

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.03.006

含风电电力系统的月度机组组合模型

季 峰, 蔡兴国

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为在更长的时间尺度上统筹协调各类发电资源,建立含风电电力系统的月度机组组合模型. 分析了保证中长期电量交易顺利进行的均衡调度和节约能源、减少污染物排放的节能发电调度,建立协调电力市场和节能发电的月度机组组合模型. 该模型综合考虑了中国“一机一价”和“标杆电价”的上网电价机制,以允许机组间均衡电量进行转移的差别电量为基础,以节能发电优先序列表作为电量转移顺序,利用风电功率相关性分析结果模拟生成考虑尾部相关性和秩相关性的风电功率可能场景,并依据火电机组热启动和温态启动的特点选取模型的计算粒度. 算例结果表明:该模型可以在降低机组启停次数的情况下,协调含风电系统的整体购电成本和总煤耗.

关键词: 调度模型; 风电功率; 机组组合; 中长期调度; 相关性

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)03-0040-07

Monthly unit commitment model of power system with integrated wind power

Ji Feng, Cai Xingguo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to coordinate the generator resources in longer time scales, a monthly unit commitment model of power system with integrated wind power is created. The balanced dispatch mode which can ensure medium-long electric quantity executed smoothly and the energy-saving dispatch mode which can save energy, reduce pollution has been analyzed first, then a unit commitment model coordinating electricity market and energy-saving has been build. In the model, the “pay as bell” and “benchmark price” electricity pricing mechanism has been considered. The model is based on the differential electric quantity which transfers from balanced energy, loaded generators by using the energy-saving priority list, simulated wind power scenarios considering tail-dependence and rank correlation from the previous wind power correlation analysis, and chooses the calculation resolution by thermal generator hot start & warm start characteristic. The calculated example indicates that the model can coordinate the electricity purchase cost and coal consumption under reducing the start-off times of thermal generators.

Keywords: dispatch model; wind power; unit commitment; medium and long dispatch; correlation

随着中国电力工业技术的发展和电力、环境政策法规的逐渐实施,现阶段中国电力生产过程中的各类发电资源日益增多,并且诸如电能交易合同、污染物排放指标、煤耗指标等发电资源多以中长期考核控制目标的形式给定. 受各类中长期发电资源限制时,电力系统多周期的分层调度机制是将中长期发电资源的预期控制目标逐渐转换为发电机组具体出力的有效方法^[1]. 现阶段中国电力系统的运行特点决定了其发电计划的编制是一个包括月度计划、日前计划、日内滚动计划的分层决策过程. 近年来,随着风电并网容量的快速增加,相关研究者对含风电电力系统的日前调度和日内滚动调度进行了大量的研究,但月度计划作为分层决策过程中的重要一

环以往的相关研究大多未考虑风电的影响.

月度计划可以在更长的时间尺度内统筹协调各类中长期发电资源,确定各个发电机组的运行状态从而为日前计划提供决策依据,文献[2]综合考虑了月度发电计划和机组检修计划,指出合理制定发电计划和检修计划对于提高风电的接纳能力和系统中期运行的可靠性和经济性有重要意义,文献[3]从月度机组组合和短期机组组合协调的思路创建了含风电的月度机组组合,但上述有关含风电月度机组组合的研究在建模时对于中国现阶段的背景约束考虑较少. 现阶段中国中长期机组组合主要受电力市场和节能发电调度的双重背景约束,为此本章在电力市场均衡电量和机组节能能耗序位表的基础上,允许均衡发电量由高耗能机组向低能耗机组转移,并在考虑中国现阶段上网电价机制和火电机组启停运行特性的前提下,提出了协调电力市场和节能发电调度的含风电电力系统中长期机组组合模型.

收稿日期: 2016-03-20

作者简介: 季 峰(1984—),男,博士研究生;
蔡兴国(1945—),男,教授,博士生导师

通信作者: 季 峰, jifeng_sy@163.com

1 风电功率不确定性的建模

1.1 风电功率的模拟方法

风电功率的各类预测技术仅限于短期功率预测,因此在中长期的时间尺度上无法采用预测值来获得各个调度时段的风电功率,只能借助随机抽样的方法建模风电功率的不确定性,其一般模拟过程如框图1所示。

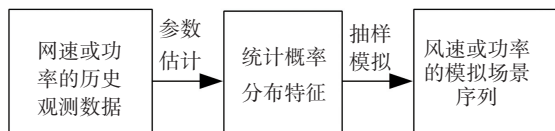


图1 风电功率模拟方法框图

Fig.1 Framework of wind power simulation method

有研究表明风速符合不同形式的韦伯分布,而实测的风电功率则不满足常见的概率分布形式,因此基于概率分布特性的抽样模拟方法大多采用风速的概率分布来推导风电功率的模拟场景序列。瑞利分布适用于绝大部分的风速统计特性^[4],计算公式为

$$f(v) = \left(\frac{2v}{c^2} \right) \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

因此本文采用式(1)所示的概率分布来表示风速的统计特性。对式(1)的反函数,在 $[0,1]$ 内进行随机抽样后代入风速-功率特性曲线便可以生成如图2所示的风电功率样本点。

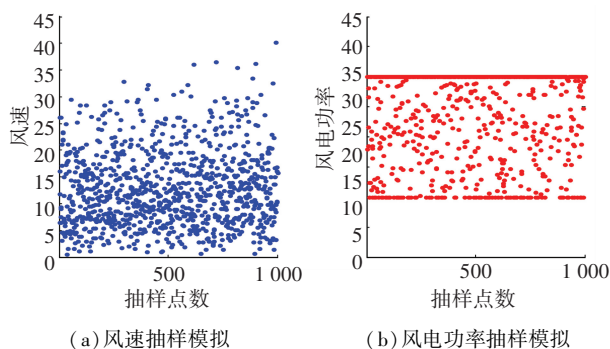


图2 风速和风电功率随机样本点

Fig.2 Random samples of wind speed and wind power

1.2 生成风电功率时间序列

通过对风速概率分布的随机抽样可以获得某个静态时段的风电功率样本点,但在具体的调度应用场合需要模拟风电功率的时间序列。如图3所示在已知各静态时段的风电功率样本点后,通过横向和纵向两个方向的扩展生成风电功率时间序列^[5]。

理论上通过枚举方法可以构造出描述所有可能场景的风电功率序列,但在实际的构造过程中风电功率时间序列的数目随着纵向样本点的数目和横向

扩展时段的数目呈指数形式迅速增加,因此数量庞大的样本点和过于精细的时段划分均不利于模拟生成风电功率序列,需要进行一定程度的削减。

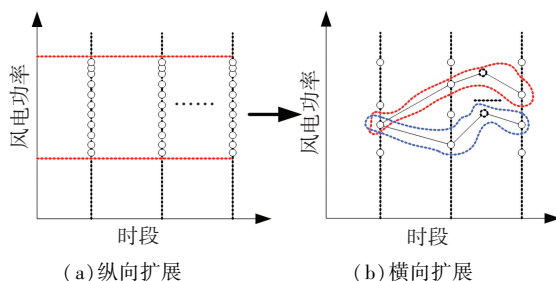


图3 风电功率时间序列构造示意

Fig.3 Construction schematic of wind power time series

尽管有各类风电功率场景削减技术,但对于中长期时间的尺度的调度规划问题,基于聚类思想的削减更为实用^[6]。纵向削减方面,首先利用聚类方法将随机抽样获得的静态风电功率样本点,简化为几类具有一定发生概率的代表性样本片段^[7]。对于图2所示的风电功率样本点可以按照可能出力大小将其出力分为 $0 \sim 20\%$, $20\% \sim 50\%$, $50\% \sim 80\%$, $80\% \sim 100\%$ 4类代表样本片段,其示意图和概率如图4所示,图中 p_1, p_2, p_3, p_4 为各段代表样本片段可能发生的概率。此时依据图3所示的风电功率序列构造示意图,利用随机抽样的方法对各调度时段可能出现的样本片段按照其发生的概率进行抽样,便可生成描述风电功率的可能场景。而对于一定地理区域内相距较近的多个风电场,依据风电功率间的相关系数进行抽样,可以得到考虑相关性的多组风电功率序列^[8]。

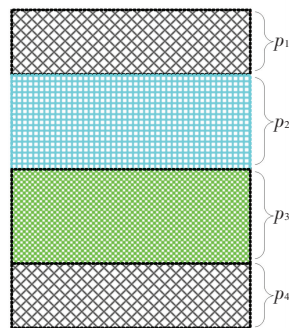


图4 风电功率的样本片段

Fig.4 Sample segment of wind power

2 协调电力市场和节能发电的月度机组组合模型

2.1 调度模式分析

中长期机组组合作为分层调度决策的重要内容,其核心是安排未来月份的电力、电量平衡,以系统的发电成本或能耗为目标优化机组的中长期出

力,获得发电机组的中长期启停方案,进而为日前发电计划的制定提供决策依据. 现阶段中国的月度机组组合主要受电力市场^[9]和节能发电调度^[10]等背景环境的限制.

1) 均衡调度模式. 电力市场的核心问题是电能交易,因此电力市场环境下的中长期机组组合以电能交易合同的执行情况为主要目标. 在中国初期电力市场环境下电网公司多以一定区域内发电机组具有相近的负荷率水平来确定机组的长期发电电量并以此电量为基础与各发电公司签订长期购电合同^[11]. 在具体的电力生产过程中,电网公司为履行购电合同,保证各发电公司长期购电合同公平有效的执行,大多采用三公原则为基础的均衡调度模式来平衡各发电公司的利益. 在初期电力市场环境下,均衡调度模式保证了各发电机组具有近似的利用小时数,相对公平地维护了各发电机组上网发电的权益. 但均衡调度模式并未对高污染、高排放的小机组和低污染、低排放的高效机组加以区别对待,此模式下各发电公司更关注其中长期购电合同的完成情况,而对某一天的具体出力计划并不特别关注. 对于生产相同的电量,高耗能机组和低耗能机组消耗的能源和排放的污染物有着较为明显的差别,因此单纯的均衡调度模式难以适应中国节能减排的整体要求.

2) 节能调度模式. 2007 年为提高电力工业能源使用效率,节约能源,减少环境污染,国务院出台的《节能发电调度办法(试行)》要求电网采用节能发电调度模式. 节能发电调度模式要求优先调度可再生能源发电,对传统火电机组按照能耗水平编制机组发电序位表,并以此序位表作为节能发电调度的主要依据. 图 5 为均衡调度模式和节能调度模式的对比示意图. 依据节能调度办法严格按照发电序位表依次加载或退出发电机组,可以保证系统消耗的能耗最小化,但与均衡调度模式相比,某些排在序位表末尾的高耗能火电机组的发电量会减少,有些机组甚至没有开机发电的机会,即节能调度模式下电网中长期发电计划从基于三公原则逐渐转变为基于差别电量原则. 因此从机组中长期发电量的角度考虑,节能调度模式可以理解为均衡调度模式下高耗能机组向低耗能机组转移其原有均衡发电量而形成的调度模式^[12].

2.2 协调电力市场和节能调度的机组组合

在实际调度中,低能耗机组大多是扩建、新建或技改的大容量机组,高能耗机组则以具有一定服役时间的中小型机组为主. 而且如表 1 所示为中国某省火电上网电价,其中“标杆电价”为 0.485 2 元/kWh. 在

中国上网电价“一机一价”和“标杆电价”并行的背景下,运行多年且完成折旧的老机组,已经没有了还本付息的压力,其上网电价往往低于现行的“标杆电价”,而“标杆电价”实行以前新建、尚未完成折旧(一般取 20 a 以下^[13])依然具有还本付息压力的机组,其上网电价往往又高于现行的“标杆电价”. 因此从电网公司购电成本的角度考虑,节能调度模式下高耗能机组向低耗能机组转移其原有均衡发电量时存在着一定的优化空间.

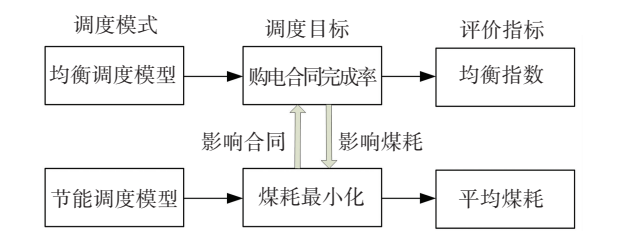


图 5 均衡调度模式和节能调度模式对比框图

Fig.5 Contrast between balanced and energy-saving dispatch

表 1 中国某省份火电上网电价

Tab.1 Thermal power feed-in-tariff of a province

发电机组编号	装机容量/MW	上网电价/(元/ kWh)
1 号	600	0.491 2
2 号	300	0.485 2
3 号	350	0.485 2
4 号	200	0.456 2

随着风能、太阳能等无调节能力的大规模可再生能源接入电力系统,系统的波动性显著增加. 目前对于中国大部分以火电机组为主的发电结构,需要依靠火电机组来调节可再生能源的波动性. 如果单纯从调节可再生能源波动性的角度考虑,电力系统采用大开机计划有利于增加系统可调节的备用容量,能够更有效的平抑系统的波动性,但过大的开机计划又有违现行的节能发电调度方法. 因此在初级电力市场和节能发电调度的双重背景约束下,为了合理优化含风电电力系统的中长期发电计划,本文采用如图 6 所示的综合调度模式.

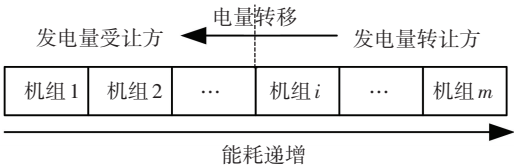


图 6 综合调度模式示意

Fig.6 Schematic diagram of integrated dispatch model

该综合调度模式以各机组的均衡发电电量为基础,首先依据节能发电调度的要求将系统内所有参与调度的机组按照能耗水平高低生成发电序位表,并以机组 i 作为分界机组将序位表中的机组分为发

电量受让方和发电量转让方两类. 其次在考虑风电接入和机组不同上网电价的前提下, 优化转让方向受让方转移的电量, 进而确定各个机组的差别发电量和开停机状态.

2.2.1 月度机组组合的计算粒度

日前发电计划大多选用 1 h 或 15 min 的计算粒度, 理论上通过扩展计算时段数月度机组组合模型可以选用与短期调度模型相同的计算粒度, 但相对于日发电计划月度机组组合是一个较长周期的计划, 若采用如此精细化的计算粒度, 一方面会严重制约计算效率和计算性能, 另一方面在长周期计划里面采用精细化的计算粒度, 对于实际生产缺乏指导意义^[14]. 同时在中长期时间尺度上, 风电等可再生能源无法通过预测方法有效获得, 只能通过随机模拟的方式来近似描述, 过于精细化的计算粒度将给场景模拟和场景削减带来严峻的挑战.

中国的月度发电计划主要是在给定计划月份总发电量的基础上优化各机组的月度电能计划和某日电能分解值, 并最终确定机组的组合方案^[15]. 中国大部分的火电机组最初是按照带基本负荷兼具调峰运行能力设计的, 其启停过程复杂、费用高昂, 且机组的启停次数受机组使用寿命的严格约束, 如表 2 所示为某汽轮发电机组采购技术协议中对给定次数下计算寿命消耗不大于 75% 的规定.

表 2 某汽轮发电机组计算寿命与启停次数有关规定
Tab.2 Designed start and stop number of a turbo generator unit

状态	状态说明	次数
冷态启动	停机 72 h 以上 (金属温度约低于该测点满负荷温度的 40%)	200
温态启动	停机 10~72 h 以内 (金属温度约低于该测点满负荷温度的 40% 至 80%)	700
热态启动	停机小于 10 h (金属温度约低于满负荷温度的 80%)	3 000
极热态启动	停机 1 h 以内 (金属温度仍维持或接近其满负荷值)	150

从表 2 中可以看出, 火电机组的 4 类启停次数与机组的计算寿命之间存在着明显的关系, 因此在考虑月度机组组合时不但要考虑火电机组的启停费用, 同时需要考虑机组的启停次数. 从火电机组的运行特性考虑, 理论上和实际应用中, 一天之内火电机组不宜两次启停, 否则得到的组合方案是不经济的, 因此采用日作为月度机组组合的优化时段较为适合^[14]. 但由于热态启动的停机时间要求小于 10 h, 如果选用日作为计算时段, 则机组在某日停机后又必须在当日开机, 无法有效分辨机组的热态启动, 为此本文综合考虑负荷峰谷平的特点和热态启

停时间小于 10 h 的要求在月度机组组合中考虑采用 8 h 间隔的计算时段. 采用 8 h 的计算时段可以基本上保证机组在第 t 个时段热态停机后, 在第 $t + 1$ 个时段进行热态开机, 并且月度机组组合的计算时段扩展为 90 个与选用 15 min 为间隔的日前发电计划具有相似的计算规模.

2.2.2 月度机组组合模型

1) 目标函数. 节能发电调度模式下为了追求系统整体能耗的最小化, 对于以火电机组为主的系统一般按照机组平均煤耗水平高低生成发电序位表安排发电, 因此为了符合节能发电调度办法, 本文在月度机组组合的目标函数中计及下式所示的机组煤耗水平.

$$F_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \omega_i s_{i,t} (w_{i,t} - u_i r_{i,t} + (1 - u_i) z_{i,t}).$$

(2)

式中: N 为参与调度机组的数目; T 为计算时段数; ω_i 为机组 i 的平均标准煤煤耗, g/kWh; $s_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的开停机标识变量, 开机状态 $s_{i,t} = 1$, 停机状态 $s_{i,t} = 0$; $w_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的发电电量, kWh; u_i 为机组 i 的转让电量标识变量, $u_i = 1$ 为机组 i 为电量出让方, $u_i = 0$ 则为机组 i 为电量受让方; $r_{i,t}$ 为机组 i 在第 t 个调度时段的出让电量; $z_{i,t}$ 为机组 i 在第 t 个调度时段的受让电量.

同时在中国现行上网电价机制下, 各类发电机组的上网电价尚未完全统一, 不同能耗水平的部分机组间存在着上网电价差, 因此本文在月度机组组合的目标函数中计及下式所示的电网公司购电成本.

$$F_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \mu_i s_{i,t} (w_{i,t} - u_i r_{i,t} + (1 - u_i) z_{i,t}).$$

(3)

式中 μ_i 为机组 i 的上网电价, 元/kWh.

月度机组组合会形成机组的启停方案, 而火电机组的启停费用高昂、启停次数受其设计使用寿命严格限制, 因此在目标函数中需要合理考虑机组的启停费用并对机组的启停次数进行合理优化. 在 4 类启动状态中冷态启动次数较为有限一般用于机组的计划检修、临时检修和事故停机等情况, 极热态启动不仅启动次数较为有限而且会对机组造成较为严重的影响, 因此本文在月度机组组合模型中重点考虑热态启动和温态启动两类启动状态.

$$F_3 = SC^{\text{hot}} + SC^{\text{warm}},$$

(4)

式中 SC^{hot} 为机组总的热态启动费用, SC^{warm} 为机组总的温态启动费用, 且有

$$\begin{cases} \text{SC}^{\text{hot}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \alpha_{i,t} \text{SC}_{i,t}^{\text{hot}}, \\ \text{SC}^{\text{warm}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \beta_{i,t} \text{SC}_{i,t}^{\text{warm}}. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\text{SC}_{i,t}^{\text{hot}}$ 为机组 i 在 t 时段热态启动的费用, 万元; $\text{SC}_{i,t}^{\text{warm}}$ 为机组 i 在 t 时段温态启动的费用, 万元; $\alpha_{i,t}$ 、 $\beta_{i,t}$ 分别为机组 i 在第 t 个调度时段热态启动和温态启动的状态变量, 用于反映机组的开机过程, 其表达式为

$$\begin{cases} \alpha_{i,t} = \begin{cases} 1, & s_{i,t} - s_{i,t-1} > 0, s_{i,t-1} - s_{i,t-2} < 0; \\ 0, & s_{i,t} - s_{i,t-1} \leq 0. \end{cases} \\ \beta_{i,t} = \begin{cases} 1, & s_{i,t} - s_{i,t-1} > 0, s_{i,t-1} - s_{i,t-2} = 0; \\ 0, & s_{i,t} - s_{i,t-1} \leq 0. \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

如前所述, 由于机组的热态启动一般要求小于 10 h, 当采用 8 h 间隔的计算时段时, 文中假设热态启停时机组 i 在 t 时段停机, 则在 $t+1$ 时段必须要开机, 因此热态启动费用采用固定值 SC_i^{hot} 来表示. 机组的温态启动一般要求大于 10 h 且小于 72 h, 其再次启动费用与机组的停机时间呈指数曲线, 因此温态启动费用为

$$\text{SC}_{i,t}^{\text{warm}} = \text{SC}_i^{\text{hot}} + \text{SC}_i^{\text{warm}} (1 - e^{-\frac{T_{i,t}^d}{\text{TAU}_i}}). \quad (7)$$

式中 SC_i^{hot} 为机组 i 的热启动成本; $\text{SC}_i^{\text{warm}}$ 为机组 i 温态启动的成本; $T_{i,t}^d$ 为机组 i 在第 t 个调度时段已经连续停机的时间; TAU_i 为机组 i 温态启动时的指数系数.

对于上述月度机组组合目标函数中的各分量, F_2 、 F_3 的量纲为元, 而 F_1 的量纲为 g. 为了统一目标函数中各分量的量纲, 将分量 F_1 乘以煤炭价格转变成与 F_2 、 F_3 相同的量纲, 此时月度机组组合的目标函数可以表示为

$$F = \gamma F_1 + F_2 + F_3, \quad (8)$$

式中 γ 为煤炭价格, 元/g.

2) 约束条件. 系统的发电电量平衡约束为

$$\sum_{i=1}^N w_i = w, \quad (9)$$

式中 w_i 为机组 i 的均衡发电电量; w 为计划月份总发电电量, 其中 w_i 表示为

$$\sum_{t=1}^T w_{i,t} = w_i. \quad (10)$$

并且在某个调度时段内机组的发电电量和机组的输出功率存在有

$$w_{i,t} = s_{i,t} P_{i,t} \Delta T, \quad (11)$$

其中 $P_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时段的输出功率; ΔT 为调度时间间隔.

系统的出力平衡约束为

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + \sum_{j=1}^M P_{j,t}^w = D_t. \quad (12)$$

式中 $P_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时段的输出功率; $P_{j,t}^w$ 为风电场 j 在 t 时段的输出功率; D_t 为 t 时段系统的负荷.

火电机组的出力上下限约束为

$$s_{i,t} P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq s_{i,t} P_i^{\max}, \quad (13)$$

式中 $P_i^{\min}$ 为机组 i 的最小出力限制; $P_i^{\max}$ 为机组 i 的最大出力限制.

火电机组的爬坡约束为

$$\begin{aligned} s_{i,t+1} P_{i,t+1} - s_{i,t} P_{i,t} &\leq \text{RU}_i, \\ s_{i,t} P_{i,t} - s_{i,t+1} P_{i,t+1} &\leq \text{RD}_i. \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $s_{i,t}$ 和 $s_{i,t+1}$ 要求等于 1, RU_i 为机组 i 在调度时段内的爬上能力, RD_i 为机组 i 在调度时段内的爬下能力.

系统最小备用容量约束为

$$\sum_{i=1}^N s_{i,t} P_i^{\max} \geq D_t + R_s + R_w, \quad (15)$$

式中 R_s 为系统的备用容量, R_w 为风电的备用容量.

温态启动时机组的启停时间约束:

$$\begin{cases} T_{i,t}^d - (s_{i,t} - s_{i,t-1}) T_{i,d} \geq 0, \\ T_{i,t}^u - (s_{i,t-1} - s_{i,t}) T_{i,u} \geq 0. \end{cases} \quad (16)$$

式中 $T_{i,t}^u$ 为机组 i 在第 t 个调度时段已经连续开机的时间; $T_{i,d}$ 、 $T_{i,u}$ 分别为机组 i 温态启停的最小停机时间和最小开机时间.

机组的启停次数限制表示为

$$\sum_{t=1}^T \alpha_{i,t} \leq N_i^{\text{hot}}, \quad (17)$$

$$\sum_{t=1}^T \beta_{i,t} \leq N_i^{\text{warm}}. \quad (18)$$

式中 N_i^{hot} 为机组 i 最大的热态启动次数, N_i^{warm} 为机组 i 最大的温态启动次数.

2.2.3 模型的求解

如上所述含风电的月度机组组合模型, 受风电功率不确定性的影响, 属于不确定规划范畴, 为了考虑风电功率的随机模拟场景本文采用随机期望值模型来处理模型中的不确定性^[16]. 此时第 2 部分中生成的各调度时段风电功率模拟场景及其期望值可以表示为如图 7 所示.

确定中、大型机组的机组启停时, 需要考虑启动耗量和各类技术限制, 混合整数规划方法是目前解决这类复杂问题的较常用的方法, 为此本文在 MATLAB 环境下利用 Yalmip 建模该模型并调用 Cplex 进行求解.

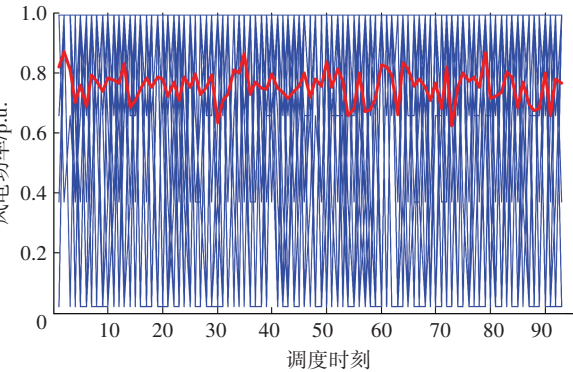


图7 风电功率模拟场景与期望值

Fig.7 Simulated scenarios and expectation of wind power

2.2.4 算例分析

本文采用 IEEE 118 节点系统进行算例分析,其中共有 186 条输电线路,54 台火电机组,91 个节点负荷. 系统中输电断面 15—33, 19—34, 38—30, 23—24 的传输容量为 200 MW. 测试系统中共有 54 台火电机组,依据机组优先顺序排序后,1~27 台机组作为电量受让方,28~54 台机组作为电量出让方. 在节点 13、14、16、17、61、62 分别接入有一个风电场,其中 13、14、16、17 接入的风电场属于同一区域具有相关性的风电场,61、62 接入的风电场属于另一区域具有相关性的风电场,利用 2.1 节介绍的风电功率建模方法得到风电场 13、14、16、17 的出力情况如图 8 所示,风电场 61、62 的出力情况如图 9 所示.

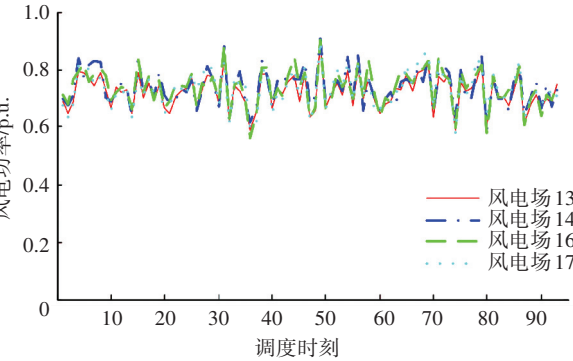


图8 风电场 13~17 的输出功率

Fig.8 Output power of wind farms 13~17

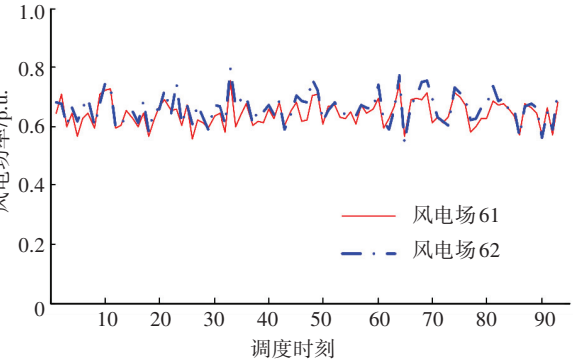


图9 风电场 61,62 的输出功率

Fig.9 Output power of wind farms 61,62

测试系统预测负荷的平均值为 4 047 MW,最大值为 5 577 MW,具有循环特征的预测负荷如图 10 所示.

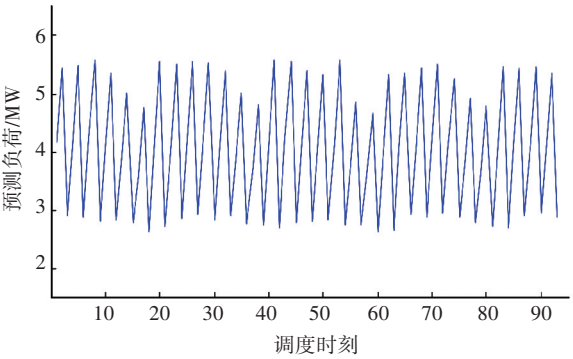


图10 118 节点测试系统的预测负荷

Fig.10 Forecasted load of IEEE 118 system

在 MATLAB 环境下利用 Yalmip 建模该调度模型并调用 Cplex 求解器进行求解. 在英特尔酷睿双核 2.0 GHz,2G 内存的计算机上计算时间为 182.6 s,此时目标函数值最优为 831 002 000 元,计算得到该模型目标函数的计算收敛过程如图 11 所示.

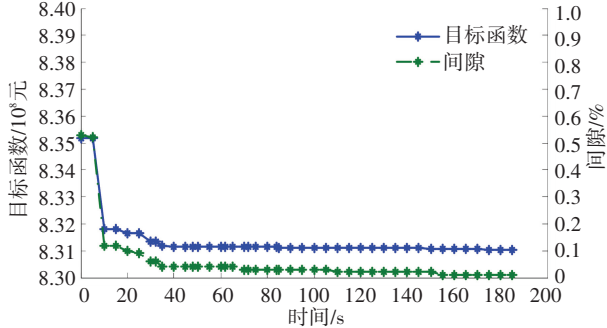


图11 模型目标函数的收敛过程

Fig.11 Convergence procedure of model

为了对比分析不同调度模式的结果,本文将协调调度模式与合同电量执行偏差最小为目标函数,追求各个发电机组合同执行电量均衡性的均衡模式^[14,17]和追求系统发电煤耗最小的节能发电模式^[10,18]进行对比分析.

同时为了分析不同情形下模型算法的鲁棒性,改变风电场数据后得到,协调电力市场和节能发电调度模型与均衡调度模式和节能发电调度模式的结果比较情况见表 3.

表3 不同调度模式下的结果比较

Tab.3 Results comparison of different dispatch model

调度模式	购电成本/ 万元	总煤耗/t	机组总启动 次数	机组总停机 次数
协调模式	11 327	958 070	332	348
	11 036	957 689	337	361
均衡模式	11 358	962 260	352	380
	11 231	961 386	354	386
节能发电模式	11 936	942 090	603	607
	11 685	940 895	625	624

从表 3 可以看出,综合考虑电力市场发电电量和节能调度要求的协调调度模型在降低机组开停机数目的情形下,可以较为有效协调系统的购电成本和总体煤耗,且在不同的风电出力情形下模型算法具有一定的鲁棒性。

3 结 论

1) 依据风电功率相关性分析结果模拟生成考虑尾部相关性和秩相关性的风电功率可能场景。

2) 依据模拟抽样的方法和聚类思想生成计及尾部相关特性的风电功率模拟场景。

3) 建立了协调“一机一价”、“标杆电价”的电价机制和节能发电优先序位表的月度机组组合模型。

4) 118 节点算例表明建立的机组组合模型以在降低机组启停次数的情况下,协调含风电系统的整体购电成本和总煤耗。

参考文献

- [1] VEMURI S, RANJIT A B, KUMAR D F, et al. Hackett fuel resource scheduling, part I: overview of an energy management problem[J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(7): 1542-1548.
- [2] 周明, 夏澍, 李琰. 含风电的电力系统月度机组组合和检修计划联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1586-1595. DOI: 10.13334/j.0258-8013.
- [3] ZHOU Ming, XIA Shu, LI Yan. A joint optimization approach on monthly unit commitment and maintenance scheduling for wind power integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1586-1595. DOI: 10.13334/j.0258-8013.
- [3] 张娜. 面向风电高不确定性的多周期机组组合研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [4] ZHANG Na. Multi-cycle unit commitment coping with high wind power uncertainty[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [4] ATWA Y M, EL-SAADANY E F, SALAMA M M A, et al. Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 360-370. DOI: 10.1109/TPWRS.2009.2030276.
- [5] 黎静华, 孙海顺, 文劲宇, 等. 生成风电功率时间序列场景的双向优化技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2544-2551. DOI: 10.13334/j.0258-8013.
- [5] LI Jinghua, SUN Haishun, WEN Jingyu, et al. A two-dimensional optimal technology for constructing wind power time series scenarios[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2544-2551. DOI: 10.13334/j.0258-8013.
- [6] SHUKLA A, SINGH S. Clustering based unit commitment with wind power uncertainty[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 211: 89-102. DOI: 10.1016/J.enconman.2015.12.40.
- [7] SUMAILI J, KEKO H, MIRANDA V. Clustering-based wind power scenario reduction technique[C]//17th Power System Computation Conference. Stockholm: Power System Computation Conference, 2011.
- [8] 季峰, 蔡兴国, 王俊. 基于混合 Copula 函数的风电功率相关性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 1-6. DOI: 10.7500/AEPS201208067.
- JI Feng, CAI Xingguo, WANG Jun. Wind power correlation analysis

- based on hybrid copula[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 1-6. DOI: 10.7500/AEPS201208067.
- [9] 张利. 电力市场中的机组组合理论研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
 - ZHANG Li. Studies on unit commitment in electricity market[D]. Jinan: Shandong University, 2006.
 - [10] 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(6): 27-33. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2011.06.010.
 - XIA Qing, CHEN Yuguo, CHEN Liang. Establishment of mode and method for energy-conservation monthly unit commitment considering dispatching[J]. Power System Technology, 2011(6): 27-33. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2011.06.010.
 - [11] 王良缘, 刘文彬, 方日升, 等. 基于多目标分组的中长期发电购电计划编制方法及应用[J]. 电网技术, 2011(6): 167-170. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2011.06.033.
 - WANG Liangyuan, LIU Wenbin, FANG Risheng, et al. A multi-objective clustering-based method to draft medium and long-term schedules for power generation and purchase and its application[J]. Power System Technology, 2011(6): 167-170. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2011.06.033.
 - [12] 章美丹, 谢俊, 黄民翔, 等. 基于差别电量的中长期发电调度分步模型[J]. 电力系统自动化, 2012(16): 42-46. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.16.008.
 - ZHANG Meidan, XIE Jun, HUANG Minxiang, et al. A two-stage medium and long term power dispatch model based on electricity quantities with differences[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012(16): 42-46. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.16.008.
 - [13] 陈育英. 火电企业固定资产折旧年限探析[J]. 财会通讯, 2011, 36(25): 67-68.
 - [14] 李莉莉, 管益斌, 耿建, 等. 月度安全约束机组组合建模及求解[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 27-31.
 - LI Lili, GUAN Yibin, GENG Jian, et al. Modeling and solving for monthly security constrained unit commitment problem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 27-31.
 - [15] 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.
 - ZHANG Huiqi, CHANG Yongji, TANG Dayong, et al. A monthly electric energy plan making method of thermal power generation unit in energy-saving generation dispatching mode[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 84-89.
 - [16] 刘宝锭, 赵瑞清, 王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
 - LIU Baoding, ZHAO Ruiqing, WANG Gang. Uncertain programming with applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
 - [17] 王岗, 李莉莉, 丁怡. 江苏电网中长期机组组合问题研究[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(2): 1-4.
 - WANG Gang, LI lili, DING Qia. Study on medium and long-term unit commitment for jiangsu power grid[J]. Jiangsu Electircal Engineering, 2012, 31(2): 1-4.
 - [18] 黎灿兵, 吕素, 曹一家, 等. 面向节能发电调度的日前机组组合优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 70-76. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.2012.16.010.
 - LI Canbing, LÜ Su, CAO Yijia, et al. A new method for day-ahead unit commitment based on energy-saving generation dispatching[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 70-76. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.2012.16.010.

(编辑 魏希柱)