

考虑多规则约束的统调火电机组合同电量修正策略

何治华¹, 刘友波², 刘俊勇², 刘洋², 李响¹, 凌亮¹, 过夏明¹

(1. 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 在当前电力市场模式下, 电网公司需对供区内统调机组发电合同的计划分解、进度监视、执行修正、合同考核, 而现有分析工具缺乏考虑诸多外部规则的统调机组合同电量修正算法。这里将合同电量修正中的节能环保规则、经济规则、公平性规则、系统规则、定制规则进行集中建模, 以约束的形式体现到合同调整成本最小的决策模型中, 并辅以一定的松弛条件, 利用 Java Netbeans 7.0 开发平台, 开发了考虑多规则约束的统调火电机组合同电量修正分析程序, 能作为调度部门进行合同电量修正、合同执行进度优化、计划执行质量预警的辅助决策工具。

关键词: 多规则约束; 统调机组; 合同电量; 修正策略

Abstract: Considering nowadays electricity market in China, it is a significant task for the grid corporation to make generation plan schedule, monitor contract progress, perform generation plan adjustment and assess the contract. Due to lack of researches in this field regarding constraints based on complex rules, there are few tools to help manage the task. The rules of environmental protection, economic issues, fairness principle, power system operation restriction and special requirements are established together as a series of constraints of mathematical planning model with relaxation conditions, whose objective is the minimization of adjustment cost. Based on Java Netbeans 7.0 platform, the relevant computer program is developed, which can be used as decision-aided tool for generation contract optimization and generation plan performance monitoring.

Key words: multi-rules based constraints; central-dispatched units; generation contract; adjustment strategy

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)03-0052-05

0 前言

在中国当前电力市场运行机制下, 年度上网电量合同是组织电力交易的最主要形式, 多年实践表明, 省级电网公司调度部门对供区内统调机组发电合同的计划性分解、进度监视、执行修正、完成考核有利于特大型输电系统安全稳定, 并兼顾电力市场平稳运行及合理过渡^[1]。实际工程中, 合同电量的修正一般遵守既定原则, 如“三公”、节能或经济原则, 具体方法简单实用, 但忽略了较多客观因素, 致使电网公司难以进行精细化的发电计划管控; 理论上, 不同时间尺度下的统调机组合同电量分解与滚动是一个多目标、多因素制约的寻优问题, 在时段平均利用小时、机组排放序列、检修计划、丰枯平衡等众多约束下, 寻求一组可行的计划调整方案。近年来, 市场公平性和节能调度愈发受到关注, 统调机组合同电量的精细化管理算法也随之得到了重视。文献[2]根据电量预测偏差、机组少发电量和被核减

合同电量对合同完成率的影响, 定义了修正后的合同电量完成率, 进一步构造了基于修正加权变异系数的合同电量执行公平性指标, 用于测算给定时间跨度内任意机组合同电量实际完成情况及调度公平度。文献[3]考虑风电并网后的不确定性, 提出一种能考虑多时间段各类动态约束的发电计划滚动优化算法, 用以保持发电计划的可行性, 减小系统运行风险。随着人们对环保问题的深入认识, 电力系统节能调度已成为安排系统运行方式的重要原则。文献[4]提出了一种节能发电调度模式下制定火电机组月度发电计划的方法, 可以在计算发电计划同时给出节能发电调度序位表和组合优先级, 但未考虑各机组间合同完成进度, 容易造成实际需求电量严重偏小时某些机组无法开机的问题。在此背景下, 这里提出较为完整的考虑多规则约束的统调火电机组合同电量修正算法, 将时段受阻电量、电量平衡滚动、合同进度偏差、节能调度与利用小时数等多类规则融入到策略模型中。四川电网实际算例验证了所提方法的有效性。

1 统调火电机组合同电量修正

1.1 一般性原则

在一定时间段内(如一月、一旬或一周)待执行合同电量作为制定该时间段内生产方式和考核机组发电水平的重要依据,应充分考虑既定的市场规则、已完成情况、时段内机组特性及检修计划等诸多条件,力求使合同电量的时序分配更符合省级电力市场与系统运行实际。当前,“三公”和节能降耗是合同电量核准修正的主要原则,反映在不同的修正模型中即为不平衡电量分摊机组的排序优先权重具有差异。实际应用中,当出现合同执行偏差时,对统调机组合同电量的处理以滚动修正为主^[5],将对象时段实际执行电量与计划电量的差额按一定原则和约束分配到后续时段中。例如,文献[6]以负荷平衡、检修计划、发电量上下限为约束,以调度公平和经济性作为目标提出了火电机组年合同电量编制算法。而文献[7]则在月度竞价市场框架基础上,开发了将年度中标合同电量分解到各月的均衡化滚动算法,以利于电力市场稳定及降低电网公司购电成本。

1.2 实际应用中存在的问题

当前对省级统调火电机组的合同电量修正方法仍较为粗糙,更多的研究倾向于如何将各机组超前、滞后电量编制到后续电量平衡中,并进行总体控制,使得各机组某时段内合同总量不会偏差过大。然而以单纯滚动编制的手段难以考虑多个规则约束的作用,使执行计划的修正问题缺乏优化操作。造成此类问题的难点之一在于,对合同电量修正的规则性约束较为模糊、相关参数难以确定、阈值选取缺乏依据等。例如传统滚动修正方法中,常见环保优先、兼顾经济、利用小时大致相当等模糊性原则,进一步可细分为如下几方面。

(1) 节能环保规则,即机组煤耗、排放因素需予以考虑,实际中火电机组煤耗、排放性能有既定序列表,理论上可用相应权重参数表示。

(2) 经济规则,不同电气位置的机组上网电量造成的边际网损有一定差异,此外,上网电价也不完全相同,从减小购电成本提高运行效益角度,经济性是电网公司核调合同计划时必须考虑的问题。

(3) 公平性规则,在中国当前电力市场阶段,难以全盘采用竞争性报价方式确定中标合同与上网电

量,仍必须要坚持一定的公平性,例如在节能调度大原则下,排放指标属于同类的机组应具有大致相当的利用小时,同类机组合同执行进度应保持一致,合同偏差方向保持一致等。

(4) 系统规则,即存在从电网安全稳定运行角度出发必须以一定利用小时带负荷上网发电的机组,如某些调峰机组、地区重要无功支撑机组等。

(5) 定制规则,即一些人为制定且已为市场认可的管理性、政策性规则,如某电厂总合同进度保持一定水平、公平和效率因素如何定义和量化等。

目前尚未有成熟的方法能在统调火电机组合同电量执行计划修正中考虑上述多种规则,亦缺乏必要的优化建模过程,无法为更好的修正、调整方案计算提供理论支撑。

2 合同电量修正的多规则约束

传统中对统调机组合同电量的修正考虑因素均过于简单,容易造成未来考察时段内计划电量与实际工况较大幅度失准的情况,削弱了对生产方式安排的指导意义。综合“三公”、节能调度与经济性原则,本节对此过程中应考虑的若干修正策略制定进行详细建模。设在某一固定时间尺度 t 内进行统调机组合同电量的执行计划修正, t 可为月、周或旬,为方便理解,假设 t 为月,即进行月度电量的修正策略优化,其他可以此类推。由于合同电量的计划修正仅与当前执行情况及未来单位时间段内约束有关,设参与合同执行计划修正的机组共 N 台,剩余月份为 M ,机组 i 在第 j 月原上网合同电量为 W_{ij} ,修正变量为 ΔW_{ij} 。

2.1 刚性电量与受阻电量

对于剩余任意月度 m ,机组 i 计划上网电量具有刚性电量与受阻电量约束。刚性电量指由于电气约束、保障性上网而必发的最小电量 $W_{ij, \min}$,通常可用机组 i 在 t 时段内的日均最小利用小时、 t 内小时数和机组容量的积表示,因此存在如下刚性电量约束。

$$W_{ij} + \Delta W_{ij} \geq W_{ij, \min} \quad \exists W_{ij, \min} = h_{ij, \min} TC_i \quad (1)$$

式中 $h_{ij, \min}$ 表示机组 i 在第 j 月内日均最小利用小时; T 为时段总小时数; C_i 为机组 i 装机容量。

受阻电量影响因素主要为检修、供煤、汛期水电大发。其中,汛期配合水电大发因素在年初合同分解时已经考虑,一般不会出现重大变化,而检修和供

煤状况则有可能根据实际情况调整,因此受阻电量可取二者中的较小值,即

$$W_{ij} + \Delta W_{ij} \leq W_{ij\max} \quad (2)$$

$$\exists W_{ij\max} = \min(\alpha_1 Th_{ij\max} C_i, \alpha_2 Th_{ij\max} C_i)$$

式中 $h_{ij\max}$ 表示机组 i 在第 j 月内日均最大利用小时; $\alpha_1, \alpha_2 \in [0, 1]$ 分别为非检修小时数占比、预测存煤可支撑满发小时数占比。在实际中, $h_{ij\min}$ 和 $h_{ij\max}$ 一般为常数,刚性电量与受阻电量给定了机组 i 在月份 j 进行执行电量调整幅度的上下限。

2.2 电量平衡与滚动规则

剩余每个时间段内的发供电量平衡是合同电量执行计划修正的目的之一,而需求侧电量预测在修正前可能有所改成并产生新的偏差累计至各机组后期执行计划中,若将各机组总合同电量设为定值,则可能导致相互矛盾的约束条件而造成模型不可解,因此引入机组合同松弛因子 β 消纳电量平衡所产生的新偏差,其等式约束和不等式约束分别可用式(3)~(5)表达。

$$\sum_{j \in M} (W_{ij} + \Delta W_{ij}) = L_j \quad (3)$$

$$(1 - \beta) E_i \leq \sum_{j \in M} (W_{ij} + \Delta W_{ij}) \leq (1 + \beta) E_i \quad (4)$$

$$|\Delta W_{ij}| \leq \gamma W_{ij} \quad \forall i, j \quad (5)$$

式中 L_j 为第 j 时段需求侧电量预测; 松弛因子 β 可取 5%; E_i 为年合同电量与到当前月已实际上网的电量之差。式(5)为各机组各月调整不得超过其原计划电量的比例, γ 为比例系数,取值 20%,式(5)和式(1)、(2)共同决定了电量调整幅度约束。

2.3 合同进度偏差约束

对于丰枯期发电构成变化较大的系统,必须分别保证丰水期和枯水期内发电合同执行进度符合一定水平,且从公平性出发,宜保证各机组总合同执行进度大致处于同一水平。基于初始的电量合同分解表,可得到机组 i 在各月初始完成进度。

$$S_{ij} = \frac{W_{i0} + \sum_j W_{ij}}{E_{iy}} \quad \exists j \in [1, M] \quad (6)$$

式中 E_{iy} 为机组 i 年电量合同总量; W_{i0} 表示修正前机组 i 已实际执行的电量; $S_{iM} = 100\%$,修正后的执行进度应处于与修正前大致相当的水平,可用以下不等式表达,其中 ω 为进度水平的约束松弛因子,用于改善解的可行域,这里取 $\omega = 0.075$ 。

$$(1 - \omega) S_{ij} \leq \frac{W_{i0} + \sum_j (W_{ij} + \Delta W_{ij})}{E_{iy} + \sum_j \Delta W_{ij}} \leq (1 + \omega) S_{ij} \quad (7)$$

2.4 节能调度约束

发电排放量是当前电力市场模式下的相当重要考核指标。在合同电量分解阶段,往往以给定排放序列(与机组装机规模有关)进行出清,并辅以一定公平性原则,如同等级机组利用小时大致相当等。在合同电量修正阶段,也应有相应的排放变化量约束。以参数 ξ_i 表示机组 i 的线性化氮氧化物排放当量参数(t/kWh), $\Delta W_{ij} \xi_i$ 即为该机组在第 j 月的排放修正量,节能调度规则表现为剩余时段排放当量不应高于计划剩余排放当量,可描述为

$$\sum_j (W_{ij} + \Delta W_{ij}) \xi_i \leq (1 + \sigma) (N_y - N_a) \quad (8)$$

式中 N_y, N_a 分别为合同电量总排放当量和已发月份排放当量; σ 为排放当量约束的松弛因子,设定为 0.02。

2.5 机组利用小时规则

当前的市场考核机制中,机组利用小时约束包括两个方面:①单个机组的日均发电利用小时不能超越所在机组类别的上下限(即同类型机组日均利用小时大致相当);②典型分类机组期望年均利用小时级差应在一定范围内。以 C_i 表示机组 i 的装机容量,该规则约束的数学模型如下。

$$h_{I\min} \leq \frac{W_{ij} + \Delta W_{ij}}{C_i \cdot D_j} \leq h_{I\max} \quad i \in I, j \in M \quad (9)$$

$$H_{I_1} - H_{I_2} \leq h_{diff} \quad (10)$$

$$H_{I_2} - H_{I_3} \leq h_{diff} \quad (11)$$

式中 D_j 表示第 j 月的天数; I 表示机组 i 所属机组类型; $h_{I\min}$ 和 $h_{I\max}$ 分别为该类机组最小最大利用小时。按当前市场规则,将 I 划分为 I_1, I_2, I_3 类:装机 600 MW 及以上、300 至 600 MW、300 MW 及以下,各相邻类年利用小时级差设定为 $h_{diff} = 300$ h。 H_{I_1} 表示 I_1 类机组的预期年平均利用小时,可用式(12)计算。

$$H_{I_1} = \frac{\sum_i (W_{i0} + \sum_j (W_{ij} + \Delta W_{ij}))}{\sum_i C_i} \quad i \in I_1 \quad (12)$$

机组的类型划分需在计算前设置,属于 I_2 和 I_3 的机组预期年均利用小时具有类似表达式。

2.6 目标函数

对合同电量的修正其本质是对既定发电计划进

行调整,而不同机组的上网电价并不一致,因此导致了调整成本的出现。该模型以考虑规则约束的统调火电机组合同电量修正的调整成本最小为目标函数进行优化,即

$$\min A = \sum_i \sum_j \Delta W_{ij} p_{ij} \quad (13)$$

式中 p_{ij} 为机组 i 在第 j 月的上网电价; A 为从当前时段开始的总修正成本。上述所提数学模型(1)~(13)中,决策变量是各机组在剩余时段的合同电量修正调整量,即 ΔW_{ij} 。若应用于月度修正,变量个数为 $N \times$ 剩余月数,对于超过40台火电机组省级电网而言,模型属于较大规模线性规划问题,需要鲁棒性较高的求解方法,这里通过Java环境的Netbeans 7.0开发平台开发考虑多规则约束的统调火电机组合同修正程序,调用LINDO线性规划求解动态链接库进行稳定解算,数据库采用MySQL,能满足工程要求。

3 算例分析

采用四川电网40台火电机组2012年某时段合同电量完成与计划修正数据为基础建立研究场景(1—10月为实发电量,11—12月为修正合同计划

量)进行算例分析,计算流程如图1所示。

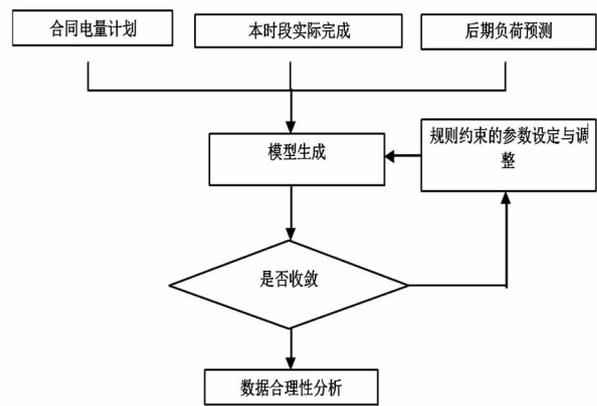


图1 考虑多规则约束的机组合同电量修正程序计算流程

该程序需要输入合同电量已经执行情况、本期完成情况和后期负荷预测(本算例以月修正为例,日修正具有类似形式),各类规则约束参数如前文所设,机组输入信息如表1所示。

输入数据还包括机组上网电价、通过最大最小利用小时数折算的电量修正量上下限、月负荷电量预测值、受阻电量等。以式(13)为目标函数,(1)~(13)为约束条件,利用所开发的系统求解模型,可得如表3所列的考虑前述所有约束在内的统调火电机组合同修正方案。

表1 机组维护信息

| 火电机组 | 容量 /MW | 丰期合同 /MWh | 枯期合同 /MWh | 日最大利用小时 | 日最小利用小时 |
|-------|--------|-----------|-----------|---------|---------|
| 云潭1号 | 300 | 461 500 | 750 000 | 20 | 5 |
| 高坝1号 | 100 | 140 400 | 250 000 | 20 | 5 |
| 新平1号 | 600 | 924 050 | 1 500 000 | 20 | 8 |
| 新平2号 | 600 | 924 050 | 1 500 000 | 20 | 8 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 黄桷庄2号 | 200 | 246 560 | 500 000 | 18 | 7.5 |
| 白马2号 | 200 | 259 000 | 500 000 | 18 | 7.5 |

表2 合同信息及前期执行情况(MWh)

| 机组号 | 1月 | | 2月 | | 3月 | | ... |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----|
| | 合同 | 实发 | 合同 | 实发 | 合同 | 实发 | ... |
| 1 | 170 500 | 176 560 | 175 090 | 176 550 | 119 050 | 118 020 | ... |
| 2 | 49 800 | 51 020 | 40 210 | 43 010 | 39 430 | 38 700 | ... |
| 3 | 260 770 | 255 960 | 272 300 | 278 960 | 292 400 | 290 880 | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 39 | 68 120 | 67 700 | 89 040 | 91 220 | 71 410 | 66 180 | ... |
| 40 | 79 040 | 79 910 | 90 240 | 90 060 | 80 150 | 82 330 | ... |

表3 2012年11—12月合同电量修正策略(MWh)

| 机组号 | 11月 | | 12月 | | 丰期进度 (实际) /% | 枯期进度 (预期) /% |
|-----|---------|--------------|---------|--------------|-----------------|-----------------|
| | W_i | ΔW_i | W_i | ΔW_i | | |
| 1 | 107 300 | -5 500 | 122 510 | -1 150 | 101.3 | 98.7 |
| 2 | 15 540 | -450 | 16 690 | +297 | 104.4 | 104.3 |
| 3 | 108 400 | +4 220 | 99 200 | +1 040 | 99.7 | 100.8 |
| 4 | 108 400 | +3 220 | 99 250 | +1 040 | 107.2 | 99.4 |
| 5 | 121 340 | +2 450 | 130 450 | -640 | 106.4 | 101.3 |
| 6 | 121 000 | +2 450 | 128 950 | -625 | 94.5 | 99.7 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 39 | 37 470 | -14 400 | 46 390 | +157 | 92.33 | 101.4 |
| 40 | 50 600 | -2 780 | 38 950 | -464 | 98.46 | 103.7 |

表4 其他输出参数统计分析

| 月份 | 合同电量修正成本 /万元 | 排放当量变化比例 /% | 600 MW 以上机组 日均利用小时 | 枯水期平均发电进度 /% | 月发电量松弛总量 /MWh |
|-----|-----------------|----------------|-----------------------|-----------------|------------------|
| 11月 | +201.76 | +1.072 | 17.34 | 84.61 | 94 183 |
| 12月 | +127.45 | +0.979 | 16.91 | 101.71 | 81 475 |

从表4可知,所提模型能够有效地在多规则约束下给出统调火电机组的合同修正策略,并能在可接受的排放当量变化比例、月发电量松弛总量范围内,尽量减小合同电量的修正成本,以较小的代价保障不同类型发电机组各自日均利用小时大致相当、合同执行进度在一定控制范围内。

4 结 论

省级统调火电机组待执行合同电量的计划性修正具有其内在规则,而长期以来此类规则尚未得到量化研究与具体建模,这里系统性地研究了合同电量修正过程中的各类规则,进行集中建模,并开发了相应的测试分析系统。从工程角度而言,所开发算法在电力市场某一发展阶段上具有一定通用性,能可靠保证节能减排和各类公平性要求,以较小地代价保障合同电量执行质量,可作为省级电网统调火电机组合同电量优化调整辅助决策工具。就算法本身而言,还可以进一步考虑更多的适用场景,如对合同执行异常情况(如大机组因故临时退出运行后的电量补偿问题)、新规则的加入与调整等问题的处

理,这些将是后续的研究重点。

参考文献

- [1] 王漪,汤伟,罗桓桓,等.编制直调火力发电单元月度电能交易计划的负荷率偏差法[J].电力系统保护与控制,2009,37(22):134-140.
- [2] 张成刚,王秀丽.基于修正加权变异系数的电力调度公平性指标[J].电力技术经济,2009,21(5):5-9.
- [3] 张国强,张伯明,吴文传.考虑风电接入的协调滚动发电计划[J].电力系统自动化,2011,35(19):18-22.
- [4] 张慧琦,常永吉,唐大勇,等.节能发电调度模式下火力发电单元的月度电能计划编制方法[J].电力系统保护与控制,2011,39(4):84-89.
- [5] 温丽丽,刘俊勇,吴志云,等.基于月度滚动修正的合同电量分解算法[J].现代电力,2008,25(1):82-87.
- [6] 张力,刘俊勇,刘继春,等.火电机组年合同电量的编制与分解算法研究[J].继电器,2007,33(4):64-69.
- [7] 王漪,于继来,柳焯.基于月度竞价空间滚动均衡化的年中标电量分解[J].电力系统自动化,2006,30(17):24-27.

(收稿日期:2013-02-15)