

面向多种调度模式的电力交易 计划统一编制与管理

许立雄¹ 李响² 刘友波¹ 刘俊勇¹ 凌亮² 孙毅²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 针对电力市场发展当前形势下多种调度模式的发电计划科学化管理要求,提出了面向省级电网多种调度模式的月度交易计划统一编制模型,通过设置不同的目标函数来反映不同的调度管理目标;模型采用禁忌-粒子群算法进行求解,利用禁忌算法的局部搜索能力来改善粒子群算法的“早熟”收敛;开发了相应的软件系统,实现月度交易计划的编制与管理。实例表明模型与方法的有效性和实用性。

关键词: 月度交易计划; 节能分解; 平均分解; 粒子群; 禁忌搜索

Abstract: Aiming at the requirement of scientific power generation scheduling management under multi-dispatching modes in the new development of electricity market, a uniform optimization model for monthly trading scheduling is proposed. By setting different objective function, the present model can satisfy different dispatching modes. The Tabu-PSO is adopted to solve the uniform optimization problem, which uses the local search ability of Tabu search to improve the premature convergence problem of basic PSO. A project is developed to realize the algorithm and evaluate the implementation of monthly trading scheduling. The numerical examples show the effectiveness of the proposed method.

Key words: monthly trading scheduling; dispatching mode for energy saving; dispatching mode for justness; particle swarm optimization (PSO); Tabu search

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)04-0023-05

0 引言

交易计划编制工作是电力交易中心的主要工作之一,其结果将直接影响后续调度中心的工作^[1]。交易计划按照时间跨度可以分为短期的日交易计划、中期的月度交易计划和长期的年度交易计划。短期的日交易计划国内外研究得比较成熟^[2-6],长期的年度交易计划国内外的研究成果也比较丰富^[7-10],而对于中期的月度交易计划的研究相对比较匮乏。文献[1]基于“三公”调度模式,建立了全周期变时段发电计划优化模型。然而“三公”调度模式不能有效地引导电力工业朝着提高能源使用效率,减少环境污染的方向实现可持续发展,因此国务院特别颁布了《节能发电调度办法》。文献[1]提出在节能调度模式下的一种综合耗量优化方法,综合考虑了发电企业、电网公司和社会环境三方利益,用于解决省级电网直调火力发电单元月度电能交易

计划编制问题。上述文献均是针对某一种调度模式研究月度交易计划的编制,而目前就省一级的电力交易中心而言,月度交易计划的编制正由平均分解的方式向节能分解的方式过渡,迫切需要能够同时考虑多种调度方式的月度交易计划编制方法。在深入分析平均分解和节能分解的编制模型的基础上,提出了考虑多种调度模式的月度交易计划统一编制模型,采用禁忌-粒子群算法进行求解,并开发了相应的系统实现月度交易计划的编制与管理。

1 月度交易计划编制模型

月度交易计划编制是根据未来月份系统的电力电量需求,各个发电机组的检修安排、启停限制、发电量限制等条件,确定各个发电机组在未来月份的开停、出力及电量。编制完的计划还需要满足相应的要求,如能耗最小、各个发电机组年合同电量完成进度相当等。这种要求与不同的调度模式相对应,

如能耗最小是节能调度模式下的要求;而各个发电机组年合同电量完成进度相当则是“三公”调度模式下的要求。

将编制完的计划需要满足的要求作为目标函数,系统的电力电量平衡、机组运行限制作为约束条件,建立考虑多种调度模式的月度交易计划编制优化模型,通过设置不同的目标函数来反映不同的调度模式。模型具体描述如下。

1.1 优化目标

1) 节能调度模式

节能调度模式要求按照各个发电机组的能耗由小到大安排发电,以提高电力工业能源使用效率,节约能源,促进能源和电力结构调整。因此节能调度模式下月度交易计划编制模型的优化目标为发电能耗最小。

$$\min \sum_{i \in G} \eta_i E_{i,t}^p, i \in G$$

式中 η_i 为发电机组 i 的单位能耗; $E_{i,t}^p$ 为时段 t 内发电机组 i 的计划发电量。

2) “三公”调度模式

“三公”调度模式是中国传统的调度模式,“三公”调度的关键指标是电厂年度合同电量进度,即要求各电厂的电量完成进度尽可能相近。以时段内各个发电机组年合同电量完成进度的方差来衡量各个机组之间年合同电量完成进度的偏差,则优化目标可具体描述如下。

$$\min \sum_{i \in G} D(F_{i,t}), i \in G$$

式中 $D(F_{i,t})$ 为时段 t 内各个发电机组年度合同电量完成进度的方差; $F_{i,t}$ 为时段 t 内发电机组 i 的年度合同电量完成进度。

$$F_{i,t} = (E_{i,t-1}^c + E_{i,t}^p) / E_i^c$$

式中 $E_{i,t-1}^c$ 为时段 t 之前发电机组 i 已经完成的发电量; $E_{i,t}^p$ 为时段 t 内发电机组 i 的计划发电量; E_i^c 为发电机组 i 的年度合同电量。

3) 统一模型

采用不同调度模式进行月度交易计划的编制,区别体现在目标上:节能调度模式以能耗最小作为计划编制的指导,“三公”调度以各个机组年合同电量完成进度尽可能相近作为计划编制的指导。因此,可以通过引入权重将不同的目标函数综合来实现不同调度模式下月度交易计划编制的统一。

统一模型下的目标函数可描述为

$$\min [\alpha \sum_{i \in G} \eta_i E_{i,t}^p + \beta \sum_{i \in G} D(F_{i,t})], i \in G$$

式中 α, β 为权重,当 $\alpha = 1, \beta = 0$ 时,对应于节能调度模式;当 $\alpha = 0, \beta = 1$ 时,则对应于“三公”调度模式。

1.2 系统平衡约束

发电机组的出力需要满足系统的负荷及备用需求;同时在时段内所发电量需要与负荷消耗的电量相匹配。因此系统的平衡约束包括了电力平衡约束和电量平衡约束。

1) 电力需求约束

电力需求约束为

$$\sum_{i=1}^{N_G} x_{i,t} P_{i,t} \geq (1 + \gamma_t) P_{L,t}$$

式中 $x_{i,t}$ 为时段 t 内发电机组的运行状态,0为停机,1为运行; $P_{i,t}$ 为时段 t 内发电机组的出力; N_G 为发电机组总台数; γ_t 为时段 t 内系统的备用率; $P_{L,t}$ 为时段 t 内系统的总体负荷电力需求。

2) 电量需求约束

电量需求约束为

$$\sum_{i=1}^{N_G} x_{i,t} h_{i,t} P_{i,t} \geq (1 + \gamma_t) E_{L,t}$$

式中 $x_{i,t}$ 为时段 t 内发电机组的运行状态,0为停机,1为运行; $h_{i,t}$ 为时段 t 内发电机组的利用小时数; $P_{i,t}$ 为时段 t 内发电机组的出力; N_G 为发电机组总台数; γ_t 为时段 t 内系统的备用率; $E_{L,t}$ 为时段 t 内系统的总体负荷电量需求。

1.3 机组约束

发电机组本身存在各种运行的限制,如检修、最小启停时间等。具体的约束描述如下。

1) 机组必须停机约束

机组必须停机约束为

$$u_{i,t} = 0 \quad (i, t) \in G_{\text{off}}$$

式中 G_{off} 为时段 t 内由于检修等原因必须停运的发电机组集合。

2) 机组必须开机约束

机组必须开机约束为

$$u_{i,t} = 1 \quad (i, t) \in G_{\text{on}}$$

式中 G_{on} 为时段 t 内必须运行的发电机组集合。

3) 机组日利用小时数约束

机组日利用小时数约束为

$$h_i^{\min} \leq h_i \leq h_i^{\max}$$

式中 h_i 为发电机组 i 的日利用小时数; h_i^{\min} 为发电

机组 i 的日最小利用小时数; h_i^{\max} 为发电机组 i 的日最大利用小时数。

4) 机组启停时间间隔约束

机组不能频繁启停,运行和停运都必须持续一段时间。

$$D_{i,t-1}^{\text{on}} + x_{i,t} \geq T_i^{\text{on}}$$
$$D_{i,t-1}^{\text{off}} + (1 - x_{i,t}) \geq T_i^{\text{off}}$$

式中 $D_{i,t-1}^{\text{on}}$ 为时段 t 之前发电机组 i 运行持续的天数; $D_{i,t-1}^{\text{off}}$ 为时段 t 之前发电机组 i 停运持续的天数; T_i^{on} 为发电机组 i 运行持续的最少天数; T_i^{off} 为发电机组 i 停运持续的最少天数。

2 求解方法

月度交易计划编制优化模型是一个复杂的混合规划问题,传统的数学优化算法随着计算规模的扩大,存在“维数灾”问题。

粒子群优化算法简单,可处理各种复杂优化问题,已在多个领域广泛应用,但不同程度地存在早熟收敛问题。Tabu 搜索通过禁忌准则避免迂回搜索,通过藐视准则来赦免一些被禁忌的优良状态,以保证多样化的有效探索,最终实现全局最优。借鉴这一思想来改进 PSO 算法,避免算法陷入局部最优导致的早熟收敛^[12]。以改进后的 Tabu - PSO 算法来求解月度交易计划编制优化模型。流程如下。

1) 参数设置。粒子群个体的维数取优化变量的个数即火电机组数,种群规模 M 取 40。Tabu - PSO 算法参数设置:惯性因子 w 取 0.5,学习因子 $c_1 = c_2 = 2.0$,速度限制取 ± 4.0 ,禁忌长度 L 即禁忌对象的任期取 5,最大迭代次数 I_{\max} 取 50。

2) 初始解生成。随机生成 M 个可行解 x_i ,计算各个可行解的目标函数,取 M 个可行解中的目标函数值最小的可行解作为群体当前的最优解 P_g ,并将其设置为禁忌对象,任期为 L ;将 M 个可行解设置为粒子自身当前的最优解 P_i 。当前迭代次数置为 1。

3) 判断当前迭代次数是否达到最大迭代次数,若不满足,当前迭代次数累加 1;若达到最大迭代次数则输出群体当前最优解 P_g 为最终的优化结果。

4) 计算各个粒子的飞行速度

各个粒子飞行速度为

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1(p_i^k - x_i^k) + c_2r_2(p_g^k - x_i^k)$$

式中 w 为惯性因子; c_1, c_2 为学习因子; r_1, r_2 为 $[0,$

1] 间的随机数; v_i^{k+1}, v_i^k 为粒子未来飞行速度和当前飞行速度; p_i^k, p_g^k 为粒子自身当前的最优解和群体当前的最优解。

5) 根据粒子速度产生新的粒子位置(解)

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}$$

6) 查看粒子位置是否被禁,若是则重复步骤 4)、5) 若不是,继续以下步骤。

7) 计算粒子新位置(解)的目标函数值,与粒子当前最优解 p_i 对应的目标函数值 $f_{i, \text{best}}$ 比较,若小则将粒子的新位置作为粒子的当前最优解 p_i ,并更新 $f_{i, \text{best}}$;选取种群中所有粒子自身当前最优解的最小者,与种群当前最优解比较,若小则更新种群当前最优解 p_g 及相应的目标函数值 $f_{g, \text{best}}$,并更新禁忌对象,若未更新种群当前最优解,则递减禁忌对象的任期,转入步骤 3)。

3 计划管理

编制好的交易计划其效果依赖于各个电厂对计划的执行情况。计划管理不仅是各个电厂月度开停、出力、发电量等信息的管理,还包含了对各个电厂计划执行情况的跟踪与评估。评估计划执行情况的指标具体定义如下。

1) 电量偏差率

用于衡量各个发电机组实际发电量对计划电量的偏差,其定义如下。

$$\Delta\% = \frac{(E_{i,t}^c - E_{i,t}^p)}{E_{i,t}^p} \times 100\%$$

式中 $E_{i,t}^c$ 为时段 t 发电机组 i 实际的发电量; $E_{i,t}^p$ 为时段 t 内发电机组 i 的计划发电量,指标正值表示超发,负值表示欠发。

2) 偏差均衡率

用于衡量各个发电机组电量偏差相对于平均偏差水平的差异程度,其式为

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{N_G} (\Delta_i\% - \Delta\%)^2}{N_G} \quad i \in G$$

式中 G 为发电机组集合,可分别取超发机组和欠发机组进行统计; N_G 为发电机组集合里发电机组的总台数; $\Delta_i\%$ 为发电机组集合里第 i 台发电机组的偏差率; $\Delta\%$ 为发电机组集合里发电机组的平均偏差率。

3) 合同进度

对各个发电机组分别统计丰水期、枯水期以及全年的合同完成进度,其式为

$$F_{i,p} = \frac{\sum_{t=p(1)}^{p(\max)} E_{i,t}^r}{E_{i,p}^c}$$

式中,依据变量 p 的取值, $F_{i,p}$ 分别为发电机组 i 的丰水期合同电量完成进度、枯水期合同电量完成进度和年度合同电量完成进度; $p(1)$ 分别为丰水期起始时段、枯水期起始时段和年度起始时段; $p(\max)$ 分别为丰水期结束时段、枯水期结束时段和年度结束时段; $E_{i,t}^r$ 为发电机组 i 已经完成的发电量; $E_{i,p}^c$ 分别为发电机组 i 的丰水期合同电量、枯水期合同电量和年度合同电量。

4 实例

以某省公司 2012 年数据来验证模型及方法的实用性。

4.1 计划编制

月度交易计划编制模型中系统平衡约束如表 1 所示(只列出 10—12 月份的系统电力电量需求),其中电力需求取该月份典型日的预测负荷,电量需求仅是火电部分的电量需求。

表 1 电力电量

月份	10	11	12
电力 /MW	1 950	2 200	2 500
电量 / (MW · h)	262 000	487 000	577 000

月度交易计划编制模型中机组约束如表 2 所示(只列出部分信息),包括了机组的容量、全年的合同电量、丰枯期的合同电量、检修安排、机组日利用小时数的最大最小值。机组启停时间间隔,所有机组取值相同,持续开机时间不少于 10 天,持续停机时间不少于 10 天。

表 2 机组运行信息

机组	容量 /MW	合同电量 / (MW · h)	检修	日利用小时
新平 1 号机	600.0	2 424 050	否	[5, 20]
东岳 1 号机	300.0	1 108 800	否	[5, 20]
白马 2 号机	200.0	758 890	否	[5, 20]

采用 Tabu - PSO 分别求解节能调度模式、“三公”调度模式下火电机组月度交易计划。表 3、表 4 分别是节能调度模式和“三公”调度模式下部分发

电机组月度发电计划(表中的单位均为 MW · h)。

表 3 节能调度模式

机组	月份		
	10	11	12
新平 1 号机	9 300.0	21 808.0	26 758.0
东岳 1 号机	4 650.0	10 904.0	13 379.0
白马 2 号机	3 100.0	7 269.0	8 919.0

表 4 “三公”调度模式

机组	月份		
	10	11	12
新平 1 号机	9 300.0	36 000.0	37 200.0
东岳 1 号机	4 650.0	4 500.0	4 650.0
白马 2 号机	11 158.0	12 000.0	12 400.0

4.2 计划管理

根据上述算法设计计算软件,图 1 展示了十月份各个发电机组计划完成情况的评估结果。

画面上半部分是机组合同完成进度统计分析结果展示:左边以进程条的形式展示了查询机组全年合同执行的进度、丰枯期合同执行的进度以及查询月份合同计划电量的完成情况;右半部分是所有机组合同完成进度的统计分析结果展示,列表部分展示了全年、丰枯期、查询月份完成进度靠前、靠后的机组及其合同完成进度,进程条则展示了所有机组平均执行进度。

画面下半部分展示了上网电量的偏差统计:上面的列表展示了查询机组全年、丰枯期、查询月份实发电量与计划电量之间的偏差;下面的列表则展示了全年、丰枯期、查询月份实发电量与计划电量之间的偏差量靠前、靠后的机组及其计划电量、实发电量、偏差率。

5 结语

针对电力体制新形势下多种调度模式的发电计划科学化管理要求,提出了考虑多种调度模式的月度交易计划统一编制模型,通过设置不同的目标函数来反映不同的调度模式;模型采用禁忌 - 粒子群算法进行求解,利用禁忌算法的局部搜索能力来改善粒子群算法的“早熟”收敛。需指出所提模型里的约束只包含了机组的运行约束,如何有效地考虑系统的安全约束,将是后续进一步研究的内容。



图1 计划管理

参考文献

[1] 汤伟,王漪,于继来,等. 编制直调火力发电单元月度电能交易计划的综合耗量优化法[J]. 中国电机工程学报 2009, 29(5): 64-70.

[2] Wang S J, Shahidehpour S M, Kirschen D S, et al. Short-term Generation Scheduling With Transmission and Environmental Constraints Using an Augmented Lagrangian Relaxation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1294-1301.

[3] Huse E S, Wangenstein I, Faanes H H. Thermal Power Generation Scheduling by Simulated Competition [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 472-477.

[4] Abido M A. Environmental/Economic Power Dispatch Using Multi-objective Evolutionary Algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1529-1537.

[5] 张国立,李庚银,谢宏,等. 日前和实时市场统一电能交易模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 50-56.

[6] 初壮,于继来. 初期电力市场确定电网日发电计划的模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 43-47.

[7] Yu Z, Sparrow F T, Nderitu D. Long-term Hydrothermal Scheduling Using Composite Thermal and Composite Hydro Representations [J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(2): 210-216.

[8] Ferrero R W, Rivera J F, Shahidehpour S M. A Dynamic Programming Two-stage Algorithm for Long-term Hydrothermal Scheduling of Multireservoir Systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(4): 1534-1540.

[9] Fu Y, Shahidehpour M, Li Z. Long-term Security-constrained Unit Commitment Hybrid Dantzig-Wolfe Decomposition and Subgradient Approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 2093-2106.

[10] 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.

[11] 杨争林,唐国庆. 全周期变时段“三公”调度发电计划优化模型[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 132-136.

[12] 许立雄,吕林,刘俊勇. 基于改进粒子群优化算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 27-30, 30.

作者简介:
许立雄(1982),男,博士研究生,从事电力系统稳定与控制研究;
刘友波(1983),男,博士,讲师,从事电力系统连锁故障、电力市场等领域研究。

(收稿日期: 2013-03-21)