

文章编号: 1673-5196(2018)02-0079-07

高载能负荷参与的集群风电场并网系统经济调度模式

张晓英¹, 廖 顺¹, 张蜡宝², 王 琨³, 陈 伟¹

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 南京大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210093; 3. 国网甘肃省电力公司 电力科学研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对传统调度模式已无法实现大规模风电并网系统的经济调度, 提出了将高载能负荷作为可调度资源并通过设置集群协调层与风电场进行统一调度的新调度模式. 新调度模式中, 集群协调层一方面响应调度中心的调度出力; 另一方面对群内的高载能负荷和风电场进行协调调度, 从而使调度系统达到协调最优点. 在所提调度模式上建立了系统经济调度的二层优化数学模型, 分别采用帝国竞争算法(ICA)和二进制粒子群优化算法对上层和下层模型求解. 算例仿真结果验证了所提调度模式和所建经济调度数学模型的正确性.

关键词: 高载能负荷; 集群协调层; 调度模式; 最优协调

中图分类号: TM71 文献标志码: A

Economic dispatch mode of grid connection system of clustered wind farms with high-energy load

ZHANG Xiao-ying¹, LIAO Shun¹, ZHANG La-bao², WANG Kun³, CHEN Wei¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. Electric Science Institute, State Grid Gansu Provincial Power Company, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aimed at the problem that the traditional scheduling mode has been unable to realize the economic dispatch of large-scale wind power grid connection system, a new scheduling mode is proposed, in which a high-energy load is taken as a scheduled resource and a cluster coordination layer is set to perform unified coordination of cluster coordination layer with wind farms. The cluster coordination layer, on the one hand, responds to the dispatch center scheduled output, and on the other hand conducts the coordinated scheduling of high-energy load with wind farms so that makes the scheduling system to achieve its optimum coordination. A bilayer optimization mathematical model of system economic dispatch is step up with the proposed scheduling mode and the upper and lower models are solved with imperialist competitive algorithm (ICA) and binary particle swarm optimization algorithm, respectively. The validity of proposed dispatch mode and mathematical model of economic dispatch is justified by the simulation result of a computational example.

Key words: high-energy load; cluster coordination layer; scheduling mode; optimum coordination

由于风电出力具有不确定性, 在其大规模并网时给电网调度带来了许多新问题, 比如, 一部分常规机组在风电出力波动较大的情况下不得不频繁启停, 从而增加了调度成本. 此外, 当有新的风电场并网时, 一方面调度中心必须改变调度系统原有的拓扑结构; 另一方面加大了调度人员的工作量. 因此, 研究风电场大规模并网后的新调度模式及新调度模

模式下的经济调度是有必要的. 现有的调度模式是通过常规发电机组提供足够的备用容量来弥补风力发电的不确定性, 这种调度模式加大了常规发电机组的成本, 难以实现电网的经济调度. 刘德伟等^[1]在短期经济调度模型中计及了由风电不确定性量化的风电成本. Lee^[2]修正了上、下旋转备用约束以应对风功率预测误差对系统的影响, 从而保证了系统经济可靠运行, 模型简单、实用. 王晓兰等^[3]建立了考虑风电场并网的短期经济调度多目标优化模型. 冯利民等^[4]将风电纳入到日前开机计划和日内电力电

收稿日期: 2016-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(51267012)

作者简介: 张晓英(1973-), 女, 四川仁寿人, 教授.

量平衡中. 白永祥等^[5]探讨了基于风电功率预测的风电场自动发电控制 (AGC) 方案和自动电压控制 (AVC) 方案. 以上研究均是在现有调度模式上进行优化, 并未改变调度模式本身.

传统理念认为投、切是负荷操作的主要形式, 负荷基本不参与电网的常规调节, 将负荷作为可控对象纳入电力系统控制是近几年研究的热点. 2003 年, 由美国牵头, 世界多国针对负荷侧参与电网调度做了大量的研究工作, 对部分高载能负荷进行了研究分析. Goemsa 等^[6]研究了面向长期和短期实时电价的高载能负荷响应模型. 在国内, 内蒙古乌海地区针对高载能负荷特性开展了研究, 并提出了初步的应对策略^[7]. 何桂雄等^[8]从电解铝、碳化硅、铁合金 3 种高载能负荷调节特性出发, 建立了高载能负荷参与风电调度的负荷模型. 上述研究主要是研究了高载能负荷参与电网调度的调度模型及调度成本, 少有文献建立高载能负荷参与风电并网系统经济调度的新调度模式.

本文在提出高载能负荷参与的风电并网系统经济调度新调度模式的同时建立了高载能负荷参与集群协调调度的成本函数. 在新调度模式中将高载能负荷作为一种可调度资源纳入到风电并网系统中, 并设置集群协调层对高载能负荷和风电场进行集群协调调度. 最后建立了高载能负荷参与的集群风电场并网系统经济调度的二层优化数学模型, 以使调度成本和集群协调层的收益到达协调最优.

1 高载能负荷参与的集群风电场并网系统经济调度模式

针对我国现阶段风电场的风电出力得不到充分利用的同时风电场附近的高载能负荷却由于电价过高不能大量生产这一问题, 本文设置集群协调层对风电场及其附近的高载能负荷进行协调调度. 集群协调层优先安排内部的风电场满足自身的需求再将多余的风电并网, 而在风电不能满足内部需求的情况下从电网购电.

1.1 集群协调层

1.1.1 风电集群调度

典型的风电集群接线图如图 1 所示^[9]. 将地理位置相同或者相近, 处于相同风力资源带, 具有相似的风电出力特性且在同一点并网的风电场集合称为风电集群^[10], 集群内风电场出力变化相关性强、同时率高, 具有独特的时空互补性^[11].

1.1.2 集群协调层的建立

集群协调层是根据风电集群系统建立的, 其中

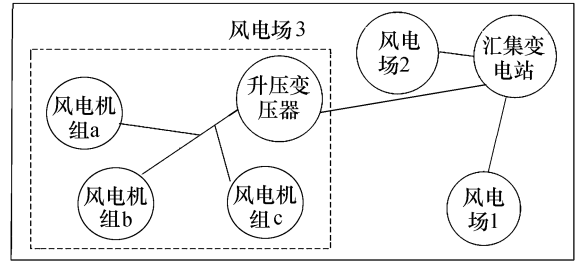


图 1 典型的风电集群接线图

集群协调层内的高载能负荷可以为零 (即协调层内只含有风电场). 相对风电集群, 本文所建立的集群协调层具有如下优点: 1) 可以充分利用风能. 由于高载能是集群协调层的内部需求, 集群协调层首先会安排其消纳内部的风电出力. 2) 可控性更高. 整合高载能负荷和集群协调层的特性可以将整个集群协调层视为一个蓄电池, 当电网向协调层购电时相当于蓄电池放电, 当协调层向电网购电时相当于蓄电池充电. 3) 高载能负荷的产量更优. 对于由电价因素引起的停产, 高载能企业可以根据新的电价安排生产.

1.1.3 调度模式

本文设置集群协调层对高载能负荷和风电场进行集群协调调度, 其高载能负荷参与的集群风电场并网系统经济调度模式如图 2 所示. 本调度模式下调度中心不用再面向单个风电场和高载能负荷, 只是面向集群协调层, 这使得调度中心的调度对象大大减少了, 从而提高了调度效率.

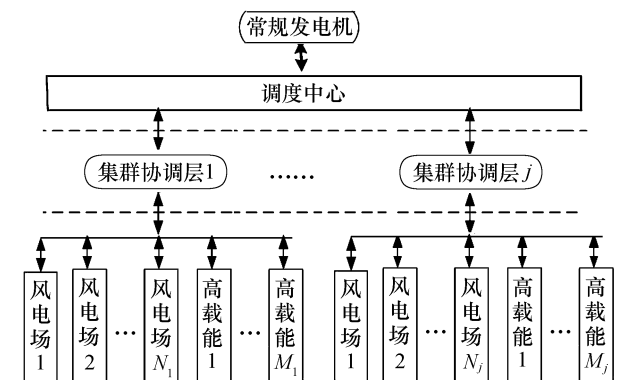


图 2 高载能负荷参与的集群风电场并网系统经济调度模式
Fig. 2 Economic dispatch mode of grid integration system clustered wind farms with high energy-bearing load

1.2 高载能负荷特性及调度模型

高载能负荷是指能源价值在产值中所占比例较大的负荷, 例如: 电解铝、铁合金、碳化硅等. 因为高载能负荷在生产过程中一般采用多条互不影响的生产线进行生产, 在负荷高峰时可以通过切除高载能负荷以降低电网的用电量, 在负荷低谷时期投入高载能负荷以增加电网的用电量. 在投切过程中是以

组为单位进行的,每次可以投切一组也可以投切多组,其投切容量可以表示为

$$P_{j,t} = \sum_{m=1}^{M_j} \left(\sum_{k=1}^{N_m} S_{jmk,t} P_{jmk} \right) \quad (1)$$

式中: $P_{j,t}$ 为集群协调层 j 在时段 t 内切除高载能负荷的容量; M_j 表示集群协调层 j 内高载能负荷的个数; N_m 表示高载能负荷 m 的可中断组数; $S_{jmk,t} = 1$ 表示集群协调层 j 内的第 m 个高载能负荷的第 k 组在时段 t 切除; $S_{jmk,t} = 0$ 表示集群协调层 j 内的第 m 个高载能负荷的第 k 组在时段 t 投入; P_{jmk} 表示集群协调层 j 内的第 m 个高载能负荷的第 k 组的容量。

2 高载能负荷参与的集群风电场并网系统经济调度的数学模型

考虑到集群协调层在响应调度中心调度出力的同时也对群内的高载能负荷和风电场进行协调调度,本文建立了二层优化模型。

2.1 上层优化模型

2.1.1 目标函数

上层以实现电网调度系统的效益最大为目标,其数学表达式为

$$\min F = F_G - F_{XG} \quad (2)$$

$$F_G = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} U_{Gi,t} [\alpha_i (P_{Gi,t})^2 + \beta_i P_{Gi,t} + \gamma_i] + U_{Gi,t} (1 - U_{Gi,t-1}) [\phi_{0i} + \phi_{1i} (1 - e^{\tau/\tau_i})] \quad (3)$$

$$F_{XG} = \sum_{j=1}^J C_{XGj} \quad (4)$$

式中: F_G 为常规发电机组的发电成本,由运行成本和启停成本组成; F_{XG} 表示集群协调层的总收益; C_{XGj} 表示集群协调层 j 的收益,同时也为下层优化模型的目标函数; J 表示集群协调层的个数; T 为调度周期; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 为常规发电机组的运行成本参数; $U_{Gi,t}$ 表示常规发电机组的启停状态, $U_{Gi,t} = 1$ 表示开机, $U_{Gi,t} = 0$ 表示关机; $\phi_{0i}, \phi_{1i}, \tau_i$ 表示常规发电机组 i 的启停成本参数; τ 表示常规机组的停机时间; N_G 表示常规发电机组的个数; $P_{Gi,t}$ 表示常规发电机组 i 在时段 t 的有功出力。

2.1.2 约束条件

1) 系统功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_G} U_{Gi,t} P_{Gi,t} + \sum_{j=1}^K P_{XGj,t} = P_{L,t} \quad (5)$$

式中: $P_{XGj,t}$ 表示集群协调层在时段 t 的有功出力,当其大于零时表示集群协调层卖电给电网,当其小于零时表示集群协调层从电网购电; $P_{L,t}$ 表示 t 时段

调度系统的常规负荷。

2) 集群协调层的出力约束. 集群协调层作为一个整体参与电网调度可以表现出电源和负荷两种外特性,其调度出力范围是从负到正的一个可控区间,且不同时间段的调度出力的上下限是不相同的. 其调度出力范围可表示为

$$P_{XGj,t,\min} \leq P_{XGj,t} \leq P_{XGj,t,\max} \quad (6)$$

式中: $P_{XGj,t,\min}$ 为 t 时段集群协调层 j 在保证风电消纳时预测出力的下限; $P_{XGj,t,\max}$ 为 t 时段集群协调层 j 预测出力的最上线。

集群协调层的出力上限表示如下:

$$P_{XGj,t,\max} = P_{XGj,t} - \sum_{m=1}^{M_j} P_{XGjm,t,\min} \quad (7)$$

式中: $P_{XGj,t}$ 为 t 时段集群协调层 j 内部所有风电场的预测出力; $P_{XGjm,t,\min}$ 表示 t 时段集群协调层 j 内部的高载能负荷 m 的最小用电量。

集群协调层的出力下限表示如下:

$$P_{XGj,t,\min} = P_{XGj,t} - \sum_{m=1}^{M_j} P_{XGjm,t,\max} \quad (8)$$

式中: $P_{XGjm,t,\max}$ 为 t 时段集群协调层 j 内部的高载能负荷 m 的最大用电量。

3) 常规发电机组的出力约束条件:

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max} \quad (9)$$

式中: $P_{Gi,\max}$ 和 $P_{Gi,\min}$ 分别为常规发电机组 i 出力的上、下限。

4) 系统备用容量约束条件:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_G} U_{Gi,t} (P_{Gi,t} - P_{Gi,t,\min}) \geq R_{G,t,\text{down}} + R_{XG,t,\text{down}} \\ \sum_{i=1}^{N_G} U_{Gi,t} (P_{Gi,t,\max} - P_{Gi,t}) \geq R_{G,t,\text{up}} + R_{XG,t,\text{up}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $R_{G,t,\text{up}}$ 和 $R_{G,t,\text{down}}$ 分别为在 t 时段应对负荷预测误差所需的正负旋转备用容量; $R_{XG,t,\text{up}}$ 和 $R_{XG,t,\text{down}}$ 分别为在 t 时段应对集群协调层预测误差所需的正负旋转备用容量。

5) 常规机组的爬坡速率约束条件:

$$\begin{cases} U_{Gi,t} P_{Gi,t} - U_{Gi,t-1} P_{Gi,t-1} \leq P_{Gi,\text{up}} \\ U_{Gi,t-1} P_{Gi,t-1} - U_{Gi,t} P_{Gi,t} \leq P_{Gi,\text{down}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{Gi,\text{down}}$ 和 $P_{Gi,\text{up}}$ 分别为常规机组 i 在单位时间内下限和上限的最大爬坡速率。

6) 常规机组启停时间约束:

$$T_{\text{on},i,t} \geq T_{\text{on},i,\min}, \quad T_{\text{off},i,t} \geq T_{\text{off},i,\min} \quad (12)$$

式中: $T_{\text{on},i,t}$ 和 $T_{\text{off},i,t}$ 分别为常规机组 i 在时段 t 的运行和停运持续时间; $T_{\text{on},i,\min}$ 和 $T_{\text{off},i,\min}$ 分别为常规机

组 i 的最小运行和停运持续时间.

2.2 下层优化模型

在确定集群协调层的调度出力后,集群协调层再根据自身利益最大对群内的高载能负荷的投切量进行二次优化并安排群内风电场的调度出力. 本文对集群协调层内的单个风电场的出力分配不做详细分析,只研究集群协调层的整体出力和高载能负荷在各时段的投切量.

2.2.1 目标函数

二次优化过程中,其目标函数的数学表达式为

$$\max C_{XGj} = \sum_{t=1}^T (\lambda_{j,t} P_{XGj,t} + r_{j,t} P_{XGj0,t}) - \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{k=1}^{N_m} \nu_{j,t} S_{jmk,t} P_{jmk} \quad (13)$$

式中: $P_{XGj0,t}$ 为 t 时段集群协调层 j 内部安排给高载能负荷的用电量; $r_{j,t}$ 为 t 时段集群协调层 j 卖电给高载能负荷的价格; $\nu_{j,t}$ 为 t 时段高载能企业用电量减少所得到的补偿与从集群协调层购电价格之和; $\lambda_{j,t}$ 为 t 时段集群协调 j 与电网进行电能买卖的价格,当 $P_{XGj,t}$ 大于 0 时 $\lambda_{j,t}$ 为集群协调层卖电给电网的价格,当 $P_{XGj,t}$ 小于 0 时 $\lambda_{j,t}$ 为集群协调层从电网买电的价格.

2.2.2 约束条件

1) 集群协调层 j 功率平衡约束为

$$P_{XGj,t} + P_{XGj0,t} = P_{XGjf,t} + \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{k=1}^{N_m} (1 - S_{jmk,t}) P_{jmk} \quad (14)$$

式中: $P_{XGjf,t}$ 表示集群协调层 j 在时段 t 的风电场有功出力.

2) 风电场出力约束为

$$P_{XGjf,t} \leq P_{XGj,t} \quad (15)$$

3) 投切次数约束为

$$0 \leq \sum_{t=1}^T |S_{jmk,t} - S_{jmk,t-1}| \leq W_{jmk} \quad (16)$$

4) 常规机组启停时间约束为

$$T_{on,j,m} \geq T_{on,j,m,\min}, \quad T_{off,j,m} \geq T_{off,j,m,\min} \quad (17)$$

式中: $T_{on,j,m}$ 和 $T_{off,j,m}$ 分别为集群协调层 j 内的高载能负荷 m 在时段 t 的投入和切除持续时间; $T_{on,j,m,\min}$ 和 $T_{off,j,m,\min}$ 分别为集群协调层 j 内的高载能负荷 m 的最小投入和切除持续时间.

3 优化算法

本文采用二层优化模型建立高载能负荷参与的集群风电场并网系统经济调度的数学模型,在求解过程中分为对上层模型和下层模型的求解.

3.1 上层模型的求解

杨楠等^[12]采用帝国竞争算法进行求解,但是他们没有考虑建立集群协调层以优化风电的整体出力. 同时文献只是对基本步骤做了简单的介绍,没有详细介绍求解过程中用到所建数学模型的公式.

在本文建立的经济调度模型中,上层优化模型的已知量包括集群协调层的预测出力、常规负荷的预测曲线和常规发电机组的运行参数,待求量为常规发电机组的启停状态及出力大小和集群协调层的出力大小. 结合文献^[13]对 ICA(imperialist competitive algorithm) 的介绍,其利用在本文的上层优化模型求解过程中包括帝国的形成、吸收殖民地、帝国的竞争、帝国的灭亡 4 个主要环节.

1) 帝国的形成

由 D 维变量组成国家 $country = [X_1, X_2, \dots, X_D]$. 在本文的数学模型下每个国家的维数为常规发电机组的个数与集群协调层的个数之和,其表达式如下:

$$X_d = [P_{G1,t}, P_{G2,t}, \dots, P_{GN_G,t}; P_{XG1,t}, P_{XG2,t}, \dots, P_{XGJ,t}] \quad (18)$$

前面部分为常规机组的调度出力,当其对对应值为 0 时,常规机组处于停止状态;当其对应的值大于 0 时,常规机组处于运行状态. 后面部分为集群协调层的调度出力,当其值大于 0 时,表示电网向集群协调层购电;当其值小于 0 时,表示电网向集群协调层售电.

在计算第 d 个国家的权利表达式时,首先要计算其函数值 f_d . f_d 的计算步骤如下:

首先将初始形成的第 d 个帝国的集群调度出力反馈给下层模型,下层模型根据计算结果结合式(13)计算出式(4)的值;其次,上层模型根据第 d 个帝国的常规发电机组出力计算出式(3)的值;最后,根据式(3,4)计算出式(2)的值,即第 d 个国家的函数值 f_d . 第 d 个国家的权利表达式为

$$P_d = \left| \frac{f_d - \max(f_1, f_2, \dots, f_D)}{\sum_{z=1}^D (f_z - \max(f_1, f_2, \dots, f_D))} \right| \quad (19)$$

根据权力的大小将权力大的国家作为帝国,其余国家作为殖民地并从中随机选择相应的个数分配给对应的帝国.

2) 吸收殖民地

帝国吸收周边的殖民地, c 为殖民地移动的距离,其表达式为 $c \sim U(0, \delta \times s)$, δ 为大于 0 的常数, s 为殖民地与帝国之间的距离. θ 为殖民地的移动方向,其表达式为 $\theta \sim U(-\psi, \psi)$, ψ 为移动方向夹角参数. 在整个吸收殖民地过程中,再根据步骤 1 的方式

计算帝国和殖民地的权利,如出现帝国的权利小于殖民地的权利,则殖民地与帝国互换。

3) 帝国的竞争

帝国 d 的总权利表达式如下:

$$p_d = | (f_d + \sigma \times f_{da}) - \max(f_z + \sigma \times f_{d1}, \dots, f_z + \sigma \times f_{db}) | \quad (20)$$

式中: p_d 为第 d 个帝国的总权利; σ 为权重参数. 从总权利最小的帝国中随机选择若干个弱小的殖民地,按一定的比例分配给其他帝国。

4) 帝国的灭亡

帝国之间通过竞争后,权力小的帝国的殖民地被权力大的帝国所吸收,当一个帝国所有的殖民地都被其他帝国所吸收后,帝国灭亡. 当只剩下一个帝国时算法停止,输出结果. 否则,返回步骤 2。

3.2 下层模型的求解

在下层模型优化过程中的已知量有常规发电机组的调度出力、集群协调层的调度出力、集群协调层的内部参数,待求量为集群协调层内的高载能负荷的投、切情况,是一个只包含 0~1 的离散化模型. 为了提高求解速度,采用参数设置少、收缩速度快的二进制粒子群算法。

在二进制粒子群算法中,粒子位置向量中的分量取值为 0 或 1,并由其相应的速度决定,其更新公式如下:

$$v_i^{\zeta+1} = \omega v_i^{\zeta} + e_1 r_1 (p_{best}^{\zeta} - x_i^{\zeta}) + e_2 r_2 (g_{best}^{\zeta} - x_i^{\zeta}) \quad (21)$$

$$x_i^{\zeta+1} = x_i^{\zeta} + l v_i^{\zeta} \quad (22)$$

式中: ζ 为迭代次数; v 为收缩速度; e_1 和 e_2 分别为个体和整体学习因子; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 的随机常数; p_{best}^{ζ} 为个体最优极值; g_{best}^{ζ} 为全局最优极值; l 为约束因子。

在利用粒子群优化算法对下层模型求解时,结合式(1)可得在时段 t 时高载能负荷投、切情况的编码公式:

$$P_S = [S_{111} \dots S_{11N_1}, \dots, S_{1M_1 1} \dots S_{1M_1 N_{M_1}}; \dots; S_{j11} \dots S_{jmk}, \dots, S_{jM_j 1} \dots S_{jM_j N_{M_j}}; \dots; S_{J11} \dots S_{J1N_{M_j}}, \dots, S_{JM_j 1} \dots S_{JM_j N_{M_j}}] \quad (23)$$

式中: P_S 为电网系统内高载能负荷的投入情况; S_{jmk} 为集群协调 j 层内的第 m 个高载能负荷的第 k 组,其中集群协调 j 层一共有 M_j 个高载能负荷,第 M_j 个高载能负荷共有 N_{M_j} 组。

在整个优化过程中常规机组的优化调度出力是以集群协调层的预测出力为前提,而集群协调层对内部风电场和高载能负荷的优化则是在常规机组和集群协调层的调度出力确定后进行,所以在计算过

程中需要多次迭代才能得到全局最优解。

3.3 算法流程图

采用帝国竞争算法和粒子群算法中的二进制算法相混合的混合智能算法对本文提出的二层优化数学模型进行求解,其具体流程如图 3 所示。

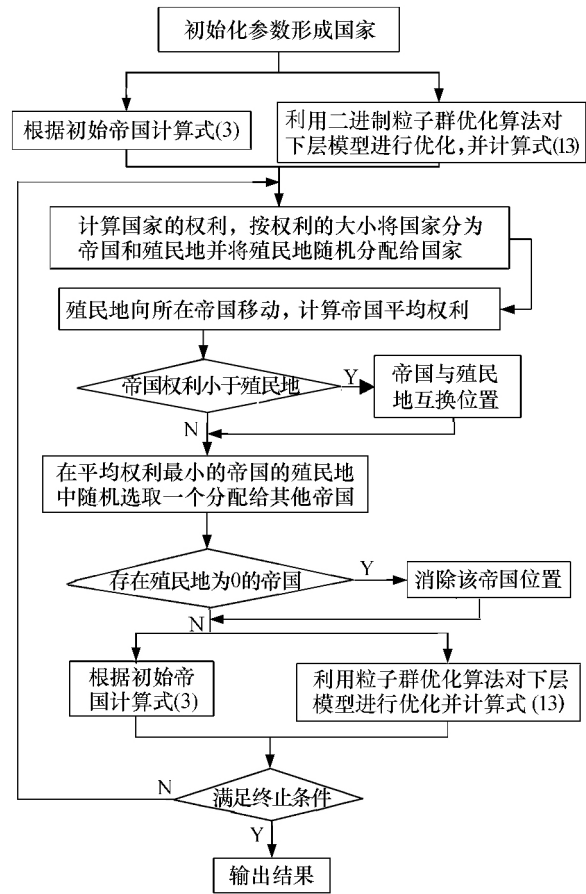


图 3 源荷协调二层优化模型的求解流程

Fig. 3 Flow-chart of solution with bilayer source-load coordination optimal model

4 算例分析

本文算例中一共有 10 台常规发电机组(具体参数如表 1 所示)和 2 个集群协调层,其中集群协调层 1 内包含高载能负荷,高载能负荷的调节参数如下:所在位置为 1,投切组数为 4,每组容量为 30 MW,最大投切容量为 120 MW,最小投切容量为 0,补偿价格为 1 000 元/(组·h⁻¹),最小运行时间为 3 h,最小停运时间为 2 h,最大投切次数为 5. 集群协调层 2 没有高载能负荷. 同时规定常规发电机组 unit1、unit3 和 unit4 具有爬坡速率并且三台机组的上升和下降爬坡速率均为 40 MW/h. 系统常规负荷预测曲线和风电集群有功输出预测曲线分别如图 4 和图 5 所示,在算例中 $P_{XGj0,t}$ 取为高载能负荷的最大值. 在参数设置中,ICA 的参数为:国家为 150,帝

表 1 常规电源调节参数

Tab. 1 Adjustment parameters of conventional power supply

unit	P_{max}	P_{min}	$\alpha_i/10^{-3}$	β_i	γ_i	ψ_{0i}	ψ_{1i}	$T_{on,i,min}$	$T_{off,i,min}$	τ_i
1	455	150	0.48	16.19	1 000	9 000	4 500	8	8	4
2	455	150	0.31	17.26	970	10 000	4 500	8	8	4
3	130	20	2.00	16.60	700	1 100	550	5	5	2
4	130	20	2.11	16.50	680	1 200	560	5	5	2
5	162	25	3.98	19.70	450	1 800	900	6	6	2
6	80	20	7.12	22.26	370	340	170	3	3	2
7	85	25	0.79	27.74	480	520	260	2	2	2
8	50	10	4.13	25.92	660	60	30	1	1	1
9	50	10	2.22	27.27	665	60	30	1	1	1
10	50	10	1.73	27.97	670	60	30	1	1	1

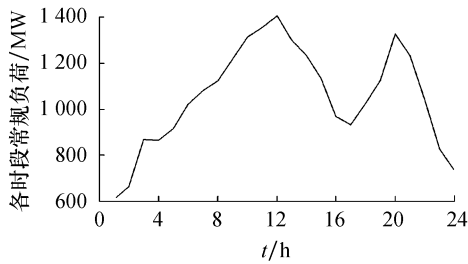


图 4 系统常规负荷预测曲线

Fig. 4 Prediction curve of system conventional load

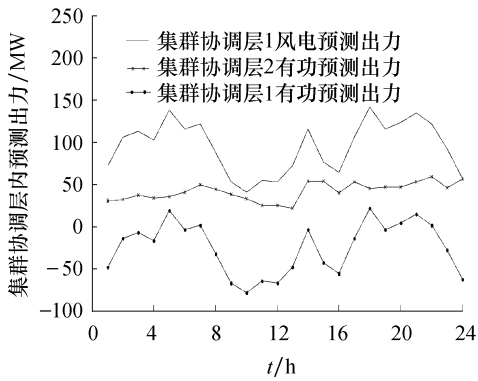


图 5 集群协调层内的出力预测曲线

Fig. 5 Output prediction curve of cluster coordination layer

国为 10, $\delta=1.75, \sigma=0.2, \psi=\pi/2$. 粒子群优化算法的参数为: $e_1=e_2=2, w=0.65, \zeta=50, l=1$.

4.1 常规发电机组调度出力

在分析常规机组调度出力时是通过将传统调度模式与本文所提调度模式的调度结果进行对比,其对应的调度出力如图 6 和图 7 所示.

对图 6 分析可知,在现有调度模式下常规发电机组 unit7、unit8、unit9 和 unit10 只有在负荷高峰时段才具有调度出力,其调度出力是不连续的且出力时间段少,比如:机组 unit7、unit8、unit9 和 unit10 中出力时间最长的机组 unit8 也只有 5 个时间段.当设置集群协调层对高载能负荷和风电场进行集群协调调度后常规发电机组 unit7、unit8、unit9 和 unit10 在调度的 24 个时段调度出力都为 0. 这是因

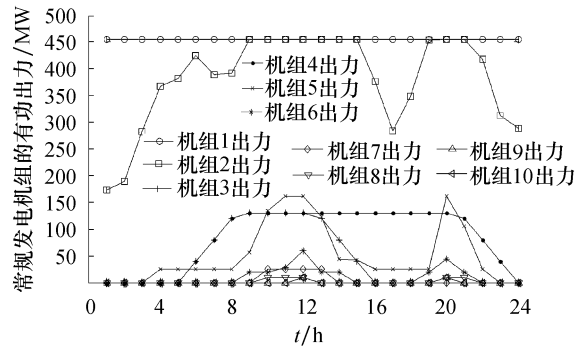


图 6 传统调度模式下的常规发电机组出力

Fig. 6 Output of conventional power generation units with traditional dispatch mode

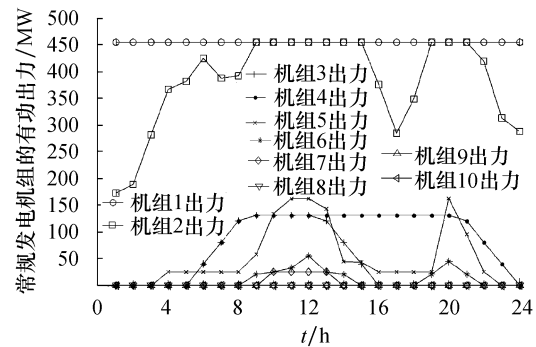


图 7 本文调度模式下的常规发电机组调度出力

Fig. 7 Dispatched output of conventional power generation unit with dispatch mode presented in this paper

为在高载能负荷不参与调度时调度中心只能以常规发电机组的装机容量作为调度系统的备用容量,因此在负荷高峰时段调度中心只能启动相应机组以满足负荷用电量的需求,这使得一部分常规发电机组不得不频繁启停.设置集群协调层后在负荷高峰时段调度中心可以根据集群协调层的出力约束条件调度集群协调层的出力以减少常规发电机组的出力,集群协调层在风电不能满足调度出力的情况下可以通过切除高载能负荷以减少高载能负荷的用电量,从而增加了协调层输出的有功功率或者减少了协调层从系统的购电量.

4.2 高载能负荷投切情况

高载能负荷的用电量如图 8 所示. 从图 8 中可以看出一共在 5 个时段切除了高载能负荷, 其中在时段 12 切除了 2 组高载能负荷. 结合负荷预测曲线和常规机组的调度出力可知, 在现有调度模式下的负荷高峰时段调度中心只有启动新的机组以满足负荷的增加, 当设置集群协调层对高载能负荷和风电场进行集群协调调度后在负荷高峰时段调度中心可以多调度集群协调层的出力以促使集群协调层切除内部的一部分高载能负荷, 从而减少整个调度系统的用电量.

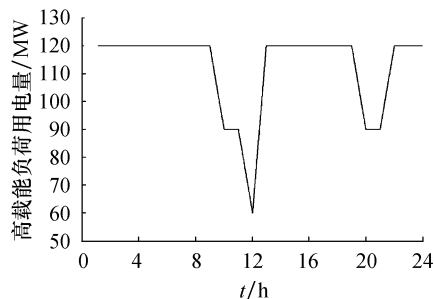


图 8 高载能负荷投切情况

Fig. 8 Putting-cutting condition of high energy-bearing load

4.3 成本分析

系统调度成本如表 2 所示, 对表 2 分析可知采用本调度模式时切除高载能负荷所产生的成本为 5 000 元, 但总的调度成本减少了 8 227 元, 其原因是高载能负荷发挥了其可调度效益, 使常规发电机组运行在更经济的出力水平之下. 总而言之, 设置集群协调层对高载能负荷和风电集群进行集群调度后, 以增加高载能负荷的补偿成本为代价, 换取常规机组运行在更经济的出力水平下, 最终降低整个调度系统的调度成本.

表 2 系统调度成本

Tab. 2 System scheduling cost

调度模式	常规机组发电成本/元	高载能负荷补偿成本/元	总成本/元
常规	516 292	0	516 292
本文	503 065	5 000	508 065

5 结论

1) 本文所建调度模式充分考虑了风电的不确定性和高载能负荷的可控性, 通过设置集群协调层对高载能负荷和风电场进行集群协调调度, 建立高载能负荷参与的集群风电场并网系统经济调度模

式, 新的调度模式充分体现了高载能负荷参与电网调度的经济性, 使电网调度获得了较大经济效益.

2) 新的调度模式使得电网调度的拓扑结构变得简单明了. 当有新的风电场并网和高载能负荷建立时将其并入相应的集群协调层内, 调度中心也不用变更调度的拓扑结构及更新操作系统, 这是因为虽然有新的风电场和高载能负荷并网, 但并没有改变系统的结构只是改变了集群协调层的内部结构.

3) 集群协调层的设置大大减少了调度人员的工作量. 调度人员只需将调度信息通知相应的集群协调层, 而不用像现有调度模式这样通知每个风电场和高载能负荷.

参考文献:

- [1] 刘德伟, 郭剑波, 黄越辉, 等. 基于风电功率概率预测和运行风险约束的含风电场电力系统经济调度 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 9-15.
- [2] LEE T Y. Optimal spinning reserve for a wind-thermal power system using PSO [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1612-1621.
- [3] 王晓兰, 解 骞, 智 勇. 考虑风电场并网的电力系统短期多目标经济调度 [J]. 兰州理工大学学报, 2012, 38(5): 82-86.
- [4] 冯利民, 范国英, 郑太一, 等. 吉林电网风电调度自动化系统设计 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 39-43.
- [5] 白永祥, 房大中, 朱长胜, 等. 内蒙古电网风电场调度管理技术支持系统设计与应用 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 86-90.
- [6] GOMESA, ANTUNES C H, MARTINS A G. A multiple objective decision support model for the selection of remote load control strategies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 865-872.
- [7] 董志平, 关 勇, 王树一. 乌海地区高耗能负荷特性的分析及其抑制对策 [J]. 内蒙古电力技术, 2004(2): 33-34.
- [8] 何桂雄, 曹年林, 蒋利明, 等. 风电富裕地区高载能负荷参与电网调峰研究 [J]. 可再生能源, 2015, 33(4): 491-496.
- [9] 林 俐, 朱晨宸, 郑太一, 等. 风电集群有功功率控制及其策略 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 9-16.
- [10] 行 舟, 李雪明, 陈振寰, 等. 甘肃酒泉大型集群风电有功智能控制系统的开发 [J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(1): 48-52.
- [11] 肖创英, 汪宁渤, 陟 晶, 等. 甘肃酒泉风电出力特性分析 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 64-67.
- [12] 杨 楠, 王 波, 刘涤尘, 等. 考虑柔性负荷调峰的大规模风电随机优化调度方法 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 231-238.
- [13] MOGHIMI H M, VAHIDI B. A solution to the unit commitment problem using imperialistic competition algorithm [J]. IEEE Transactions on Power System, 2012, 27(1): 117-124.