3.4 发电机 6 与发电机 1，发电机 8 与发电机 1 之间偏转角差值图

3.2.2 电力仿真软件接口介绍

PSCAD 并不是一款开源的软件，没有开放式的接口，如 API 函数和 OLE。但是其预留了数据级和程序级的接口，可以保证仿真数据的采集以及控制命令的传输。

数据级接口包括了数据输入接口以及数据输出接口，可以实现一下功能：

1. 利用外部数据资源
2. 生成数据供外部程序调用
3. 查看仿真过程中的详细数据

数据级接口的对于数据的输入输出都是以文件作为媒介，主要用于采集并保存仿真数据进行后期分析处理。在本次课题中，要实现数据流的实时双向流动，所以此种数据接口并不适用。

程序级接口可以通过调用外部子函数、加入用户自定义库的方式或是调用其他外部程序的方式实现以下功能：

1. 与其他应用程序实时交互
2. 自动生成仿真计算程序
3. 作为后台支持程序

PSCAD 支持 Matlab、C 语言和 Fortran 三者中某一种语言编写的外部函数，鉴于 Matlab 函数通常运行较慢，而且对系统资源占用较大，Fortran 使用不熟练，而 C 语言使用广泛，扩展性好，而且运行效率高的特点，本课题中将采用 C 语言作为外部函数的编写语言。

PSCAD 中调用外部 C 语言文件方法如下：

1) 在 PSCAD 图形化输入界面新建自定义元件并确定元件的输入输出引脚位置及个数，如图 3.5 所示，其中元件上方有两个输入引脚，左侧有两个输出引脚。

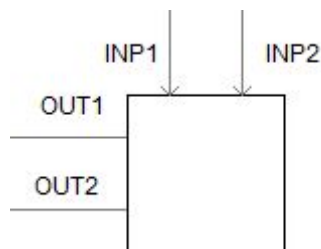


图 3.5PSCAD 中自定义元件

本课题中，输入输出数据的类型都是 Real（浮点数），如图 3.6：

ieee14v3.route_control:1					
Layers	Connections	Parameters	Computations		
Name	Expression	M	Type	Dim	F
in1		<	Real		*
in2		<	Real		*
out1		>	Real		*
out2		>	Real		*

图 3.6 自定义元件输入输出数据类型

2) 通过 File Reference 元件对已添加的自定义元件添加文件关联, 关联到已经编写好的 C 语言文件, 已关联的文件会在 PSCAD 图形界面建立一个文件图标, 如图 3.7:

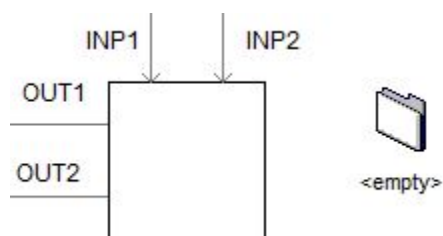


图 3.7 PSCAD 图形界面中文件关联示意图

3) 在添加文件关联后, 自定义元件在运行时关联到相关文件, 但是仍没有关联到文件内部的具体函数, 这时就需要对自定义元件的再次进行设置, 在其脚本文件中添加关联语句, 指向所要调用的函数。

假设需要调用的函数名:

void control_csub(double *arg1, double *arg2, double *res1, double *res2) 则需要脚本中添加语句:

CALL CONTROL_CSUB(\$IN1, \$IN2, \$OUT1, \$OUT2)

至此, 已经实现在 PSCAD 中调用外部 C 语言文件的功能, 仿真过程中数据通过自定义元件的输入输出线连接到电网当中, 所实现的功能取决于 C 语言函数的编写。

PSCAD 仿真程序自动生成过程结构图如图 3.8:

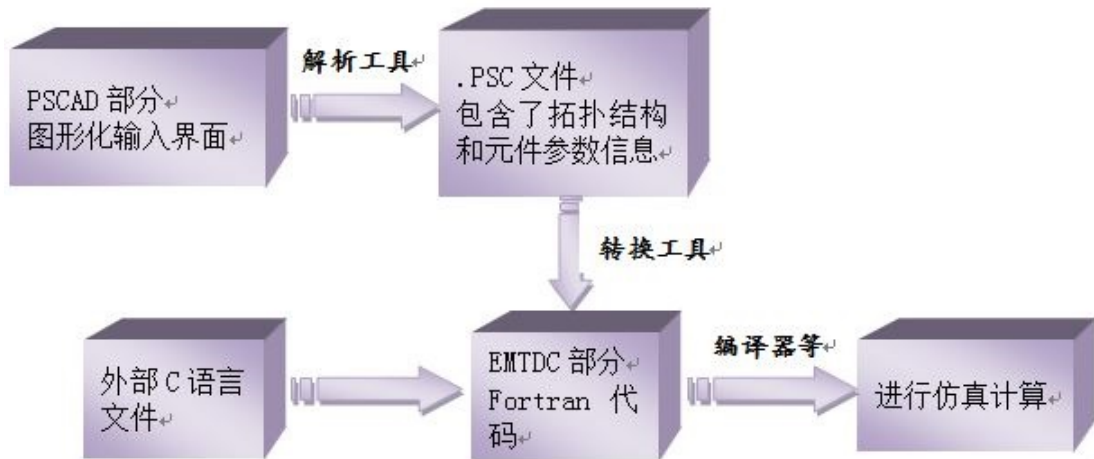


图 3.8 PSCAD 仿真程序自动生成过程结构图

3.2.3 数据采集模块的设计

为了保证混合仿真系统的可扩展性和可移植性，此次电力系统数据采集被设计为单独的一个模块，这个模块可以采集一个信号的数据并发送出去，相信在以后更换仿真电网模型或者增加模块功能时能够很方便的移植，也能作为其他人工作的借鉴。

1) PSCAD 中数据采集元件的设计

通过 3.2.2 节的说明，已经明确了如何在 PSCAD 电网模型中增加自定义元件以及如何关联 C 语言文件。

在设计数据采集元件时，考虑到可移植性的原因，每一个模块只有一个输入信号，并且有一个输出信号。自定义模块见图 3.9:

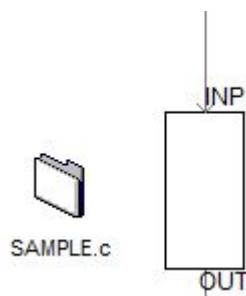


图 3.9 数据采集元件图

单输入单输出的设计是为了既能够保证信号的采集和传输，又能保证在电网中对采集到的信号进行实时处理；同时，不会因为多输入多输出产生使用上的误解，也增加了模块的可移植性。

2) 功能函数的介绍

数据采集模块关联的文件为 SAMPLE.c，采用 C 语言编写，实现了以下功能：

1. 创建基于 UDP 协议的 socket 通信，用于发送数据
2. 获取数据发送时 PSCAD 仿真进行时间，已仿真的步数
3. 将上面获取到的数据以及需要发送的电网监测数据分别转换为 5 字节的字符串。
4. 将 3 个 5 字节的字符串合并为一个 15 字节的字符串，发送到电网监测控制器指定的 IP 和端口。

发送的数据类型以及可表示的范围如表 3.1：

表格 3.1 发送数据的结构

字段名	数据类型	数据范围	描述
S_time	long	-999999999-999999999	采集数据时仿真时间
sample	int	-200-200	采集到的电网数据
degree_sam	long	0-100000	已仿真的步数

3.2.4 受控模块的设计

将电网数据实时发送给电力监测控制器的目的的一方面是为了能够实时监测电网运行状态，另一方面也是为了能够发现电网运行中的偏差，及时加以修正，而这里设计的控制模块就是模拟电网中的受控单元在接收到来自控制器的控制命令时，对电网的运行状态进行一定的修正。

因为本课题主要目标是完成对于混合仿真系统的搭建，所以在对于电网控制策略方面没有深入研究。此次将控制器设定在 2 号发电机内部，受控模块如图 3.10：

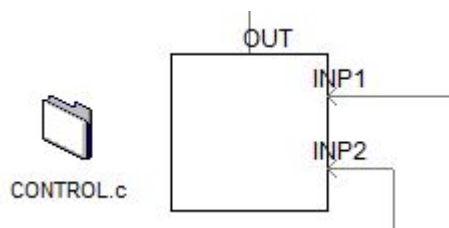


图 3.10 受控模块结构图

此受控模块有 2 个输入和 1 个输出，可以实现对于输入 INP1 和 INP2 信号进行处理后由 OUT 端口输出。

模块关联的文件为 CONTROL.c，其中包含的四个函数，及其分别实现的功能说明如下：

1. void control_csub (double *arg1, double *arg2, double *res):

这是控制文件的主函数，可实现监听特定的端口，接收基于 UDP 协议的 socket 传来的数据，分析数据内容，并根据内容在合适的时间点切换控制策略。

2. BOOL listen_socket():

创建基于 UDP 协议的 socket 通信，用于接收控制命令。

3. double old_control(double in1, double in2):

这是在电网正常运行时受控模块所采用的数据处理函数，其中 in1、in2 为受控模块的输入信号，此函数的返回值为最终模块的输出。在本课题中，选用单端口进行输出。

4. double new_control(double in1, double in2):

这是切换控制策略后受控模块所采用的数据处理函数，其中 in1、in2 为受控模块的输入信号，此函数的返回值为最终模块的输出。在本课题中，选用单端口进行输出。

在本课题中，控制命令为整数，不同的数值大小代表不同的控制策略。当然，在其他的研究中控制命令的表示方式可以进行修改。

受控模块通过 socket 接收 10 字节的字符串，其中前 5 字节为控制命令，后 5 字节为此命令发出的时间戳，这个时间戳在 PSCAD 仿真与显示时间不同步时具有矫正作用，这在后面会详细叙述。

接收数据的类型及其表示的范围如表 3.2:

表格 3.2 受控模块结构图

字段名	数据类型	数据范围	描述
S_time	long	-999999999-999999999	采集数据时仿真时间
order	int	-200-200	控制命令
degree_con	long	0-100000	采集数据时已仿真的步数

3.3 通信网络仿真模块的设计

3.3.1 Estinet 软件的使用

Estinet 是一款商用软件，在互联网上市无法下载到的，为了课题需要，实验室向台湾思锐科技有限公司提交了书面申请，获取到了半年的软件使用权。软件的版本为 Estinet7.0，需要运行在 Linux 环境下，根据思锐公司的推荐，课题中选用了 fedora 14 操作系统。

Estinet 在运行时需要获取系统的 root 权限，通过对软件的学习，了解到通过 Estinet 搭建的网络可以实现内部仿真和外部仿真两种仿真形式。

内部仿真：搭建的网络中的路由器、主机都是由软件虚拟的，链路的带宽和时延也可以随意设置，仿真软件会自动对每一个路由器和主机非配虚拟 IP，仿真步长也可以随意变动。

外部仿真：搭建的网络中主机是现实中真实的主机，此时需要电脑的连接方能实现仿真。链路的带宽和时延也可以人为设置，但是仿真过程中仿真软件的时间与真实时间实时同步，即仿真了 10 秒的网络状态所需要的真实时间一定为 10 秒。

经过学习，实现了仿真软件的初步使用，如图 3.11

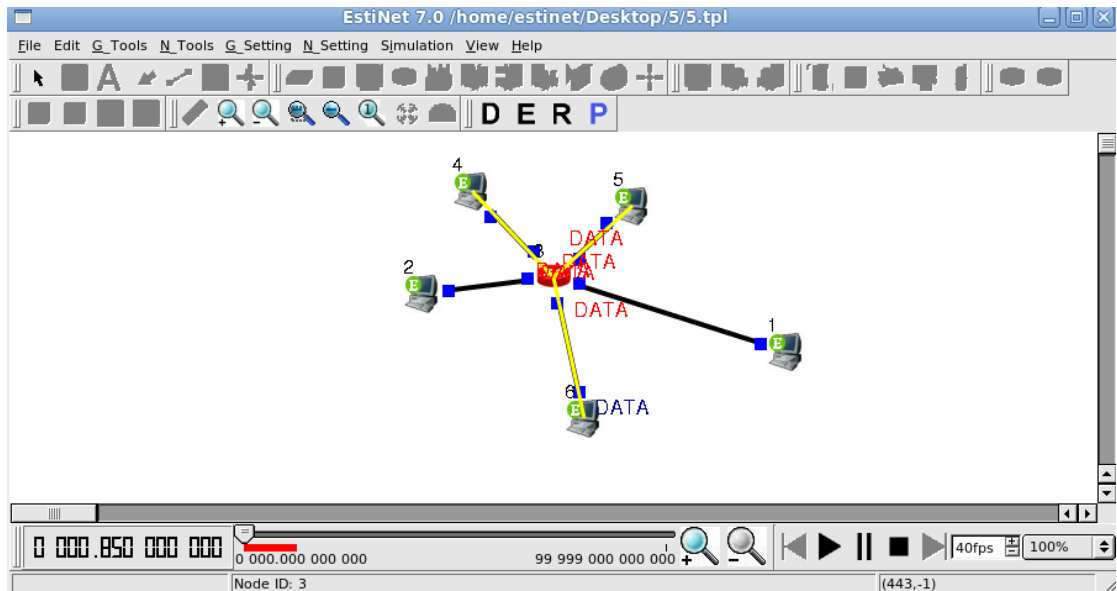


图 3.11 Estinet 搭建的简单网络模型

3.3.2 通信网络的设计与搭建

在本课题中，通信网络模拟了真实世界的互联网，需要通过模拟的网络

传输数据的过程，并在此过程中加入一定的网络时延，模拟显示网络的时延。基于上述原因，课题中使用了 Estinet 外部仿真的功能，在仿真软件内部虚拟出一个复杂的网络，实现两个实体机之间数据的双向传输。

通信网络参数：

1. 路由器数量： 50
2. 链路带宽： 10 兆
3. 链路时延： 50 微秒
4. 网络产生模式： 随机生成

通过以上参数生成了通信网络，如图 3.12

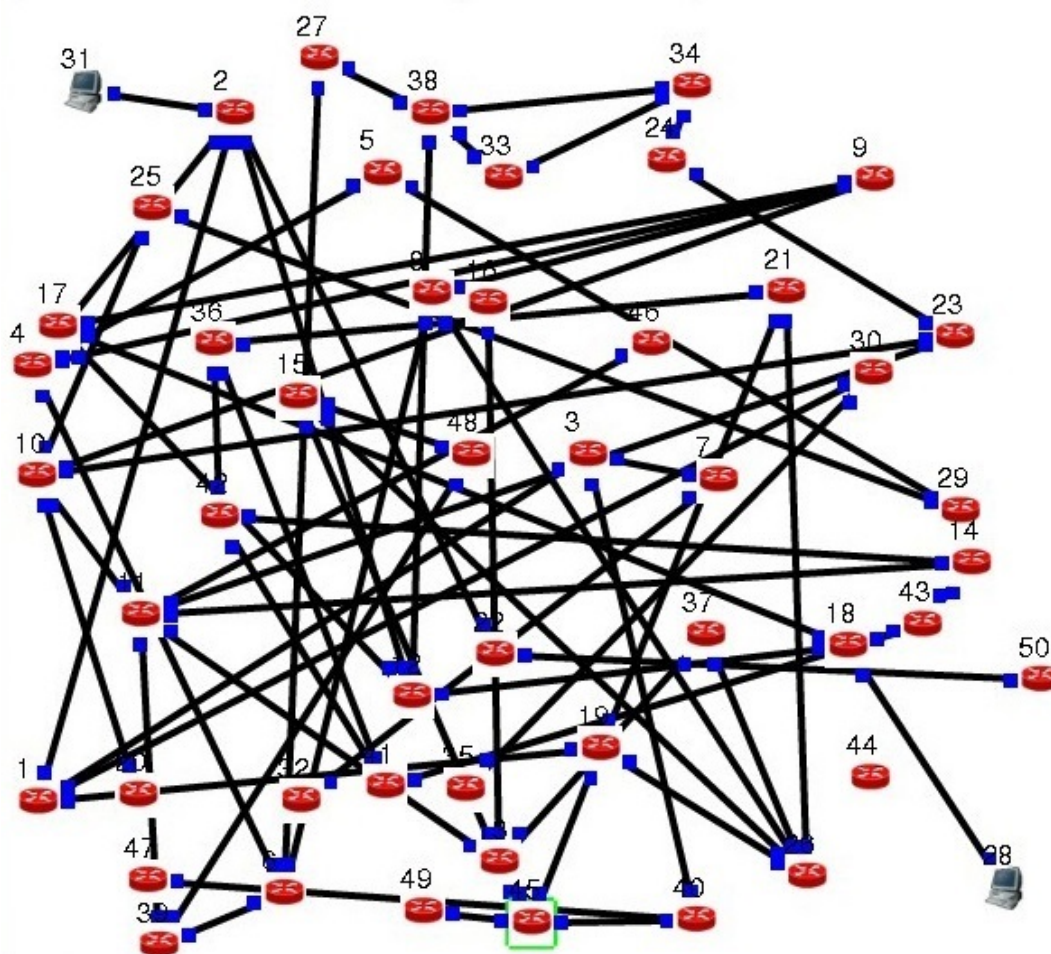


图 3.12 通信网络示意图

通过此网络，可以实现在实际网络环境下，电力系统与电力监测控制器之间的双向数据传递。

3.4 电力监测控制器的设计

智能电网在运行时做到了电力流和信息流在电力生产单元与用户之间的双向流通，信息流在其中扮演着对于电网状态的监测和控制的角

色。在此次混合仿真系统中，信息流自电力仿真软件产生，并通过电力监测控制器回到电力仿真软件当中，形成闭环控制回路。电力监测控制器的有效运行，保证了混合仿真系统结构和功能上的完整，也对后面混合仿真系统功能验证起到决定性作用。

3.4.1 电力监测控制器功能设计

在智能电网实际运行时，电网监测控制器运行在大型的服务器上面。本课题中设计的仿真模块简化了电网监测控制器的结构与功能，主要对于以下功能进行模拟：

- 1: 接收由电网模型中数据采集元件传来的实时仿真数据，分离出代表电网状态量的数据量
- 2: 根据电网实时状态数据判断出所要采用的控制策略，并向特定的受控模块发送控制指令

3.4.2 电力监测控制器具体实现

为了保证程序的可移植性和通用性，此控制器通过 C 语言进行编写，程序中函数名称和功能如下：

1. void main(void):
作为程序的主函数，实现建立基于 UDP 协议的 socket，接收数据、分析数据、发送控制命令的功能。
2. BOOL Create_socket():
创建基于 UDP 协议的 socket 通信，用于接收控制命令。
3. void Listen_socket():
重复监听端口，接收由电力仿真软件中的数据采集元件传来的字符串。为了方便省略传参过程，此函数将接收到的字符串付给全局变量，用于后面的调用
4. int Analysis():
将 Listen_socket() 接收到的字符串还原为 3 个整数，并在程序界面中逐行显示，实时分析电网状态量的数值，在发现异常情况时给出相应的控制命令。
5. BOOL Send_socket():

在 Analysis() 函数发现电网异常情况，给出相应的控制命令后，将此控制命令以及被 Analysis() 分析为异常数据的数据包中的“采集数据时仿真时间”以及“采集数据时已仿真的步数”整合为一个字符串，发送给电网仿真软件中的受控模块。

在程序运行，接收到来自电网的数据采集元件传来的字符串后，程序界面如图 3.13:

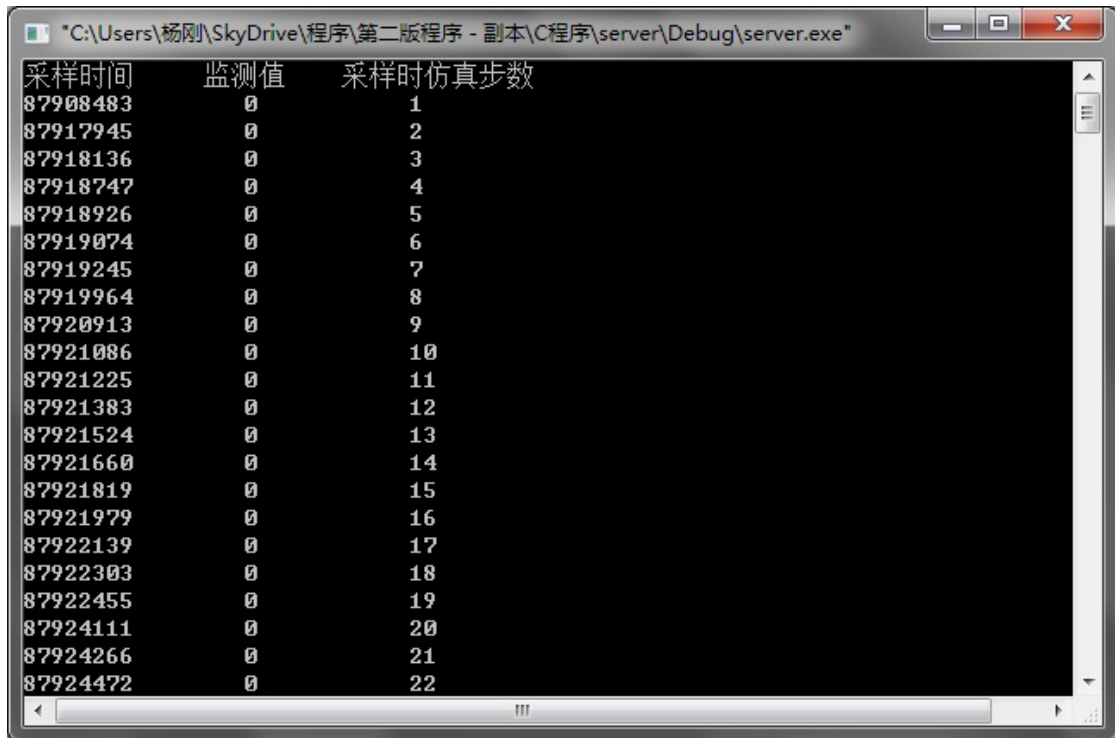


图 3.13 电力监测控制器程序运行界面

图 3-11 显示了在电力仿真系统开始运行时通过数据采集元件传回的数据值，其中第一列为数据的采样时系统的时间，第二列为监测的状态量，第三列为采样时仿真进行到的步数。由于电力仿真系统刚开始运行，电网中监测的节点的状态量都为 0，经过一段时间的运行后将达到一个平稳点。

3.5 仿真时间与真实事件不同步处理方法

时间同步性是不同仿真软件之间进行混合仿真需要着重注意的问题，尤其对于此次仿真，仿真构成了一个闭环控制回路，数据在不同仿真软件之间经过的时间需要重点记录，此时仿真软件的同步性更加重要。

回到真实电网的情形，每一条被检测到的状态量需要经过通信网络到达电力

监测服务器，服务器给出控制命令后再通过通信网络到达受控的电力元件。在电网发送—接收数据的过程中经过的时延主要由通信网络引入。

时延的准确性对于仿真具有重要作用，在智能电网这个闭环控制回路中，时延的大小会直接影响系统结构的设计，控制策略的选取以及系统稳定性的判断。所以本课题，时延的准确性一定要得到首要保证。

在本课题中，时延在数据经过通信网络仿真器时产生，如果不能保证仿真器之间的时间同步性，则可能带来增加或减小时延的效果。假设电力仿真软件的仿真时间比真是时间慢，则最终的时延结果如图 3-14：

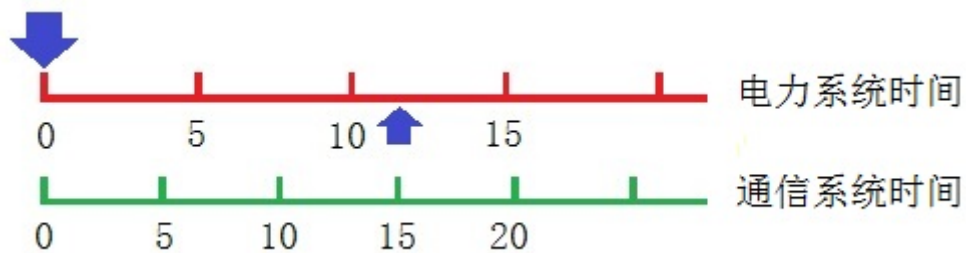


图 3.14 仿真时间不同步示意图

图中，忽略电力系统与通信系统之间传递数据的时延，在左侧蓝箭头即 0 时刻电力系统向通信系统发出数据，经过通信系统和电力控制器后在右侧蓝箭头出由通信系统返回电力系统。由于两个系统仿真速率不同步，真实的时延应该是 15 毫秒，但是在返回到电力系统时，其仿真时间不足 15 毫秒，这会使得通信系统的延时被缩短，造成系统误差。

同样道理，当电力系统仿真速度比通信系统仿真速度更快时，系统的时延会被加大。

由此可见，保持不同系统之间时间同步性是十分重要的，因此，我将首先分析混合仿真系统中不同模块在仿真中与真实时间的同步性，并给出对于不同步情况的处理办法。

3.5.1 系统中各模块的时间同步性

对本课题中三个模块可能产生时间同步性分析如下：

1) 电力仿真模块：

由于电力仿真是一个纯运算的过程，所以其仿真速度具有很大的变动范围，而且其运行速度取决于很多方面，其中与本课题有关的原因大致分为一下几方面：

1. 计算机的计算能力

2. 电网的复杂度
3. 仿真步长的选择
4. 外部 C 语言程序的复杂度

除了上面所提到的，PSCAD 调用外部程序的类型也对仿真速度有着很大影响，在课题研究前期我曾分别用 Matlab 和 C 语言编写了同样的函数用于被 PSCAD 调用，相比之下调用 Matlab 程序要比 C 语言程序慢很多，这也是最终选择 C 语言作为外部文件编写语言的原因之一。

在本实验中，由于硬件的限制，计算机的计算能力有限。在这种情况下我测试了不同规模的电网模型以及同一个电网模型下不同仿真步长对于仿真速度的影响，发现越复杂的网络，越小的仿真步长会使得仿真速度越慢，同时每个因素对于仿真素的影响可以叠加。

在这种情况下，PSCAD 整体仿真速度比显示时间快或慢的情况都有发生，这也使得系统需要对于每种情况制定出相应的策略，保证仿真的真实性和准确性。

2) 通信网络仿真模块：

Estinet 仿真软件的仿真模型分为内部仿真和外部仿真两种模式，对于内部仿真模式，其仿真步长可以调节，仿真速度也可以在一定范围内变动，在本课题中使用的是外部仿真模式，在此模式下仿真时间自动与真实时间进行同步，无法进行改动，所以在通信网络仿真模块中仿真时间只能与真实时间同步。

3) 电力监测控制器：

在本课题中，电力监测控制器只是起到监测电网状态数据、发送控制命令的作用，其仿真速度取决于其接收到电网数据后，分析数据及发送控制命令的速度。

由于通信网络仿真器的限制，接收数据的时间间隔已经不可能小于发送数据的时间间隔，而且电力仿真软件的仿真步长最小为 50 微秒，所以只要控制器每个电力监测数据的接收、分析和发送控制命令的时间小于 50 微秒即可不影响系统整体仿真速度。

由于每次接收到的测试数据的字节数是固定的，这也就保证程序处理每个接收到的数据的时间不会有大的变化，经过测试，程序处理每条数据的时间均小于 3 微秒，即此控制器不会对混合系统的整体仿真速度带来影响。

3.5.2 时间同步性修正方法

本课题中混合仿真系统的三个模块，已经可以确定电力系统仿真模块的仿真速度可能比真实时间快或慢，通信网络仿真的仿真时间与真实时间相符，而电力

监测控制器不会影响系统整体的仿真速度。

为了保证仿真系统的真实性，我将真实时间设定为时间基准，通过对电力系统的仿真过程进行调节来实现仿真的时间同步性。下面分别对两种可能造成误差情况下的处理办法进行说明：

1) 电力系统仿真时间比真实时间短：

这种情况下，为了与通信网络仿真速度保持相符，可以通过外部程序延长每个仿真步长所需要的真实时间，具体流程图如下：

图 3.15 外部程序流程图

因为在采集数据时判断系统时间，故以上功能的函数写在了数据采集元件的关联文件 SAMPLE.c 当中。

通过上述功能的实现，可以保证电力系统的仿真速度不会快过通讯网络仿真时间，而且由于获取到的时间精度是纳秒级别，而电力系统的仿真步长为微秒级别，而且每次获取系统时间所需要花费的时间小于 1 纳秒，所以这种方式可能引入的精度误差可以忽略。

2) 电力系统仿真时间比真实时间长：

这种情况下，由于通讯网络仿真器的仿真速度不可调节，只能通过调整控制指令加入到电网的时间来保证发送数据与接收控制命令之间的时延与网络时延相同。

假设一个电力系统状态量发送时电力系统仿真时间为 $T1$ ，真实时间为 $t1$ ，这个数据包所得到的控制命令被受控模块接收时电力系统仿真时间为 $T2$ ，真实时间 $t2$ ，控制命令开始执行时电力系统仿真时间为 $T3$ ，则以上变量间存在下列关系：

$$t2 - t1 > T2 - T1 \quad \text{公式 3-1}$$

$$T3 = T1 + (t2 - t1) \quad \text{公式 3-2}$$

此关系式保证了一个数据包从发送到其对应的控制命令加入到电网系统内的时延与系统的真实时延相等，因此也就保证了混合仿真系统的仿真精度。

此调控机制的函数写在受控模块所关联的文件 CONTROL.c 当中，其函数流程图如下：

图 3.16 外部程序流程图

通过以上两种方式，可以确保在电力仿真速度发生变化时混合仿真系统整体保持稳定性和准确性，这使得混合仿真系统的在以后研究中的移植性得到了保证。

3.6 本章小结

智能电网是在现有电力设施基础上融合信息、计算机、自动控制等技术，形成的全新的复杂网络，能够保证信息流和电力流在电力生产方与用户间高效快捷的双向流通。现有的仿真软件对于电网运行和通信网络的单独仿真已经十分完善，但对于由电网—通信网络—电力监测控制器形成的闭环网络仍没有完善的仿真工具。

本章首先对仿真的硬件、软件环境进行介绍，然后分别对混合仿真系统中电力网络仿真模块、通信网络仿真模块、电力监控控制器模块的功能设计及实现方式进行阐述，最后介绍了时间同步性对于仿真的重要性，以及本课题的混合仿真系统中对于时间不同步情况的处理方法。

第4章 智能电网混合仿真系统实验验证

本课题中搭建的混合仿真系统可以实现电网—通信网—控制器混合仿真，完全模拟智能电网运行时的实际情况。为了验证混合仿真系统的正确性和对于仿真的完成情况，本章将结合一些实验验证该系统的实际效果。

4.1 实验模型介绍

为了保证实验的准确性和可重复性，下面将实验过程中电力仿真模型和通信网络模型进行详细的介绍

4.1.1 电力仿真模型

本实验所采用的电网为 IEEE 标准的 14 母线节点标准测试系统，其结构图可参见图 3-1。在第三章已经实现了在电力仿真软件中将该电网运行在平稳状态下，实现电网上电到平稳运行的过渡过程。

为了模拟电网运行时遇到的突发情况，我在电网中加入了一个人为设定的故障，故障属性如下：

位置：2 号发电机入网电缆处

类型：短路

大小：50 欧姆

时间：0.2 秒

4.1.2 通信网络模型

为了模拟通信网络对于实验的影响，实验中将采用已生成的 50 个路由节点的通信网络，其具体参数如下：

1. 路由器数量： 50
2. 链路带宽： 10 兆
3. 链路时延： 50 微秒
4. 网络产生模式：随机生成

4.2 混合仿真系统功能验证

在本节中，将通过对比试验分别对一下三种情况分别进行仿真：

1. 电力仿真软件单独仿真

2. 电力仿真软件与电力监测控制器混合仿真

3. 电力仿真软件、通信网络仿真软件、电力监测控制器混合仿真

通过比较三种仿真结果，可以比较出混合仿真系统与单一仿真系统的优缺点，为以后的工作做好铺垫。

4.2.1 电力仿真软件单独仿真

由于在电网中加入了故障，故仿真波形与以前相比会有不同。选择与图 3.2 至图 3.4 相同的采样位置，得到以下波形图：

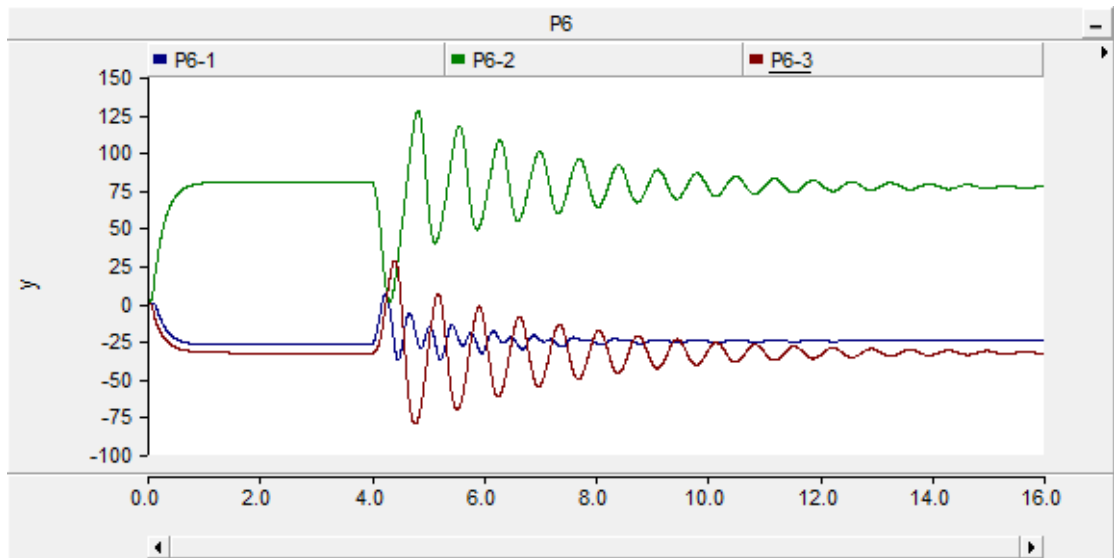


图 4.1 节点 6 附近 3 条支路的三项电压变化过程图

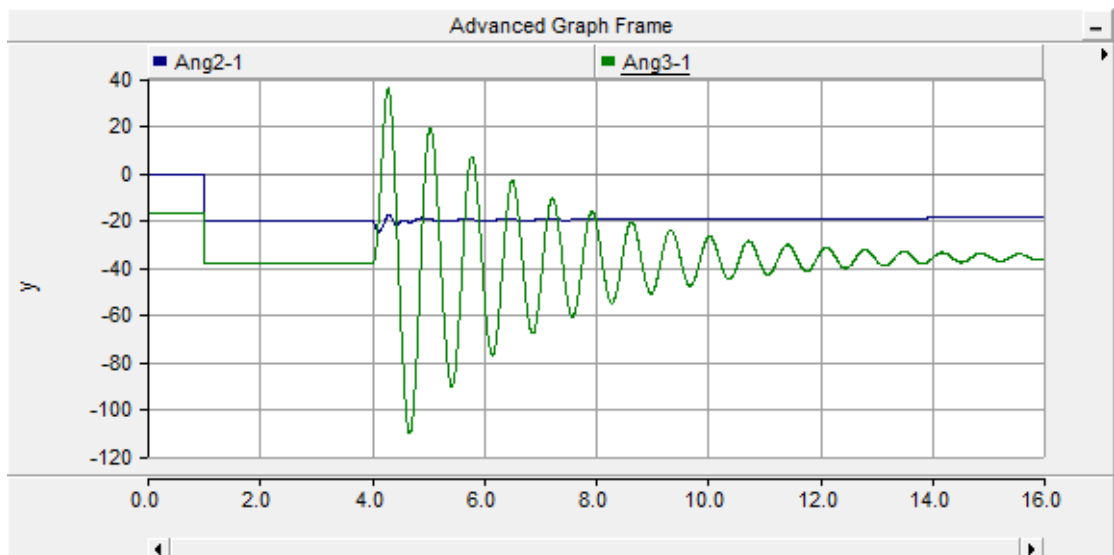


图 4.2 发电机 2 与发电机 1，发电机 3 与发电机 1 之间偏转角差值图

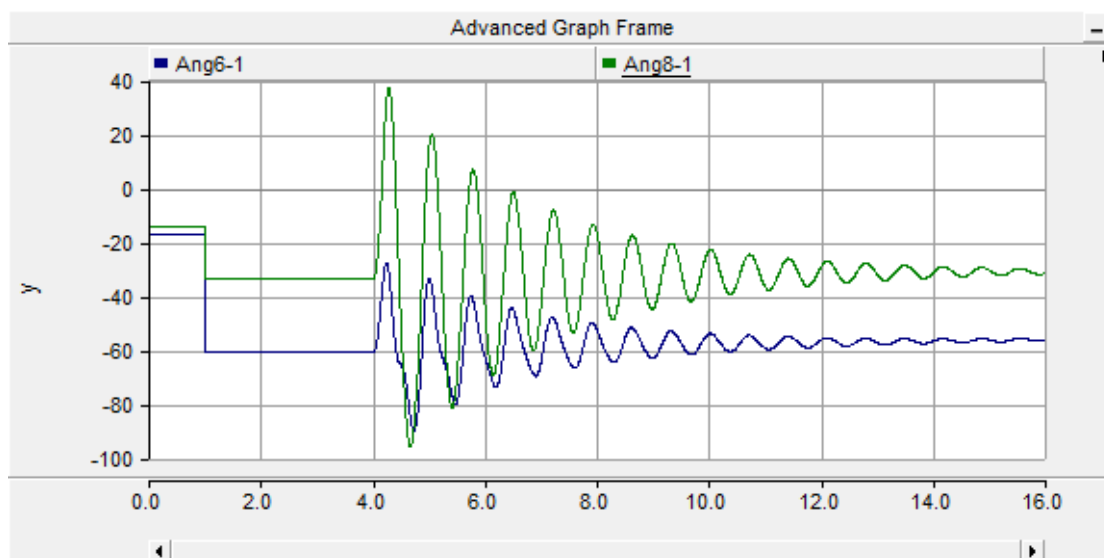


图 4.3 发电机 6 与发电机 1，发电机 8 与发电机 1 之间偏转角差值图

经过计算，每个曲线的超调量及过渡时间如下表：

表格 4.1 电力仿真软件单独仿真时超调量及过渡时间

	P6-1	P6-2	P6-3	Ang2-1	Ang3-1	Ang6-1	Ang8-1
超调	121.33%	99.08%	185.05%	20.72%	191.79%	54.54%	210.79%
过渡时间（秒）	6.915	7.910	10.355	3.565	11.645	7.1300	11.655

可以看出，故障对于电网的影响很大，许多状态值超调两已经超过 100%，系统整体的过渡时间也较长。

4.2.2 电力仿真软件与电力监测控制器混合仿真

在整合了电力仿真软件与电力监测控制器后，通过电力监测控制器对于电网状态的实时监控，可以在电网遇到故障时及时切换控制策略，保证电网能够较快的恢复稳定。

由于本课题的终点不是电网的控制策略，本实验中只是将电动机内转角的一个控制量加入采样保持后与原信号进行叠加，增加受控模块后 2 号发电机内部结构如图：

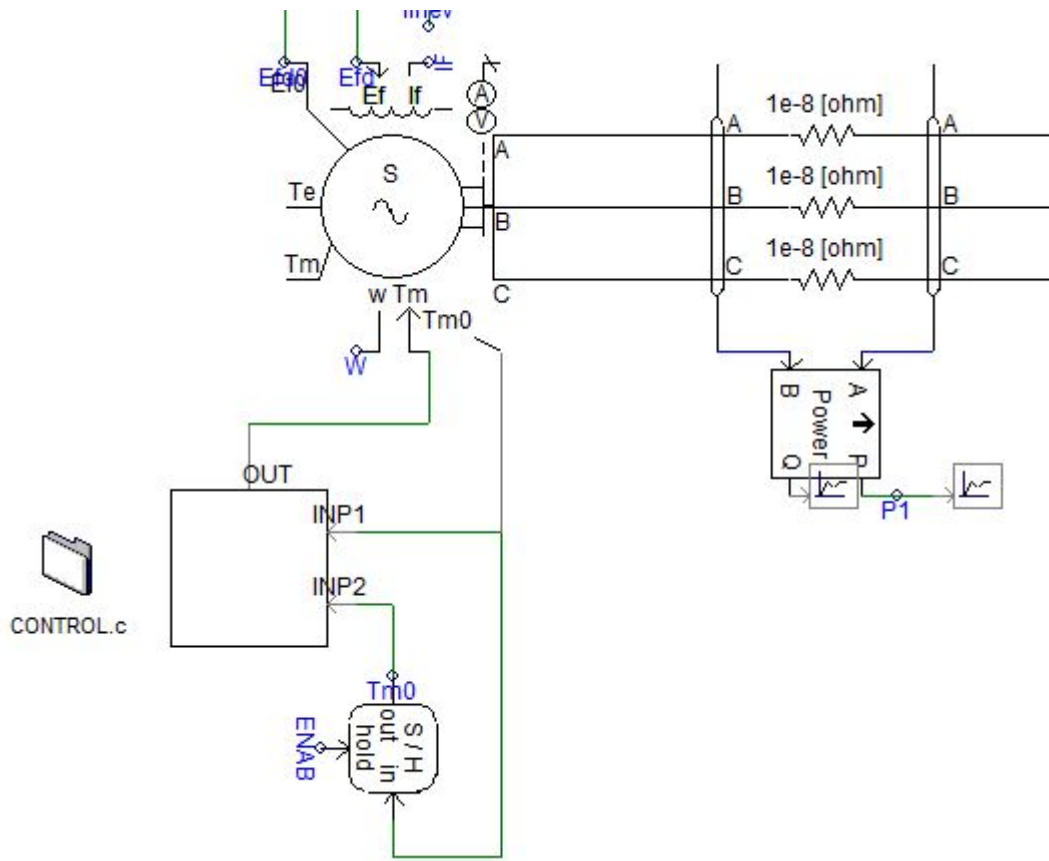


图 4.4 2 号发电机内部结构图

在增加受控原件后，再次进行前面小节中的实验，得到实验结果如下：

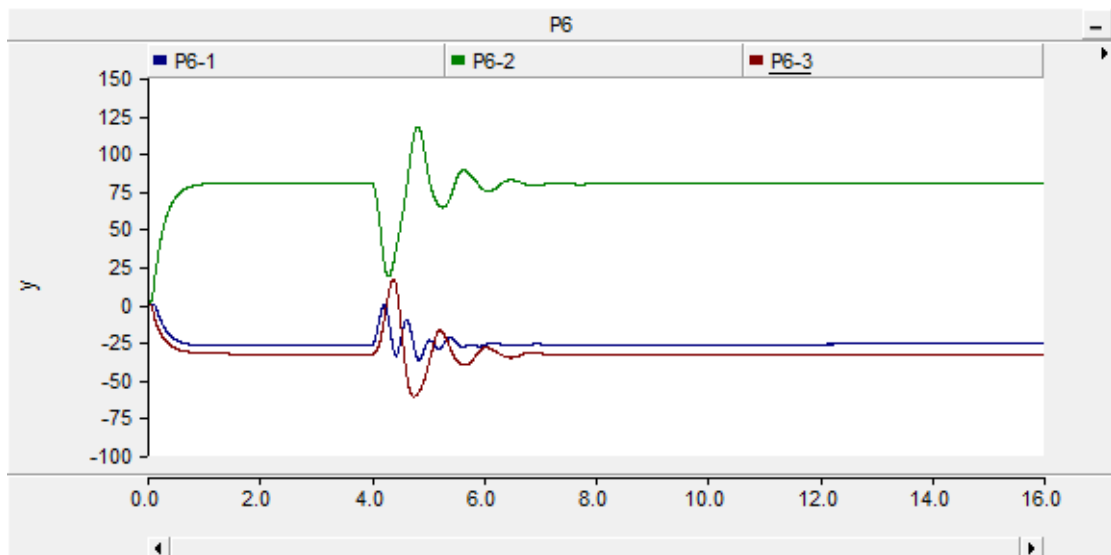


图 4.5 节点 6 附近 3 条支路的两项电压变化过程图

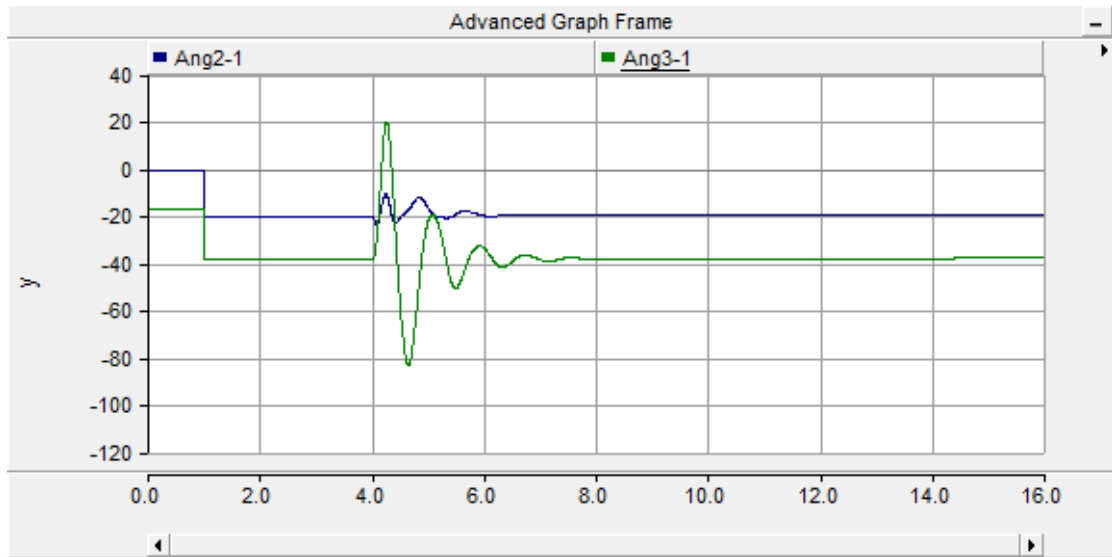


图 4.6 发电机 2 与发电机 1，发电机 3 与发电机 1 之间偏转角差值图

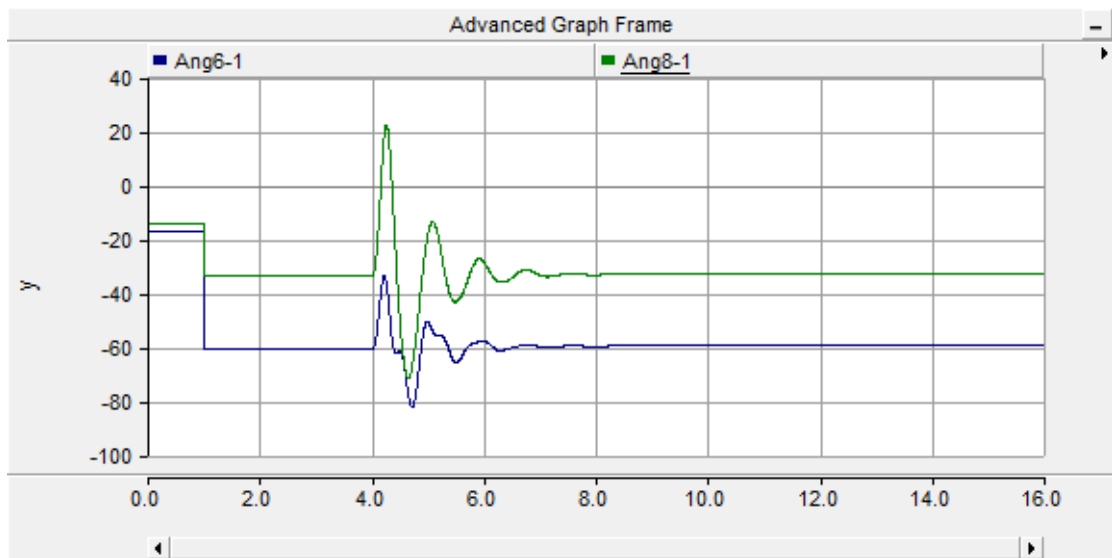


图 4.7 发电机 6 与发电机 1，发电机 8 与发电机 1 之间偏转角差值图

经过计算，每个曲线的超调量及过渡时间如下表：

表格 4.2 电力仿真软件与电力监测控制器混合仿真时超调量及过渡时间

	P6-1	P6-2	P6-3	Ang2-1	Ang3-1	Ang6-1	Ang8-1
超调	98.36%	77.21%	149.87%	47.25%	151.35%	44.83%	166.56%
过渡时间（秒）	1.955	2.165	2.530	1.780	2.470	1.635	2.490

4.2.3 电力仿真软件、通信网络仿真软件、电力监测控制器混合仿真

上面的仿真只是在单独的电力仿真当中加入了状态监测以及控制，与真实的

智能电网相比，电力系统与控制器之间传递数据过程缺少了通信网络的仿真，这显然是不够全面的。

考虑到上述原因，我用本课题中所实现的电力仿真软件、通信网络仿真软件、电力监测控制器混合仿真系统，采用相同的控制方式，再次进行前面的实验，得到实验结果如下：

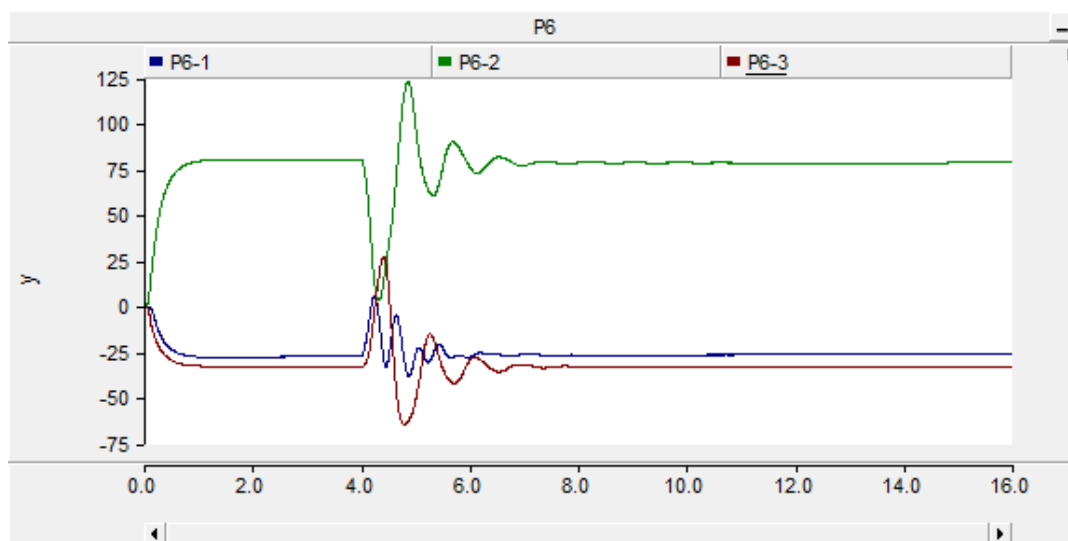


图 4.8 节点 6 附近 3 条支路的三项电压变化过程图

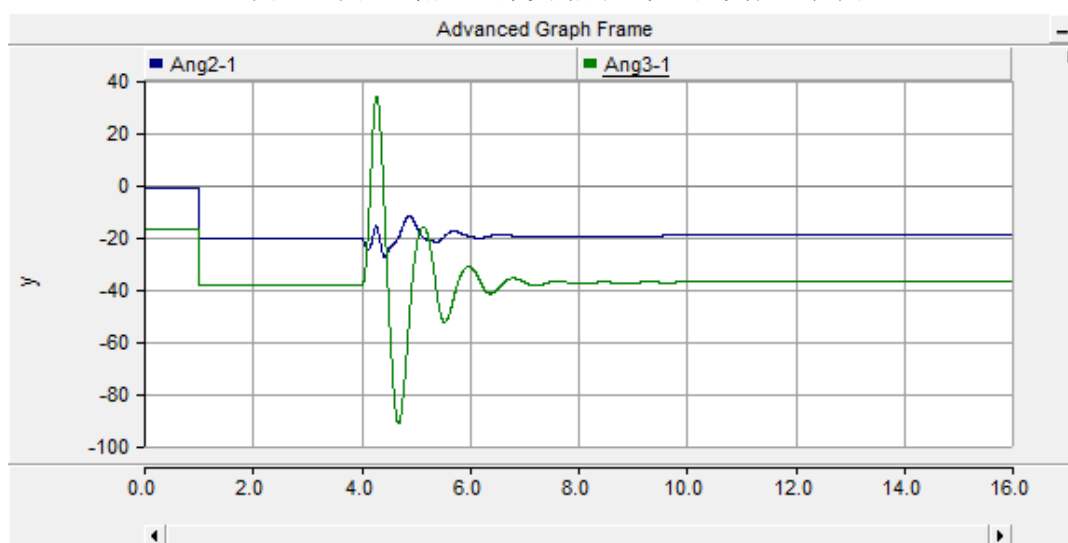


图 4.9 发电机 2 与发电机 1，发电机 3 与发电机 1 之间偏转角差值图

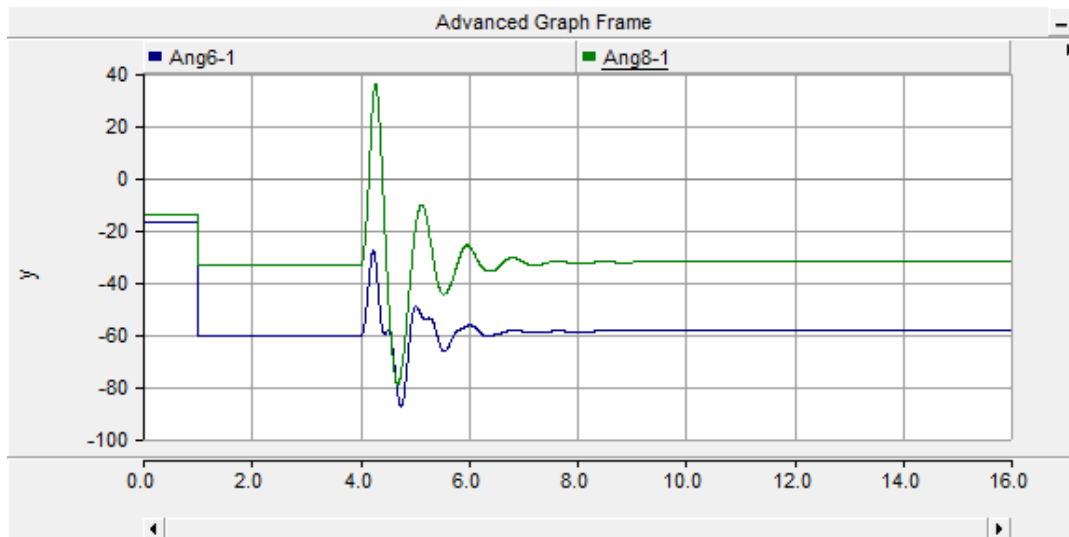


图 4.10 发电机 6 与发电机 1，发电机 8 与发电机 1 之间偏转角差值图

经过计算，每个曲线的超调量及过渡时间如下表：

表格 4.3 电力仿真、通信网络仿真、电力监测控制器混合仿真时超调量及过渡时间

	P6-1	P6-2	P6-3	Ang2-1	Ang3-1	Ang6-1	Ang8-1
超调	119.18%	96.13%	182.08%	40.65%	186.97%	54.01%	205.71%
过渡时间（秒）	2.015	2.235	2.640	2.275	2.550	1.695	2.575

由于此次仿真加入了通信网络仿真器，也引入了网络时延，为了比较网络时延对的大小与过渡时间的关系，我将仿真过程中触发控制策略改变的数据包的发送时间、控制策略的接收时间进行记录。

由于此次试验中 PSCAD 的仿真速度比真实时间慢很多，我又对经过公式 3-2 计算后的控制命令加入到电力仿真器的时间进行记录。记录数据如下：

发送数据包的时间：4.0007 秒

接收到控制命令的时间：4.0019 秒

实际加入控制的时间：4.0084 秒

4.2.4 对比试验结果分析

上述三组实验显示了三种结构下电网在遇到故障后恢复稳态的过程，其中第一组中由于没有加入外界的控制，所以其收敛过程较慢，与后两组的可比较性很小。

第二组与第三组实验可以比较出网络时延对于收敛过程的影响。将数据整合后得到下表：

表格 4.4 加入时延前后超调

	P6-1	P6-2	P6-3	Ang2-1	Ang3-1	Ang6-1	Ang8-1
未加入时延超调	98.36%	77.21%	149.87%	47.25%	151.35%	44.83%	166.56%
加入时延超调	119.18%	96.13%	182.08%	40.65%	186.97%	54.01%	205.71%
增加值	20.82%	19.01%	32.21%	-6.6%	35.62%	9.18%	39.15%

表格 4.5 加入时延前后过渡时间

	P6-1	P6-2	P6-3	Ang2-1	Ang3-1	Ang6-1	Ang8-1
未加入时延过渡时间（秒）	1.955	2.165	2.530	1.780	2.470	1.635	2.490
加入时延过渡时间（秒）	2.015	2.235	2.640	2.275	2.550	1.695	2.575
增加时间（秒）	0.06	0.07	0.11	0.495	0.08	0.06	0.85

通过表格可以清晰地看出，加入通信网络仿真后，由于时延的引入，控制效果与未加入时延相比要差很多，但这时更加真实的结果，这也说明了通信网络仿真对于智能电网混合仿真的重要性。

同时应该注意到，加入的时延只有 0.008 秒，而因此带来的过渡时间的增加基本为 10 倍，这说明过渡时间的增加不仅仅由于网络时延而产生。通过初步分析，过渡时间的增加主要是控制策略加入时间较晚，所以所需的过渡时间更长。

4.3 本章小结

本章在 IEEE 标准的 14 母线节点标准测试系统基础上，通过增加故障，比较了电力仿真软件单独仿真、电力仿真软件与电力监测控制器混合仿真以及电力仿真软件、通信网络仿真软件、电力监测控制器混合仿真三种情况下收敛过程的超调以及过渡时间。

通过实验结果的对比，验证了本课题所设计的混合仿真系统的完整性以及实用性，证明了混合仿真系统相比于单独的仿真系统对于智能电网的仿真更加精确，为以后的工作建立基础。

第5章 总结与展望

5.1 本文工作总结

随着社会经济与技术的蓬勃发展，电力系统正在逐步融合计算机、自动化控制、通信等技术，实现信息流与电力流在电力生产者与用户之间的高速双向流动。在智能电网的发展与建设的过程中，对其进行仿真的工具必不可少的，现阶段，没有一个单独仿真软件能够完整实现智能电网的仿真，因此利用已有的电力、网络等仿真工具搭建混合仿真系统是当下最佳的解决方案。

本课题通过对智能电网混合仿真系统的应用需求进行分析，结合已有的混合仿真系统，通过全新的结构，设计出一个结合电力系统和通信网络系统仿真软件、以及电力控制器的混合仿真系统，对智能电网混合仿真系统的搭建以及实际效果进行了创新性探索。本文从已实现的功能出发，对以下几个方面进行了介绍：

1. 在实验室环境下实现了混合仿真系统的三个组成模块，分别是电力仿真模块，通信网络仿真模块，电力监测控制器模块，在三个模块之间，实现了程序级通信，保证混合仿真的运行。

2. 对于混合仿真系统中可能出现软件之间时间不同步的情况进行分析，给出了解决方案。

3. 通过与其他电力仿真系统进行对比试验验证了混合仿真系统的完整性和准确性，证明了现阶段混合仿真系统是智能电网仿真的最优选择。

5.2 未来工作展望

本课题的工程性很强，受到理论基础和人员精力的限制，并没有对于混合仿真系统的结构在理论上进行分析和优化，对于实验过程中使用过的电网模型、通信网络模型以及控制算法没有进行深入的理论研究和挖掘，因此对于该系统的性能分析也不够全面。目前虽然已经搭建了智能电网混合仿真系统的各个基本模块和功能，但是距离大规模仿真的实际应用仍有很大的差距。本课题在今后的工作中还需要在以下几个方面进行后续研究：

1. 对电力仿真中电网模型进行进一步研究，选择一个规模更大，更具代表性的电网模型用于实验，通过调节电网内部参数，使得仿真结果更加逼近真实情况。

2. 更换通信网络仿真中网络规模及结构，加入干扰量模拟显示网络中的拥塞等特殊情况。

3. 对电网的控制方法进行深入研究，找到更加适合智能电网的控制策略，再次进行实验时混合仿真系统的性能将得到更加真实的体现。

4. 研究混合仿真系统之间协同仿真的可能性，为未来智能电网大规模混合仿真做好理论研究。

插图索引

图 1.1	EPOCHS 混合仿真系统的基本构架	2
图 1.2	EPOCHS 系统构架图	3
图 1.3	EPOCHS 混合仿真系统的运行中数据同步示意图	4
图 2.1	2003 年美加大停电停电前（左）和停电后（右）对比的卫星地图	6
图 2.2	坚强智能电网基本构架	8
图 2.3	混合仿真系统构架图	10
图 3.1	IEEE 14 母线节点标准测试系统系统结构图	14
图 3.2	节点 6 附近 3 条支路的三项电压变化过程图	15
图 3.3	发电机 2 与发电机 1, 发电机 3 与发电机 1 之间偏转角差值图	15
图 3.4	发电机 6 与发电机 1, 发电机 8 与发电机 1 之间偏转角差值图	15
图 3.5	PSCAD 中自定义元件	16
图 3.6	自定义元件输入输出数据类型	17
图 3.7	PSCAD 图形界面中文件关联示意图	17
图 3.8	PSCAD 仿真程序自动生成过程结构图	18
图 3.9	数据采集元件图	18
图 3.10	受控模块结构图	19
图 3.11	Estinet 搭建的简单网络模型	21
图 3.12	通信网络示意图	22
图 3.13	电力监测控制器程序运行界面	24
图 3.14	仿真时间不同步示意图	25
图 3.15	外部程序流程图	27
图 3.16	外部程序流程图	29
图 4.1	节点 6 附近 3 条支路的三项电压变化过程图	31
图 4.2	发电机 2 与发电机 1, 发电机 3 与发电机 1 之间偏转角差值图	31
图 4.3	发电机 6 与发电机 1, 发电机 8 与发电机 1 之间偏转角差值图	32
图 4.4	2 号发电机内部结构图	33
图 4.5	节点 6 附近 3 条支路的三项电压变化过程图	33
图 4.6	发电机 2 与发电机 1, 发电机 3 与发电机 1 之间偏转角差值图	34
图 4.7	发电机 6 与发电机 1, 发电机 8 与发电机 1 之间偏转角差值图	34
图 4.8	节点 6 附近 3 条支路的三项电压变化过程图	35
图 4.9	发电机 2 与发电机 1, 发电机 3 与发电机 1 之间偏转角差值图	35
图 4.10	发电机 6 与发电机 1, 发电机 8 与发电机 1 之间偏转角差值图	36

表格索引

表格 3.1	发送数据的结构.....	19
表格 3.2	受控模块结构图.....	20
表格 4.1	电力仿真软件单独仿真时超调量及过渡时间.....	32
表格 4.2	电力仿真软件与电力监测控制器混合仿真时超调量及过渡时间.....	34
表格 4.3	电力仿真、通信网络仿真、电力监测控制器混合仿真时超调量及过渡时间.....	36
表格 4.4	加入时延前后超调.....	37
表格 4.5	加入时延前后过渡时间.....	37

参考文献

- [1] Hopkinson K, Wang X, Giovanini R, et al. EPOCHS: a platform for agent-based electric power and communication simulation built from commercial off-the-shelf components[J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2006, 21(2): 548-558.
- [2] LEARNED S Q L S W L. North American Electric Reliability Council[J]. 2003.
- [3] Godfrey T., Mullen S., Dugan R. C., Rodine C., Griffith D. W., Golmie N., “Modeling Smart Grid Applications with Co-Simulation”, First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2010, pp. 291-296
- [4] Liberatore V., Al-Hammouri A., “Smart grid communication and co-simulation”, IEEE Energytech, 2011, pp. 1-5
- [5] Hopkinson K., Wang X., Giovanini R., Thorp J., Birman K., Coury D., “EPOCHS: A Platform for Agent-Based Electric Power and Communication Simulation Built From Commercial Off-the-Shelf Components”, IEEE Transactions on Power Systems, 2006, vol. 21, no. 2, pp. 548-558
- [6] Liscouski B, Elliot W. Final report on the august 14, 2003 blackout in the united states and canada: Causes and recommendations[J]. A report to US Department of Energy, 2004, 40.
- [7] 赵希正. 强化电网安全 保障可靠供电——美加 “8·14” 停电事件给我们的启示 [J]. 电网技术, 2003, 27(10).
- [8] 何光宇, 孙英云. 智能电网基础[M]. 中国电力出版社, 2010.
- [9] European Commission. European technology platform smart grids: vision and strategy for Europe's electricity networks of the future[J]. Office for Official Publications of the European Communities, 2006.
- [10] 国网能源研究院编著. 国内外智能电网发展分析报告. 中国电力出版社, 2011.
- [11] Liu C C, Jung J, Heydt G T, et al. Conceptual design of the strategic power infrastructure defense (SPID) system[J]. IEEE Control System Magazine, 2000, 20(4): 40-52.
- [12] Amin M. Toward self-healing energy infrastructure systems[J]. Computer Applications in Power, IEEE, 2001, 14(1): 20-28.

致谢

在课题即将完成之际，我首先要感谢导师吉吟东教授，从课题开始时的文献调研一直到论文的撰写，吉老师对我进行了耐心的帮助和悉心的指导。从寒假的封闭开发开始，吉老师就带领我开始了课题的研究道路。作为一名刚刚接触科研工作的本科生，我在课题研究的过程中犯了不少错误，在遇到困难时常常几日无法取得进展。吉老师对课题的分析和解读使我打开了思路，一次次帮助我克服困难，向着目标前进。在此，我要对科研道路的领路人、敬爱的吉吟东老师致以最衷心的感谢！

感谢曹军威老师在课题研究过程中给予的指导和帮助。曹老师对于课题宏观上的把握和细节的严格要求帮助我提高课题完成的质量，也让我看到了自己在科研方法上的不足。同时，曹老师废寝忘食、精益求精的工作态度为我树立了榜样。

感谢万宇鑫师兄的无私帮助，他对于仿真技术的深入了解、对于科研工作的丰富经验给了我很多启发和帮助。

感谢同组的辛明原、邹睿、何康同学在课题完成中的帮助和合作，与他们的交流为我开阔了解决问题的思路。

回首此次科研经历，我对以前很多的知识有了更深的领悟，也在研究过程中得到了锻炼和成长。再次感谢吉吟东老师、曹军威老师、万宇鑫师兄以及帮助过我的老师和同学，感谢你们！