

AEMS 及其在上海电网的应用

阮前途^{1,2}, 何光宇¹, 柳明¹, 梅生伟¹, 卢强¹

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京市 100084; 2. 上海市电力公司, 上海市 200122)

摘要: 结合电力系统的运行实践,提出了用混成自动控制来实现电力系统多重目标趋优控制的理论和自动化系统(即先进能量管理系统(AEMS))。该系统以事件驱动为其内核,通过将不满意状态定义为事件,将趋优化问题转化为事件的处理和消除问题。采用分层控制的方式,构思了控制命令(发自最高决策与指挥层)和操作指令(发自中间操作层)的概念,建立了完整的事件处理框架,以达到消除事件的目的。进一步介绍了 AEMS 的组成框架,明确了框架中各组成部分的职能和工作机制。针对 AEMS 的设计、实现和运行,指明了其必须具备的基本特征,并对 AEMS 与能量管理系统(EMS)之间的包容关系进行了阐述。最后,简要介绍了上海电网 AEMS 工程实现第 1 阶段软硬件系统实现方案。

关键词: 混成自动控制; 多重目标趋优化; 先进能量管理系统(AEMS); 事件驱动; 全局智能决策; 基于组件的设计; 运行状态可视化

中图分类号: TM734

0 引言

电力系统的调度均以实现电能质量、稳定安全和经济运行多重目标优化为其最终目标。为实现这一目标,文献[1]提出了数字电力系统理论框架^[1],文献[2-4]采用混成自动控制理论对其实现进行了有益的尝试。数字电力系统理论和实践说明,基于混成自动控制理论^[2-4]构筑自动化系统,是实现多重目标趋优自动化调度理想的有效途径。先进能量管理系统(AEMS)正是基于混成自动控制理论,对网内各种资源(包括发电机、电容器、电控器、变压器和各种柔性交流输电系统(FACTS)设备等)进行统一、自动、科学调控,实现电力系统多重目标趋优控制的自动化系统。

上海电网是华东电网的重要组成部分,对电网的安全运行和经济运行有更高的要求^[5-6]。通过深入的可行性研究,上海电网公司在 2005 年决定与清华大学合作,启动 AEMS 的建设,以求在现有调度自动化系统基础上通过科技创新,引入新的控制理念,以较少的投资获得整个电网稳定性、安全性及经济性的全面提升。经过 1 年左右时间,上海电网

AEMS 研发工作已基本完成。本文试图对 AEMS 进行总体性阐述,期望可以对我国新一代能量管理系统(EMS)的建设^[7-13]有所推进。

1 AEMS 概述

1.1 电力系统的多重目标趋优化控制

上海电网 AEMS 建设的目的是在统一的框架下进一步提高其总体运行水平,实现电压质量、电压稳定性、频率质量、频率稳定性、网损最小化等多重目标的优化。这样复杂的问题不能指望用纯数学的方法来解决,需要采取创新的思路。

这条新途径就是混成控制系统(HCS)。其主导思想是:将一切不满足要求和不满意的状态都分类地定义为事件,通过控制使系统回归至无事件运行状态,则系统的各项指标(电能质量、安全稳定性和经济性)一定是足够满意的(见图 1)。这就是说,HCS 控制所得的效果在工程上是足够满意的,可以在实践中解决大电网的多重目标趋优控制问题。

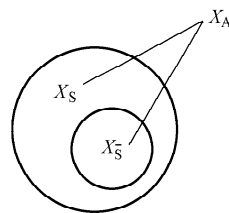


图 1 全状态为满意状态集合与不满意状态集合的并集

Fig. 1 Full states is union of satisfied and unsatisfied states

收稿日期: 2007-01-08; 修回日期: 2007-02-17。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2004CB217903);国家自然科学基金重大项目(50595411);国家自然科学基金资助项目(50377018);国家电网公司重点科技项目。

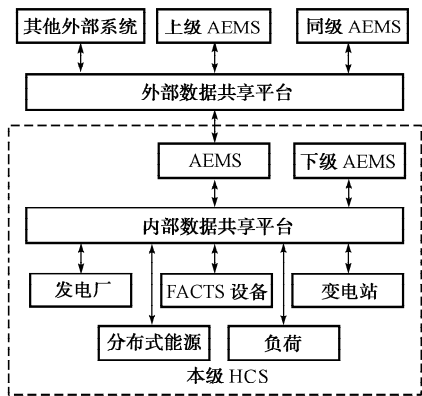


图 3 电力 HCS 的一般模型

Fig. 3 General model for hybrid control in power

2 AEMS 的组成框架

HCS 以事件处理为其本职,与其相应的 AEMS 也由事件分析模块、事件处理模块和调度员决策模块构成,见图 4。

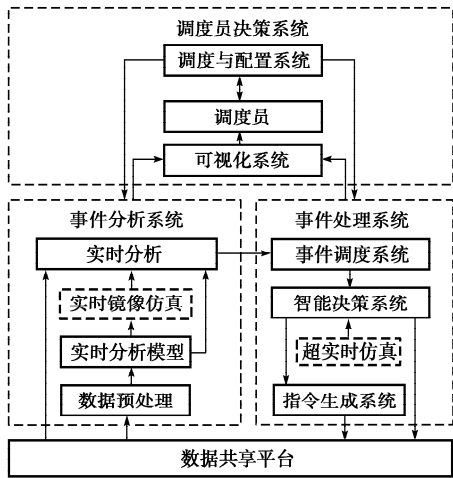


图 4 AEMS 的组成框架

Fig. 4 Framework of AEMS

事件分析模块对所收集到的信息进行实时分析,确定有无事件产生。若有,则将事件发送给事件处理系统;若无,则交由常规 EMS 实现常规的自动化调度(见图 2)。事件处理模块对接收到的事件进行处理,产生相应的控制命令或操作指令下达给中间处理层或由其直接控制的底层设备。这 2 部分与外部系统的数据交换通过数据共享平台实行。

在一般状况下,上述系统已能进行有效的闭环控制。鉴于调度人员需要对其所调度管理的电力系统运行状态有很好的知情度,因此,所研发的 AEMS 的另一职能是将系统运行的关键状态以可视化的形式提交给调度员,使调度员对系统的运行状况有一个直观的了解。在上海电网的 AEMS 实

现中广泛使用了可视化技术,如电压稳定域的可视化和抑制低频振荡效果的可视化等。

2.1 事件分析系统

事件分析系统的核心是实时分析,它由一组分析模块(如质量分析、扰动分析、安稳分析和网损分析等模块)构成。这些模块从实时分析模型或实时镜像仿真系统获取系统当前的运行状况,通过对这些数据的分析,确定是否有事件(即不满意的运行状态)发生,并将产生的事件提交给事件处理系统。

针对不同类型的事件,有相应的分析模型与其对应。模型所涉及的数据都是实时数据(可以是实时采集的数据,也可以是实时的预测和估计数据)。它主要包括以下 3 类:①网络拓扑模型数据和实时状态数据,也包含准确的状态估计数据;②负荷分布模型数据,它通过超短期精确负荷预测模块对数据加以实时修正形成;③发电预测模型(包括辅助服务),它由运行计划结合实时的市场交易数据形成。

数据预处理单元负责将从所调度的电力系统(包括厂站和其他 AEMS 中的 SCADA 系统)收集到的数据进行处理,形成符合分析模型要求的数据。该模块包含负荷预测、状态估计、拓扑分析和网络化简等模块。负荷预测包括总量预测和节点(母线)负荷预测;状态估计主要提供给分析模型难以直测或不能直测的数据。为了提高估计的准确性,还可利用采集数据的冗余性来剔除一些错误的量测数据。拓扑分析单元通过对开关设备的状态信息进行分析,获得进一步分析所需要的网络拓扑模型。网络化简是将与上海电网互联的外部网络(也可以是自己内部的一部分)进行动态等值处理。

实时镜像仿真在图 4 中用虚线表示,它是 AEMS 的高级阶段需要实现的功能单元。它的职能包括 3 个方面:①以实时模型的数据为基础进行实时仿真,供实时分析系统使用(由于与实时量测存在同步机制,它提供的仿真数据具有很高的可靠性);②将整个电网的关键节点状态的仿真结果通过可视化界面展示在调度员面前,作为调度员发出调度指令的参考;③作为实时分析的计算平台,从而可以避免不同在线分析模块采用各自独立计算模块所带来的结果的不一致性。

2.2 事件处理系统

事件处理系统的一般模型如图 5 所示。事件调度系统从事件判断单元接收事件,对这些事件进行排队(不同的事件具有不同的优先级,安全类事件必须先于经济类事件进行处理)和合并(由于对于其中某一类事件的处理实际上也可以消除另一类事件)等处理,并将处理后的事件提交给智能决策系统中

的相应模块进行决策。

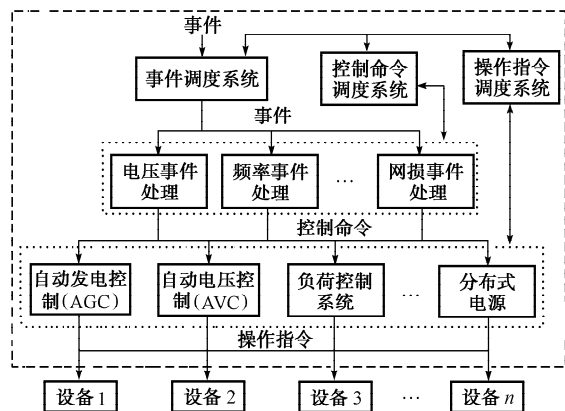


图5 事件处理系统
Fig. 5 Event handling system

智能决策系统由一组模块构成,分别针对不同类型的事件形成相对应的控制命令,下达给中间层系统(包括位于 AEMS 内部的指令生成系统和位于直控厂站端的控制系统),以实现式(2)所示的功能。智能决策系统下达的控制命令包括 3 类:①常规调度(由常规 EMS 承担);②趋优化控制,它给出 1 个或多个控制决策,自动选择(也可由调度员选择)其中最优的一个下达;③紧急控制指令,这时 AEMS 制定控制决策,给出明确的建议,由相关负责人确认后下达执行(技术成熟后也可自动执行)。

指令生成系统也包括一组模块,它们接收智能决策系统的控制命令,生成面向设备的一组操作指令,并下达给相应设备的接收与执行装置。它实现式(3)所示的功能。

按照上述运行机制,由于相对同一个事件可能对多个中间层系统发出控制命令,而一个中间层系统也可以向多个设备输出操作指令,所以为了避免这些控制命令和操作指令之间发生冲突,需要设立相应的协调机构(控制命令调度系统和操作指令调度系统)。

超实时的仿真平台是一个将放在 AEMS 高级阶段实现的功能单元,其主要作用是作为智能决策系统的辅助决策平台。通过对智能决策系统下达的控制命令进行超实时仿真,可预知控制的效果,并提交给调度员作为参考,从而进一步提高智能决策的可靠性和有效性。

2.3 调度员决策系统

调度员决策系统确定整个 AEMS 的运行方式。由图 4 可知,它由以下 3 个部分组成:

1)可视化系统。负责将系统的实时状态(包括系统的实际运行状态和系统控制中的事件处理对状态的影响)以动态图形的形式展示给调度中心,使得

调度员对系统有一个更为直观的了解,从而有助于做出科学的调度决策。

2)调度与配置系统。其功能包括 2 部分:①调度,包括主动和被动 2 种形式。主动形式指调度员在尚未形成事件时根据 AEMS 提供的服务(包括可视化界面),根据其经验做出预测,主动改变当前运行方式,这时一般直接向事件分析系统发出指令,使它触发相应的事件;被动形式的调度主要是调度员对智能决策的确认;②配置,是指对 AEMS 运行方式的配置,它决定了 AEMS 的行为模式,具体的配置包括:运行方式(开/闭环)、事件的种类和触发条件、事件调度的策略、智能决策的约束等。

3)调度员。即使在实现了 AEMS 后,调度员及其负责人在该系统中仍然具有最高的决策特权。其职能主要包括运行时的调度决策和维护时的配置管理 2 个方面。例如,尽管在运行时没有事件产生,调度员还是可以利用可视化系统了解到某些潜在的问题(但可能尚未形成事件),并采用主动方式进行调度操作(这时可以利用超实时系统来了解操作的效果,以减少操作的盲目性)。应该强调指出,由多年教育和运行所练就的调度人员的知识及经验就是一个活的专家系统。这个由调度人员的大脑所形成的专家系统,无论现在或未来的调度系统中均享有最高的决策权。

3 AEMS 的特征

如前所述,作为 HCS 的内核,AEMS 具有事件驱动的特征。事件驱动的属性必然引出以下几个 AEMS 所具有的特点:

1)数字化表示。它是整个系统运行的基础。数字化的表示主要包括 2 个方面:①电力系统模型的数字化表示,包括电力系统的物理状况(即静态特性)和运行状态(即动态量测);②基于事件的控制流程的数字化表示,包括事件、控制命令和操作指令本身数字化表示和控制过程的数字化表示。

2)数据的全局共享。它是智能决策得以实现的基础。为了实现数据的全局共享,需要建立 AEMS 与外部系统实现数据共享的平台。同时,针对 AEMS 各个模块间的数据共享,在系统内部也需要建立相应的数据共享机制,即遵照 IEC 61970 标准,采用标准的信息模型和数据访问接口。

3)全局性智能决策。这里的全局性,一方面是指决策依据全局化的数字模型来制定,另一方面则要求决策包含对于全局控制手段的综合利用。智能性体现在它能部分地替代原来需要调度员执行的工作,它的实现依赖于新的分析和控制理论在电力系

统中的应用。

4) 基于混成控制的调控机制。它以事件的产生作为智能决策触发的条件,以事件的消除作为控制的目标,以一个简单的机制涵盖了复杂系统的全方位趋优的需求,既简化了问题的复杂程度,也保证了用其他方法所难以达到的全方位趋优的效果。

除了上面所提到的运行方面的特征以外,AEMS 对于软件系统的组成和实现也提出了具体的要求。

首先是采用模块化的结构。事实上,对于系统的常规变化(如事件类型的增加、事件判据的变化等),系统的组成框架必须保持相对稳定,这就要求在框架不变的基础上,便于增加某个功能单元或修改已有功能的具体实现方式。采用基于组件技术的模块化构造,不但能降低建设和维护的时间及费用,同时为系统功能模块的互通和互换提供了方便。

在系统的实现方面,将采用模型驱动实现。这主要是由于 AEMS 中的事件分析和事件处理都是围绕一定的数字化模型进行的,这些模型分别对电力系统一个部分或一个方面的功能、结构和行为进行规范化的表示。一般来说,行业的业务功能模型的改变不会很频繁,但是可以用来实现这些功能的技术却在不断改进,采用模型驱动的设计有利于跟踪和采用新技术,提升电网的自动化调度水平。

4 AEMS 与 EMS 的关系

AEMS 与传统的 EMS 不仅不相抵触,而且将与 OEMS^[16-18] 并存,AEMS 相当部分功能可通过在 EMS 上进行功能的继承和扩充^[19-26] 来获得。实际上,它们之间的关系(见图 2)简单到可用一句话来表达:若 AEMS 判断电网处于无事件状态,则交由 OEMS 执行,否则由 AEMS 进行多目标趋优化调度。

下面以上海电网为例说明。上海电网中,AEMS 与 EMS 的实际数据信息交互方案如下:

1) AEMS 从 EMS 中获得如下数据:各测点的实时量测数据;系统静态拓扑数据(数据格式遵循 IEC 61970 标准);系统日出力、日负荷预测等计划数据。

2) AEMS 将相关的 AGC 命令发送到 EMS,通过原有的控制通道将命令下发给受控机组。

3) AEMS 将变电站 AVC 命令发送到 EMS,通过已有的控制通道将命令下发给受控变电站。

4) AEMS 通过自己的前置机系统,将 AVC 命令直接下发给受控电厂(因 EMS 中尚没有此控制通道)。

由此可见,AEMS 充分利用了 EMS 已有的 AGC 等功能;而对其不具备的功能,则进行了相应的扩充。其最本质的区别在于 EMS 偏重于全局分析,而 AEMS 偏重于全局控制,它通过对网内各种可控资源,进行统一、自动、科学调控,实现全局的多目标趋优自动控制。

5 上海电网 AEMS 实现方案

上海电网供电营业区覆盖整个上海市行政区,包括长兴、横沙和崇明 3 岛。它位于华东 500 kV 主网架的东端,是华东电力通道的“下游”,属于强大的受端系统网络。上海电网负荷密集且增长较快,电网结构发展迅速,现有的 ± 500 kV 直流线路落点使上海电网形成一个特性复杂的交直流混合系统。

上海电网目前有待进一步改进的主要方面有:

1) 上海电网在向用户提供优质电能方面尚需进一步努力。

2) 上海电网缺乏足够的动态无功电源储备且分布不均,空调负荷比例高,负荷对气温变化敏感,夏季高峰负荷爬坡速度快等因素易诱导电压稳定事故。其次,上海电网在高峰负荷期间的外省受电比重大,网内缺乏足够的备用容量,从而导致抵御意外事故的能力不足。此外,上海电网属密集型受端电网,用电负荷密度高,大容量发电机组相对较少,不能排除上海电网与华东电网内部如安徽、江苏电网之间产生低频振荡的可能性。上述问题使得上海电网的安全稳定运行面临新的挑战。

3) 运用新的控制理论,使 AGC 与 AVC 精密协调配合,能够使上海电网统一潮流(有功和无功)全年逼近其优化态的时间得以延长。由此可知,上海电网目前仍然存在着进一步降低网损的空间。

为解决上述问题,上海电网公司与清华大学合作,计划在“十一五”期间实现基于 HCS^[3] 的上海电网 AEMS。所设计的 AEMS 包含混成自动电压控制(HAVC)系统、混成自动发电控制(HAGC)系统、混成自动抑制低频振荡控制(HADLFOC)系统以及混成自动稳定控制(HASC)系统,简称“4A”系统。课题分 3 个阶段进行。第 1 阶段的工作是在新构建的统一平台上实现包含 HAVC 及 HAGC 的 AEMS,并给出 HADLFOC 及 HASC 的概念设计。第 1 阶段中初步选择了吴泾二厂、石洞口发电厂、春申变电站、万荣变电站作为 HAVC 和 HAGC 的调控对象。第 2 阶段将把 HAVC 和 HAGC 的调控对象扩展至上海电网管辖范围内的所有主力电厂、220 kV 及 500 kV 变电站,并使 HAVC 覆盖上海地区级电网。第 3 阶段将在 HAVC 与 HAGC 系统协

调动作的基础上进一步实施 HADLFOC 与 HASC 的协调集成,使上海电网 AEMS 完全接管上海电网的主要可控设备。目前,项目第 1 阶段已完成。以下主要对第 1 阶段的建设情况进行介绍。

5.1 上海电网 AEMS 软件结构

5.1.1 基于 SOA 的分布式体系结构

AEMS 是一个基于面向服务的体系结构 (SOA) 的分布式系统^[27],采用松散耦合的软件体系结构,利用独立可重用的服务构建系统功能。SOA 构架见图 6。

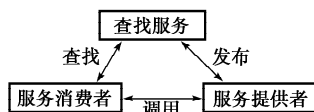


图 6 SOA
Fig. 6 Service oriented architecture

通常,SOA 包含如下几个组成部分:

- 1) 查找服务:是比较特殊的服务提供者,其他服务在此注册,服务消费者向它查询感兴趣的服务。
- 2) 服务提供者:是提供相关服务的实体,它的服务通过一致的对外发布的接口进行访问。
- 3) 服务消费者:是需要使用服务的应用程序或其他服务。

在 AEMS 中,服务提供者提供的服务主要包括电力系统中常用的计算服务,例如:潮流计算、最优潮流计算、HAVC 计算、HAGC 计算、电压稳定域计算、对抑制低频振荡起决定作用的系统主导特征值的计算,以及超短期负荷预测等。服务消费者则需要调用上述计算服务,实现 AEMS 中各种业务流程和作业调度。

5.1.2 针对业务的作业调度

作业是完成某一特定任务的一段可执行代码。作业是对服务的具体应用,是根据业务需求而制定的。一项业务由一组作业来完成。

在 AEMS 中,作业是通过实现 Job 接口来完成任务的 Java 类,它接受作业调度器的调度。作业调度器采用多线程的架构,充分利用计算机资源。作业调度器包含的基本功能如下:

- 1) 作业的动态扩充、修改和删除:对于新的作业能够动态地加入到现有系统,对于不再需要的任务可以动态地删除。
- 2) 作业打火条件的增加、修改和删除:有些作业需要定时启动,有些作业要在其他作业完成后启动,调度器提供对作业打火条件的修改。

此外,作业调度还可最大限度地利用现有的计算资源,并具有足够的灵活性,能快速响应业务需求的变化。

5.1.3 分布式 AEMS 的实现

AEMS 中的服务实体大多是用 Java 开发的,这些服务与远程对象绑定,在特定端口等待服务消费者调用。该类型对象的功能可由 1 种或多种远程接口描述。值得强调的是,远程对象的方法调用与本地对象的方法调用语法相同,正因为这一点,使得调用服务变得十分简便。

对于 AEMS 中存在的非 Java 程序的服务实体,实体服务消费者与服务提供者可以通过网络传输协议(如 TCP/IP、用户数据报协议(UDP))实现基于可扩展置标语言(XML)的消息传递。此外,服务可以分布在能够通过网络连接的任何地方,对于服务消费者来说,它并不需要知道服务实体的位置,只需从“查找服务”中查找感兴趣的服务即可。在一个系统中可以存在 1 个以上的“查找服务”,也可以存在多个提供相同服务的服务实体。因此,分布式 AEMS 十分便于实现双机热备用甚至集群热备用,从而大幅度提高 AEMS 运行的安全性和可靠性。

5.2 上海电网 AEMS 硬件架构

AEMS 的硬件结构如图 7 所示。其服务器包括 2 台数据服务器和 2 台 Web/应用服务器,服务器操作系统均采用 Solaris 8,2 台数据服务器及 2 台 Web/应用服务器均互为热备用。由于 AEMS 需要同时进入现有 EMS 及其 SCADA 网络,并保持一定的独立性,因此 AEMS 启用了 2 个 3 层交换机,通过它们分别连接到 EMS 网络和 SCADA 网络。数据服务器都采用双网卡设计,分别与上述 2 个交换机相连,从而实现 AEMS 分区网络与 EMS 网络、SCADA 网络之间的相互访问。

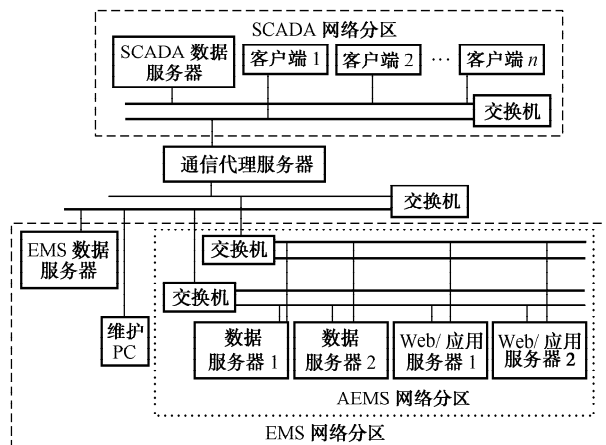


图 7 AEMS 硬件架构
Fig. 7 Hardware structure of AEMS

6 结语

本文提出了利用 HCS 实现多重目标趋优控制

的 AEMS 的理念和方法。为实现复杂电力系统的多目标趋优闭环控制,提出了采用事件驱动与分层控制的技术,引入控制命令和操作指令的概念作为实现的手段,建立了由式(1)~式(5)以及图 1~图 5 所表示的完整的事件处理框架。针对 AEMS 的设计、实现和运行,指出了它必须具备的基本特点和理论内核,并阐明了 AEMS 与 EMS 之间的关系,以上海电网为例简介了其实现方案。

随着第 1 阶段建设的基本完成,AEMS 已经从理论走向了工程实用。当然,这种理论方法和技术并不仅可应用于上海电网。

参考文献

- [1] 卢强. 数字电力系统(DPS). 电力系统自动化,2000,24(9):1-4.
LU Qiang. Digital power systems. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(9): 1-4.
- [2] 王智涛. 大电网混成自动电压控制理论及其工程实现的研究[D]. 北京:清华大学,2006.
WANG Zhitao. Study on theory and engineering implementation of hybrid automatic voltage control for large scale power systems [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.
- [3] HU Wei, LU Qiang, MEI Shengwei, et al. Hybrid emergency control for power system. Electric Power Components and Systems, 2001, 29(8): 683-693.
- [4] 王智涛,胡伟,夏德明,等. 东北 500 kV 电网 HAVC 系统工程设计及实现. 电力系统自动化,2005,29(17):1-4.
WANG Zhitao, HU Wei, XIA Deming, et al. Design and application of HAVC system in the 500 kV power grid of Northeast China. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 1-4.
- [5] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策. 电网技术,2005, 29(2):78-83.
RUAN Qiantu. Present situation of short current control in Shanghai power grid and countermeasures. Power System Technology, 2005, 29(2): 78-83.
- [6] 阮前途. 确保上海电网安全运行的若干思考. 电网技术,2005, 29(22):7-13.
RUAN Qiantu. Some thoughts on ensuring secure operation of Shanghai power grid. Power System Technology, 2005, 29(22): 7-13.
- [7] 何大愚. 21 世纪中的四项重大电网技术及其相关关系的发展展望. 电网技术,1997,21(11):16-22.
HE Dayu. The development outlook for four major power system technologies (FACTS, AEMS, DOA and AIC) and their correlations in the 21th century. Power System Technology, 1997, 21(11): 16-22.
- [8] 辛耀中. 新世纪电网调度自动化技术发展趋势. 电网技术,2001, 25(12):1-10.
XIN Yaozhong. Development trend of power system dispatching automation technique in 21st century. Power System Technology, 2001, 25(12): 1-10.
- [9] 傅书遑. IEEE PES 2005 年会控制中心与 EMS 部分综述. 电网技术,2006,30(16):11-14.
FU Shutu. Summary and comments on IEEE PES 2005 general meeting: electricity market and EMS part. Power System Technology, 2006, 30(16): 11-14.
- [10] 傅书遑. IEEE PES 2004 会议电网安全问题综述及防止大面积停电事故建议. 电力系统自动化,2005,29(8):1-4.
FU Shutu. Summary on power system security problems on 2004 IEEE PES meeting and recommendation for developing defence measures. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 1-4.
- [11] 王明俊. 新一代能量管理系统的开发和分布式问题求解的新途径. 电网技术,2004,28(17):1-5.
WANG Mingjun. Development of a new generation of energy management system and new approach to distributed problem solving. Power System Technology, 2004, 28(17): 1-5.
- [12] 王明俊. 我国电网调度自动化的发展:从 SCADA 到 EMS. 电网技术,2004,28(4):44-45.
WANG Mingjun. Development of dispatching automation technology in China: from SCADA to EMS. Power System Technology, 2004, 28(4): 44-45.
- [13] 张伯明. 现代能量控制中心概念的扩展与前景展望. 电力系统自动化,2003,27(15):1-6.
ZHANG Boming. Concept extension and prospects for modern energy control centers. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(15): 1-6.
- [14] 吕书强,秦世引,宋永华. 混成电力系统频率紧急控制的 Petri 网建模和仿真. 电力系统自动化,2001,25(6):4-8.
LÜ Shuqiang, QIN Shiyin, SONH Yonghua. Modeling and simulation of emergency frequency control for hybrid power system based on differential Petri nets. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(6): 4-8.
- [15] 胡伟,梅生伟,卢强,等. 东北电网混成自动电压控制的研究. 电力系统自动化,2004,28(1):69-73.
HU Wei, MEI Shengwei, LU Qiang, et al. Research on hybrid automatic voltage control of Northeast China power grid. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 69-73.
- [16] 张王俊,秦杰,唐跃中,等. 面向 21 世纪的上海电网新一代能量管理系统. 上海电力,2006,19(2):166-170.
ZHANG Wangjun, QIN Jie, TANG Yuezhong, et al. The next generation energy management system of Shanghai Grid in 21st century. Shanghai Electric Power, 2006, 19(2): 166-170.
- [17] 谢开,刘军,宁文元,等. 华北电网一体化调度计划和实时发电控制系统的设计与实现. 电网技术,2005,29(18):6-11.
XIE Kai, LIU Jun, NING Wenyan, et al. Design and realization of integrated scheduling and dispatching system for North China power grid. Power Systems Technology, 2005, 29(18): 6-11.
- [18] 陶文伟,吴文传,王俏文,等. 基于 EMS 的电网规划分析系统的设计与实现. 电力系统自动化,2006,30(14):87-91.
TAO Wenwei, WU Wenchuan, WANG Qiaowen, et al. Design and implementation of transmission network planning analysis systems based on EMS. Automation of Electric Power

- Systems, 2006, 30(14): 87-91.
- [19] 张伯明, 吴素农, 蔡斌, 等. 电网控制中心安全预警和决策支持系统设计. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 1-5.
ZHANG Boming, WU Sunong, CAI Bin, et al. Design of an early warning and security countermeasure system for electric power control centers. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 1-5.
- [20] 吴文传, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于 IEC 61970 标准的 EMS/DTS 一体化系统的设计与开发. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 53-57.
WU Wenchuan, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Design of integrated EMS/DTS system based on IEC 61970. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 53-57.
- [21] 姚建国, 高宗和, 杨志宏, 等. EMS 应用软件支撑环境设计与功能整合. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 49-53.
YAO Jianguo, GAO Zonghe, YANG Zhihong, et al. Supporting platform design and function integration for EMS application software. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 49-53.
- [22] 张良栋, 赖同庆. 能量管理系统中一种基于 XML 的 Web 应用研究. 广东电力, 2005, 18(5): 30-32.
ZHANG Liangdong, LAI Tongqing. Research of XML-based Web application in energy management system. Guangdong Electric Power, 2005, 18(5): 30-32.
- [23] 姜彬, 叶峰, 冒宇清, 等. 版本管理技术在能量管理系统中的应用. 电力系统自动化, 2005, 29(5): 84-87.
JIANG Bin, YE Feng, MAO Yuqing, et al. Application of version management in energy management system. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(5): 84-87.
- [24] 孟立会, 成海彦, 习新魁. 引进 EMS 应用功能的改造和扩充. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 96-99.
MENG Lihui, CHENG Haiyan, XI Xinkui. Improvement and extension of application functions of introduced EMS. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 96-99.
- [25] 李萍, 曹荣章, 朱为民, 等. 电力市场对能量管理系统软件功能的影响. 电力系统自动化, 2002, 26(11): 58-61.
LI Ping, CAO Rongzhang, ZHU Weimin, et al. The effects of power markets on energy management system. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(11): 58-61.
- [26] 曾克娥, 谢庆国, 沈轶, 等. 基于构件技术的能量管理系统设计思想. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 35-37.
ZENG Ke'e, XIE Qingguo, SHEN Yi, et al. Design ideology of component technology-based energy management system. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9): 35-37.
- [27] THOMAS E. Service-oriented architecture: a field guide to integrating XML and Web services. Englewood Cliffs, NJ, USA: Princeton Hall, 2004.

阮前途(1965—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统稳定控制与运行管理. E-mail: ruanqt@smepc.com

何光宇(1972—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统经济运行及优化理论在电力系统中的应用。

柳明(1970—), 男, 在博士后工作站从事研究工作, 研究方向为电力系统建模和电力系统架构。

Advanced EMS and Its Application to Shanghai Power Grid

RUAN Qiantu^{1,2}, HE Guangyu¹, LIU Ming¹, MEI Shengwei¹, LU Qiang¹

(1. State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Shanghai Power Grid Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: A hybrid control approach aimed at realizing multi-objective approximation of optimization for the control and dispatch of power systems is presented. The essence of the approach is to have the unsatisfactory states defined as events and the problems of optimization approximation are converted to problems of handling and elimination of events. By adopting the layered control mode, the concept of the control command (issued from the supreme decision-making and commanding layer) and operating instructions (issued from the intermediate operation layer) is proposed and a complete event handling framework is developed so as to attain the goal of eliminating events. The framework of composition of the advanced EMS (AEMS) is also described, with the functions and operation mechanisms of all the component parts in the framework specified. In view of the design, implementation and operation of the AEMS, the basic features they must possess are pointed out while the relationship of tolerance between AEMS and EMS is dealt with. The AEMS of Shanghai Power Grid based mainly on the hybrid control theory and method proposed is explained as a typical case.

This work is jointly supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217903), National Natural Science Foundation of China (No. 50595411, 50377018) and the Key Technology Project of State Grid Corporation of China.

Key words: hybrid control system; multi-objective optimization; advanced EMS; event driven; intelligent globe control; component-based design; visualization of operating states