

DOI: 10.7667/PSPC161672

基于“三公”调度的年度滚动发电计划与机组组合优化模型

谢冰¹, 黄柳强², 吴茵², 杨小卫², 郭瑞鹏¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 广西电网公司电力调度控制中心, 广西 南宁 530023)

摘要: “三公”调度是我国目前普遍采用的调度模式。负荷预测及水电计划是火电发电计划编制的基础, 一般具有时间越近、精度越高的特点, 实际应用中一般通过滚动预测及修正以提高发电计划的可用性。基于“三公”调度提出了年度滚动发电计划与机组组合优化模型, 在优先保障“三公”调度目标的同时, 优化机组的启停计划, 提高火电机组的平均负荷率, 并减少机组启停次数, 以提高电网运行的经济性。所提模型为混合整数线性规划问题, 能够采用 CPLEX 等商业软件求解。广西电网的仿真分析验证了所提模型的正确性及有效性。

关键词: “三公”调度; 电量完成率; 发电计划; 机组组合; 混合整数线性规划

Annual rolling generation scheduling and unit commitment optimization model based on open and impartial dispatching

XIE Bing¹, HUANG Liuqiang², WU Yin², YANG Xiaowei², GUO Ruipeng¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Guangxi Power Grid Company Electric Power Dispatching and Control Center, Nanning 530023, China)

Abstract: Open and impartial dispatching is widely used in China at present. Load forecast and hydropower schedule are the foundation of thermal power generation scheduling, and are generally more precise when the forecast time is more recent. To improve the availability of power generation schedule, rolling prediction and correction are usually used in practical applications. An annual rolling power generation schedule and unit commitment optimization model based on open and impartial dispatching is proposed. The primary goal of proposed model is to meet the need of open and impartial dispatching. At the same time, the model can reduce the start-stop times of thermal generation units and improve the average load rate of thermal generation units so as to improve the economy of power grid operation. The proposed model is a mixed integer linear programming problem, and can be solved by optimization tools, such as CPLEX. The correctness and effectiveness of the proposed model is verified by the simulation results of Guangxi power grid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377143).

Key words: open and impartial dispatching; accomplishment rate of electricity energy; generation scheduling; unit commitment; mixed integer linear programming

0 引言

电力体制改革后, 厂网分开, 发电企业和电网企业成为市场中独立的经济实体, 电力市场各方利益矛盾加剧, 实现调度的公平、公正和公开成为亟待解决的问题^[1]。“三公”调度, 即指电力调度机构遵循国家法律法规, 在满足电力系统安全、稳定和经济运行的前提下, 按照公平和透明的原则, 在调度运行管理和信息披露等方面, 平等对待各市场主

体^[2]。“三公”调度是我国目前普遍采用的调度模式, 具体体现在年度电量指标的执行过程中对电厂年度电量完成率趋同性的要求^[3-4]。年度电量指标是发电计划编制的基础, 在执行过程中, 调度中心需要根据本年度各电厂的电量指标以及分月预计用电量、发电企业上报的机组计划检修安排、将火电总的年度计划发电量分解到月度^[5]。

水文预测是编制水电发电计划的基础, 负荷预测及水电发电计划则是编制火电发电计划的依据。负荷及水文预测均具有预测周期越长, 预测精度越低的特点, 中长期的负荷预测及水文预测均可能存

在较大误差。在年底内滚动更新负荷预测及水电发电计划, 并结合火电机组的实际电量完成进度及检修计划等滚动优化后续火电发电计划是降低中长期预测误差影响的重要手段。

传统的发电计划通常以火电机组运行能耗最低或者运行成本最低为调度目标, 以系统功率平衡、机组运行状态、潮流限制等为约束条件, 建立日调度模型, 其建模和算法研究都相对成熟^[6-8]。由于我国目前采用的调度模式主要为“三公”调度, 常用的以日为优化范围、以发电成本最小为目标的安全约束发电计划模型难以满足“三公”调度的需求^[9-11], 在实际生产中可操作性较弱, 难以执行^[12]。

目前, 省级电力调度中心普遍采用平均分配发电量及利用小时数的模式编制月度电能交易计划, 该方法虽然简单易行, 但编制考虑因素不足, 往往造成日调度的困难, 不满足节能减排的要求以及造成“三公”调度的困难^[13]。“三公”调度目标不仅仅关注机组某天的运行状态、出力安排, 更关注各火电厂年度电量指标的完成情况^[14]。电力调度机构应当对各火电厂的年度电量完成进度适时进行滚动调整, 使同一电网内各火电厂的年度电量完成进度大致相当。目前并没有针对于“三公”调度模式的成熟的发电计划优化软件, 发电计划的安排主要由专业人员手工完成, 工作量巨大, 且效果严重依赖经验。

广西电网水电资源丰富, 但电网结构薄弱, 火电厂又以热电联产为主, 多座主力火电厂因供热及网络安全原因存在安全约束最小出力。受近年来负荷需求增长疲软, 相关流域自然来水偏丰的影响, 火电机组的负荷率低, 年度“三公”调度存在巨大困难, 在丰水期经常被迫调停核电机组以避免或减少弃水。

文献[15]基于“三公”调度模式提出了按照一定的原则通过有序地调停燃煤机组, 提高系统运行负荷率水平以降低系统煤耗。借鉴该思想, 本文在年度滚动发电计划中引入机组组合优化模型, 通过优化机组开停机, 尽可能地避免机组低负荷率运行, 并减小机组启停次数, 在保证“三公”调度目标的同时, 兼顾电网运行的经济性。

1 基于“三公”调度的年度滚动发电计划与机组组合优化模型

在年度滚动计划的实际应用中, 负荷预测及电量计划一般以月为时间单位, 但机组检修计划及机组调停均以天为单位, 故本文直接以天为单位, 滚动优化的时间跨度为计算时的下一天到当年的最后一天。年度滚动计划的主要目的是确定次月的电量计划, 但在确定次月电量计划时需适当前瞻, 保障

年度电量调控目标完成率的趋同性。

1.1 火电日发电量需求的确定

根据节能减排的要求, 省级电网的主要机组发电序位大致为: (1) 核电单元; (2) 水电单元; (3) 按“以热定电”方式运行的燃煤热电联产机组; (4) 非供热火电机组。考虑组合优先级方案中核电、水电等机组的发电量计划主要根据核能、来水情况另行制定^[16], 文献[17]以运行可靠性和经济性为目标, 给出了分布式能源的发电优化策略。我国装机以燃煤火电机组为主, 能源消耗量一直较高^[18-19]。火电发电计划安排时需要先确定负荷需求及水电、核电发电计划等。

在年度滚动计划的实际应用中, 负荷预测及水电计划等一般以月为单位。定义火电的月度平衡电量为

$$M_B^m = M_L^m - M_X^m - M_H^m - M_N^m - M_W^m - M_S^m - M_G^m - M_O^m \quad (1)$$

式中: M 表示月电量; 上标 m 表示月份; 下标 L、X、H、N、W、S、G 及 O 分别表示负荷、省间受电、水电、核电、风电、光伏发电、气电及其他。

受网络安全约束及“以热定电”方式运行的燃煤热电联产机组等必开机组的最小出力限制, 故电力系统运行中存在安全约束最小火电发电量, 记为 M_T^m 。显然, 若火电的月度平衡电量大于相应月份的安全约束最小火电发电量, 则火电需求电量等于火电月度平衡电量, 否则火电需求电量等于安全约束最小火电发电量, 即

$$M_T^m = \max \{ M_B^m, M_T^m \} \quad (2)$$

式中, M_T^m 表示 m 月的火电总发电量需求。火电需求电量超过平衡电量的部分只能通过弃水实现, 即 m 月的弃水电量等于 $M_T^m - M_B^m$ 。

由于年度滚动发电计划以天为单位, 故需要将月度电量需求分解至日, 即

$$D^d = \frac{M_T^{m(d)}}{DAYS(m(d))} \quad (3)$$

式中: d 表示日编号; D^d 表示第 d 日的火电总发电量需求; 函数 $m(d)$ 表示第 d 日对应的月份; 函数 $DAYS(m)$ 表示 m 月的天数。

1.2 约束条件

1) 日电量平衡约束

$$\sum_{p=1}^P E_p^d = D^d \quad d \in \{d_f, d_f + 1, \dots, d_t\} \quad (4)$$

式中, p 表示电厂编号; P 表示电厂数; d 表示日

编号, d_f 表示起始日; d_t 表示终止日; E_p^d 表示电厂 p 第 d 日的发电量。

2) 各电厂日发电量与累计电量的关系约束

$$A_p^d - A_p^{d-1} = E_p^d \quad d \in \{d_f, d_f + 1, \dots, d_t\} \quad (5)$$

式中: A_p^d 表示电厂 p 第 d 日日末的累计电量; E_p^d 表示电厂 p 第 d 日的日发电量。 $A_p^{d_f-1}$ 对应于滚动计算起始日前一天末的累计电量, 可以由实际系统统计得到。

3) 各机群各日的启停机数量与运行机组数量的关系约束

考虑到同一电厂内拥有相同容量的机组之间具有替代性, 在优化中只需关注运行机组的数量, 而不需要关注具体开哪台机组, 故这里将同一电厂内拥有相同容量的机组定义为一个机群。各机群各日的启停机数量与运行机组数量的关系为

$$U_c^d \geq |G_c^{d-1} - G_c^d| \quad (6)$$

式中: U_c^d 表示机群 c 第 d 日的启停机数量; G_c^d 表示机群 c 第 d 日的运行机组数量。实际应用中, 式(6)可替换为式(7)及式(8)。

$$U_c^d \geq G_c^{d-1} - G_c^d \quad (7)$$

$$U_c^d \geq G_c^d - G_c^{d-1} \quad (8)$$

4) 各机群各日的运行机组数量约束

$$0 \leq G_c^d \leq \bar{G}_c^d \quad (9)$$

式中, \bar{G}_c^d 表示机群 c 第 d 日的最大允许运行机组数量, 由机群 c 的机组数量扣除计划检修机组数量得到。

5) 各电厂各日的开机与可发电量关系约束

$$24R \sum_{c \in S_p} G_c^d C_c \leq E_p^d \leq 24\bar{R} \sum_{c \in S_p} G_c^d C_c \quad (10)$$

式中: R 表示火电机组的日平均最小发电负荷率, 实际应用中一般取 0.3; \bar{R} 表示火电机组的日平均最大可发负荷率, 实际应用中一般取 0.85; C_c 表示机群 c 的单机容量; S_p 表示电厂 p 的机群编号集合。

6) 各电厂各日的最小发电量约束

$$E_p^d \geq \underline{E}_p^d \quad (11)$$

式中, \underline{E}_p^d 表示电厂 p 第 d 日的安全约束最小发电量, 由运行方式专业人员综合考虑网络安全及热电联产机组供热等多方面因素给出, 在优化计算中为已知的常量。

7) 各电厂各月底的累计电量完成率约束

$$A_p^m \geq Y_p r^m \quad (12)$$

式中: m 表示月份; e_m 表示 m 月最后一天的日编号; Y_p 表示电厂 p 的年度计划电量, 在优化计算中

为常量; r^m 表示 m 月底各电厂累计电量完全率的下限。

8) 各日的火电总开机容量约束

火电机组的单位煤耗与负荷率密切相关, 图 1 给出了广西电网某 1000 MW 级机组的煤耗曲线。

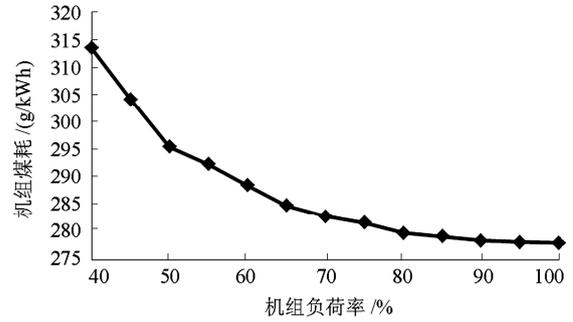


图 1 火电机组单位煤耗曲线

Fig. 1 Thermal power units coal consumption curve

理论上, 可以将机组煤耗曲线用分段直线描述, 并对机组的发电煤耗进行详细建模, 但这将使模型大大复杂化, 并给数值计算带来巨大的困难。在年度滚动发电计划及机组组合优化中需要对模型进行适当简化。从图 1 可以看出, 低负荷率水平的单位煤耗较高, 很不经济。在实际运行中, 若运行机组的平均负荷率过低, 可通过调停部分机组, 以提高运行机组的负荷率, 从而降低电网的总体煤耗, 故有目标约束

$$\frac{L^d}{\sum_{p=1}^P \sum_{c \in S_p} G_c^d C_c} \geq \underline{K} \quad (13)$$

式中, \underline{K} 表示火电机组平均负载率的期望下限, 在优化中为常量。根据广西电网的轮停规则要求取 $\underline{K} = 0.55$ 。

式(13)的目标约束可以用式(14)~式(16)替代。

$$\min s^d \quad (14)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{c \in S_p} G_c^d C_c \leq \frac{L^d}{\underline{K}} + L^d s^d \quad (15)$$

$$s^d \geq 0 \quad (16)$$

式中, s^d 表示第 d 日火电开机容载比超出期望上限的幅度。

1.3 优化目标

“三公”调度的首要目标是实现各火电厂年度电量完成率趋同, 数学上可以描述为使各火电厂年度电量完成率的最小值最大化, 即

$$\max \underline{r}^{12} \quad (17)$$

由于中长期负荷及水文预测的精度较低,故“三公”调度中还希望各月底的累计电量完成率趋同,从而减小因预测偏差对年度电量完成率的影响,即

$$\max \sum_{m=m_f}^{11} r^m \quad (18)$$

式中, m_f 表示起始月份。

机组启停成本较高,故实用中应尽可能减少机组启停次数,即

$$\min \sum_{c=1}^C \sum_{d=d_f}^{d_c} U_c^d \quad (19)$$

基于“三公”调度的年度滚动发电计划与机组调停优化模型存在4个目标,实际应用中需要对4个目标进行协调。这里对4个目标进行加权处理,即将式(14)、(17)、(18)及(19)综合为

$$\max W_1 r^{12} - W_2 \sum_{d=d_f}^{d_c} s^d - W_3 \sum_{c=1}^C \sum_{d=d_f}^{d_c} U_c^d + W_4 \sum_{m=m_f}^{11} r^m \quad (20)$$

式中, W_1 、 W_2 、 W_3 及 W_4 分别表示4个目标的权重。实际应用中,目标1的重要性高于目标2,目标2的重要性高于目标3和4,故有 $W_1 \gg W_2 \gg W_3, W_4$ 。在广西电网的实际应用中取 $W_1 = 100$, $W_2 = 10$, $W_3 = W_4 = 1$ 。

2 算例分析

本文所提出的基于“三公”调度的年度滚动发电计划与机组组合优化模型在数学上为线性混合整数优化问题,可以采用 CPLEX 软件求解。基于所提出的模型,采用标准 C++ 开发了年度滚动发电计划与机组组合优化软件,并在广西电网试运行,取得了较好的效果。

以广西电网2016年7月31日的实际数据为例,对2016年8月—12月进行年度滚动分析。仿真环境为 Microsoft Visual Studio 2010,计算机硬件配置为 2.5 GHz CPU, 8 GB 内存。整个计算过程所花费的 CPU 时间为 3.6 s,能够很好地满足电网实际应用的要求。

截至2016年7月底,广西电网的统调装机容量如表1所示。由表1可以看出,广西电网装机以火电及水电为主,水电所占的比重在省级电网中相对较大。

从表2可以看出,广西电网8月—10月为丰水期,水电大发,为避免弃水,广西电网被迫计划在8月及9月调停所有核电机组。10月计划开启部分核电机组,但预计将被迫弃水,故除因安全约束必开的火电机组需要以安全约束最低出力运行外,其

余火电机组均需停机。

表1 广西电网统调分类装机容量表

机组类型	装机容量/MW	占比/%
火电	15 150	55.79
水电	8754	32.24
核电	2172	8.00
风电	627.5	2.31
光伏	92	0.34
气电	120	0.44
其他	240	0.88
合计	27 155.5	100

2016年,广西电网相关流域的自然来水偏丰,负荷需求增长疲软,13座主力火电厂中有10座因供热及安全原因存在安全约束最小出力,年度“三公”调度存在巨大困难。2016年8月—12月的分月火电发电量需求如表2所示。

表2 火电发电量计算表

Table 2 Calculation table of thermal power generation

月份	亿 kWh				
	8月	9月	10月	11月	12月
电量需求	90	80	78	77	85
省间受电	32.2	29.2	26.4	17	15.8
水电	39.38	32.56	28.39	24.05	20.74
核电电量	0	0	8.1	15	15.5
风电	0.86	0.83	0.87	0.85	0.87
光伏	0.33	0.32	0.33	0.32	0.33
气电	0.42	0.41	0.3	0	0
其他	0.60	0.58	0.60	0.58	0.60
火电平衡电量	16.22	16.11	13.01	19.21	31.16
安全约束最小火电电量	14.43	15.77	16.29	16.13	16.29
火电需求电量	16.22	16.11	16.29	19.21	31.16
预计弃水电量	0	0	3.28	0	0

应用所开发的软件对广西电网进行建模并求解,表3及表4给出了滚动优化结果。

表3中,7月完成率指截至7月31日实际已经发生的累计电量完成率,8月—12月完成率为计划完成率。根据表3绘制出火电厂电量完成曲线图,如图2所示。由图2可以看出,到2016年12月底,前6座火电厂的计划电量完成率相同,较好地体现了“三公”调度原则,而后面7座火电厂的计划电量完成率相对较大,且8月到12月末电量完成率呈现等幅增长。由表4可知,后面7座火电厂均存在安全约束最小出力,且其平均出力均等于安全约束最小出力,即实际上已经全部按安全约束最小出力运行,其电量完成率仍高于前6座电厂,故无法进一步下调其电量完成率,反映了电厂的安全约束最

小出力对“三公”调度的影响。

表 3 火电厂发电计划完成率进度安排

Table 3 Completion rate of thermal generation schedule

电厂名称	装机容量/ MW	年度调控目标/ kWh	7月完成率/ %	8月完成率/ %	9月完成率/ %	10月完成率/ %	11月完成率/ %	12月完成率/ %
贵港电厂	1260	22.8	53.5965	53.5965	53.5965	53.5965	53.5965	76.1015
田阳电厂	300	4.94	39.0688	39.0688	39.0688	39.0688	39.0688	76.1015
合山电厂	1330	10.02	45.5989	45.5989	45.5989	45.5989	47.4316	76.1015
防城港电厂	1260	21.29	41.6174	51.3371	56.7119	62.2658	69.6262	76.1015
富川电厂	2090	48.28	45.6089	50.9392	55.7113	60.6426	69.6435	76.1015
钦州电厂	3360	18.8	39.9952	47.3597	54.7092	61.469	68.0098	76.1015
北海电厂	640	15.83	53.1901	60.2401	67.0625	74.1124	80.9349	87.9848
来宾 B 厂	720	34	45.7941	50.1706	59.7	69.5471	80.1353	89.9824
六景电厂	1320	24.56	62.0521	68.7166	75.1661	81.8306	88.2801	94.9446
田东电厂	270	4.38	45.4338	57.3242	68.8311	80.7215	92.2283	104.119
来宾电厂	600	10.66	60.6004	69.6735	78.454	87.5272	96.3077	105.381
柳州电厂	440	6.9	56.6667	67.4493	77.8841	88.6667	99.1014	109.884
永福电厂	640	9.96	64.5582	74.2691	83.6667	93.3775	102.775	112.486

表 4 火电厂运行信息

Table 4 Operation information of thermal power plant

电厂名称	起始日期	终止日期	开机容量/MW	安全约束最小出力/MW	平均出力/MW	平均负载率/%
贵港电厂	2016/8/1	2016/11/30	0	0	0	0
贵港电厂	2016/12/1	2016/12/31	1260	0	689.671	54.7358
田阳电厂	2016/8/1	2016/11/30	0	0	0	0
田阳电厂	2016/12/1	2016/12/31	300	0	245.889	81.9631
合山电厂	2016/8/1	2016/11/24	0	0	0	0
合山电厂	2016/11/25	2016/11/30	330	0	280.5	85
合山电厂	2016/12/1	2016/12/31	1000	0	849.309	84.9309
防城港电厂	2016/8/1	2016/12/31	630	240	301.924	47.9244
富川电厂	2016/8/1	2016/12/31	1045	320	400.921	38.3657
钦州电厂	2016/8/1	2016/12/31	630	380	411.309	65.2872
北海电厂	2016/8/1	2016/12/31	320	150	150	46.875
来宾 B 厂	2016/8/1	2016/8/31	360	200	200	55.5556
来宾 B 厂	2016/9/1	2016/10/31	720	450	450	62.5
来宾 B 厂	2016/11/1	2016/11/30	720	500	500	69.4444
来宾 B 厂	2016/12/1	2016/12/31	720	450	450	62.5
六景电厂	2016/8/1	2016/12/31	660	220	220	33.3333
田东电厂	2016/8/1	2016/12/31	135	70	70	51.8519
来宾电厂	2016/8/1	2016/12/31	300	130	130	43.3333
柳州电厂	2016/8/1	2016/12/31	220	100	100	45.4545
永福电厂	2016/8/1	2016/12/31	320	130	130	40.625

从表 3 可以看出, 田阳电厂的电量完成率在 11 月底及以前一直最低, 理应优先安排其发电, 但由于防城港电厂、富川电厂、钦州电厂、北海电厂等 10 座电厂存在安全约束最小出力, 且 8 月—11 月火电的发电空间较小, 10 座存在安全约束最小出力的

电厂的平均负荷率很低, 田阳电厂若开机将导致火电机组的平均负荷率进一步降低, 经济性很差, 甚至可能被迫弃水, 故田阳电厂在 8 月—11 月停机, 而在 12 月份火电发电空间较大时增大其负荷率以实现电量完成率趋同。

由表 4 可以看出, 3 座不存在安全约束最小出力的火电厂中, 贵港电厂及田阳电厂在 8 月—11 月

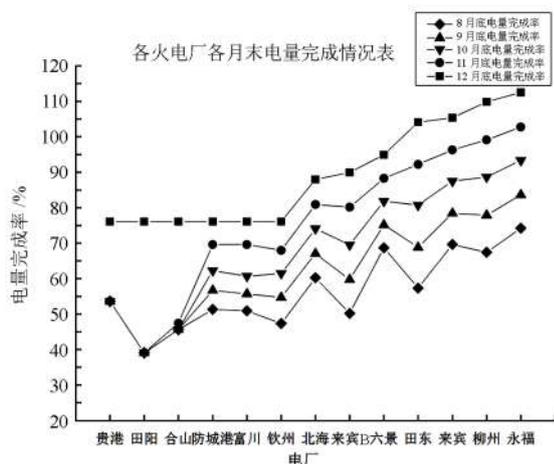


图 2 火电厂电量完成情况

Fig. 2 Completion rate of thermal power plants generation

份机组全停, 合山电厂也在 8 月—11 月份的绝大多数时间里机组全停(仅 11 月 25 日开启一台 330 MW 机组以避免后续负荷率过高可能存在的电量完成率不足风险), 从而尽可能地提高运行机组的平均负荷率, 进而提高电网运行的经济性。由表 4 的第 5 列可以看出, 各火电厂机组开机容量的变化次数较小, 这说明机组的启停次数较少。

3 结论

本文提出了基于“三公”调度的年度滚动发电计划与机组组合优化模型, 广西电网的仿真结果表明:

1) 应用所提模型, 三公调度目标(即年度电量完成率趋同目标)能够在最大限度范围内得以实现。

2) 该模型能够提供优化的机组启停计划, 尽可能地避免火电机组低负载率运行, 减少机组启停次数, 以提高电网运行的经济性, 对于合理安排机组的轮停方案具有参考价值。

3) 所提模型为线性混合整数优化模型, 能够采用 CPLEX 等商业软件可靠求解, 计算速度能够满足实际应用要求。

参考文献

[1] 简洪宇, 康重庆, 都百青, 等. 电力市场下“三公”调度的一种评判方法[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 26-32. JIAN Hongyu, KANG Chongqing, DU Baiqing, et al. A novel approach to assess impartiality and openness of power dispatching in electricity market[J]. Power System Technology, 2005, 29(16): 26-32.

[2] 国家电力监管委员会. 关于促进电力调度公开、公平、公正的暂行办法[Z]. 北京: 国家电力监管委员会, 2004.

State Electricity Regulatory Commission of China. The temporary measure on promoting impartial and open electrical dispatching[Z]. Beijing: State Electricity Regulatory Commission of China, 2004.

[3] 魏学好, 胡朝阳, 杨莉. 对“三公”调度现有评价指标的思考和建设[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 109-112.

WEI Xuehao, HU Chaoyang, YANG Li. Analysis and suggestions for existing evaluation indices of open and impartial power dispatching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 109-112.

[4] 白杨, 钟海旺, 夏清, 等. 电量协调与成本控制的日内滚动发电计划[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2965-2972.

BAI Yang, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. An intraday rolling scheduling with unit energy coordination and operating cost control[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2965-2972.

[5] 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, 36.

ZHANG Chenggang, WANG Xiuli. Impartiality indexes of power dispatching based on modified weighed coefficient of variation[J]. Electric Power Technologic Economics, 2009, 21(5): 5-9, 36.

[6] 郭琳, 文旭, 赵志强, 等. 计及节能风险评估的月度随机规划调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 22-29.

GUO Lin, WEN Xu, ZHAO Zhiqiang, et al. A stochastic programming monthly generation dispatching model considering energy-saving risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 22-29.

[7] 贺建波, 胡志坚, 刘宇凯. 大规模多目标水-火-风协调优化调度模型的建立及求解[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 1-7.

HE Jianbo, HU Zhijian, LIU Yukai. Establishment and solution of the large-scale multi-objective hydro-thermal-wind power coordination optimization dispatching model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 1-7.

[8] 文旭, 郭琳, 王俊梅. 面向节能减排的电力系统发购电计划研究述评[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 136-144.

WEN Xu, GUO Lin, WANG Junmei. Overview of power dispatch and purchasing plan in power system from energy-saving and emission-reducing[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 136-144.

- [9] 耿建, 高宗和, 张显, 等. 节能电力市场设计初探[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 18-21.
GENG Jian, GAO Zonghe, ZHANG Xian, et al. A preliminary investigation on power market design considering social energy efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 18-21.
- [10] 尚金成, 张立庆. 电力节能减排与资源优化配置技术的研究与应用[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 58-63.
SHANG Jincheng, ZHANG Liqing. Research and application of technologies in energy-saving, emission-reducing and optimal resource allocation of electric power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 58-63.
- [11] 张宁, 陈慧坤, 骆晓明, 等. 广东电网节能发电调度计划模型与算法[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 11-15, 38.
ZHANG Ning, CHEN Huikun, LUO Xiaoming, et al. Model and algorithm of energy-conservation based generation dispatching for Guangdong power grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 11-15, 38.
- [12] 许丹, 赵鸿图, 丁强, 等. 基于实用化安全约束经济调度扩展建模策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 76-81.
XU Dan, ZHAO Hongtu, DING Qiang, et al. Modeling strategy based on utility of security constrained economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 76-81.
- [13] 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.
WANG Yi, TANG Wei, LUO Huanhuan, et al. Load ratio deflection method for making monthly trade schedule of directly dispatched thermal power generation units[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 134-140.
- [14] 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.
YANG Zhenglin, TANG Guoqing. A generation scheduling optimization model suitable to complete period and variable intervals and conforming to principles of openness, equity and justness[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 132-136.
- [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 mode of energy-conservation dispatching based on thermal unit cyclic operation and its benefit analysis[J]. Electric Power, 2010, 43(9): 19-23.
- [16] 汤伟, 王漪, 于峰, 等. 编制直调火力发电单元月度电能交易计划的综合成本加权法[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 167-173.
TANG Wei, WANG Yi, YU Feng, et al. An integrative cost weighted method for drawing up electric energy monthly transaction schedule of directly dispatched thermal power generation units[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 167-173.
- [17] AI Qian, FAN Songli, PIAO Longjian. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0017-x
- [18] 刘永坤, 李成. 我国能源效率及其影响因素分析[J]. 热力发电, 2015, 44(3): 1-7.
LIU Yongkun, LI Cheng. China's energy efficiency and its influencing factors[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(3): 1-7.
- [19] 薛彦廷, 杨寿敏, 牟春华, 等. 我国煤电技术国际竞争优势分析[J]. 热力发电, 2015, 44(10): 1-8.
XUE Yanting, YANG Shoumin, MU Chunhua, et al. Study on international competitiveness of China's coal-fired power generation technology[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(10): 1-8.

收稿日期: 2016-10-09; 修回日期: 2017-04-09

作者简介:

谢冰(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化调度; E-mail: xiebing602@163.com

黄柳强(1984—), 男, 工学博士, 工程师, 从事电力系统运行策划工作; E-mail: huanglq.dd@gx.csg.cn

吴茵(1979—), 女, 工学硕士, 高级工程师, 从事电网运行策划管理工作。E-mail: wu_y.dd@gx.csg.cn

(编辑 姜新丽)