

安全约束机组组合理论与应用的发展和展望

夏清, 钟海旺, 康重庆

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

Review and Prospects of the Security Constrained Unit Commitment Theory and Applications

XIA Qing, ZHONG Haiwang, KANG Chongqing

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Security constrained unit commitment (SCUC), as the key procedure of generation scheduling, has been widely used in electricity markets abroad. With the promotion of lean management in power dispatch and the implementation of energy conservation based power generation dispatch, the system operator has an increasingly demanding requirement on the secure and economic operations. Therefore, the research and applications of SCUC have been paid more and more attention. This paper summarized the patterns, mathematical models and major algorithms of SCUC. Based on the survey of the state-of-the-art of SCUC research and industrial applications in China and abroad, the potential research topics were proposed. Hopefully, this paper could be an important reference for the theoretical study and industrial applications of generation scheduling in China.

KEY WORDS: security constrained unit commitment (SCUC); generation scheduling; mixed integer programming (MIP); transmission losses; renewable energy integration; demand response; tight formulation; intelligent algorithm

摘要: 安全约束机组组合作为编制发电计划的核心环节, 在国外电力市场中已经得到广泛的应用。随着中国电网全面推进精益化的调度管理和节能发电调度的实施, 电网运行部门对安全经济运行的要求日益提高, 安全约束机组组合的研究和应用也越来越受到重视。总结了安全约束机组组合的模式、数学模型和主要求解方法; 在综述国内外最新研究动态和工业应用现状的基础上, 展望了未来有待进一步研究的内容。希望本文的工作能够为推动中国发电计划领域的研究和应用提供重要参考。

关键词: 安全约束机组组合; 发电计划; 混合整数规划; 网

络损耗; 新能源并网; 负荷互动; 紧凑型建模; 智能算法

0 引言

长期以来, 实现安全和经济运行是电力系统的主要目标^[1]。机组组合(unit commitment, UC)作为编制发电计划的核心环节, 能够在电力系统短期运行中实现对发电资源的结构性优化, 为调度预留充足的优化空间, 以应对未来负荷的不确定性和新能源发电的波动性, 满足系统的调峰和备用需求, 为电力系统经济调度及安全校核提供基础^[2]; 同时, 能够提升高能效大机组的运行效率, 尽可能使机组运行在最佳工作点, 提升系统的经济性和节能性。

从考虑安全性的角度, 机组组合的研究可划分为3个阶段: 第一阶段, 是不考虑网络安全约束的机组组合, 称为传统机组组合(UC); 第二阶段, 是考虑网络安全约束的机组组合(security constrained unit commitment, SCUC); 第三阶段, 是全面考虑暂态稳定性、电压稳定性等安全约束的机组组合。

在浩如烟海的机组组合研究文献中, 已有不少文献做了较为详尽的综述^[3-9]。本文结合近年来国内外的最新研究动态, 侧重综述SCUC的研究和应用。在国外SCUC的文献中, “安全”通常是指同时包含基态和预想故障下的网络约束^[8], 而在国内, “安全”通常只包含基态的网络约束^[10-11]。

随着中国全面推进精益化的调度管理和节能发电调度的实施, 电网运行部门对编制发电计划提出了更高的要求, SCUC因此成为中国发电计划领域的新一轮研究和应用热点。

本文首先总结了SCUC的模式、数学模型和主要求解方法, 在此基础上综述了国内外SCUC的应用现状, 最后展望了未来SCUC有待进一步研究的

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863计划)(2010AA05A118)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2011AA05A118).

内容。

1 SCUC 的模式

根据电力系统调度模式的不同, SCUC 可分为不同的模式。

在电力市场模式下, SCUC 主要应用于日前市场, 当系统中含有较多快速启动的燃气机组时, 例如美国德州 ERCOT 燃气装机占到了 59%^[12], 日前 SCUC 结果的可执行性较强; 在我国传统的“三公”调度模式下, 月度合同电量完成率要求在月内优化机组启停^[13]; 随着节能发电调度的不断推进, 未来我国的装机将以燃煤火电大机组为主, 由于机组启动过程步骤多、时间长, 且具有下降型煤耗特性曲线^[14], 因此日内启停的操作性、经济性和节能性不佳, 需要在周、旬等时间跨度上优化机组启停, 通过有序调停^[15], 尽可能使在线机组运行在最佳工作点。目前, 多级协调的日前、周、月度大范围节能优化调度技术的研究工作正在有序开展^[16]。

2 SCUC 的数学模型

2.1 优化目标

机组组合研究可追溯到 20 世纪 40 年代^[17]。1962 年, Garver 首次完整地提出考虑开停机费用的混合整数规划 UC 模型^[18]。限于技术原因, 早期的 UC 模型并未同时考虑网络约束。直到 20 世纪 80 到 90 年代, 有学者提出在机组组合模型中考虑网络约束^[19-20], 开启了 SCUC 的研究。SCUC 在数学上是一个大规模混合整数规划(mixed integer programming, MIP)问题^[21], 科学、高效、精细的建模始终是 SCUC 研究和应用的关注焦点。

SCUC 的优化目标通常是系统成本最小, 包括发电机组的启动成本、关停成本和运行成本等。在电力市场中, SCUC 的优化目标是社会福利最大(负荷需求弹性情况下)或购电成本最小(负荷需求刚性情况下)。近年来, 资源、环境和气候变化为电力系统调度带来了新的挑战, 在节能发电调度模式下, SCUC 的优化目标是系统能耗最低或污染物排放最少; 在低碳电力调度模式下, SCUC 的优化目标是最大限度地减少 CO₂ 排放^[22]。此外, SCUC 模型可同时考虑多个优化目标^[23]。

需要指出的是, SCUC 的目标函数通常含有凸非线性, 如发电机组的成本曲线、市场成员的报价曲线等, 通常采用分段线性化的方法, 将混合整数非线性规划问题转化为混合整数线性规划问题^[24]。

根据机组已关停时间的长短, 可分为冷、温、热启动等三种方式^[24], 分别对应不同的启动成本。

2.2 约束条件

2.2.1 发电机组自身约束

发电机组自身约束是指仅涉及单台机组的约束, 主要包括: 有功出力上下限约束, 爬坡速率约束, 最小持续开机/停机时间约束^[24], 限制运行区约束^[25], 调度周期内燃料约束、电量约束、启停次数约束, 启停过程出力曲线约束^[26]等。

随着调度精益化水平的提升, SCUC 的模型朝着精细化的方向发展。如考虑与负荷率相关的动态爬坡约束^[27-28], 水机组的振动区约束等。而随着工业园区热电联产机组的增多, 特别是燃气蒸汽联合循环机组, 要求考虑其多模式运行特性及各模式间的转移约束^[29-31]。这些特殊运行要求大大增加了 SCUC 模型的复杂度。

此外, 生产实际中还面临一些非解析约束, 如机组出力阶梯化约束。文献[32]将机组出力限定为整值, 但这种处理方式不够灵活, 且容易造成其他约束条件的破坏。因此, 如何在 SCUC 模型中科学表达非解析约束仍有待进一步研究。

2.2.2 机组群约束

机组群约束是指同时涉及若干台发电机组的约束, 主要包括: 机组群出力约束, 调度周期内机组群电量约束以及其他由于电网安全稳定原因而需考虑的机组群约束等。

2.2.3 系统性约束

系统性约束是指涉及系统内所有发电机组的约束, 主要包括: 系统有功负荷平衡、备用约束(主要指旋转备用约束)以及排放约束等。

2.2.4 网络约束

网络约束是区别 SCUC 与传统 UC 的关键约束, 主要包括: 基态及预想故障情况下的线路、变压器及输电断面潮流约束^[8]等。

3 SCUC 的求解方法

3.1 启发式方法

国内外学者针对 SCUC 的求解方法展开了广泛而深入的研究, 提出了包括优先顺序法^[33]、动态规划法^[34]、拉格朗日松弛法(LR 法)^[35]、分支定界法^[36]、Benders 分解法^[37]及智能优化算法等多种方法。当前, 求解 SCUC 的主流算法是拉格朗日松弛法和混合整数规划法^[38]。

优先顺序法是典型的启发式方法^[1], 其优点是

计算量小,简单易操作,在电力系统发展早期得到广泛应用。其缺点是难以考虑网络安全约束等复杂约束条件,因此在SCUC中的应用受到限制。

3.2 拉格朗日松弛法(LR法)

拉格朗日松弛法的基本原理是引入拉格朗日乘子,将耦合约束条件放在目标函数中,利用原问题的对偶问题将SCUC问题分解为一个主问题和一系列单机子问题,规模较小的单机子问题可采用动态规划等方法求解。拉格朗日乘子在主问题中求解,然后将其传到单机子问题中;子问题根据拉格朗日乘子分别优化单台机组的启停状态,然后返回主问题中更新拉格朗日乘子。如此迭代,直至收敛。

LR法的计算复杂度与机组数和时段数的乘积呈线性关系,在求解大规模问题时有一定优势。20世纪80到90年代,LR法被广泛应用于机组组合的研究和应用^[4,17]。

随着电网规模的扩大和SCUC模型复杂度的增加,LR法面临越来越多问题。1)由于SCUC问题的非凸性,LR法的求解存在对偶间隙^[39],无法证明其找到的是最优解;2)添加约束的灵活度不高,即便增加一个简单的约束(如机组爬坡约束)也需要投入大量的算法研发工作^[40];3)大量的拉格朗日乘子在迭代过程中可能出现此起彼伏的剧烈振荡,算法不易收敛^[41-42]。

尽管如此,由于拉格朗日乘子经济学意义明确,寻优过程贴切地反映了市场成员的竞价行为,该方法在模拟电力市场运行方面仍有一定应用。

3.3 混合整数规划法(MIP)

混合整数规划通常采用分支定界法(branch-and-bound, B&B),隐式枚举所有可能的组合方案,从理论上能够求得问题的最优解。随着运筹学理论的发展,割平面法(cutting planes)应运而生,其核心思想是在寻优过程中动态添加割平面约束,裁剪可行域中不包含整数可行解的区域,让凸包(convex hull)尽可能暴露在可行域的边界,加速寻优过程。分支定界法与割平面法的结合,形成了分支-割平面法(branch-and-cut, B&C),极大地提升了MIP的求解效率。

与LR法相比,MIP有如下几个优势^[43]:1)理论上能够求得全局最优解;2)易于度量当前可行解与理论最优解之间的偏差;3)建模更加灵活和准确;4)更容易考虑网络安全约束。

在过去半个多世纪以来,伴随着运筹学理论的发展,商业数学优化软件取得了显著进步。以

CPLEX为例,从1991年的1.2版本(第一个能够求解MIP的版本),到2007年的11.0版本,其MIP的求解效率提升了65倍以上^[44],这为CPLEX应用于大规模实际系统奠定了基础。排除计算机硬件升级的影响,MIP效率的快速提升主要归功于两个因素。其一,是线性规划的求解速度大大提高,从1990年的1.0版本到2004年的8.0版本,线性规划的求解速度提升了100万倍以上;其二,是割平面法尤其是Gomory混合整数割的提出和应用,极大地提升了MIP的求解效率^[44]。

混合整数规划法在机组组合中的研究始于20世纪60年代^[18],但限于计算速度等原因,在实际电网中鲜有应用。进入21世纪以来,随着数学优化软件的发展,基于MIP的SCUC逐渐成为国内外研究和应用的新热点^[45-46]。

3.4 Benders分解法

Benders分解法是求解大规模混合整数规划问题的一种分解协调方法。

据实际运行经验,SCUC模型中大部分网络约束为非起作用约束,利用Benders分解法,可以将SCUC模型分解为一个主问题和若干个子问题^[37]。主问题考虑少数的约束条件,优化机组启停;子问题在机组启停状态确定的情况下,检验其他约束条件是否满足,如果存在不可行情况,则向主问题返回一条Benders割(Benders cut),如此迭代直至子问题的可行性全部得到满足。

Benders分解法在求解复杂优化问题时,巧妙地发现起作用约束条件,逐步缩小问题的搜索空间,该方法已成功应用于大规模SCUC的求解^[21]。

3.5 智能优化算法

智能优化算法主要包括:遗传算法^[47],模拟退火算法^[48],禁忌搜索算法^[49],粒子群优化算法^[50]等。该类算法与传统数学优化算法相比,其优势在于能够灵活处理各种复杂非线性、非解析约束,提供高质量的解^[51]。

然而,智能优化算法本质上属于随机优化,其核心思想是模拟生物界的进化过程或大自然中的某种物理现象。然而生物界的进化过程本身是异常缓慢的,一般在面对复杂非线性、非解析的优化问题时考虑采用此类方法。与传统数学优化算法相比,智能优化算法有几个弊端:1)无法保证求得全局最优解;2)随着模型维数的增加,计算量显著增大,在求解大规模实际系统时,所需计算时间长^[5];3)解的稳定性不足,即给定同样的输入数据

和边界条件，在同样的计算环境中先后执行两次得到的解可能不同，这将影响电力调度和电力市场的公平性，不利于优化结果的解释^[52]。

4 国内外 SCUC 应用现状

4.1 国外应用现状

从 1998 年英国电力市场在全世界首次投入使用 SCUC 软件以来^[53]，SCUC 在国外电力市场中得到了广泛应用。到目前为止，美国几乎所有独立系统调度机构或区域输电组织(ISO/RTO)都已采用 SCUC 支撑日前市场的运行和可靠性分析^[54]。当前，Areva T&D 和 ABB 研发的 SCUC 软件^[4,39]应用较为广泛。

Areva T&D 的 SCUC 软件核心计算模块采用混合整数规划法^[39]。2004 年 8 月，该软件成功应用于 PJM 电力市场，为用户节省了大量的成本^[55]。目前，美国中西部 Midwest ISO 已采用 SCUC 联合优化日前电能市场和辅助服务市场^[46]。

ABB 的 SCUC 软件能够同时提供基于 LR 法和混合整数规划法的计算模块，该软件目前已应用于美国加州 ISO、纽约 ISO 以及德州 ERCOT。美国纽约 ISO 于 2003 年开始投入使用 ABB 研发的 SCUC 软件，其核心模块基于 LR 法，而目前，纽约 ISO 正考虑向基于 MIP 的模块切换^[56]。

表 1 总结了美国部分 ISO/RTO 中 SCUC 的计算规模。

表 1 美国部分 ISO/RTO 中 SCUC 的计算规模
Tab. 1 Scale of the SCUC models in ISO/RTOs of the United States

ISO/RTO	发电机	基态线路约束	预想故障	节点
PJM ^[57]	~1 200	~6 000	~10 000	~8 700
CAISO ^[57]	~1 000	~7 000	不详	~4 000
ERCOT ^[13]	~550	不详	~2 000	~5 000
Midwest ISO ^[46]	~1 500	不详	不详	~2 000

当然，国外电力市场中 SCUC 的应用也并非完善。2010 年 6 月，美国联邦能源管制委员会(FERC)在华盛顿召开会议，讨论机组组合模型和应用软件的问题。在美国德州 ERCOT 日前市场运行中，就曾遇到 SCUC 软件运行 12 h 得不到可行解的情况；同时，用户对模型的要求越来越精细^[28]。这些均表明，如何进一步提升 SCUC 算法的计算效率和鲁棒性，仍是值得研究的课题。

4.2 国内应用现状

2003 年，华东电网调度中心开始引进 ABB 的

软件^[58]，有力支撑了华东电力市场试点工作的开展。华北电网调度中心也同期引进了 Areva T&D 的 SCUC 软件^[52]，该软件能够考虑动态断面极限和动态机组群约束^[59]，有效提升了电网安全经济运行水平。

近年来，随着节能发电调度的实施，电网运行部门对编制发电计划提出了更高的要求，促进了国内 SCUC 的研究和应用工作。

2007 年，国家电网公司牵头组织中国电科院、国网电科院和清华大学开展 SCUC 的技术攻关和软件系统研发工作。三家科研单位采用统一的数据接口，背靠背完成了 SCUC 的建模与核心算法开发，在编制标准测试案例的基础上对优化结果进行比对。目前，该项目研究成果已在我国江苏、福建、山东等电力调度中心投入实用^[60-63]。

结合我国国情，国内的 SCUC 软件能够支持多调度模式运行，既能很好地适应“三公”调度模式，又统一考虑了节能发电调度、成本优化调度和电力市场等模式，具有良好的可扩展性和适应性。目前，我国已基本掌握了 SCUC 的核心建模技术，实现了多目标、多时段、多约束日前发电计划的工程化应用，为开展节能发电调度和实现智能电网调度提供了坚强的技术支撑。

表 2 总结了目前国内 SCUC 软件的应用情况，计算效率完全可以满足编制日前发电计划的要求。

表 2 国内 SCUC 软件的计算效率
Tab. 2 Performance of the SCUC applications in China

省份	发电机	时段	断面数	计算时间/min
江苏 ^[60]	161	96	48	~3
福建 ^[62]	194	96	81	4~6

5 SCUC 有待进一步研究的内容

5.1 内嵌式、精细考虑网络损耗影响

得益于运筹学理论的发展和商业数学优化软件的进步，SCUC 的研究和应用已取得重大进展。然而，随着电力系统规模的进一步扩大，以及电网调度运行精益化要求的日益提升，SCUC 仍面临一些问题，有待深入研究。

SCUC 通常采用直流潮流模型，难以动态考虑网络损耗的影响。当前，我国已形成超大规模互联电网，大容量远距离输电已成为能源供应的重要手段。在如此复杂的大电网中实施节能发电调度，如何在统一的发电计划优化模型中内嵌式、精细考虑网络损耗，构建公平高效的发电调度模式，是迫切

需要解决的问题。

在过去的几十年, B 系数法在工业界得到了广泛应用^[64]。B 系数矩阵基于电网典型运行方式计算得到, 其缺点是当系统负荷水平或网络拓扑发生变化时, B 系数矩阵都需要更新^[65]。为了精细考虑网损, 文献[66]采用交流模型编制发电计划。然而, 由于系统无功、节点电压等数据在日前难以准确估计^[8], 常常使基于交流模型的方法面临潮流不收敛的问题。为了解决实用性和优化精度之间的矛盾, 部分学者提出基于直流潮流同时内嵌网损的发电计划优化模型^[67]。文献[68]提出一种基于网损因子迭代的 SCUC 算法, 但该算法在迭代中容易出现网损因子的振荡, 收敛性无法保证。

现有的考虑网损的发电计划优化模型和算法, 主要采用非线性规划或者分段线性化的思路, 算法流程较为复杂, 求解效率、计算精度、鲁棒性等仍然难以满足工业应用的要求。

5.2 全时段、闭环考虑暂态安全约束

考虑暂态安全约束的最优潮流已经有大量研究^[69-71], 但大多局限于单时段的最优潮流模型, 或采用分解协调的方法在子问题中逐时段执行暂态安全校核, 全时段、闭环考虑暂态安全约束的发电计划研究鲜有报道。由于日前发电计划主要是优化发电机有功分配, 而电力系统的暂态稳定与全网的有功分布密切相关, 如何能未雨绸缪地在日前 SCUC 中精细考虑电网暂态稳定约束是亟待解决的问题。

文献[72]利用暂态能量函数的定量化暂态安全评估理论, 建立了全时段发电计划暂态安全预控模型, 能够保证日前发电计划的运行点具备充足的暂态安全裕度。文献[72]做了有益的探索, 但这一问题有待进一步的研究。

5.3 紧凑式、高效建立 MIP 数学模型

尽管混合整数规划求解技术已日臻成熟, SCUC 建模环节的重要性却仍然不容忽视。研究表明, MIP 求解效率低下的原因通常是建模质量不高, 如设置没有必要的无边界限制变量, 模型中包含异常大或者异常小的系数、设置没有必要的大 M 值等^[44]。

近年来, 国外已有学者开始关注 SCUC 的建模质量问题, 如模型的紧凑性问题^[73-74]。例如, 对二次成本曲线的分段线性化一般采取等分策略, 包括从二次曲线上部添加弦和从二次曲线下部添加切线两种方式。文献[73]提出了一种更加紧凑的二次

成本曲线分段线性化方法, 其目标是使分段线性化得到的弦的长度与原二次曲线的弧长度之间的偏差尽可能小。文献[74]从运筹学的角度, 深入比较了不同的 SCUC 建模方式对混合整数规划求解效率的影响。

从数学建模的角度, 如何改善 SCUC 模型的结构, 增强约束条件的有效性, 在不损失最优性的前提下尽可能收缩 MIP 的有效搜索空间, 从而提升求解效率, 这些问题仍待进一步的研究。

5.4 全方位、深度包容新能源发电上网

随着风电等新能源的大规模发电上网, 电网的安全稳定运行面临更大的挑战^[75]。

SCUC 应能全方位包容风电等新能源的波动性和间歇性。目前, 国内外学者针对考虑风电波动性和间歇性的机组组合问题开展了大量研究, 提出了基于场景分析^[75]、基于机会约束规划^[76]和基于区间数优化^[77]等的随机机组组合模型和方法。基于场景分析的方法, 其最优解对场景数不敏感, 但计算量随场景数增加而显著增加; 基于区间数优化的方法, 其计算量不大, 能够自动生成系统运行成本的上下限及机组出力的上下限, 但最优解对不确定性的区间较为敏感^[78]。

在电力系统调度运行中, 概率性指标往往令运行人员无所适从, 概率性方法在生产实际中难以为运行人员所接受。因此, 探索一种兼顾风电等新能源的不确定性、调度运行的确定性及可操作性的 SCUC 模型和方法, 仍需开展深入的研究工作。

5.5 一体化、综合考虑用户负荷互动

负荷互动是智能电网的重要元素^[79], 随着智能电表的普及和高级量测体系(advanced metering infrastructure, AMI)的建设, 用户负荷互动将为电网运行带来显著的效益。据估算, 在美国, 削减 4%~7% 的峰荷以及 5%~8% 的移峰, 每年可为电网运行节省 150 亿\$ 的费用^[80]。

通过负荷的有序互动, 如电动汽车与电网的双向互动等^[81], 可以为电力系统提供旋转备用^[82]; 利用负荷的时段耦合特性, 可以实现高峰时段负荷的削减及转移^[83], 从而降低电网峰荷水平, 减少系统备用需求, 避免机组启停调峰; 还可通过用电激励、可中断负荷、电价响应等用电调度方式, 实现发用电一体化调度^[84]。此外, 在调度中引入需求响应可以提高系统消纳风电的能力^[85], 在现有装机容量水平下, 提升发电运行效率, 大幅提高电网资产利用率, 还可降低网损, 实现发、输、配、用各环节的

综合节能。

如何通过一体化综合考虑用户负荷互动的 SCUC, 支撑发电、用电一体化调度, 以消纳更多的新能源发电, 有待进一步的研究。

5.6 基于人类智能思维方式的寻优策略

在面对未来“三华”电网大规模机组组合问题时, 商业数学优化软件也难以在合理的时间内求得满意解。因此, 必须在深刻理解电力系统物理本质的基础上, 引入人类智能思维方式, 突破传统数学方法在寻优过程中的机械式、遍历化, 从而达到智能加速、事半功倍的效果。

例如, 对于实际大电网, 其最大负荷通常达到装机容量的 70% 甚至更高, 这意味着有大量的必开机组, 无需对所有机组进行状态组合^[2]。在初始寻优阶段, 可以通过辨识起作用整数变量, 剔除决策变量中的伪整数变量, 大大缩小起作用的可行域, 避免传统数学方法的遍历寻优。文献[86]针对混合整数规划中整数变量在目标函数中的系数差异显著这类问题, 通过将不起作用的整数变量松弛为连续变量, 建立了松弛混合整数规划模型, 提出了起作用整数集精确辨识方法, 并且从理论上证明了该方法的收敛性和最优性。文献[87]针对大电网机组组合“维数灾”的难题, 通过模拟人类智能思维方式, 提出松弛解、多变量趋整的寻优策略, 形成了快速定界方法, 为高效求解混合整数规划提供了新的思路。

综上, 随着电网规模的不断扩大, 简单地调用商业数学优化软件已经无法满足工业应用的要求。大规模 SCUC 的研究, 必须在算法流程设计上, 深度嵌入人类智能思维方式, 避免寻优过程的盲目性, 从而另辟蹊径地提升大规模 MIP 的求解效率。

6 结论

SCUC 是编制发电计划的核心环节, 无论是在节能发电调度、电力市场、还是低碳电力调度模式下, 其对电力系统运行的安全性和经济性都具有举足轻重的作用。本文总结了 SCUC 的模式、数学模型和主要求解方法, 在对国内外 SCUC 研究和应用综述的基础上, 展望了未来 SCUC 有待进一步研究的内容, 主要包括: 内嵌式、精细考虑网络损耗影响; 全时段、闭环考虑暂态安全约束; 紧凑式、高效建立 MIP 数学模型; 全方位、深度包容新能源发电上网; 一体化、综合考虑用户负荷互动; 基于人类智能思维方式的寻优策略。希望本文的工作能够

为推动我国发电计划领域的研究和应用提供重要参考。

参考文献

- [1] 李文沅. 电力系统安全经济运行: 模型与方法[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1988: 1-7.
Li Wenyuan. Secure and economic operations of power systems: models and methods[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1988: 1-7(in Chinese).
- [2] 汪洋, 夏清, 康重庆. 机组组合算法中起作用整数变量的辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 46-52.
Wang Yang, Xia Qing, Kang Chongqing. Identification of the active integer variables in security constrained unit commitment[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 46-52(in Chinese).
- [3] Gerald B S, George N F. Unit commitment literature synopsis[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1994, 9(1): 128-135.
- [4] Cohen A I, Brandwahn V, Chang S. Security constrained unit commitment for open markets[C]//Proceedings of the 21st International Conference on Power Industry Computer Applications. Santa Clara: ABB, 1999: 39-44.
- [5] 陈皓勇, 王锡凡. 机组组合问题的优化方法综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(5): 51-56.
Chen Haoyong, Wang Xifan. A survey of optimization-based methods for unit commitment[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(5): 51-56(in Chinese).
- [6] Padhy N P. Unit commitment problem under deregulated environment-a review[C]//Proceedings of IEEE Power & Energy Society General Meeting. Toronto: IEEE Power & Energy Society, 2003: 1088-1094.
- [7] Padhy N P. Unit commitment: a bibliographical survey [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2004, 19(2): 1196-1205.
- [8] Pinto H, Magnago F, Brignone S, et al. Security constrained unit commitment: network modeling and solution issues[C]//Proceedings of IEEE PSCE Conference. Atlanta: IEEE Power & Energy Society, 2006: 1759-1766.
- [9] 李晓磊, 周京阳, 于尔铿, 等. 电力系统机组组合研究综述[C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会论文集(上册). 北京: 中国农业大学, 2008: 803-807.
Li Xiaolei, Zhou Jingyang, Yu Erkeng. A survey of research on unit commitment in power systems [C]//Proceedings of the 24th Conference on Electric Power System and Its Automation for Universities in China. Beijing: China Agriculture University, 2008: 803-807(in Chinese).
- [10] 汪洋, 夏清, 康重庆. 考虑电网 N-1 闭环安全校核的

- 最优安全发电计划[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 39-45.
- Wang Yang, Xia Qing, Kang Chongqing. Optimal security constrained generation scheduling considering closed-loop $N-1$ security correction[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 39-45(in Chinese).
- [11] 张利, 赵建国, 韩学山. 考虑网络安全约束的机组组合新算法[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 50-55.
- Zhang Li, Zhao Jianguo, Han Xueshan. A new unit commitment algorithm considering network security constraint[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 50-55(in Chinese).
- [12] The Electric Reliability Council of Texas. 2009 ERCOT annual report[R]. Austin, TX: The Electric Reliability Council of Texas, 2010.
- [13] 夏清, 陈雨果, 陈亮. 考虑月度机组组合的节能发电调度模式与方法[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 27-33.
- Xia Qing, Chen Yuguo, Chen Liang. Establishment of mode and method for energy-conservation monthly unit commitment considering dispatching[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 27-33(in Chinese).
- [14] 刘福国, 蒋学霞, 李志. 燃煤发电机组负荷率影响供电煤耗的研究[J]. 电站系统工程, 2008, 24(4): 47-49.
- Liu Fuguo, Jiang Xuexia, Li Zhi. Investigation on effects of generator load on coal consumption rate in fossil power plant[J]. Power System Engineering, 2008, 24(4): 47-49(in Chinese).
- [15] 滕晓毕, 李继红, 吴臻, 等. 有序调停燃煤机组的节能调度模式及效益分析[J]. 中国电力, 2010, 43(9): 19-23.
- Teng Xiaobi, Li Jihong, Wu Zhen, et al. New model of energy-conservation based on thermal unit cyclic operation and its benefit analysis[J]. Electric Power, 2010, 43(9): 19-23(in Chinese).
- [16] 中华人民共和国科学技术部. 大电网运行状态感知、风险评估、故障诊断与调度技术. 国家高技术研究发展计划(863计划)课题任务书, 课题编号: 2010AA05A118[R]. 北京: 国家电网公司, 2011.
- The Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. The awareness of operating conditions, risk evaluation, fault diagnosis and dispatch technology of large-scale power systems. Proposal of the national high-tech research and development program (863 Scheme, No.2011AA05A118)[R]. Beijing: State Grid Corporation, 2011.
- [17] Li C, Johnson R B, Svoboda A J. A new unit commitment method[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1997, 12(1): 113-119.
- [18] Garver L L. Power generation scheduling by integer programming-development of theory[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Power Apparatus and Systems, Part III, 1962, 81(3): 730-734.
- [19] Piekutowski M, Rose I A. A linear programming method for unit commitment incorporating generator configurations, reserve and flow constraints[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1985(104): 3510-3516.
- [20] Ruzic S, Rajakovic N. A new approach for solving extended unit commitment problem[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1991, 6(1): 269-277.
- [21] Fu Y, Shahidehpour S M. Fast SCUC for large-scale power systems[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22(4): 2144-2151.
- [22] 康重庆, 陈启鑫, 夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 1-7.
- Kang Chongqing, Chen Qixin, Xia Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1-7 (in Chinese).
- [23] 张晓花, 赵晋泉, 陈星莺. 节能减排多目标机组组合问题的模糊建模及优化[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 71-76.
- Zhang Xiaohua, Zhao Jinquan, Chen Xingying. Multi-objective unit commitment fuzzy modeling and optimization for energy-saving and emission reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 71-76(in Chinese).
- [24] Carrión M, Arroyo J M. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2006, 21(3): 1371-1378.
- [25] Daneshi H, Choobari A L, Shahidehpour S M, et al. Mixed integer programming method to solve security constrained unit commitment with restricted operating zone limits [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Electro/Information Technology. Ames: IEEE Power & Energy Society, 2008: 187-192.
- [26] Arroyo J M, Conejo A J. Modeling of start-up and shut-down power trajectories of thermal units[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2004, 19(3): 1562-1568.
- [27] Li T, Shahidehpour S M. Dynamic ramping in unit commitment[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22(3): 1379-1381.
- [28] Cohen A I, Yu C. Unit commitment in energy markets: recent experience and future directions[C]//FERC Technical Conference on Unit Commitment Software. Washington DC: FERC, 2010: 1-18.
- [29] Cohen A I, Ostrowski G. Scheduling units with multiple operating modes in unit commitment[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1996, 11(1): 497-503.
- [30] 丁晓莺, 刘林, 王锡凡, 等. 考虑灵活运行机组的随机机组组合模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 23-27.

- Ding Xiaoying, Liu Lin, Wang Xifan, et al. Stochastic unit commitment method with flexible generating units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 23-27(in Chinese).
- [31] 徐帆, 姚建国, 耿建, 等. 考虑联合循环机组的机组组合模型及求解[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 39-43, 60.
- Xu Fan, Yao Jianguo, Geng Jian, et al. Unit commitment problem with combined cycle gas turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 39-43, 60(in Chinese).
- [32] 沈伟, 吴文传, 张伯明, 等. 消纳大规模风电的在线滚动调度策略与模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 136-140.
- Shen Wei, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. An on-line rolling generation dispatch method and model for accommodating large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 136-140(in Chinese).
- [33] Lee F N. Short-term unit commitment: a new method [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1988, 4(3): 421-428.
- [34] 白晓民, 于尔铿. 用动态规划法进行电力系统机组组合最优化[J]. 中国电机工程学报, 1984, 4(1): 11-19.
- Bai Xiaomin, Yu Erkeng. Optimization for unit commitment of electric power system by dynamic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 1984, 4(1): 11-19(in Chinese).
- [35] Zhai Q, Guan X, Cui J. Unit commitment with identical units successive subproblem solving method based on Lagrangian relaxation[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 17(4): 1250-1257.
- [36] Cohen A I, Yoshimura M. A branch-and-bound algorithm for unit commitment[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1983(102): 444-451.
- [37] Shahidehpour S M, Yamin H, Li Z. Market operations in electric power systems[M]. New York: Wiley, 2002: 276-310.
- [38] Guan X, Zhai Q, Papalexopoulos A. Optimization based methods for unit commitment: Lagrangian relaxation versus general mixed integer programming[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Toronto: IEEE Power & Energy Society, 2003: 1095-1100.
- [39] Sun D, Ma X, Cheung K W. The application of optimization technology for electricity market operation [C]//Proceedings of IEEE/PES Transmission Distribution Conference/Exhibition: Asia-Pacific. Dalian, China: IEEE Power & Energy Society, 2005: 1-6.
- [40] Fan W, Guan X, Zhai Q. A new method for unit commitment with ramping constraints[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 63(3): 215-224.
- [41] 夏清, 康重庆, 沈瑜. 考虑电网安全约束条件的机组组合新方法[J]. 清华大学学报, 1999, 39(9): 14-17.
- Xia Qing, Kang Chongqing, Shen Yu. Novel approach to unit commitment with security constraint[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 1999, 39(9): 14-17(in Chinese).
- [42] Streiffert D. Multi area economic dispatch with tie line constraints[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1995, 10(4): 1946-1951.
- [43] Li T, Shahidehpour S M. Price-based unit commitment: a case of Lagrangian relaxation versus mixed integer programming[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(4): 2015-2025.
- [44] Junger M, Liebling T M, Naddef D, et al. 50 years of integer programming 1958-2008[M]. Heidelberg: Springer, 2009: 619-645.
- [45] Chang G W, Aganagic M, Waight J G, et al. Experiences with mixed integer linear programming based approaches on shorg-term hydro scheduling[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2001, 16(4): 743-749.
- [46] Ma X, Song H, Hong M. The security-constrained commitment and dispatch for midwest iso day-ahead co-optimized energy and ancillary service market[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary: IEEE Power & Energy Society, 2009: 1-8.
- [47] 孙力勇, 张焰, 蒋传文. 基于矩阵实数编码遗传算法求解大规模机组组合问题[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 82-87.
- Sun Liyong, Zhang Yan, Jiang Chuanwen. A solution to the unit commitment problem based on matrix real-coded genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 82-87(in Chinese).
- [48] Zhuang F, Galiana F D. Unit commitment by simulated annealing[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1990, 5(1): 311-318.
- [49] Bai X, Shahidehpour S M. Hydro-thermal scheduling by tabu search and decomposition method[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1996, 11(2): 968-974.
- [50] 胡家声, 郭创新, 曹一家. 一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 24-28.
- Hu Jiasheng, Guo Chuangxin, Cao Yijia. A hybrid particle swarm optimization method for unit commitment problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 24-28(in Chinese).
- [51] Pappala V S, Erlich I. A new approach for solving the unit commitment problem by adaptive particle swarm optimization[C]//Proceedings of IEEE Power & Energy Society General Meeting. Pittsburgh: IEEE Power & Energy Society, 2008: 1-6.

- [52] 陈之栩, 谢开, 张晶, 等. 电网安全节能发电日前调度优化模型及算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 10-13, 98.
- Chen Zhixu, Xie Kai, Zhang Jing, et al. Optimal model and algorithm for day-ahead generation scheduling of transmission grid security constrained convention dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 10-13, 98(in Chinese).
- [53] ABB. ABB power market experience [EB/OL]. 2006[2013-04-10]. [http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/399c7a2e32b513ccc125727b0050e1e0/\\$file/ABB%20Project%20Experience%20working%20version.ppt](http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/399c7a2e32b513ccc125727b0050e1e0/$file/ABB%20Project%20Experience%20working%20version.ppt)
- [54] Streiffert D, Philbrick R, Ott A. A mixed integer programming solution for market clearing and reliability analysis[C]//Proceedings of IEEE Power & Energy Society General Meeting. San Francisco: IEEE Power & Energy Society, 2005: 1-8.
- [55] PJM news release. PJM's New generation-scheduling software to save customers estimated \$56 million: unit commitment system uses first of its kind technique[EB/OL]. 2004[2013-04-10]. <http://www.thefreelibrary.com/PJM's+New+Generation-Scheduling+Software+to+Save+Customers+Estimated...-a0118537606>.
- [56] Johnson S. NYISO day-ahead market overview[C]//FERC Technical Conference on Unit Commitment Software. Washington DC: FERC, 2010: 1-29.
- [57] Krall E. Optimization in RTO/ISO electricity markets[C]//FERC Technical Conference on Unit Commitment Software. Washington DC: FERC, 2010: 1-39.
- [58] 葛朝强, 汪德星, 葛敏辉, 等. 华东网调日计划安全校核系统及其扩展[J]. 电力系统自动化, 2008, 23(10): 45-48.
- Ge Zhaoqiang, Wang Dexing, Ge Minhui, et al. Security checking system for daily generation scheduling of East China power grid and its expansion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 23(10): 45-48(in Chinese).
- [59] Yao M, Zheng H, Qiu W, et al. Enforcing dynamic limits in generation scheduling at north china grid[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Minneapolis: IEEE Power & Energy Society, 2010: 1-3.
- [60] 杨争林, 唐国庆, 李利利. 松弛约束发电计划优化模型和算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 53-57.
- Yang Zhenglin, Tang Guoqing, Li Lili. Application of relaxed constraints model on generation schedule optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 53-57(in Chinese).
- [61] 耿建, 徐帆, 姚建国, 等. 求解安全约束机组组合问题的混合整数规划算法性能分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 24-27.
- Geng Jian, Xu Fan, Yao Jianguo, et al. Performance analysis of mixed-integer programming based algorithm for security constrained unit commitment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 24-27(in Chinese).
- [62] Cui H, Chen Z, Zhou J, et al. The design and implementation about short-time Generation Scheduling system on the basis of SCUC&SCED[C]//International Conference on Power System Technology (POWERCON). Hangzhou: IEEE Power & Energy Society, 2010: 1-8.
- [63] 汪洋, 夏清, 朱明祥, 等. 最优校正型安全机组组合模型及其求解算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 19-24.
- Wang Yang, Xia Qing, Zhu Mingxiang, et al. Performance analysis of mixed-integer programming based algorithm for security constrained unit commitment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 19-24(in Chinese).
- [64] Meyer W S, Albertson V D. Improved loss formula computation by optimally ordered elimination techniques [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1971, 90(1): 62-69.
- [65] Wollenberg B, Stadlin W. A real time optimizer for security dispatch[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1974, 93(5): 1640-1649.
- [66] Fu Y, Shahidepour S M, Li Z. Security-constrained unit commitment with AC constraints[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(2): 1001-1013.
- [67] Alguacil N, Conejo A J. Multiperiod optimal power flow using Benders decomposition[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(1): 196-201.
- [68] 张舒, 胡泽春, 宋永华, 等. 基于网损因子迭代的安全约束机组组合算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 76-82.
- Zhang Shu, Hu Zechun, Song Yonghua, et al. Security constrained unit commitment algorithm considering network losses based on an iterative loss factor calculation [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 76-82(in Chinese).
- [69] Gan D, Thomas R J, Zimmerman R D. Stability-constrained optimal power flow[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(2): 535-540.
- [70] 韦化, 阳育德, 李啸骥. 多预想故障暂态稳定约束最优潮流[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 91-96.
- Wei Hua, Yang Yude, Li Xiacong. Optimal power flow with multi-contingencies transient stability constrained [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 91-96(in Chinese).
- [71] 孙景强, 房大中, 钟德成. 暂态稳定约束下的最优潮流

- [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 12-17.
Sun Jingqiang, Fang Dazhong, Zhong Decheng. Optimal power flow with transient stability constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 12-17(in Chinese).
- [72] 夏叶. 发用电一体化调度计划的理论与方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
Xia Ye. Research on theories and methods of scheduling with generation and load integration[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012(in Chinese).
- [73] Wu L. A tighter piecewise linear approximation of quadratic cost curves for unit commitment problems [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2011, 26(4): 2581-2583.
- [74] Ostrowski J, Anjos M F, Vannelli A. Tight mixed integer linear programming formulations for the unit commitment problem[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2012, 27(1): 39-46.
- [75] Wang J, Shahidehpour S M, Li Z. Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2008, 23(3): 1319-1327.
- [76] Ozturk U A, Mazumdar M, Norman B A. A solution to the stochastic unit commitment problem using chance constrained programming[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2004, 19(3): 1589-1598.
- [77] Wang Y, Xia Q, Kang C. Unit commitment with volatile node injections by using interval optimization[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2011, 26(3): 1705-1713.
- [78] Wu L, Shahidehpour S M, Li Z. Comparison of scenario-based and interval optimization approaches to stochastic SCUC[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2012, 27(2): 913-921.
- [79] Rahimi F, Ipakchi Ali. Demand response as a market resource under the smart grid paradigm[J]. IEEE Trans. on Smart Grid, 2010, 1(1): 82-88.
- [80] Colledge J A, Hicks J, Robb J B, et al. Power by the minute[EB/OL]. 2002[2013-04-10]. http://www.mckinseyquarterly.com/Marketing/Pricing/Power_by_the_minute_114.
- [81] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.
Hu Zechun, Song Yonghua, Xu Zhiwei, et al. Electric vehicles integration into power systems: impacts and utilization[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10(in Chinese).
- [82] Parvania M, Fotuhi-Firuzabad M. Demand response scheduling by stochastic SCUC[J]. IEEE Trans. on Smart Grid, 2010, 1(1): 89-98.
- [83] Khodaei A, Shahidehpour S M, Bahrarirad S. SCUC with hourly demand response considering intertemporal load characteristics[J]. IEEE Trans. on Smart Grid, 2011, 2(3): 564-571.
- [84] 王卿然, 谢国辉, 张粒子. 含风电系统的发用电一体化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 15-18, 30.
Wang Qingran, Xie Guohui, Zhang Lizi. An integrated generation-consumption dispatch model with wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 15-18, 30(in Chinese).
- [85] 刘晓, 艾欣, 彭谦. 计及需求响应的含风电场电力系统发电与碳排放权联合优化调度[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 213-218.
Liu Xiao, Ai Xin, Peng Qian. Optimal dispatch coordinating power generation with carbon emission permit for wind farms integrated power grid considering demand response[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 213-218(in Chinese).
- [86] 滕晓毕. 多区域多周期机组组合的研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
Teng Xiaobi. Research on multi-area and multi-period unit commitment[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012(in Chinese).
- [87] Wang P, Wang Y, Xia Q. Fast bounding technique for branch-and-cut algorithm based monthly SCUC[C]// Proceedings of IEEE Power & Energy Society General Meeting. San Diego: IEEE Power & Energy Society, 2012: 1-8.



夏清

收稿日期: 2013-01-13。

作者简介:

夏清(1957), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 研究方向为电力经济、电力规划、发电计划、负荷预测等;

钟海旺(1986), 男, 博士研究生, IEEE 学生会员, 研究方向为发电计划、电力市场、需求响应等, zhonghw04@mails.thu.edu.cn;

康重庆(1969), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 研究方向为电力市场、电力规划、负荷预测、低碳电力等。

(责任编辑 刘浩芳)

Review and Prospects of the Security Constrained Unit Commitment Theory and Applications

XIA Qing, ZHONG Haiwang, KANG Chongqing
(Tsinghua University)

KEY WORDS: security constrained unit commitment (SCUC); generation scheduling; mixed integer programming (MIP); transmission losses; renewable energy integration; demand response; tight formulation; intelligent algorithm

Security constrained unit commitment (SCUC), as a key procedure of generation scheduling, realizes the structural optimization of power system operations. It has been widely used in electricity markets abroad. With the implementation of energy conservation based power generation dispatch (ECPGD), the system operator has an increasingly demanding requirement for the secure and economic operations. Therefore, the research and applications of SCUC have attracted more and more attention.

Unlike the existing literature reviews on UC, this paper focuses on the survey of SCUC.

First, the SCUC patterns, mathematical models and major algorithms are reviewed.

There are different generation dispatch patterns, including the electricity market mode, ECPGD, low-carbon dispatch, etc.

The objectives of SCUC differ in different dispatch patterns, such as minimizing the cost, maximizing the social welfare, etc. The constraints fall into the following categories: generators' physical constraints, generator groups' constraints, system-wide constraints and network constraints.

The scientific and efficient modeling is the key of successful implementation of SCUC in the industry.

The algorithms for SCUC are then surveyed. The prevailing algorithms of SCUC are Lagrangian relaxation (LR) and mixed integer programming (MIP). A lot of research efforts focused on the LR method in the 1980s and 1990s. However, with the rapid development of the operation research theory and commercial MIP solvers such as CPLEX, more research efforts have focused on the MIP-based SCUC.

The applications of SCUC both abroad and home are then summarized. The SCUC software was first applied in the UK Electricity Pool in 1998. Nowadays

almost all the ISO/RTOs in the U.S. use the SCUC tool to facilitate the market operations and reliability analysis. The prevailing SCUC software is developed by Areva T&D and ABB.

Tab. 1 summarizes the scale of the SCUC models in ISO/RTOs of the United States.

Tab. 1 Scale of the SCUC models in ISO/RTOs of the United States				
ISO/RTO	Generators	Lines constraints	Contingencies	Node
PJM	~1 200	~6 000	~10 000	~8 700
CAISO	~1 000	~7 000	Unknown	~4 000
ERCOT	~550	Unknown	~2 000	~5 000
Midwest ISO	~1 500	Unknown	Unknown	~2 000

In 2003, the East China Grid Company purchased the SCED software from ABB to support the electricity market pilot. The North China Grid Company also purchased the SCUC software from Areva T&D.

In 2010, the SCUC software developed by native vendors was put into operation in Jiangsu, Fujian and Shandong Power Dispatching Centers respectively as shown in Tab.2. Significant cost savings are achieved.

Tab. 2 Performance of the SCUC applications in China				
Province	Generators	Periods	Interfaces	CPU Time/min
Jiangsu	161	96	109	~10
Fujian	194	96	81	4~6

The potential research topics of SCUC in future are proposed as follows: 1) Precise consideration of transmission losses; 2) Incorporation of transient stability constraints; 3) Tighter and more efficient MIP modeling techniques; 4) Accommodation of more renewable energy; 5) Integrated optimization with interactive demand; 6) Design of more efficient and intelligent algorithms.

Hopefully, this paper would be an important reference for the academic research and industrial applications of generation scheduling in China.