Proceedings of the 8th
World Congress on Intelligent Control and Automation
June 21-25 2011, Taipei, Taiwan

Research on the Construction of Artificial Power Systems

Xisong Dong[1], Gang Xiong[1] (corresponding author)，Feiyue Wang[1], Timo R. Nyberg[2], Pekka Hämäläinen[3]

[1)] The Key Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing, CHINA (dongcimic04@163.com, gang.xiong@ia.ac.cn & feiyue.wang@ia.ac.cn)

[2)] BIT Research Centre, Aalto University, Aalto, FINLAND (timo.nyberg@tkk.fi)

[3)] TEKLA Corporations. Espoo FI, FINLAND (Pekka.Hamalainen@tekla.com)

***Abstract*—With the increasing complexity of modern power system, the conventional analytical methods and simulation systems, which are based on reductionism, can't provide sufficient guidance for its operation and management anymore. ACP theory which is based on holism and complex system theory, mainly consists of artificial systems (A), computing experiments (C) and parallel execution (P), has its specific advantages in the research on power grid. In this article, ACP method is introduced to build up artificial power system by using multi-agent complex network models. With the help of the artificial power system, actual power system's control, scheduling, optimization and management can be improved further by providing theoretical guidance and technical support for the rolling optimizations in normal situations, and emergency management in abnormal situations. As an application case study, the artificial power system constructed with actual data from north China power grid is applied for computing experiment's analysis under different attacks. The same way, the artificial power system can also provide theoretical guidance and practical support for smart grid research.**

***Keywords*—power system, artificial power system, smart grid, ACP, complex network, multi-agent, vulnerability**

人工电力系统构建方法研究

董西松 [1]，熊刚 [1] 通讯作者，王飞跃 [1]，Timo R. Nyberg[2]，Pekka Hämäläinen[3]

[1)] 中国科学院自动化研究所复杂理论与智能科学重点实验室，北京，中国

[2)] 芬兰阿尔托大学 BIT 研究中心，阿尔托，芬兰

[3)] 芬兰 TEKLA 公司总部研发中心，艾斯堡，芬兰

摘　要　现代电力系统是典型的由人、财、物组成的多级复杂巨系统，也涉及经济、社会、生态和人为等因素，基于物理模型或自然现象构建的电力仿真系统，只基于还原论的现有控制理论和方法，不能满足现代电力系统的运营和管理要求。因此，本文采用人工社会 A、计算实验 C、平行执行 P 的 ACP 方法，研究采用多 Agent 复杂网络模型构建人工电力系统，并根据中国华北电力网络的实际数据构建了相对应的人工电力系统，对该系统在不同攻击下的结果进行计算实验分析。基于人工电力系统，以计算实验为手段，可进一步提升现代电力系统的控制、调度、优化和管理水平，主要是对电力系统正常情况下的滚动优化，和突发事件下的应急管理。ACP 方法不仅为现代电力系统提供理论上的指导、切实可行的技术系统支持，也可为未来智能电网的研究和实施提供支持和指导。

关键词　电力系统，人工电力系统，智能电网，ACP 理论，复杂网络，多 Agent，脆弱性

1．引言

随着设备日益复杂、区域电网互联和电力市场的改革，现代电力系统已经是一个涉及自然、政治、经济、社会、生态、文化和人为等因素的多级复杂巨系统，成为当今世界覆盖面最广、结构最复杂的人造系统之一。它在提高运行效率、促进资源优化配置的同时，也增加了其运行时的不确定性，给其自身的安全稳定运行带来新的挑战[1]。最近几年，世界上很多国家都发生过大规模电力系统故障[2]。

智能电网，就是电网的智能化，它是建立在集成的、高速双向通信网路的基础上，将现代先进的传感测量技

本研究受下列项目的资助：NSFC 60921061/F03, 90924302/G0310, 70890084, 90920305; MOST 2006CB705506, 2006AA010106; CAS 2F09N05, 2F09N06; Finnish TEKES Cloud Software Program and Finnish TEKLA R&D Fund; SFR for ROCS SEM

术、通讯技术、信息技术、计算机技术和控制、决策支持技术与物理电网高度集成而形成的新型电网，以实现对用户可靠、安全、高效、经济、清洁、环境友好和使用安全互动的电力供应和增值服务。未来的智能电网将大大改变现有的电力系统，在各个方面都产生深刻的影响，使其在时间、空间、对象、目标、信息等多个维度的耦合会更加紧密，电网的拓扑结构、网络特性等各种参数指标也将发生重大改变[3,4]。

电力系统的智能化和应急管理要同时考虑社会要素、自然要素和工程要素相叠加，多数情况下既没有、也不能建立系统的、足够精确的模型，这对现代电力系统的理论分析和仿真研究提出了新的挑战：

1) 对电网本身的特性机理缺乏有成效的理论研究成果。对若干复杂现象缺乏科学的理论解释和分析方法，如电网的演化特性、连锁反应事故发展机理等；
2) 目前多数电力仿真系统是基于物理模型或自然现象，没有深入地考虑人的行为、自然环境和社会因素的影响，所以很难开展这些因素对复杂电力系统运营影响的评估，特别是无法从定性到定量地对突发事件、重大灾变和社会影响等十分重要的问题进行分析评估；
3) 对于广域分布、参数海量、模型复杂的现代电力系统，传统仿真方法仍具有许多的局限性；除了仿真系统的规模因经济上的原因受到限制外，随着复杂性的增加，精度和可靠性很难保障；由于电具有不可存储性、无形性、需求的随机不确定性、价格多样性等特殊性，影响电负荷变化的因素有气象、节假日、社会、经济、政治等；
4） 电力系统特别是智能电网的发展，使得其运营和管理的复杂性大大增加。电网与社会要素、自然要素和工程要素的联系更加紧密，而现有的研究理论和方法难以对此进行研究。

综上所述，现代电力系统是一个典型的由人、财、物组成的多级复杂巨系统，涉及经济、社会、生态、文化和人等因素。电力系统的智能化和应急管理，多数情况下既没有、也不能建立系统的、足够精确的模型，目前基于还原论的控制理论和方法难以发挥有效作用，必须寻求新的解决思路，引入新的概念和方法，建立新的理论体系。

为了克服传统理论和方法的局限，本文提出了以人工社会和复杂系统理论为基础，综合复杂网络模型和多智能体模型等方法（多 Agent 复杂网络模型）建立与实际电力系统“等价”的人工电力系统。

本文内容组织如下：第二章介绍了基于 ACP 方法的平行系统；第三章给出了应用多 Agent 复杂网络模型构建人工电力系统的具体方法；第四章给出了人工电力系统的实例验证；最后，对全文进行了总结，并对未来工作进行了展望。

2. 基于 ACP 方法平行系统

平行系统，是指由某一个自然的实际系统和对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统所组成的共同系统[5]。实际上，经典的和现代控制理论都是成功应用平行系统理念的典范[6]。平行控制理论为复杂系统的控制研究提供了一个全新的思路和视角。它在传统的小闭环控制基础上，增加考虑社会、人为要素而形成大闭环控制。在此基础上，建立与实际系统“等价”的人工系统，从而构成双闭环控制原理的平行系统（图 1）。其最大特点就是要改变人工系统的非主导地位，使其角色从被动到主动、静态到动态、离线到在线，最后，由从属地位提高到相等的地位，使人工系统在实际复杂系统的控制中充分地发挥作用[7]。

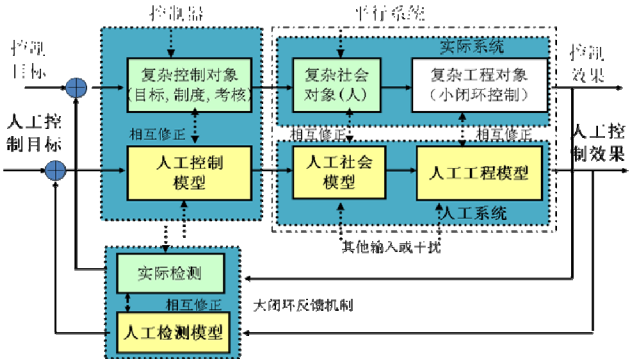

图 1 平行系统的基本框架

平行控制理论框架下的 ACP 方法体系包括人工系统（Artificial Systems）、计算实验（Computing Experiments）和平行执行（Parallel Execution）。其基本原理和方法可以描述为：综合考虑工程、社会、人为和环境等各方面因素，采用理论建模、经验建模和数据建模有机结合的方法，建立与实际系统“等价”的人工系统，解决实际系统难以进行传统建模的难题；在人工系统上通过计算实验或“试验”来认识实际系统各要素间正常和非正常状态下的演化规律和相互作用关系，并通过二者的相互连接，对二者之间的行为进行对比和分析，研究对各自未来状况的“借鉴”和“预估”，相应地调节各自的控制与管理方式；最后利用计算实验所认识的规律实现并行执行：正常情况下，利用人工系统认识实际系统千变万化的演化规律，不断优化实际系统的控制目标和减少非正常情况的发生；非正常情况下，利用人工系统帮助找到让实际系统迅速恢复正常的应急控制方法，从而减少损失[8,9]。

平行系统方法基于整体论，创新地采用自下而上的涌现

方法建造“等价”于实际系统的人工系统，相当于传统的管理模型。对于复杂系统的先验理论和知识，可以体现在人工系统的建造中。在人工系统基础上，利用智能技术、信息技术和高性能计算技术发展的成果，通过计算实验来认识复杂系统要素间的动态演化规律，之后平行执行利用规律实现管理目标[10]。

1）人工系统（Artificial Systems）

平行控制理论的 ACP 方法中 A 的本质是要在建立同实际系统“等价”的人工系统，通过在人工系统上的计算实验找到实际系统的“等价”结果，保证从人工系统上得到的认识“等价”于实际系统，对人工系统的控制结果“等价”于实际系统的控制[11]。

2）计算实验（Computing Experiments）

与常规系统不同，研究复杂社会系统时很难，有时由于其本质、经济、法律和道德等方面的因素不可能对其研究对象进行“试验”，更不用说是“实验”或“重复性”试验了。即使是作了试验，其中的主观和不可控因素也太多了，从而结果和结论往往也不具有一般性。

利用计算实验方法对人工系统进行各种“试验”，对复杂系统的行为进行预测和分析。视人工系统为“生长培育”各类复杂事件的手段，一个可控可重复的“实验室”。系统地设计各种各样的试验，引入各种不确定甚至传统上难以量化的因素和事件，多次重复并以统计的方法对结果进行分析，使传统的计算仿真变成系统性的计算实验，进而用来验证对复杂系统特征和行为分析的各种可能和假设[9]。表 1 即为现有电力仿真与人工电力系统计算实验的区别。

表 1 普通电力仿真与人工电力系统的区别

	普通电力仿真	人工电力系统
对象	电力系统本身或其中一部分	电力系统及社会、人为等综合考虑
方法	数据	机理、数据和经验
性质	工程复杂性	工程复杂性和社会复杂性
路线	非实时仿真、实时仿真	实时仿真、超实时仿真（预测）
形态	暂态	暂态、中长期动态
规模	小规模	大规模
目标	具体局部（如发电厂、变电站等）	整体全局（整个区域的电力系统）
范围	未考虑电力之外因素	考虑自然、经济、社会、人为等
输入	只考虑设备、工艺等工程复杂性	考虑工程复杂性和社会复杂性
手段	情景—应对	预案—应对
方式	事先的预案	主动防御
形式	离线预案	在线对应
方法	针对实际情况的仿真	计算实验（可对因本质、经济、法律、道德等问题而不可能、不可行、不容许、不可建模的各种现象进行模拟分析）

3） 平行执行（Parallel Execution）

利用计算实验结果，就可以实现实际系统和人工系统的平行执行。一方面，通过采用计算实验的各类结果，对实际调度系统进行指导，以达到优化的目的。另一方面，将实际系统的结果再次反馈到人工系统当中进行修正，以达到虚实共同进步的目的。可以开发不同的平行执行系统以实现不同目的。进而通过采用对计算仿真有所创新的计算实验手段来寻找电力系统（智能电网）的相关动态演化规律，为其优化运营和应急管理探索一条新的技术途径[10]。

现在，ACP 方法已经成功的应用到应急管理[12]、石化生产控制[13]和城市交通控制方面[14-15]。其中的平行交通系统（PtMS）已经应用于多个城市和在中国广州第 16 届亚洲运动会[14]。

3. 人工电力系统设计与构建

3.1. 人工电力系统

人工电力系统的基本思想就是利用人工社会的理论与方法，首先，综合考虑电力系统生产和运营过程中各方面的因素，包括设备特性、市场特征、人为因素和社会因素等，构建人工电力系统；其次，利用人工电力系统，在几乎无成本无风险的情况下对电力系统进行重复试验，进而对具体的电力生产方案、电力市场运营模式、突发事件下的危机管理等进行全面、准确、及时的评估和修正；同时，将人工电力系统与实际电力系统相结合，将实验结果应用于实际电力系统，以实现对实际电力系统的平行管理[1]。

人工电力系统的建模原则就是要打破以实际电力系统作为建模的唯一参照和标准的理念，不再以逼近现实电力系统作为建模的唯一追求和衡量指标，把人工电力系统模型也认为是一种现实，是实际电力系统的一种可能演变到的形式，二者行为与模型的行为“不同”但却“等价”。

人工电力系统是电力仿真的深入和升华。电力系统传统仿真的根本出发点是通过将研究对象分解为子系统，利用计算机和数值技术建模集成，仿真并“回演”实际电力系统中的各种状态和发展特性，讨论和解决实际电力系统面临的各种问题，是一种自上而下的被动还原型研究方法；而人工电力系统的根本出发点在于它是通过人工构件的相互作用，“培育生长”电力系统，是一种自下而上的主动综合型研究方法。通过各种人工构件组成电力系统，目的是希望在系统的规模上，可操作性上，还有考虑的因素方面，特别是人与社会的行为方面，有较大的突破。此外，经济因素、时间因素，可行性问题也是从传统电力仿真走向人工电力系统的原因。多数情况下，人工电力系统的结论和有效范围是针对特定目标和特定精度要求的。目前用于常

规系统建模的许多方法都可以在人工电力系统的构造中得到直接应用。

总之，人工电力系统对实际电力系统进行建模，追求的是能够从定性到定量对电力系统的复杂性进行计算分析，它综合机理、数据和经验等建模方法，兼顾工程、社会和人为因素，可以全方面的描述实际电力系统，借助计算实验对电力系统在各种情况下的运行演化规律及应急管理进行模拟、评估与改进，为电力系统（智能电网）的运营与管理提供一条新的可行途径。

3.2. 以多 Agent 复杂网络模型为基础构建人工电力系统

（1）电力系统的复杂性

长期以来，对电力系统的研究，人们往往从自然环境、设备、人为操作等具体因素来分析，却很少从其整体特性去分析。传统的分析方法过分注重各原件的个体动态特性，本质上还属于还原论，在深入分析电力系统连锁反应等系统动态行为方面很难揭示系统整体的动态行为特征，很难揭示出系统的整体动态行为特征。事实上，电网本身的拓扑结构是一个电网所具有的内在、本质的特性，一旦确定下来，必然对电网的性能产生深刻的影响。

电力系统是迄今为止最大的人造工程之一，是一个高维、非线性、时变、在时空上大范围跨越的大系统。电力系统所表现出的非线性、多样性、层次性、整体性、统计性、自相似性、自组织与临界性等都符合系统复杂性的一般特征。电力系统也具有复杂网络的特性：如网络节点的大规模性和动力学行为的复杂性、网络连接的稀疏性和结构复杂性、网络时空演化复杂性的不可预测性和演化的复杂性等[16-23]。

电力系统是一个强非线性大规模动态系统，它可认为是由电站、高压输电线等通过不同连接方式组成的规模庞大的复杂网络。复杂系统理论和方法作为系统整体论分析方法，其结构特征、传播动力学、同步等理论的发展为研究新形势下的电力系统提供了一种新的思路和途径，它可以从一个新视角来审视复杂电力系统的整体动态特性，能够对各种复杂电力系统的复杂性特点和演化规律提出新的见解。

而智能电网由于其本身的特性，其复杂性将更加明显，复杂程度将更大，传统的理论分析方法无法对其进行研究，而复杂网络理论在可为研究智能电网提供可行的思路和途径[18-23]。

近年来的研究表明：电力系统也具有复杂网络的一些特性，如小世界和无标度特性等[16,17]。所以，许多研究者根据复杂网络理论基于实际电力系统数据直接建立复杂网络的模型来研究实际电力系统。

（2）人工电力系统的构建

基于复杂网络的网络特征，同时考虑到电力系统的特性，在建立电力系统复杂网络模型时从简化分析的角度出发，抽象出电网的拓扑模型。具体构造算法如下：

1) 电网模型中的节点（顶点）包括发电厂、变电站和变压器，不考虑大地零点，各节点被认为是无差别的节点；
2) 高压输电线和变压器支路为网络中的边，且所有边为无向边，不考虑配电网、发电厂和变电站的主接线；
3) 所有传输线的拓扑特性均被认为是相同的，不考虑输电线的各种特性参数和传输电压的不同；
4) 合并同杆并架的输电线，不计并联电容支路，即消除自环和多重边，使模型成为简单图。

但是，原有的网络状态量在表征电力系统性能的时候，仅仅能从网络连通性的角度来体现其网络性能，对于电力系统的自身特点并未能很好地加以体现。例如：没有考虑节点的不同，节点可能是发电站、变电站、变压器等；没有考虑电网外的各种因素的影响，而这些因素往往可能对比电力系统本身造成的影响更大。可知仅仅将复杂网络的研究方法引入电力系统的网络特性研究，将会过多地简化电力系统，而忽略过多电力系统的特征，从而不能得到具有电力系统特性的网络模型。

为了解决上述问题，我们进行两方面的工作。一方面，对用来描述实际电力系统的复杂网络的拓扑结构和参数意义进行改进：如引入更能描述电网特性以及能专门描述未来智能电网特性的参数，如网络能力、路径冗余度、存续力、熵度及输电介数等，以及将电力系统复杂网络模型改进为有向加权网络以能更好的描述节点之间的潮流传输；另一方面，我们引入 Agent，构造多 Agent 复杂网络模型[24]。Agent 理论是人工智能领域的新发展，Agent 是一个具有智能性行为并可通过与其它 Agent 个体或者环境产生交互从而产生涌现性现象的个体，具有响应性、主动性和社会性，能对环境进行感知并采取自主行动以实现其设计目标，同时 Agent 之间可以协商、交互并达成一致，实现整个系统的控制目标[25,26]。

电力系统网络的整体行为是电力系统节点和链路之间复杂的非线性相互作用下涌现形成的，具有典型的复杂系统的行为特征。复杂网络和基于 Agent 建模仿真可以对描述和研究复杂电力系统提供了更加符合现实、更加有效的建模手段和理论指导，从而大大提高了人们对于复杂电力系统认识、研究、控制能力。与传统建模仿真方法相比，基于Agent建模仿真不仅提供了更加符合现实的建模方法，更重要的是能够获取复杂系统从微观到宏观的涌现行为特征，揭示复杂系统宏观整体特性的内在微观机制。同时，复杂网络则把复杂系统的大量组成单元抽象成点，把单元

间的相互作用抽象成边，可以描述生物、社会、技术等各类复杂系统。所以，以多 Agent 复杂网络为理论基础来建立人工电力系统，综合了 Agent 和复杂网络的优点，也更符合实际电力系统的本质特性。

以多 Agent 复杂网络理论为基础，综合蒙特卡洛、模糊神经网络等方法可以建立与实际电网“等价”的人工电力系统（见图 2）。以之为平台，可以对电网在受到各种突发事件下的预测、产生、次生、衍生及耦合、变异的非线性动力学演化规律进行计算实验，对和大面积停电密切相关的网络拓扑、参数变化以及大面积停电的预测、分析、决策与恢复方案等进行研究，为电力系统的应急预案制定、现场管理、决策提供辅助支持；在人工电力系统上研究各种社会因素和电网之间的相互影响，并进行计算实验，分析各种突发情况下人与社会的行为和反应对电网的相互影响，并对不同的解决方案的效果进行评估和优化，作为选择和支持管理决策的依据，以期对电网正常和非正常的运行状况提供参考、借鉴、指导和建议，并能对实际电网的故障风险管理提供理论支持。

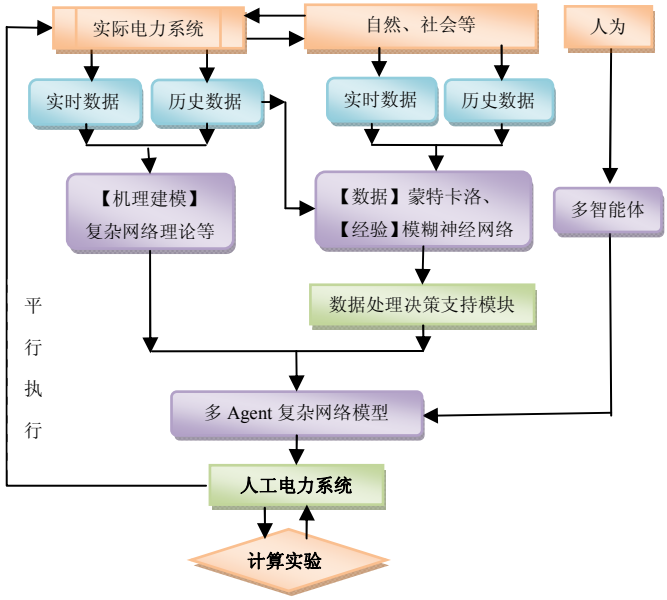

图 2 人工电力系统示意图

通过人工电力系统，利用计算实验，还可以研究未来智能电网的拓扑结构和各种在参数指标的变化以及对其安全的影响，研究其自愈性、坚强性等特性。从而对未来智能电网的发展提供理论方面的指导和借鉴（见图 3）。

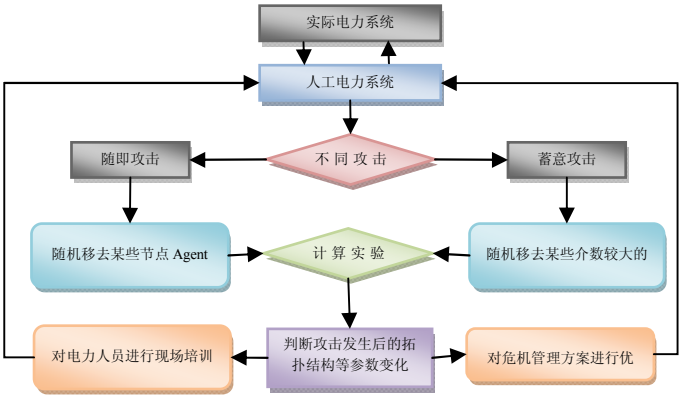

图 3 基于人工电力系统的计算实验示意图

4. 人工电力系统的实例验证

基于 ACP 方法，利用多 Agent 复杂网络，以中国华北电网具体数据，建立了相对应的人工电力系统。该系统有 2556 个节点和 2892 条边。在该系统上，我们研究了在 3 种不同攻击下该人工电力网络的可用率，计算实验结果见图 4。这三种攻击方式为：

1) 随机攻击：随机移去任一节点；重复 10 次；

2) 高度数攻击：从大到小，依次移去度数最大的节点；重复 10 次；

3) 高介数攻击：从大到小，依次移去介数度数最大的节点；重复 10 次。

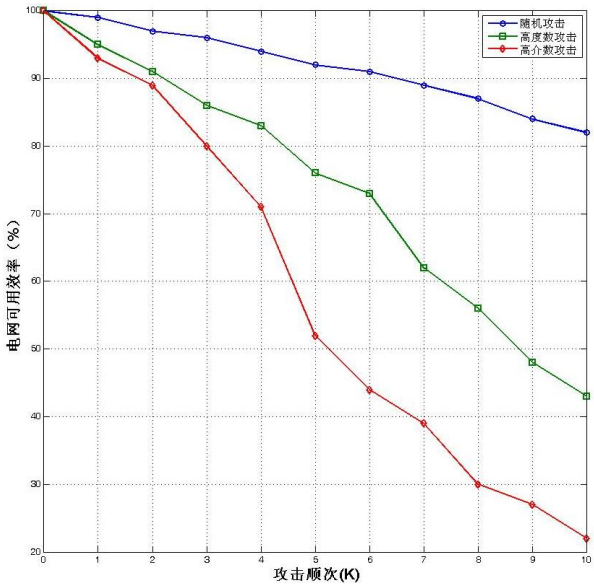

图 4 人工电力系统遭不同种类攻击效果示意图

从图 4 中，我们可以得到：

1) 该系统对随机攻击有很大的鲁棒性，在连续攻击 10 次后，仍有 80%的效率；

2) 该系统对蓄意攻击，即对针对高度数或高介数节点的攻击很脆弱，连续攻击 10 次之后，可用率只有 40%和 20%左右；
3) 与一般的网络相比较，电力网络的介数性质比度数更为重要，这说明：①网络的介数概念更能描述电力系统本身的某种固有特征；②网络的高介数节点或边是网络的薄弱点，需重点防护；③网络的拓扑结构对网络的安全性有直接的影响。

5．结论

本文提出采用 ACP 方法，以多 Agent 复杂网络模型为基础，建立与实际电力系统“等价”的人工电力系统；通过该人工电力系统，可以借助计算实验对实际电力系统的规划、设计、优化和运营管理方案以及其在各种突发事件情况下的运行、演化规律和应急管理等进行分析评估；通过人工电力系统，可以与实际电力系统互联构成平行系统，利用平行执行和反馈方法实现对二者的控制、管理与运营、优化；通过人工电力系统，可以进一步实现操作人员培训、实验与评估、优化与控制、故障诊断与预测等，为现代电力系统运营和管理提供科学的指导；通过人工电力系统，也可对智能电网的参数变化和自愈性等各种特性进行前瞻性的研究。

本文提出的方法可为电力系统的安全稳定、优质和经济运行提供科学指导，不仅可以提高电力公司的运营、管理水平和经济效益、降低生产成本，争创世界一流的的创新力、应变力、适应力和综合竞争力。同时，也对未来智能电网的研究和实施提供技术支持，具有十分重要的意义。

参考文献

[1] 王飞跃，赵杰，伦淑娴，人工电力系统与复杂大电网的运营和管理，南方电网技术，2008，2（3）：1-6

[2] 赵炜炜，电网大停电分析模型及预防应急体系研究，华北电力大学博士学位论文，2009

[3] 刘振亚，智能电网知识读本，北京：中国电力出版社，2010.

[4] 刘振亚，智能电网技术，北京：中国电力出版社，2010.

[5] 王飞跃．平行系统方法与复杂系统得管理和控制．控制与决策，2004，19(5)：485-489

[6] F. Y. Wang, “Toward a paradigm shift in social computing: the ACP approach,” *IEEE Intelligent Systems*, vol. 22, no.5, pp. 65-67, 2007

[7] 王飞跃，史蒂夫·兰森．从人工生命到人工社会——复杂社会系统研究的现状和展望们．复杂系统与复杂科学，2004，1(1)：33-41

[8] 王飞跃，人工社会、计算实验、平行系统——关于复杂社会经济系统计算研究的讨论，复杂系统与复杂性科学，2004，1（4）：25-35

[9] 王飞跃．计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估．系统仿真学报，2004，16(5)：893-897

[10] 王飞跃，关于复杂系统的建模、分析、控制和管理，复杂系统与复杂性科学，2006，3（2）：27-34

[11] 王飞跃．关于复杂系统研究的计算理论与方法．中国基础科学．2004，6(41)：3-10

[12] 王飞跃．平行应急管理系统 PeMS 的体系框架及其应用研究．中国应急管理．2007，12：22-27

[13] 熊刚，王飞跃，邹余敏，程长建，李乐飞. 提升乙烯长周期生产管理的平行评估方法. 控制工程. 2010，13(3)：401-406

[14] G. Xiong, K. F. Wang, F. H. Zhu and C. Cheng. “Parallel traffic management for 2010 Asian Games.” *IEEE Intelligent Systems*. vol.24, no.5, pp.81-85, 2010

[15] F. Y. Wang, “Parallel control and management for intelligent transportation system: concepts, architectures and application.” I*EEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* vol.11, no.3, pp.1-10, 2010

[16] D. J. Watts and S. H. Strogatz, “Collective dynamics of 'small-world' networks.” *Nature*, vol.393, no.6684, pp.440-442, 1998

[17] M. Rosas-Casals, “Power grids as complex networks: topology and fragility,” *Complexity in Engineering*, pp. 21 – 26, 2010

[18] G. H. Zhang, C. Wang, J. H. Zhang, J. Y. Yang, Y. Zhang and M. Y. Duan, “Vulnerability assessment of bulk power grid based on complex network theory,” 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp.1554-1558, 2008

[19] W. J. Bai, T. Zhou, Z. Q. Fu, Y. H. Chen, X. Wu and B. H. Wang, “Electric power grids and blackouts in perspective of complex networks,” International Conference on Communications, Circuits and Systems Proceedings, vol. 4, pp. 2687-2691,2006

[20] X. H. Yu, A. Dwivedi and P. Sokolowski, “On complex network approach for fault detection in power grids,” IEEE International Conference on Control and Automation, pp.13-16, 2009

[21] X.G. Chen, K. Sun, Y.J. Cao and S.B. Wang, “Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory,” IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp.1-6, 2007

[22] K. Sun, “Complex networks theory: a new method of research in power grid,” IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, pp. 1-6, 2005.

[23] S.Z. Xu, H. Zhou, C.X. Li and X.M. Yang, “Vulnerability assessment of power grid based on complex network theory,” Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, pp.1-4, 2009

[24] Z. B. Wei and J. Y. Liu, “Research on the electric power grid vulnerability under the directed-weighted topological model based on Complex Network Theory,” International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, pp. 3927-3930, 2010

[25] M. Pipattanasomporn, H. Feroze and S. Rahman, “Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation,” IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, pp. 1-8, 2009

[26] Q. L. Pang, H. H. Gao and M. J. Xiang, “Multi-agent based fault location algorithm for smart distribution grid,” 10th IET International Conference on Developments in Power System Protection, pp.1-5, 2010