

# 基于多Agent的电力系统智能调度

狄义伟<sup>1</sup>, 赵建国<sup>2</sup>, 刘炳旭<sup>1</sup>

(1. 山东大学电气工程学院 山东济南 250061; 2. 山东电力高等专科学校 山东济南 250002)

**摘要:**随着智能电网概念的提出和电力体制改革的不断深化,传统的电网调度运行方式面临巨大挑战,本文分析了当前调度自动化系统面临的问题及不足,提出了适应未来智能电网建设的电力系统智能型调度控制中心的构架,阐述了Agent技术的基本概念,设计了基于多Agent技术的智能调度系统的框架结构,并简要介绍了各个模块的基本功能。

**关键词:** 电力系统; 能量管理系统; Agent; 智能调度

## 0 引言

电力系统调度中心是电网运行管理的指挥决策中心,其调度自动化系统的性能高低对电网的安全、经济运行起着重要作用。虽然目前能量管理系统(EMS)已经得到广泛应用,但仍停留在分布式独立计算阶段,还需要调度员的人工干预才能进行计算分析,然后根据调度员的经验进行决策处理,这在调度操作的实时性和合理性上存在很大的缺陷。

随着电网规模的不断扩大、电力市场改革的日益深化,电力系统的结构和运行方式日趋复杂,传统的调度控制方式面临严峻挑战、同时对于调度人员心理素质和运行经验的要求也越来越高,迫切需要功能更为强大的智能化的调度系统,帮助调度人员完成调度任务,提高电网运行的安全性和经济性。因此,随着形势的发展和技术的进步,智能调度系统的出现是必然的。

## 1 智能调度系统概述

### 1.1 传统调度系统的局限性

在新的形势下,传统的电网调度自动化系统面临一系列的问题,主要表现在:

(1)电力市场的逐步实施和不断深化给调度人员造成巨大压力。在电力市场条件下,如何保证电力系统安全、可靠、经济运行面临很多新的问题,虽然电网的安全稳定运行仍然是电网调度运营部门最重要的目标,但是与传统的电网调度相比,电力市场条件下的电网调度更具有特点:为了充分挖掘现有系统的潜力,提高系统的运营效益,系统中的许多输电设备都需要运行在极限或接近极限的状态,因此保证系统安全运行的任

务将变得更为艰巨;此外,系统运行的经济性更为复杂,不仅要考虑发电的经济性,还要考虑输电服务和辅助服务的经济性。

(2)当前电网规模急剧扩大,使传统的调度自动化系统面临巨大挑战。我国的能源资源与经济发展水平在地域上呈逆向分布,能源丰富地区远离负荷中心,我国3/4的煤炭资源分布在山西、陕西、内蒙古等西北地区,而2/3以上的经济可开发水能资源分布在四川、云南、西藏等西南地区;东部地区经济发达,能量消耗大,能源资源却十分匮乏。我国这种资源分布与电力负荷中心分布极不均衡的状况,要求建设远距离、大容量的特高压输电系统,实现西电东送,加强南北互联,为实现全国范围内的资源优化配置创造条件。电网互联的发展,致使电力系统的规模越来越大,结构日益复杂,汇集到调度中心的各种信息大量增加,影响系统安全的因素越来越多,故障的发生和发展日趋复杂,多重故障、连锁故障造成的后果日益严重。

(3)建设统一坚强智能电网需要功能强大、更加智能化的调度系统。智能电网是以物理电网为基础,将现代先进的传感测量技术、通讯技术、信息技术、计算机技术和控制技术与物理电网高度集成而形成的新型电网。2009年美国奥巴马上任伊始就提出了以智能电网为核心的能源战略,积极应对全球气候变暖和国际金融危机,实现美国经济振兴,这使得智能电网这一概念逐渐得到各国研究机构和电力公司的重视。随后我国国家电网公司提出了建设以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的统一坚强智能电网发展战略,为我国智能电网的建设与发展勾画出了较为清晰的路线图。未来的智能电网首先应该具有坚强的网架结构,同时具备信息化、自动化、互动化的特征和自愈能力,方便加强与用户的实时交互沟通,支持分布式电源和双向潮流等特点。这些功能特点对电网控制中心都提出了新的更高的要求。调度中心作为电网监控的中枢,迫切需要建设具备实时分析、智能决策、适应市场化要

求的安全可靠的智能型调度自动化系统，以提高对电网的驾驭能力。

在这样巨大的挑战面前，传统的 EMS 系统就显得有些难以应对，必须对其结构和功能进行扩充和完善，以满足智能电网调度监控的要求。而且随着电力市场的发展，调度中心已经不再是一个纯粹的电网运行监控中心，它不但要负责电网的安全运行和稳定，而且还要负责电量的交易和市场的经营，是代表整个电力企业对电力系统实现电力调度、管理和运营的一个高度信息化、自动化和智能化的指挥决策中心。

### 1.2 智能调度的提出及其功能特点

电力系统调度的发展经历了经验型调度和分析型调度两个阶段，调度自动化系统的功能由初期的数据采集与监控(SCADA)逐步发展为现在的能量管理系统(EMS)。现在的 EMS 系统大多集成了潮流计算、状态估计、静态安全分析等高级应用软件(PAS)，在功能上有了较大的改进并得到了广泛的应用，但由于技术发展等方面的原因，目前在自动化和智能化程度方面仍然不高，没有从综合决策的角度把这些应用有机的结合起来。如何在现有 EMS 系统的基础上，对传统 SCADA/EMS 的功能进一步发展和扩充，为电网调度提供更为全面和智能化的决策支持，是今后电网调度系统发展的新方向。

如果能够综合运用最新的计算机技术、现代通信技术、人工智能技术、协调调用决策和信息技术等，研究复杂多变的电力系统，由计算机系统代替调度员根据系统的运行状况实时协调调用各个高级应用软件，综合生成系统调度决策方案，辅助调度员进行运行指挥和事故处理，则可以大大提高调度操作的速度和准确性，系统运行的监控水平将会有很大程度的改进和提高。

电力系统智能调度是指调度自动化系统能够自动跟踪电网状态的变化，帮助调度人员了解和掌握电力系统的运行状态，提供针对电网当前运行状态的分析决策，保证电网的安全稳定运行，提高电网运行的经济性。具体来说就是：当系统正常运行时，不断进行安全性和经济性的评估，给出评估报告；当系统发生故障时，决策系统根据故障信息进行故障诊断，在判断出故障元件的同时，对故障涉及的开关和保护的动作情况进行评价；诊断出故障元件后，给出故障恢复策略；当电网有操作任务时系统可根据操作任务自动开具操作票<sup>[3-5]</sup>。

智能调度系统是比较现有的 EMS 系统更为庞大的应用软件，其所做的决策不仅限于稳态分析，而且包括故障诊断和故障后的恢复决策，以及今后要加入的电力市场运行支持系统。在这种环境下，软件系统必须具有自主运行和协调计算的能力，另外不同的软件模块间也要更加频繁的交互，这要求系统的结构体系是一种开放的软件框架，各个模块保持相对独立又能协同工作，而且具有第三方模块的接入能力，支持应用软件的删除或加入。分布式人工智能领域的 Agent 技术为解决这个问题提供了一种有效的方法，它可以将现有 EMS 系统的成熟模块进行封装，进化为 Agent，与传统的系统相比具有更强的自治性和可移植性，近年来在调度系统的开发研究中越来越受到重视。

## 2 Agent技术简介

Agent 技术出现于上世纪 70 年代，在 80 年代后期逐渐发展起来，是计算机科学和人工智能领域的一项重要概念。对于 Agent 目前尚没有统一、确切的定义，国内学者一般将其译为智能体或代理。Agent 是处于一定环境下包装的计算机软件系统，具有相应的知识和能力，它能对外部事件做出响应，能够单独或在人的少许指导下进行推理决策，是一个具有自主行为能力的主体。Agent 技术吸收并集成了多种计算机技术，包括对象与封装、人工智能、专家系统、分布式处理等学科的知识。Agent 一般具有以下特性<sup>[6]</sup>：

**自治性(autonomy):** Agent 可以在没有外界干预的情况下自主地根据它本身的状态和外界环境进行活动，并能对其行为和状态进行控制。

**反应性(reactivity):** Agent 能感知它们所处的环境，并对周围环境的变化做出响应。

**社会性(social ability):** Agent 能用其通信语言与其它实体交换信息和相互作用，协调或合作解决复杂问题，共同完成任务。

**自发性(pro-activeness):** 传统的应用程序都是被动的由用户来调用，机械地完成用户的指令；而 Agent 的行为应该是主动的，自发的感知周围环境的变化，并做出基于目标的行为。

Agent 的结构描述了组成 Agent 的基本成分及其相互关系，根据 Agent 体系结构的不同可以将其分为三种类型：认知型、反应型和混合型。认知型结构保留了经典人工智能的传统，是一种显式的基于知识推理的符号模型，涉及复杂的逻辑演算，较难构建和操纵；反应型 Agent 是由事

件驱动的，无需复杂的符号推理，结构相对简单，反应速度也优于认知型；将上述两种结构相结合就构成了混合型体系结构，这种结构将 Agent 构建为两个子系统，一个为认知型子系统，含有用符号表示的事件模型，并用主流人工智能中提出的方法生成规划和决策，另一个为反应型子系统，用来不经过复杂的推理就对环境中出现的事件进行反应。通常反应子系统的优先级比认知子系统高，以便对环境中出现的重要事件做出快速反应。基于混合型 Agent 的这种优点，使其在大型复杂系统的开发中逐渐得到重视。

由于单个 Agent 对问题的解决能力有限，而多个 Agent 相互协作可以完成更复杂问题的求解，因此在实际应用中一般使用功能更为强大的多 Agent 系统(Multi-Agent, MAS)。MAS 系统将各种不同功能的 Agent 模块通过通信和协作结合起来，共同协调来完成任务，具有更大的灵活性和适应性。MAS 技术的一个显著特点就是将一个复杂的任务拆分为若干个简单的子任务，每个子任务由一个 Agent 模块执行，通过各 Agent 之间的交互，实现复杂问题的求解。

### 3 智能调度系统的基本框架

电力系统是一个超大规模分布式的复杂实时动态系统，为了实现其运行的可靠性和经济性，本文提出了智能调度系统这种新的调度控制中心模式。智能调度系统是比较有 EMS 系统更为复杂的在线运行的软件系统，所做的决策不仅限于稳态分析，而且包括故障诊断以及故障恢复决策，而且将来还要包括电力市场运行决策支持系统。在这种环境下，软件系统必须具有自主运行和协调计算的能力，不同的软件模块之间也要更频繁的进行交互，并且系统要易于扩展升级。在这种要求下，使用面向 Agent 的软件结构是较为理想的解决方案，因此我们将多 Agent 系统的概念与方法引入进来，提出了基于多 Agent 技术的智能型电网调度系统。

#### 3.1 传统软件模块的封装

当前电力系统正在使用的 SCADA/EMS 系统基本上都具备了潮流计算、状态估计、安全分析、网络拓扑等软件模块，而这些应用在系统中正可靠有效地运行，如何将这此模块封装起来加以合理利用，使其进化为 Agent，作为智能调度系统的一部分，关系到新系统开发的成本及开发效率。而现有 EMS 系统开发的过程中，已经广泛采用了面向对象技术，使系统的模块化程度不断提高，

而 Agent 可以看成是面向对象技术的进一步发展，为原来的软件模块向 Agent 进化提供了可能。在现有的 EMS 应用软件模块中通过添加一系列的功能函数，例如通信处理、消息响应、知识推理等模块，可以将其逐步进化为 Agent，作为多 Agent 智能调度系统的各职能模块。

#### 3.2 系统的框架结构

智能调度系统由数据资源层、通信服务层、网络分析层、人机接口层四部分组成，其结构框架如图 1 所示。

(1)数据资源层：实时收集电力系统的各种数据信息，是智能调度系统的数据基础，也是所有高级应用的支撑平台。与传统的 EMS 系统相比，它不仅包括来自 SCADA 系统的全部稳态信息，而且包括故障发生时的暂态信息（如各继电保护装置的動作状态及故障录波等），为各功能模块提供全面而准确的数据支持。

(2)通信服务层：它是网络分析层与数据资源层之间的中介，由通信系统和指挥系统组成，起到任务分配及协调调用的作用。根据电力系统的状态触发相应的职能模块，协调各个智能模块的调用逻辑及执行顺序，以合作的方式共同完成复杂任务。

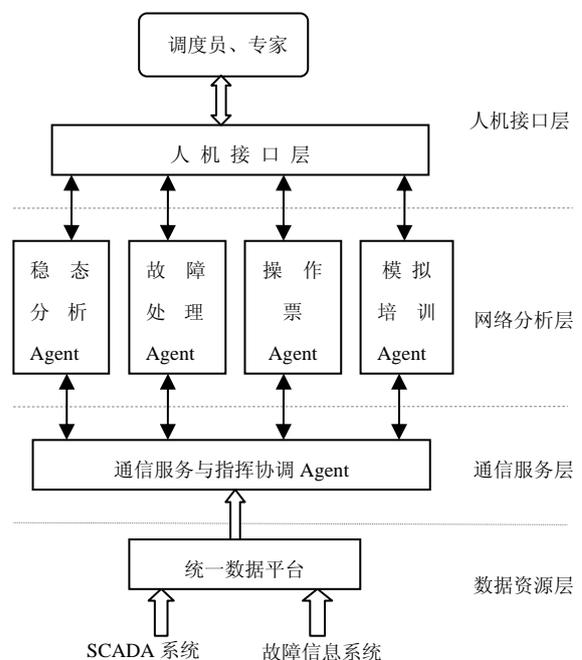


图 1 智能调度系统的模型框架

(3)网络分析层：该部分主要由稳态分析、故障处理、智能操作票和模拟培训等不同功能的 Agent 组成，是智能调度系统的核心。

1)稳态分析 Agent 主要由潮流计算、状态估

计、网络拓扑、静态安全分析、无功优化等子模块构成,当系统正常运行时,稳态分析模块不断进行安全性和经济性的评估,给出评估报告,并给出改善系统安全稳定性的建议和决策供调度员参考,使系统始终处于最佳的运行状态;该模块的触发方式主要有两种:事件触发和定时触发,当系统的开关发生变位或根据定时器自动运行稳态分析模块,给出综合评估报告。

2)故障处理 Agent 主要由故障诊断和故障恢复两个子模块构成,当系统发生故障时,故障诊断模块由报警信息自动驱动,根据来自故障信息系统的开关和保护动作信息排除其中误动和拒动的情况,自动诊断出故障设备,然后故障恢复模块根据自身的知识库自动搜索所有可能的供电恢复路径,并将恢复策略提供给调度员参考。与传统的故障处理相比,它可以更加有效地控制电网事故的发生、发展,缩短电网恢复正常运行的时间,减少电网事故带来的损失。故障处理系统以基于知识的专家系统为基础,通过封装集成于智能调度系统之中,该模块主要由报警信息驱动,并且具有最高的优先级,可以屏蔽其它职能模块的运行。

3)智能操作票 Agent 可根据操作任务自动开具操作票。开具电网调度操作票是一项经验性很强的工作,难以建立精确的数学模型,需要熟练的专业知识和运行经验才能很好的解决;智能操作票系统可以避免因手工输入疏忽而导致的开票错误,并大大缩短了开票时间,减轻调度员的工作压力。

4)模拟培训 Agent 主要用于调度员培训、运行方式研究和反事故演习等,可以仿真电网的模型,提供与实际系统完全相同的运行环境,使调度员实习在正常和故障状态下的操作任务,预演将要执行的操作,积累电网操作的经验。该系统不仅可以培养分析型调度人员,使他们具备电网正常运行、故障处理和恢复操作的能力,而且可以培训面向电力市场的经济型调度员,提高系统交易员分析、交易的能力。

(4)人机接口层:通过人机接口,调度系统可以把网络分析层的各种决策方案和电网运行的核心信息以人性化的图形用户界面提供给调度员,调度员或电力专家根据系统提供的辅助方案结合自身积累的经验知识做出合理的调度决策。另外还可以通过人机接口完成系统界面的维护、各职能模块知识的扩充等任务。

## 4 结论

本文在分析电力系统现状和发展趋势的基础上,针对当前调度自动化系统面临的问题和实际需求提出了适应智能电网要求的智能调度系统。结合分布式人工智能领域的 Agent 技术,构建了智能调度系统的框架结构,并介绍了各职能模块的基本功能。先进的电网控制中心的研究开发具有非常重要的价值和现实意义,智能型调度已成为电力系统调度发展的新方向,是建设统一坚强智能电网的重要组成部分。

## 参考文献

- [1] Song Wei, Wang Xiangnan, Cao Houji, Pan Guowei. Multi-Agent Architecture of Energy Management System Based on IEC61970 CIM. The 8th Power Engineering Conference, 2007, 1366-1370
- [2] 姚建国, 杨胜春, 高宗和, 杨志宏. 电网调度自动化系统发展趋势展望. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 7-11
- [3] 吴琼, 刘文颖, 杨以涵. 智能型电网调度决策支持系统的开发与实现. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 79-83
- [4] 吴文传, 张伯明, 孙宏斌等. 在线安全预警和决策支持系统的软件构架与实现. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 23-29
- [5] Azevedo G P, Feijo B, Costa M. Control Centers Evolve with Agent Technology. IEEE Computer Applications in Power, 2000, 13(3): 48-53
- [6] 史忠植. 智能主题及其应用. 北京: 科学出版社, 2000
- [7] 艾琳, 华栋. 电力系统智能型调度. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 83-87
- [8] 杨旭升, 盛万兴, 王孙安. 多 Agent 电网运行决策支持系统体系结构研究. 电力系统自动化, 2002, 26(18): 45-48
- [9] 赵冬梅, 郭锐, 徐开理. 电网故障诊断专家系统的一种实现. 电力自动化设备. 2000, 20(4): 33-36
- [10] 康权, 刘文颖, 石建雄等. 鄂尔多斯电网智能调度决策支持系统. 电网技术. 2008, 32(增刊 1): 74-76
- [11] Novosel D. Emerging technologies in support of smart grids. IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2008
- [12] 孙宏斌, 谢开, 蒋维勇等. 智能机器调度员的原理和原型系统. 电力系统自动化. 2007, 31(16): 1-6
- [13] 张文亮, 刘壮志, 王明俊等. 智能电网的研究进展及发展趋势. 电网技术. 2009, 33(13): 1-11
- [14] 孙宏斌, 张伯明, 吴文传等. 面向中国智能输电网的智能控制中心. 电力科学与技术学报. 2009, 24(2): 2-7
- [15] 杨胜春, 姚建国, 高宗和等. 基于调度大二次系统的智能化电网调度辅助决策的研究. 电网技术. 2006, 30(增刊): 176-180
- [16] 赵川, 李永, 吴琼等. 多智能体型电网调度决策支持系统. 电网技术. 2006, 30(22): 59-66
- [17] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考. 电力系统自动化. 2009, 33(9): 1-4

## 作者简介:

狄义伟, 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统调度自动化的研究。Email: diyiwei666@163.com

赵建国, 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统调度自动化和安全稳定分析等方面的教学和研究工作。

刘炳旭, 男, 副教授, 主要从事电力系统自动监控与广域测量等方面的教学与研究工作。