

SCUC/SCED 问题分析

李利利,姚建国,耿建,徐帆
(国电南瑞科技股份有限公司,江苏南京 210061)

摘要:安全约束机组组合(SCUC)与安全约束经济调度(SCED)同时考虑电力系统运行的安全性和经济性,在国外受到广泛关注,基于现代混合整数规划(MIP)算法的 SCUC 近几年得到实际应用和快速发展,文中对 SCUC/SCED 研究的最新进展进行了综述。概述了 SCUC 问题的优化模型和算法的研究状况,分类介绍了基于 MIP 算法的 SCUC 研究进展,并分析和评述了主要方法、原理及其优缺点,进一步提出我国开展 SCUC/SCED 研究亟待解决的问题。

关键词:SCUC;SCED;混合整数规划;智能调度

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2010)03-0024-04

随着电力调度精细化要求的提出,短期发电调度从单纯的安全性过渡到安全性与经济性并重,需要以考虑安全约束的优化调度软件为支持,编制发电计划。在美国区域电力市场,电力调度机构主要采用安全约束机组组合(SCUC)和安全约束经济调度(SCED)两大核心应用软件来完成日前和实时调度,SCUC 和 SCED 几乎完成了所有的电力生产和调度的主要工作^[1]。

日前计划阶段,ISO 运用 SCUC/SCED,在考虑系统约束、机组运行约束和网络安全约束的条件下,优化决策机组的开停方案和出力水平,完成日前计划的编制;实时调度阶段,ISO 在日前计划确定的机组开停状态的基础上,实时跟踪负荷变化,运行实时 SCED,优化调整机组出力水平。

近年来,随着电力行业节能减排的实施与特高压大电网建设和运行的要求,SCUC/SCED 逐渐成为研究的热点。电力系统是一个大规模的非线性复杂系统,SCUC/SCED 是一个高维数、非凸的、离散的、非线性的优化问题,是电力系统优化研究的一个难点。国内外众多机构都对 SCUC/SCED 开展了广泛深入的研究和应用。

1 SCUC 模型和算法概述

1.1 SCUC 问题

SCUC 是根据研究周期内的各时段系统负荷预测优化机组发电计划,包括机组开停方式和发电出力。优化的目标是系统的总成本(包括发电成本、开机成本、停机成本)最小。约束主要分为 3 类:

(1) 系统约束。包括负荷平衡、系统备用;

(2) 机组约束。包括机组出力上下限、最小持续开停时间、爬坡率、旋转备用、最大开停次数等;

(3) 安全约束。包括支路输电极限、断面极限、节点电压等。

SCUC 在实际应用中还可以根据需要添加约束条件,如开停机过程的出力约束、分区备用约束、排放约束、资源约束等。

1.2 SCUC 优化算法

机组组合(UC)能够带来显著的经济效益,人们一直在积极研究,提出各种不同方法来解决这个问题^[2],这些方法可以分为 3 类。

(1) 启发式方法。如优先顺序法、局部寻优法等;

(2) 智能搜索类方法。如遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法等;

(3) 数学优化类方法。如动态规划法、拉格朗日松弛法(LR)、混合整数规划(MIP)等。

启发式方法缺乏严格的理论基础,找不到最优解,但计算速度快,在机组组合研究初期得到应用,另外,启发式方法目前一个重要的应用是为其他算法快速提供初值。智能搜索类方法适应性强,理论上可得到全局最优解,但属于随机优化算法,计算时间长,优化结果受初值及寻优规则的影响,优化过程不透明,限制了其在实际生产中的应用。数学优化类方法有严格的数学模型依据,但动态规划法存在“维数灾”问题,近些年,LR 和 MIP 成为求解 UC 问题的 2 种主要方法^[3],在实际电力系统中得到广泛应用。

LR 有效处理大系统优化问题,是求解实际规模 UC 问题较为成功的算法之一。基于 LR 法的主要思想是将系统类的电力、备用平衡等约束通过相应的对偶变量添加到目标函数中,求解过程严重依赖于初始拉格朗日乘子和乘子的更新方法。LR 算法的优点是随着问题规模的增加,计算时间近似线性增长;

收稿日期:2010-01-17;修回日期:2010-02-25

“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2008BAA13B06);国家电网科技项目(SG0874)。

缺点是求解过程中对乘子的操作较为复杂,同时由于 UC 问题的非凸性,需要采用启发式方法来找到可行解,LR 求得的结果是次优的。

MIP 求解 UC 问题产生于 60 年代,受当时混合整数规划发展水平的限制,MIP 法并没有获得重视;进入 90 年代,随着数学优化算法的发展以及商用求解器计算性能的巨大进步^[4],基于 MIP 的 UC 问题重新进入人们的视野,MIP 成为求解 UC 问题最重要的算法之一。

相比于 LR,MIP 的优点是:全局最优;直接测算解的最优性;更加灵活和精确的建模能力。采用 MIP 算法,开发者可以专注于 SCUC 模型的建立,使模型更贴近于电力系统实际运行情况。基于 MIP 算法的 SCUC/SCED 在美国电力调度领域得到越来越广泛的应用^[5]。美国宾夕法尼亚—新泽西—马里兰电力市场(PJM)已经将其发电计划软件从 LR 法转换为 MIP 法,其他 ISO 也正准备运行基于 MIP 算法的 SCUC/SCED,如表 1 所示。

表 1 美国部分 ISO 采用的 SCUC/SCED 算法概况

ISO	之前算法	MIP 算法运行时间 / 年	年节约成本 / 百万美元
PJM	LR	2004	60
ISONE	LR/LP	2008	无
NYISO	LR/LP	无	无
MISO	LR	2008	无
CAISO	LP	2008	23

1.3 SCUC 电网安全约束的建模和求解

目前,在国内外 SCUC 的研究中,电网安全约束的分析主要有 3 种方式^[6-8]:直流潮流模型;交流潮流模型;基态采用交流模型,故障分析采用直流模型。

直流潮流只考虑有功,存在误差,但它计算速度快,在工程上得到广泛应用。也有学者提出采用交流潮流模型的 SCUC,考虑了线路潮流和节点电压的约束,但计算规模巨大,计算时间长。交流潮流、直流故障分析的混合方式,能够在精度和计算速度之间寻求平衡,满足实际工程的应用需求。

加入网络安全约束使 UC 问题的建模和求解变得更加复杂,求解方法可以分为 2 类。

(1) 直解法:将网络约束表示为线性化约束的形式,全部合并到原始 UC 问题中,联合优化求解,称为直解法(Direct Method)^[9]。

(2) 分解迭代法:采用分解技术,将 SCUC 分解为 UC 和网络安全校核(SFT) 2 个子问题,UC 模型中借鉴直接法,加入重要断面和支路的线性化安全约束,通过与 SFT 迭代求解,直至所有网络越限被消除,获得 SCUC 问题的最优解^[10]。

直解法把网络安全加入到约束中,可获得可靠的结果,缺点是把所有网络约束加入到 UC 中,增大了优化的计算量,不适合求解大规模系统;近年来,随着电力系统规模的不断增长,采用分解技术逐渐成为求解 SCUC 问题的主要方法。

2 基于 MIP 法的 SCUC 进展

随着 MIP 算法技术的发展,以及众多的 ISO 将发电计划软件转换为 MIP 模式,应用 MIP 法求解 SCUC 问题越来越受到人们的关注。主要表现在:基于 MIP 的模型分析和改进、模型扩展、应用扩展几个方面。

2.1 模型分析和改进

求解 MIP 问题的传统技术是基于线性规划(LP)的分支定界法,随着割平面技术引入,产生了结合分支定界法和割平面法的分支割平面技术,能更有效地求解 MIP 问题。基于 MIP 算法原理^[11],通过分析 SCUC 问题模型,改进模型表达形式,增加割平面,使约束尽可能“紧”,同时尽可能减少离散变量的数目,可以加快 MIP 法求解 SCUC 问题的速度。新近研究也多关注于这一方向。

文献[12]建立 UC 模型时,在每个时段为每台机组分配 3 个二元变量,分别表示机组状态、开机标识和关机标识。这种模型出现较早,且应用较为广泛。文献[13]提出了只使用机组状态 1 个二元变量的方法,并通过算例证明模型降低了搜索树的规模,能缓解 MIP 的计算负担。该模型减少了二元变量的数目,但其使用复杂的约束来表示机组的启停,并不能有效改善计算性能。

2.2 模型扩展

近些年,高效环保机组发展迅速,其在电力系统中所占比例越来越大,促使人们在 SCUC 建模时考虑这些元素,完善 SCUC 模型。

2.2.1 联合循环机组

联合循环机组(CCU)具有高效率、低污染、灵活运行、快速启动的特点。基于燃气轮机(CT)和蒸汽轮机(ST)的数目和状态,CCU 有多种运行配置。目前国外文献建模 CCU 主要有简化模型、模式模型、组件模型 3 种方式。

文献[17]将 CCU 各种运行模式能耗曲线合成发电曲线,把 CCU 当成火电机组进行处理。

文献[18]把 CCU 各种运行模式分别建模为伪机组,CCU 的运行通过状态转移表实现模式变换。模式模型对 CCU 的运行特性作了一定的近似,获得次优解,在实际中应用较广。

文献[19]建模 CCU 的每个 CT 和 ST 为独立机组。组件模型能更精确地建模 CCU 机组,获得最优

解,但计算时间较长。

2.2.2 水电机组

水电机组的模型较火电机组更为复杂,还包括与水量相关的约束,如水量平衡约束、水库容量限制、上下游水流量限制等^[20]。基于MIP算法建模的灵活性,将非线性水电转换关系分段线性化,可以方便地形成MIP模型。

2.2.3 风电机组

风电的随机性是发电计划优化的难点。文献[21]在SCUC中考虑了风电出力的间断性与波动性,运用场景来模拟出力的波动,该方法在调度中较好地考虑了风电的特点,但基于蒙特卡洛模拟的场景会增加MIP的计算负担。文献[22]基于模糊集理论运用MILP算法求解UC模糊优化模型。该方法量化风电带来的不确定性,降低风电带来的风险。

2.3 应用扩展

随着SCUC在日前计划和实时运行领域的实际应用,一些专家学者也开始了新的应用领域的研究,如长期SCUC、随机SCUC等。

2.3.1 长期SCUC

长期SCUC的研究周期为几个月至一年,除了包括短期SCUC的主要约束外,还引入了长期的燃料、环保排放、电量等约束。较早出现的是基于启发式的分析法,简单快速,但不能求解更多的约束和大规模系统。近年来出现了分解法,通过LR,将原问题分解为一系列短期SCUC子问题来求解^[23]。分解法可以有效处理长期约束,但会造成求解大量SCUC的计算量问题。长期SCUC中如何处理电网安全约束是一个难点问题,文献[24]提出了一种按峰谷平负荷等效分解校核电网安全的解决方法。

2.3.2 不确定性SCUC

电力系统运行中的不确定性主要分为2类:预测信息的不准确;运行设备的不可靠。解决不确定性SCUC问题的方法主要有3种:(1)备用需求,通过增加火电机组的备用量来增强系统抵抗不确定风险的能力^[25],缺点是不能精确建模系统运行不确定性,且代价太高;(2)随机规划,随机故障如机组和线路的停运,以及负荷预测不准确等,通过蒙特卡洛仿真的场景法,精确建模决策过程中的不确定性^[26],缺陷是计算量大;(3)模糊规划,采用模糊MIP算法,将系统的不确定性建模为模糊约束^[27],求解效率高,有望得到广泛应用。

3 SCED研究概况

自2台发电机并列运行开始,经济调度(ED)问题随之产生,人们探索了多种求解方法^[28],主要分

为2类:经典经济调度;现代经济调度。经典法经历了基本负荷法、最优负荷点法和等微增率法3个阶段,计算速度快是经典法的优势,缺点是无法有效处理安全约束。现代经济调度包括线性规划、非线性规划、动态规划等,便于处理各种约束,国内外学者在这方面作了大量研究。ED仅仅在一个时间断面上对目标函数进行最优化,难以处理机组爬坡速度的限制,出现了考虑多时段耦合约束的动态经济调度(DED)^[29]。在DED的基础上,加入网络安全约束,形成SCED问题。SCED同SCUC的最大区别在于机组开停状态已知,其模型中不包含离散变量。

SCED作为SCUC问题的子集,已包含在SCUC中,对其专门研究的文献较少,新近文献主要是基于工程的实用化改造和应用。文献[30]在SCED中考虑双边合同的影响,优化目标为使实际出力与合同计划的偏移量最小;文献[31]介绍了SCED在加州市场实时调度中的应用,SCED每5min执行一次,优化得到实时计划,并计算出市场清空价。

4 我国开展SCUC/SCED急需解决的问题

SCUC/SCED是电力生产和调度的核心应用软件,在国外经过了深入研究并投入实际使用,取得了显著的效益。我国在这方面的研究和应用刚起步,结合国外的研究和应用成果,我国开展SCUC/SCED研究亟待解决的问题有以下几个方面。

4.1 开发实用及高效的模型和算法

(1)大规模系统MIP算法的性能验证。MIP算法本质上是一种状态组合算法,具有指数级的计算时间复杂度和维数灾难的问题。现代MIP算法上的数学改进和应用技巧均是为了提高MIP算法性能,满足实际应用要求。我国开展SCUC研究首要解决的问题是研究和验证这些现代MIP算法的计算性能和应用技巧,算法性能必须满足实际电力系统规模甚至更大规模系统的要求。

(2)建模技巧的研究。就MIP算法而言,不同的建模方式对求解性能有巨大的影响。为此必须深入研究现代MIP的算法原理,探索MIP建模技巧,形成有效的模型表达形式,使求解性能可以满足工程化应用需求。如基于MIP求解原理,利用有效不等式,来分析各个约束的松紧,进行各种表达形式的组合,以期获得较好的模型。

4.2 “三公”调度的SCUC/SCED

“三公”调度是我国目前的主要调度模式,以各电厂合同发电量同步执行为调度目标。该模式与国外电力市场模式有很大差别,国外没有相应的研究成果可借鉴,为此必须对SCUC/SCED进行深入的研究

和大量的技术创新才能满足“三公”调度模式的要求。

4.3 一体化的协调优化

发电计划领域,我国电力系统主要包括国、网、省三级电网。三级调度之间发电计划、电网安全的协调是实际电力调度的一个重要工作。对一个独立系统而言,SCUC/SCED 为优化发电计划与电网安全提供了一个良好的技术手段,但如何协调电网边界的功率计划和电网安全问题是一个值得深入研究的领域。

5 结束语

SCUC/SCED 是当前国外电力系统应用的先进的调度优化软件,将机组开停、出力分配、电网安全联合优化,在实际调度生产中给出了实用、可信的调度决策,实现了电网调度安全性和经济性一体化优化,在日常调度中发挥重要作用。本文对 SCUC/SCED 问题的研究状况进行了较为全面的综述,并提出了我国开展 SCUC/SCED 急需解决的问题。希望相关研究能够广泛开展起来,为我国智能调度的建设服务。

参考文献:

- [1] RUIZ P A, PHILBRICK C R, ZAK E, et al. Innovative Market Design and Mitigation Methods in the ERCOT Nodal Market [C]. Proceedings of IEEE PES 2007 General Meeting, Tampa, FL, USA, 2007.
- [2] PADHY N P. Unit Commitment-A Bibliographical Survey [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1196-1205.
- [3] LI T, SHAHIDEHPOUR M. Price-based Unit Commitment: A Case of Lagrange Relaxation Versus Mixed Integer Programming [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 2015-2025.
- [4] BIXBY R E, FENOLON M, GU Z H, et al. MIP: Theory and Practice - Closing the Gap [EB/OL]. <http://www.ilog.com/products/optimization/tech/research/mip.pdf>.
- [5] O'NEILL R P. It's Getting Better All the Time (with MIP) [EB/OL]. http://www.hks.harvard.edu/hepg/rllib_rp_competitive_models.html.
- [6] PINTO H, MAGNAGO F, BRIGNONE S, et al. Security Constrained Unit Commitment: Network Modeling and Solution Issues [C]. Proceedings of 2006 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, GA, USA, 2006.
- [7] STOTT B, JARDIM J, ALSAC O. DC Power Flow Revisited [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(3): 1290-1300.
- [8] FU Y, SHAHIDEHPOUR M, LI Z Y. Security Constrained Unit Commitment with AC Constraints [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 1001-1013.
- [9] CHOWDHURY B H, RAHMAN S. A Direct Method for Security Constrained Unit Commitment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1329-1342.
- [10] SHAHIDEHPOUR M, FU Y. Applying Benders Decomposition to Power Systems [J]. IEEE Power Energy Magazine, 2005, 33(2): 20-21.
- [11] NEMHAUSER G L, WOLSEY L A. Integer and Combinatorial Optimization [M]. New York: Wiley-Interscience, 1999.
- [12] CHANG G W, TASI Y D, LAI C Y, et al. A Practical Mixed Integer Linear Programming Based Approach for Unit Commitment [C]. Proceedings of IEEE PES General Meeting, Denver, USA, 2004.
- [13] CARRION M, ARROYO J M. A Computationally Efficient Mixed Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1371-1378.
- [14] HEDMAN K W, O'NEILL R P, OREN S. Analyzing Valid Inequalities of the Generation Unit Commitment Problem [J]. Proceedings of IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Seattle, USA, 2009.
- [15] FU Y, SHAHIDEHPOUR M. Fast SCUC for Large-scale Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 2144-2151.
- [16] 李晓磊, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于动态搜索线性混合整数法的机组组合新算法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 18-21.
- [17] CHANG G W, CHUANG G S, LU T K A. Simplified Combined-cycle Unit Model for Mixed Integer Linear Programming-based Unit Commitment [C]. Proceedings of IEEE PES General Meeting, Pittsburgh, PA, USA, 2008.
- [18] LU B, SHAHIDEHPOUR M. Short-term Scheduling of Combined Cycle Units [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1616-1625.
- [19] LIU C, SHAHIDEHPOUR M, LI Z Y, et al. Component and Mode Models for the Short-term Scheduling of Combined-cycle Units [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(2): 976-990.
- [20] CHANG G W, AGANAGIC M, WAIGHT J G. Experiences with Mixed Integer Linear Programming Based Approaches on Short-term Hydro Scheduling [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4): 743-749.
- [21] CHANG J H, SHAHIDEHPOUR M, LI Z Y. Security Constrained Unit Commitment with Volatile Wind Power Generation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(3): 1319-1324.
- [22] VENKATESH B, YU P, GOOI H B, et al. Fuzzy MILP Unit Commitment Incorporating Wind Generators [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(4): 1738-1746.
- [23] FY Y, SHAHIDEHPOUR M, LI Z Y. Long-term Security Constrained Unit Commitment: Hybrid Dantzig - Wolfe Decomposition and Subgradient Approach [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 2093-2106.
- [24] 陈之栩, 李丹, 张晶, 等. 华北电网安全节能发电优化调度系统功能设计 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 43-47.
- [25] WOOD W G. Spinning Reserve Constrained Static and Dynamic Economic Dispatch [J]. IEEE Trans on Power Apparatus, 1982, 101(2): 381-388.

作者简介:

贺智(1978-),男,湖南邵阳人,工程师,研究方向为高压直流输电系统技术管理;

李海英(1972-),男,河北饶阳人,高级工程师,研究方向为高压直流输电、电力电子技术在电力系统中的应用;

曹冬明(1972-),男,江苏泰兴人,高级工程师,研究方向为高压直流输电、电力电子技术在电力系统中的应用;

李九虎(1971-),男,江苏泰兴人,教授级高级工程师,研究方向为电力系统保护与控制。

Application of PCS-9550 Control and Protection System in Tianguang HVDC Transmission System Renovation Project

HE Zhi¹, LI Hai-ying², CAO Dong-ming², LI Jiu-hu²

(1. CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510620, China;

2. NARI Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: Tianguang ± 500 kV HVDC power transmission system is the first HVDC project in the CSG, and the second buck power HVDC transmission project in the China, which made great contributions in the power transmission from west to east and the economics development of the Guangdong province. With the growth of operation time, the trouble in the HVDC control and protection system becomes more and more serious, and has caused Tianguang HVDC transmission system single pole even bipolar pole to block for several times. It is necessary to update the control and protection system of Tianguang HVDC transmission system. The characteristics of PCS-9550 as well as its application in Tianguang HVDC transmission system are introduced in the paper.

Key words: HVDC; control and protection system; dynamic simulation

(上接第 27 页)

- [26] WU L, SHAHIDEHPOUR M, LI T. Stochastic Security Constrained Unit Commitment[J]. IEEE Trans on Power Systems 2007, 22(2): 800-811.
- [27] DANESHI H, JAHROMI A N, LI Z Y, et al. Fuzzy Mixed Integer Programming: Approach to Security Constrained Unit Commitment[C]. Proceedings of IEEE PES General Meeting Calgary, Canada, 2009.
- [28] CHOWDHURY B H, RAHMAN S. A Review of Recent Advances in Economic Dispatch[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(4): 1248-1259.
- [29] HAN X S, GOOI H B, KIRSCHEN D S. Dynamic Economic Dispatch: Feasible and Optimal Solutions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 22-28.
- [30] KUMAR A, CHANANA S. Security Constrained Economic Dispatch with Secure Bilateral Transactions in Hybrid Electri-

city Markets[A]. Proceedings of IEEE Power India Conference, New Delhi, India, 2008.

- [31] RUIZ P A, PHILBRICK C R, ZAK E, et al. New Real Time Market Applications at the California Independent System Operator[A]. Proceedings of IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, New York, USA, 2004.

作者简介:

李利利(1987-),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行和优化;

姚建国(1963-),男,江苏南通人,高级工程师,主要研究方向为 EMS 系统和电力系统智能调度;

耿建(1971-),男,山东文登人,高级工程师,主要研究方向为电力系统运行和优化;

徐帆(1984-),男,河北廊坊人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行和优化。

Analysis of the Research on SCUC/SCED

LI Li-li, YAO Jian-guo, GENG Jian, XU Fan

(NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210061, China)

Abstract: Security-constrained unit commitment (SCUC) and security constrained economic (SCED), which take into account the security and economy of power system operation simultaneously, have caused extensive attention abroad. In recent years, SCUC based on the algorithm Mixed-integer programming (MIP) has procured practical application and rapid development. This paper presents a review of recent advances in SCUC/SCED research, the research situation of the optimization mathematical model and algorithms of SCUC are summarized, the progress of the study on SCUC based on the MIP algorithm is described in category, and the main methods and principles combined with their advantages and disadvantages are analyzed and reviewed, furthermore, some aspects that need to be urgently solved in applying SCUC/SCED to China are proposed.

Key words: SCUC; SCED; mixed integer nonlinear programming; intelligent dispatching