一种风电集群分层模型预测控制策略研究

王海军，王磊

（内蒙古能源发电投资集团有限公司电力工程技术研究院，内蒙古 呼和浩特 010060）

摘要：针对分布式风电场大规模风电集群（WPC）在电力系统并网中存在的有功功率调度与控制问题，提出了一种基于动态电力调度的分层模型预测控制（HMPC）策略。首先，将调度框架分为日内调度、实时调度、集群优化和风电场调制四个层次，使得风电调度具有精细的时间尺度。其次，利用下行旋转和传输路径最大限度地提高风电场调制层的风电输出，并通过数值特征方法进行分层分析，提高优化模型中风电预报数据的准确性。最后，利用真实风电场数据进行仿真实验，验证所提控制策略的有效性。实验结果表明，所提HMPC策略能充分利用风电集群的多个时间尺度和适应因子的预测信息，能有效提高风力发电集群传输路径的利用率，提高了风电的可容纳空间和调度的准确性。

关键词：风电集群；模型预测；有功功率；分层模型；风电场

中图分类号：TM73　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.19457/j.1001-2095.dqcd22576

Research on a Hierarchical Model Predictive Control Strategy of Wind Power Cluster

WANG Haijun，WANG Lei

（*Electric Engineering Technology Research Institute of Inner Mongolia Energy Power Investment Group Co.*，*Ltd.*，*Hohhot* 010060，*Nei Monggol*，*China*）

Abstract: Aiming at the problem of active power dispatch and control in the grid-connected power system of large-scale wind power clusters（WPC）of distributed wind farms，a hierarchical model predictive control（HMPC）strategy based on dynamic power dispatch was proposed. Firstly，the dispatch framework was divided into four levels：intraday dispatch，real-time dispatch，cluster optimization and wind farm modulation，so that wind power dispatch could have a fine time scale. Secondly，the downstream rotation and transmission path were used to maximize the wind power output of the wind farm modulation layer，and the numerical feature method was used to perform layered analysis to improve the accuracy of the wind power forecast data in the optimization model. Finally，simulation experiments were conducted using real wind farm data to verify the effectiveness of the proposed control strategy. Experimental results show that the proposed HMPC strategy can make full use of the forecast information of multiple time scales and adaptation factors of wind power clusters，effectively improve the utilization of wind power cluster transmission paths，and improve the accommodating space of wind power and the accuracy of dispatching.

Key words: wind power cluster（WPC）；model prediction；active power；hierarchical model；wind farm

近年来，随着国家大力推进可再生能源的利用与发展，风力发电已经受到越来越多的关注[1]。然而，由于风能资源本身的间歇性特点，在风力发电中容易产生不确定性，对电力系统的稳定运行和调度造成不良影响[2-3]。另外，由于风力发电集群（wind power cluster，WPC）拥有多个风电场，并通过输电线路与电网相连，更增加了电力系统的调度难度[4]。

为此，针对风电系统并网中存在的有功功率调度与控制问题，国内外众多专家学者开展了大量研究[5]。文献[6]提出了一种风电集群有功功率多时间尺度协调调度方法，该方法基于方差-协

基金项目：内蒙古自治区科技厅项目（JJKH20190976KJ）；内蒙古能源发电投资集团资助项目（2020001-02）

作者简介：王海军（1975—），男，硕士，高级工程师，Email：he20100813008@sina.com

方差变权重组合预测模型对风电功率进行预测，采用模型预测控制技术进行风电集群有功功率有限时域滚动优化和实时反馈校正，可有效提高风电集群有功功率的调度精度和平稳性，但随着风电并网容量的不断增大，方差-协方差分布存在预测精度不足的问题。文献[7]提出了一种基于风电机组多时空尺度协调的分层控制策略，可有效增加风电容量，提高风电预测精度，并改进有功调度方法。文献[8]提出了一种含风电集群的多区域互联系统自动增益控制（automatic gain control，AGC）方法，利用风电场的备用容量，实现风电场参与AGC控制，减少常规电源调频压力，以提高风电预测和控制精度，但上述方法未讨论风电机组之间的调度问题，其应用范围有限。文献[9]提出了一种基于功率波动时间相关性的随机模型预测控制方法，以风电集群日内调度曲线为参考，建立各风场功率缺额期望最小的风场实时控制策略，能够更准确地反映风电的波动特性，可有效提高对大规模风电的消纳能力。文献[10]提出了一种考虑风电预测误差的风电机组调度方法，通过解决闭环最优控制问题，减少未来输出与参考轨迹之间的偏差，但上述方法对常规机组和风电机组的有功功率调度（dynamic active power dispatch，DAPD）问题的研究较为分散，未充分利用风电预测信息和多时间尺度协调，不能有效处理风能资源的不确定性影响。

因此，为增加风力发电的适应性，针对WPC集成的有功功率分配问题，提出了一种基于多时间尺度协调的DAPD分层模型预测控制（hierarchical model predictive control，HMPC）策略。首先，在WPC集成的基础上，利用MPC和分层原理解决风力发电的有功调度，并在超短期风电预测下，将调度框架分为四个层次；其次，在集群优化层中开发一种动态分组策略，以精确地分配每个风电场的调度计划。同时，通过数值特征方法进行分层分析，提高优化模型中风电预测数据的准确性。最后，通过与传统的调度和计划分配算法进行比较分析，验证所提出控制策略的有效性。

1 HMPC策略框架

风电机组的输出特性与单个风电场不相同，一般来说，风电场具有较强的波动性，预测精度和可控性较差[11]。然而，风电并网具有空间平滑效应和相关性，与单个风电场相比波动较少。随着WPC装机容量的增加，功率波动与装机容量的比值呈下降趋势，因此整体调度WPC更接近于常规发电机组的特点。同时，在风电机组中，部分风电场在风能资源充足的情况下，仍能产生足够的电能，但由于调度机制或控制策略不当，可能会使风电机组处于低效率状态。

本文提出的HMPC模型在时间尺度上从系统级到单个风电场级分为四个层次，其中日内调度层和实时调度层在系统级，集群优化层在WPC级，风电场调制层在单个风电场级。在时间尺度上，模型采用超短期风电功率预测，并逐层细化分辨率，包括滚动周期和计划周期，具体如表1所示。

表1　多时间尺度协调图解

Tab.1　Multi-time scale coordination diagram

层级	滚动周期/min	调度计划范围/min	时间分辨率/min	执行点/进度点
日内调度	60	240	15	4/6
实时调度	15	30	5	3/6
集群优化	5	5	5	1/1
风电场调制	1	1	1	1/1

表1中，日内调度层执行下一个4小时的DAPD，计算周期为1 h。该层级优化了所有常规机组和风电机组的调度，可有效降低常规机组的运行成本，并提升风电运行效率。从表1中可以看出，该层风力发电预测数据的分辨率为15 min。

实时调度层能对所有机组和WPC进行有功功率调度，使优化后的变量作为一个调整值。其调度范围为30 min，滚动周期为15 min，在优化过程中加入AGC机组的约束条件，能有效保证系统的旋转备用，并对下一步的控制起着重要作用。该层优化结果共包含6个点，其中前3个点将同时分配给常规发电机和WPC，时间分辨率为5 min。

集群优化层在WPC中每5 min开始执行一次优化程序，以确保未来5 min内每个风电场的输出。为提高风能资源的利用率，根据风电场的功率变化趋势和发电状况，对风电场进行动态分组，其计算周期为5 min。该层级的主要目标是合理有效地分配风电计划，并跟踪风电总进度。

风电场调制层主要是对风电场各层的风电功率调节结果进行优化。该层级的时间表、滚动周期和时间分辨率均为为1 min。同时，根据WPC输电线路利用率和AGC机组下行旋转备用，提出了一种提高风电效率的新方法。

2 HMPC策略构建

2.1 日内调度层和实时调度层

电力系统有功调度是一个多变量、非线性的优化问题,具有电力系统安全性的原则[12-13]。将常规机组分为非AGC机组和AGC机组,假设优化中的所有变量都以MW为单位,则日内调度的计算方法如下。

1)日内调度目标函数如下式所示:

$$F(P_{i,t}^{\mathrm{NA}},P_{j,t}^{\mathrm{A}},P_{k,t}^{\mathrm{W}})=\min\sum_{t=t_0+\Delta t}^{t_0+T_1}[F_{\mathrm{C}}(P_{i,t}^{\mathrm{NA}})+F_{\mathrm{A}}(P_{j,t}^{\mathrm{A}})+F_{\mathrm{W}}(P_{k,t}^{\mathrm{W}})] \tag{1}$$

式中:$P_{i,t}^{\mathrm{NA}}$为非AGC单元i时间段长的功率输出;$P_{j,t}^{\mathrm{A}}$为AGC单元j时间段长的功率输出;$P_{k,t}^{\mathrm{W}}$为WPC时间段长的功率输出; $F_{\mathrm{C}}()$,$F_{\mathrm{A}}()$分别为非AGC单元和AGC单元的发电成本;$F_{\mathrm{W}}()$为减少风力发电的惩罚成本;Δt为间隔时间,t_0为初始时间,T_1为日内调度的时间表范围。

2)将机组的发电成本乘以二次函数,得到常规单体发电成本的数学表达,如下二式所示:

$$F_{\mathrm{C}}(P_{i,t}^{\mathrm{NA}})=\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{NA}}}[a_i(P_{i,t}^{\mathrm{NA}})^2+b_iP_{i,t}^{\mathrm{NA}}+c_i] \tag{2}$$

$$F_{\mathrm{A}}(P_{j,t}^{\mathrm{A}})=\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{A}}}[a_j(P_{j,t}^{\mathrm{A}})^2+b_jP_{j,t}^{\mathrm{A}}+c_j] \tag{3}$$

式中:N_{NA},N_{A}分别为非AGC单元和AGC单元的数量;a_i,b_i,c_i分别为非AGC单元单位发电成本的系数;a_j,b_j,c_j分别为AGC单元单位发电成本的系数。

3)由于风力发电的环境成本较低,因此风电削减的惩罚成本与风电预测和计划之间的差异成正比,其数学表达如下式所示:

$$F_{\mathrm{W}}(P_{k,t}^{\mathrm{W}})=\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{W}}}C_{\mathrm{W}}(\bar{P}_{k,t}^{\mathrm{WF}}-P_{k,t}^{\mathrm{W}}) \tag{4}$$

式中:N_{W}为WPC的数量;C_{W}为风电削减的惩罚因子;$\bar{P}_{k,t}^{\mathrm{WF}}$为时段$t$中风电集群$k$的风电预测值。

为了保证系统的稳定性,优化必须遵守以下安全约束条件。

1)系统功率平衡约束。由于本模型忽略了网损的影响,因此电力系统应在总功率和负荷需求之间达到平衡,其平衡约束的数学表达如下式所示:

$$\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{NA}}}P_{i,t}^{\mathrm{NA}}+\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{A}}}P_{j,t}^{\mathrm{A}}+\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{W}}}P_{k,t}^{\mathrm{W}}=D_t^{\mathrm{F}} \tag{5}$$

式中:D_t^{F}为时间段t内系统的负荷需求预测。

2)常规功率输出限制条件。常规机组的发电出力应受到实际出力限制,其输出限制条件如下式所示:

$$\begin{cases}\underline{P}_{i,t}^{\mathrm{NA}}\leqslant P_{i,t}^{\mathrm{NA}}\leqslant\bar{P}_{i,t}^{\mathrm{NA}}\\ \underline{P}_{j,t}^{\mathrm{A}}\leqslant P_{j,t}^{\mathrm{A}}\leqslant\bar{P}_{j,t}^{\mathrm{A}}\end{cases} \tag{6}$$

式中:$\underline{P}_{i,t}^{\mathrm{NA}}$,$\overline{P}_{i,t}^{\mathrm{NA}}$分别为非AGC单元$i$的下限和上限;$\underline{P}_{j,t}^{\mathrm{A}}$,$\overline{P}_{j,t}^{\mathrm{A}}$分别为AGC单元$j$的下限和上限。

3)风电出力限制:

$$\begin{cases}0\leqslant P_{k,t}^{\mathrm{W}}\leqslant\bar{P}_{k,t}^{\mathrm{WF}}\leqslant P_k^{\mathrm{N}}\\ \bar{P}_{k,t}^{\mathrm{WF}}=f(\dot{P}_{k,t-\Delta t}^{\mathrm{W}})\end{cases} \tag{7}$$

式中:P_k^{N}为WPC k的安装容量;$f()$为预测过程;$\dot{P}_{k,t-\Delta t}^{\mathrm{W}}$为预测方法中采用的历史风电序列。

4)爬坡率限制。由于传统机组在一个周期内的可调能力有限,其爬坡率限制如下式所示:

$$\begin{cases}-R_{\mathrm{NA},i}^{\mathrm{down}}\Delta T\leqslant P_{i,t}^{\mathrm{NA}}-P_{i,t-\Delta t}^{\mathrm{NA}}\leqslant R_{\mathrm{NA},i}^{\mathrm{up}}\Delta T\\ -R_{\mathrm{A},j}^{\mathrm{down}}\Delta T\leqslant P_{j,t}^{\mathrm{A}}-P_{i,t-\Delta t}^{\mathrm{A}}\leqslant R_{\mathrm{A},j}^{\mathrm{up}}\Delta T\end{cases} \tag{8}$$

式中:$R_{\mathrm{NA},i}^{\mathrm{down}}$,$R_{\mathrm{NA},i}^{\mathrm{up}}$分别为非AGC单元$i$的下行和上行爬坡率;$R_{\mathrm{A},j}^{\mathrm{down}}$,$R_{\mathrm{A},j}^{\mathrm{up}}$分别为AGC单元$j$的下行和上行爬坡率;$\Delta T$为日内调度层的最小时间间隔。

5)旋转备用需求约束。电力系统应具有足够的备用容量,以应对调度期间的紧急事件,其旋转备用需求约束如下2式所示:

$$\begin{cases}\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{A}}}(\bar{P}_{j,t}^{\mathrm{A}}-P_{j,t}^{\mathrm{A}})\geqslant SR_t^{+}\\ \sum_{j=1}^{N_{\mathrm{A}}}(P_{j,t}^{\mathrm{A}}-\underline{P}_{j,t}^{\mathrm{A}})\geqslant SR_t^{-}\end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases}(\bar{P}_{j,t}^{\mathrm{A}}-P_{j,t}^{\mathrm{A}})=\min\left\{(\bar{P}_{j,t}^{\mathrm{A}}-P_{j,t}^{\mathrm{A}}),R_{\mathrm{A},j}^{\mathrm{up}}\Delta T\right\}\\ (P_{j,t}^{\mathrm{A}}-\underline{P}_{j,t}^{\mathrm{A}})=\min\left\{(P_{j,t}^{\mathrm{A}}-\underline{P}_{j,t}^{\mathrm{A}}),R_{\mathrm{A},j}^{\mathrm{down}}\Delta T\right\}\end{cases} \tag{10}$$

式中:SR_t^{+},SR_t^{-}分别为时间段t中系统的上行和下行储备需求。

6)输电断面安全约束。输电断面由供电中心至负荷中心的相邻输电线路组成,其数学表达如下式所示:

$$\underline{T}_{l,t}\leqslant\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{NA}}}L_{l,i}P_{i,t}^{\mathrm{NA}}+\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{A}}}L_{l,j}P_{j,t}^{\mathrm{A}}+\sum_{k=1}^{N_{\mathrm{W}}}L_{l,k}P_{k,t}^{\mathrm{W}}\leqslant\overline{T_{l,t}} \tag{11}$$

式中:$L_{l,i}$为发电机i对输电段l的发电量分布系数;$\overline{T}_{l,t}$,$\underline{T}_{l,t}$分别为在时间段t中传动部分l功率潮流的上限和下限。

以最优$P_{i,t}^{\mathrm{NA}}$,$P_{j,t}^{\mathrm{A}}$分别作为实时调度层的基本调度值。实时调度的目的是根据风电预测的5 min分辨率调整调度计划,其目标函数如下式所示:

$$F(\Delta\hat{P}_{i,t}^{\mathrm{NA}},\Delta\hat{P}_{j,t}^{\mathrm{A}},\hat{P}_{k,t}^{\mathrm{W}})=\min\sum_{t=t_0+1}^{t_0+T_2}[F_{\mathrm{C}}(\hat{P}_{i,t'}^{\mathrm{NA}}+\Delta\hat{P}_{i,t}^{\mathrm{NA}})+F_{\mathrm{A}}(\hat{P}_{j,t'}^{\mathrm{A}}+\Delta\hat{P}_{j,t}^{\mathrm{A}})+F_{\mathrm{W}}(\hat{P}_{k,t}^{\mathrm{W}})] \quad (12)$$

式中：$\Delta\hat{P}_{i,t}^{\mathrm{NA}}$，$\Delta\hat{P}_{j,t}^{\mathrm{A}}$分别为$P_{i,t}^{\mathrm{NA}}$，$P_{j,t}^{\mathrm{A}}$优化后的变量值；$\hat{P}_{k,t}^{\mathrm{W}}$为WPC输出结果的优化值。

由式（12）可知，实时调度中的约束与日内调度层的约束一致，AGC机组的功率输出限值可调，为后一控制过程留有足够的旋转储备。

2.2 集群优化层

集群优化层的目的是在WPC中分发调度计划，根据风电场的功率变化趋势和发电状况，提出一种在15 min计算周期内的动态分组策略，提高风电的适应能力。首先，利用各风电场的预测数据，估计未来20 min内的功率变化趋势。在预测中，功率趋势系数如下式所示：

$$K_{i,t}=\sum_{j=1}^{4}\mathrm{sign}(\hat{P}_{i,t+m}^{\mathrm{Wfa}}-\hat{P}_{i,t+n}^{\mathrm{Wfa}}) \quad (13)$$

式中：$\hat{P}_{i,t+m}^{\mathrm{Wfa}}$，$\hat{P}_{i,t+n}^{\mathrm{Wfa}}$分别为在时间点$m$和$n$处计算的平均值；sign($x$)为符号函数，当$x$>0时，sign($x$)=1，当$x$<0时，sign($x$)=−1，当$x$=0时，sign($x$)=0；$m$和$n$的单位为min，其中$m$=5，10，15，20，$n$=0，5，10，15；$K_{i,t}$为风电场$i$在$t$时段的功率趋势系数，max($K_{i,t}$)=4，min($K_{i,t}$)=−4。

若−4<$K_{i,t}$<4，表明电力趋势不稳定。因此，使用波动阈值η来区分稳定组和波动组，如下式所示：

$$\begin{cases}\dot{P}_{i,T}^{\mathrm{Wfa}}=[\hat{P}_{i,t}^{\mathrm{Wfa}},\hat{P}_{i,t+5}^{\mathrm{Wfa}}\cdots\hat{P}_{i,t+20}^{\mathrm{Wfa}}]\\ M=\max(\dot{P}_{i,T}^{\mathrm{Wfa}})-\min(\dot{P}_{i,T}^{\mathrm{Wfa}})\\ \eta=P_i^{\mathrm{N}}/100\\ M>\eta\end{cases} \quad (14)$$

式中：$\dot{P}_{i,T}^{\mathrm{Wfa}}$为估计变化趋势的功率序列；$P_i^{\mathrm{N}}$为风电场$i$的装机容量；$M$为最大功率偏差。

由于风能分布和装机容量的不同，各风电场的发电状况也不尽相同。最后一组类型可通过增加风电场的平均负荷率来决定，如下式所示：

$$\varphi_{i,t}=(P_{i,t}^{\mathrm{WR}}/P_i^{\mathrm{N}})\times 100\% \quad (15)$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{WR}}$为第t时段i风电场的实际风电出力；$\varphi_{i,t}$为第t时段i风电场的平均负荷率。

如果$\varphi_{i,t}$<1/3，则风电场处于低负荷状态，若$\varphi_{i,t}$>2/3，则风电场处于高负荷状态，否则风电场处于中负荷状态。

根据动态分组策略，把风电场分为12组，分组情况如表2所示。

表2　动态分组结果类型

Tab.2　Dynamic grouping result types

序号	组类型	序号	组类型
1	高负荷-减少	7	高负荷-稳定
2	中负荷-减少	8	中负荷-稳定
3	低负荷-减少	9	低负荷-稳定
4	高负荷-增加	10	高负荷-波动
5	中负荷-增加	11	中负荷-波动
6	低负荷-增加	12	低负荷-波动

通过滚动优化，常规机组从实时调度中跟踪最优调度，并根据分组结果进行风电调度，其最优模型如下式所示：

$$F(P_{i,t}^{\mathrm{W}})=\min\sum_{t=t_0+1}^{t_0+T_3}\{(\hat{P}_{k,t'}^{\mathrm{W}}-\sum_{i=1}^{k}P_{i,t}^{\mathrm{W}})+\begin{cases}[(\hat{P}_{i,t}^{\mathrm{WF}}-P_{i,t}^{\mathrm{W}})+(P_{i,t}^{\mathrm{W}}-P_{i,t-\Delta t}^{\mathrm{W}})] & G_{i,t}=1,2\\ [(\hat{P}_{i,t}^{\mathrm{WF}}-P_{i,t}^{\mathrm{W}})+(P_{i,t-\Delta t}^{\mathrm{W}}-P_{i,t}^{\mathrm{W}})] & G_{i,t}=4\\ [(\hat{P}_{i,t}^{\mathrm{WF}}-P_{i,t}^{\mathrm{W}})+(1-P_{i,t}^{\mathrm{W}}/P_i^{\mathrm{N}})] & G_{i,t}=5,6\\ \hat{P}_{i,t}^{\mathrm{WF}}-P_{i,t}^{\mathrm{W}} & G_{i,t}=3,7,8,9\\ \alpha_i\times|P_{i,t}^{\mathrm{W}}-P_{i,t-\Delta t}^{\mathrm{W}}| & G_{i,t}=10,11\\ [|P_{i,t}^{\mathrm{W}}-P_{i,t-\Delta t}^{\mathrm{W}}|+(1-P_{i,t}^{\mathrm{W}}/P_i^{\mathrm{N}})] & G_{i,t}=12\end{cases} \quad (16)$$

式中：k为WPC中风电场的个数；$P_{i,t}^{\mathrm{W}}$为第t时段风电场i输出功率的最优变量；$\hat{P}_{i,t}^{\mathrm{WF}}$为5 min分辨率的风电预测；$G_{i,t}$为表2所示风电场$i$的动态分组结果；$\alpha_i$为风电场$i$在$t$期间的控制权。

由式（16）可知，表达式的第一部分是为了满足WPC的调度，在第二部分中，不同的$G_{i,t}$描述了不同的目标函数，该层的约束如下式所示：

$$\mathrm{s.t.}\begin{cases}\sum_{i=1}^{k}P_{i,t}^{\mathrm{W}}\leqslant\hat{P}_{k,t'}^{\mathrm{W}}\\ \underline{P}_i^{\min}\leqslant P_{i,t}^{\mathrm{W}}\leqslant\hat{P}_{k,t}^{\mathrm{WF}}\leqslant P_i^{\mathrm{N}}\\ |(P_{i,t}^{\mathrm{W}}-P_{i,t-\Delta t}^{\mathrm{W}})/P_i^{\mathrm{N}}|\leqslant\hat{C}_i^{\mathrm{W}}\end{cases} \quad (17)$$

式中：$\underline{P}_i^{\min}$为风电场i的最小出力限制；$\hat{C}_i^{\mathrm{W}}$为风电场i在该层间隔时间内的爬坡率限制。

2.3 风电场调制层

风电场调制层的作用是调整风电输出，并实时跟踪前一层的最优调度。在风电场调制层每个风电场以1 min时间分辨率调制输出，对应1 min风电预测信息，其目标函数约束条件如下式所示：

$$F(P_{i,t}^{\mathrm{W}})=\min\sum_{t=t_0+1}^{t_0+T_4}[(\hat{P}_{i,t'}^{\mathrm{W}}-P_{i,t}^{\mathrm{W}})+|P_{i,t}^{\mathrm{W}}-P_{i,t-\Delta t}^{\mathrm{W}}|] \tag{18}$$

经过调制层的每一次优化，优化后的$P_{i,t}$达到最终的调度，并全部定位到风电场i，因此风电场i的实际输出功率由调度功率和可用功率决定。当调度功率大于可用功率时，实际效率等于可用功率，否则为调度功率。此外，为充分利用风电的系统调节能力，该层考虑了风电机组的WPC输电路径利用率和下行旋转备用。WPC传输路径是从WPC接入点到电网，其使用可分为三个等级：安全状态(90%以下)、警戒状态(90%至95%之间)和过载状态(95%以上)。WPC传输路径的可变容量如下式所示：

$$\Delta P_{\mathrm{TL}}^{\mathrm{s}}=\begin{cases}95\%P_{\mathrm{TL}}^{\lim}-P_{k,t}^{\mathrm{WR}} & P_{k,t}^{\mathrm{WR}}/P_{\mathrm{TL}}^{\lim}<90\%\\0 & 90\%\leqslant P_{k,t}^{\mathrm{WR}}/P_{\mathrm{TL}}^{\lim}\leqslant 95\%\\95\%P_{\mathrm{TL}}^{\lim}-P_{k,t}^{\mathrm{WR}} & P_{k,t}^{\mathrm{WR}}/P_{\mathrm{TL}}^{\lim}>95\%\end{cases} \tag{19}$$

式中：$P_{k,t}^{\mathrm{WR}}$为WPC k在时间段t内的实际功率输出；$\Delta P_{\mathrm{TL}}^{\mathrm{s}}$为WPC传输路径的可变容量；$P_{\mathrm{TL}}^{\lim}$为WPC传输路径的功率限制。

同时，若有足够的空间用于风力发电，则可以通过减少旋转备用来容纳更多的风电，如下式所示：

$$\Delta P_{\mathrm{AGC}}^{\mathrm{s}}=\begin{cases}P_t^{\mathrm{A}}-\overline{P}_{\mathrm{AGC}}^{\mathrm{u}} & P_t^{\mathrm{A}}>\overline{P}_{\mathrm{AGC}}^{\mathrm{u}}\\0 & \underline{P}_{\mathrm{AGC}}^{\mathrm{d}}<P_t^{\mathrm{A}}\leqslant\overline{P}_{\mathrm{AGC}}^{\mathrm{u}}\\P_t^{\mathrm{A}}-\underline{P}_{\mathrm{AGC}}^{\mathrm{d}} & P_t^{\mathrm{A}}\leqslant\underline{P}_{\mathrm{AGC}}^{\mathrm{d}}\end{cases} \tag{20}$$

式中：$\Delta P_{\mathrm{AGC}}^{\mathrm{s}}$为AGC机组下旋备用的可变容量；$\overline{P}_{\mathrm{AGC}}^{\mathrm{u}}$，$\underline{P}_{\mathrm{AGC}}^{\mathrm{d}}$为下行旋转备用的死区上、下限；$P_t^{\mathrm{A}}$为$t$时段内总AGC机组的实际功率输出。

因此，风力发电的最终可变容量ΔP_{F}由$\Delta P_{\mathrm{TL}}^{\mathrm{s}}$和$\Delta P_{\mathrm{AGC}}^{\mathrm{s}}$得出。其中，任一变量为正或负，都有$\Delta P_{\mathrm{F}}=\min(\Delta P_{\mathrm{TL}}^{\mathrm{s}},\Delta P_{\mathrm{AGC}}^{\mathrm{s}})$。若其中有一个或两个变量为负，则意味着可用容量不足，易导致风力发电量减少。

3　反馈校正模型构建

3.1　反馈校正模型

反馈校正在滚动层优化和风电功率预测中起着重要作用，首先选择广义误差分布(generalized error distribution，GED)模型拟合误差概率密度分布，分布形状更灵活的GED模型可以通过参数调整来匹配各种峰、腰和尾特征[14]。但是传统的具有重尾和窄峰宽特征的GED模型不适用于描述具有轻尾分布的超短期风电预测误差。另外，传统GED的对称轴为x=0，不适合精确地以一定的偏度拟合误差数据。因此，本文提出了一种改进的GED模型，如下2式所示：

$$f(x,\mu,\delta,\varepsilon,\beta)=\frac{\mu\cdot 2^{[(\mu+1)/\mu]}}{\delta\cdot\Gamma(1/\mu)}\cdot\exp[-|(x-\varepsilon)/\delta|^{\beta}] \tag{21}$$

$$\delta=\left\{\frac{2^{[2-(2/\mu)]}\cdot\Gamma(3/\mu)}{\Gamma(3/\mu)}\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{22}$$

式中：x为每单位预测误差，等于误差与风电场装机容量之比；μ，δ为形状参数；Γ为伽马函数；ε为添加到GED模型中的位置参数，使模型能够以偏斜度拟合数据；β为将常规GED的斜率和峰值之间的关系分开的斜率参数。

改进的GED模型的参数通过最大似然估计进行预测。此外，采用三个指标来评估有效性，包括平均绝对误差(mean absolute error，MAE)、均方根误差(root mean square error，RMSE)和Pearson乘积相关系数(Pearson product-moment correlation coefficient，PPMCC)。在改进的GED模型的基础上，根据累积概率函数提取两个置信度作为分层标准。置信区间的两个临界值将误差分为三个级别，分别称为小误差、中误差和大误差。随后提取预测前2 h的历史误差数据，预测下一个时期的误差。为了量化变化趋势，应用最小二乘法将误差数据拟合为直线。直线斜率ρ的绝对值能够反映变化趋势，结合误差方差ϕ，可以综合研究波动率。历史误差ϕ_0的整体方差如下式所示：

$$\phi_0=\frac{1}{N_e}[(e_1-\bar{e})^2+(e_2-\bar{e})^2+\cdots+(e_{N_e}-\bar{e})^2] \tag{23}$$

式中：ϕ_0为方差准则；$\bar{e}$为误差样本的平均值；N_e为误差样本的数量。

根据获得的斜率和方差，后续误差预测$e_{t+\Delta t}$分为四种情况。当$\phi<\phi_0$且$\rho<\rho_0$表明误差相对稳定，且波动较小。因此，采用移动平均(moving average，MA)方法预测下一个误差。当$\phi>\phi_0$且$\rho<\rho_0$表明变化趋势稳定，但幅度剧烈波动。

若通过加权移动平均(weighted moving average，WMA)方法实现预测，当$\phi<\phi_0$且$\rho<\rho_0$表明误差是不稳定的，且状态稍有波动。因此使用自回归移动平均(auto regressive moving average，ARMA)模型来预测$e_{t+\Delta t}$。当$\phi>\phi_0$且$\rho<\rho_0$表明具有明显的

变化趋势,$e_{t+\Delta t}$可通过线性方法进行估计。

因此,整合先前的误差e_t和误差预测$e_{t+\Delta t}$,可根据误差水平上的e_t和$e_{t+\Delta t}$的分类来确定误差补偿幅度。当误差预测$e_{t+\Delta t}$处于小误差级别时,无论e_t多大,在过度补偿的情况下,风电预测都不需要误差补偿。如果e_t和$e_{t+\Delta t}$处于同一水平,且具有相同的符号,则误差波动性较小。因此对于风电预测,误差补偿幅度等于$e_{t+\Delta t}$。如果e_t和$e_{t+\Delta t}$在多个水平上波动,则情况变得复杂,其误差变化趋势如下式所示:

$$\rho_e = \frac{|e_{t+\Delta t} - e_t|}{|\chi_{\mathrm{L}} - \chi_{\mathrm{H}}|} \tag{24}$$

式中:χ_{L}和χ_{H}为具有相同符号的置信区间的临界值;ρ_e为$t+\Delta t$之后的误差变化趋势。

表3为多级误差波动的补偿幅度。

表3　多个级别的波动补偿幅度

Tab.3　Variation compensation range of multiple levels

e_t和$e_{t+\Delta t}$的分类	ρ_e	补偿幅度
具有相同符号的多个级别	≤1	$-1.0e_{t+\Delta t}$
	> 1	$-1.1e_{t+\Delta t}$
具有不同符号的多个级别	≤2	$-1.0e_{t+\Delta t}$
	> 2	$-1.1e_{t+\Delta t}$

3.2 反馈校正的数据交互

分层控制策略的所有步骤均在时间段t内以不同的时间尺度在每一层中执行,其计算步骤如下所述:

1)在时间段t中,假设在最小时间间隔Δt之后,常规单元的功率输出和风力发电集群i分别为$P^{\mathrm{G}}_{i,t+\Delta t}$和$P^{\mathrm{W}}_{i,t+\Delta t}$。在日内调度层中,将在接下来的4 h内以15 min的时间分辨率实现优化。因此,$P^{\mathrm{G}}_{i,t+\Delta t}$和$P^{\mathrm{W}}_{i,t+\Delta t}$是通过优化获得的,而$\Delta t$ =15 min。

2)群集优化层根据$P^{\mathrm{W}}_{i,t+\Delta t'}$和动态分组结果执行优化,以确定接下来5 min内每个风电场的风电输出。计算每个风电场$P^{\mathrm{W}}_{i,t+\Delta t'}$的计划,并且$\Delta t'$=5 min。

3)风电场调制层着重于调整每个风电场与集群优化层中的$P^{\mathrm{W}}_{i,t+\Delta t'}$相对应的输出功率,其时间分辨率为1 min。

4)在时间段t中,风电场i的实际输出功率$P^{\mathrm{WR}}_{i,t}$由所获得的调度计划$P^{\mathrm{W}}_{i,t+\Delta t'}$和可用的风量$P^{\mathrm{Wa}}_{i,t}$确定。当$P^{\mathrm{W}}_{i,t+\Delta t'} > P^{\mathrm{Wa}}_{i,t}$时,实际输出等于$P^{\mathrm{Wa}}_{i,t}$,否则为$P^{\mathrm{W}}_{i,t+\Delta t'}$。

5)通过风能预测和每个时间段t的可用实际风能来计算最新的预测误差,并基于最新的预测误差,在反馈校正模块中,采用分层分析方法修正未来的预测误差。最后,将校正后的风能预测输入到每个层中,以在时间段$t+\Delta t$中开始优化。

图1为相邻层之间的数据交互过程。由图1可知当实时调度层的滚动周期和时间分辨率都小于日内调度层,在日内调度中的下一个优化前,实时调度层中有四个优化。由于实时调度层的滚动周期等于日内调度层的时间分辨率,因此实时调度层的第二个优化是基于日内调度层的第二调度点。

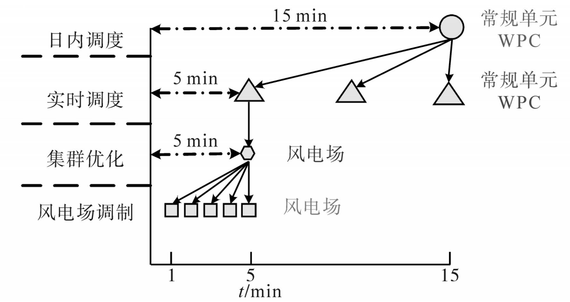


图1　相邻控制层之间的数据交互过程

Fig.1　Data interaction process between adjacent control layers

4 实验结果与分析

4.1 系统参数设置

运用IEEE可靠性测试系统RTS对本文所提HMPC策略进行仿真验证,选取Area RTS-96网络作为实验对象,其中包含24条总线、32个单元和38条传输线,机组的总容量为3 250 MW。考虑到RTS测试系统不同母线上的机组容量的限制以及实际可操作性,利用WPC取代连接在母线7上的三个共计300 MW的机组,集成WPC的数据是从包含8个风电场($\mathrm{WF_1}$~$\mathrm{WF_8}$)分布的实际操作系统中获取。其中,每个风电场的装机容量分别设置为49.5 MW,198.5 MW,99 MW,148.5 MW,98 MW,48 MW,49.5 MW和99 MW,总计790 MW。用于调度和控制验证的数据源自2016年,其中有10台连接在总线1,总线13和总线23上的AGC单元,总容量为1 443 MW。

传输部分由线路11~13,线路11~14,线路12~13,线路12~23和线路15~24组成,7~8号线被视为设置为350 MW的WPC传输路径。发电偏移分布因子$L_{l,i}$由直流潮流的节点导纳矩阵确定,将风电削减的惩罚因子C_{W}设置为500,以优先容纳风电。$P_{i,t}$和$P_{j,t}$根据不同类型的机组分别为每机组容量的20%,40%或45%。在实时调度层,$P_{i,t}$和$P_{j,t}$落在容量的30%~90%范围内,以

获取更多的备用容量。AGC装置的上、下倾斜率为每分钟容量的20%,快于初始的3%。

4.2 风电预测校正

令形状参数μ为0.191 5,位置参数ε为-0.004 258,坡度参数β为0.753 6。将改进的GED模型与正态分布、柯西分布、拉普拉斯分布和二次高斯分布的四个模型进行对比分析,结果如图2所示。由图2可知,正态分布明显不适合拟合数据,特别是在峰、腰和尾部分,而常规的GED模型除了腰部和尾部外,在峰部均具有更好的拟合度。相比之下,改进的GED模型在腰部和尾部具有更好的贴合性,而柯西分布和二次高斯分布在尾部具有相对较小的拟合值。尽管拉普拉斯分布在尾部类似于改进的GED模型,但在峰部拟合性能较差,各分布模型的评价指标值如表4所示。由表4可知,改进GED模型的*MAE*,*RMSE*和*PPMCC*通常均优于其他分布模型。

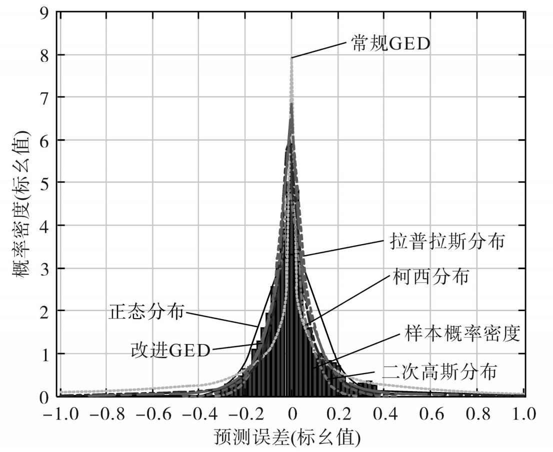


图2　改进的GED和其他分布模型的拟合性能

Fig.2　The fitting performance of improved GED and other distribution models

表4　各分布模型的评价指标值

Tab. 4　Evaluation index values of each distribution model

分配模型	*MAE*	*RMSE*	*PPMCC*
常规GED	0.262 5	0.501 5	0.916 6
改进GED	0.076 9	0.154 7	0.991 2
二次高斯分布	0.102 6	0.190 6	0.990 5
正态分布	0.190 7	0.536 0	0.891 6
柯西分布	0.115 6	0.216 5	0.982 8
拉普拉斯分布	0.086 2	0.208 3	0.984 7

根据误差拟合结果,选择80%和95%的置信度进行误差分层,图3所示为误差分层的反馈校正性能图。图3中三个误差级别分别用不同的深浅色标记,并显示单个或多个级别的波动。由图3可知,在15:00~23:45之间,大多数波动处于较小的误差水平,在13:00左右几乎没有数据处于大误差级别。由误差层数据可知,风力发电预测的误差水平在不同时期是可变的,但校正后的风能预测非常接近实际风能。表5所示为校正前后的风电预测和实际风电的三种估算指标。由表5可知,所提方法可以在较小的*MAE*和*RMSE*的情况下提高预测精度。其中,*PPMCC*越大,表示校正后的风能与实际风能之间的相关性越强。

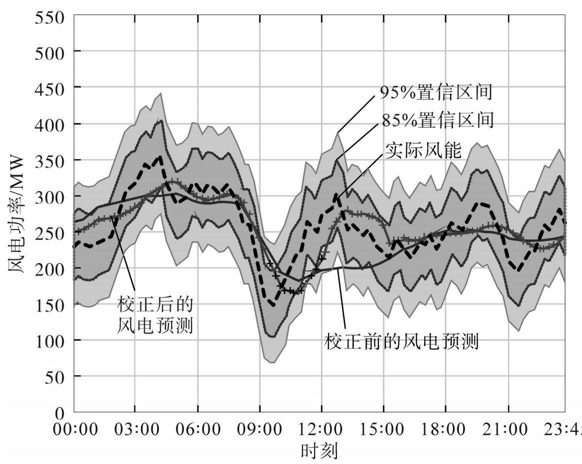


图3　风力发电预测误差的反馈校正结果

Fig.3　Feedback correction results of wind power forecast errors

表5　预测准确性的比较

Tab.5　Comparison of prediction accuracy

分配模型	*MAE*/%	*RMSE*/%	*PPMCC*/%
校正前	3.81	4.78	0.600 6
校正后	3.25	3.94	0.711 0

4.3 HMPC策略与讨论

与传统的有功功率分配方法相比,所提HMPC方法无需滚动周期,即可进行一步离线优化。图4所示为CAPD的性能和HMPC的系统调度过程结果。由图4可知,HMPC的日内调度比CAPD的调度更加准确,调度偏差等于功率调度与实际风力间的差,且日内调度层的最佳调度更接近于实际风能。5 min时间分辨率的实时调度可对与日内调度层基本调度相对应的功率调度进行调制,从而实现调度优化。由此可知,除了3:30~4:45以外,两层调度计划间的差异很小,这是因为常规单位的调整能力较强,且15 min内风能的波动性略有变化。对于特殊时段3:30~4:45,在实时调度层设置AGC单元的输出限制,以获得更多的旋转备用容量,该时段是高风能输出的最低负载区,需要常规装置降低输出功率以

容纳更多可用风能。但是,常规单元输出无法进一步降低以满足电力系统的最小储备要求。因此,在实时调度层中,设置一个较高的输出下限,以获得较高的AGC单元输出。

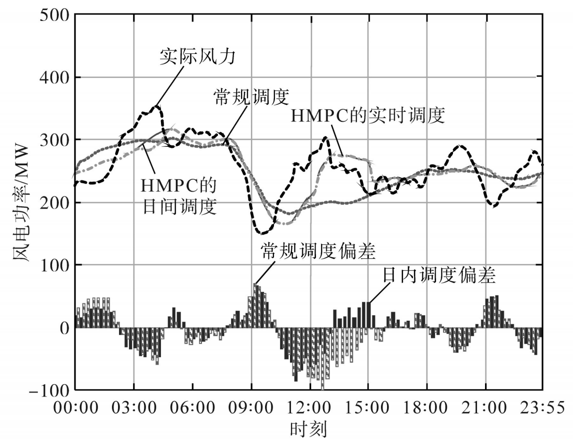


图4　CAPD的性能和HMPC的系统调度过程

Fig.4　CAPD performance and HMPC system scheduling process

WPC总调度计划框架表明了每个风电场的调度计划分配,选择固定比例分配算法(fixed proportional allocation algorithm,FPAA)和可变比例分配算法(variable proportional allocation algorithm,VPAA)与所提出HMPC策略进行比较分析。其中,FPAA根据装机容量将调度计划分发给风电场,VPAA根据风能预测信息分发调度计划。

每个风电场的最终控制输出由实际可用的风电功率和最佳计划决定。但对于HMPC策略,所提出的动态分组策略在集群优化层为实现目标分配做出了贡献,并建立了风电场调制层,最大程度地提高风力发电能力,其结果如图5所示。

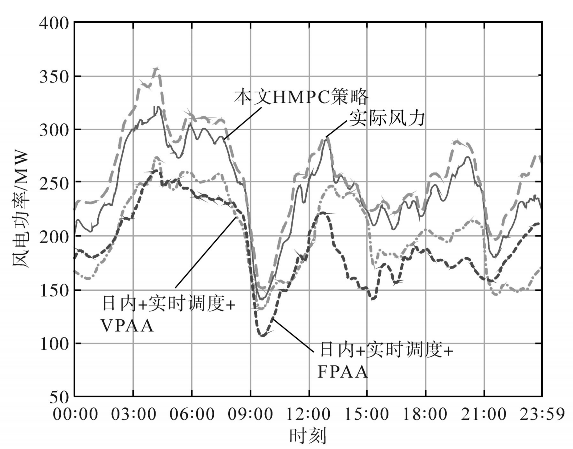
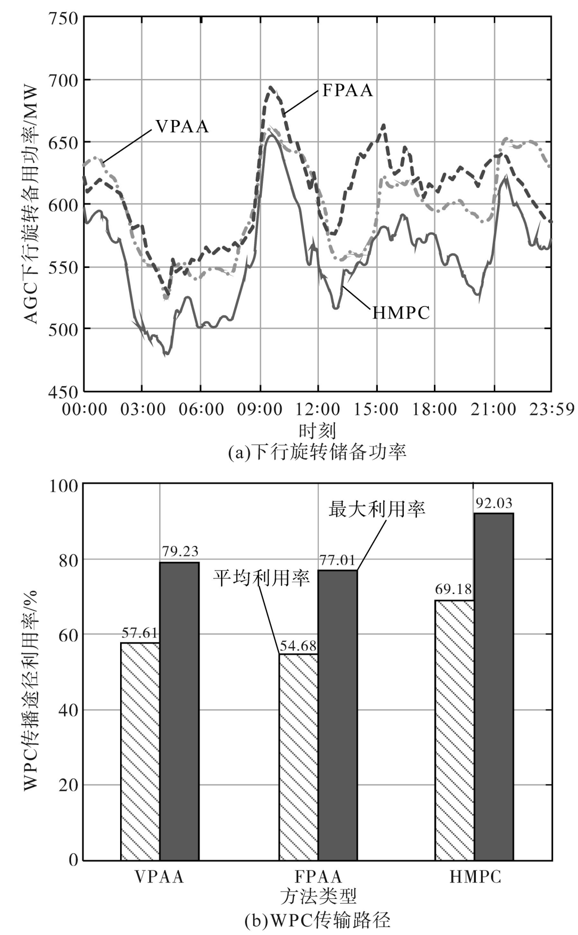


图5　不同控制策略下WPC的功率输出比较

Fig.5　Comparison of WPC power output under different control strategies

由图5可知,VPAA和FPAA无法充分利用可用的风力,因为每次优化后反馈校正都提高了下一个预报的准确性,但实际风能和预报力仍存在较大误差。因此由于保守的预测信息,调度计划会少于实际风能。

因为HMPC策略优于其他算法,从而使WPC输出更接近于实际风力,主要因为AGC机组的向下旋转储备和WPC传输路径为接收更多风能提供了足够的空间,其结果如图6所示。



(a)下行旋转储备功率

(b)WPC传输路径

图6　不同控制策略下AGC装置下行旋转储备和WPC传输路径利用率

Fig.6　AGC device downstream rotation reserve and WPC transmission path utilization rate under different control strategies

由图6可知,HMPC策略能够减少AGC装置输出,从而为风能留出更多可接受的空间。因此,在整个仿真期间,HMPC的AGC单元向下旋转储备小于VPAA和FPAA,WPC传输路径中的平均利用率和最大利用率均优于其他两种方法,其最高利用率高达92.03%。尽管AGC单元具有足够的向下旋转备用容量,但在3:00~4:00和20:00~21:00期间,风能无法接近实际风能曲线。由此可知,在极短的时间内,传输路径已达

到上限,HMPC在最小时间间隔内对风电具有斜坡速率限制约束,也同样限制了风电的增加。

各风电场关于估计指标的结果如表6所示,表6中包括风能利用率和相关系数。其中,风能利用率由风能控制输出与实际风能之比获得。由表6可知,VPAA的性能优于FPAA,但均弱于HMPC。

表6　每种风电场用不同方法计算的电源输出的估计指标值

Tab.6　Estimated index values of power output calculated by different methods for each type of wind farm

指标	方法	WF_1	WF_2	WF_3	WF_4	WF_5	WF_6	WF_7	WF_8
风电利用率/%	VPAA	81.11	93.23	78.97	97.00	44.92	81.18	99.10	74.68
	FPAA	55.65	92.93	89.54	97.00	96.63	79.16	85.93	68.80
	HMPC	96.82	98.25	95.23	100.00	85.48	98.78	100.00	93.75
与实际风能的相关系数	VPAA	0.93	0.95	0.66	0.98	0.42	0.92	0.99	0.82
	FPAA	0.65	0.80	0.91	0.97	0.95	0.86	0.85	0.76
	HMPC	0.99	0.99	0.92	1.00	0.85	1.00	1.00	0.96

通常,在没有任何误差纠正的情况下对风电功率的预测是不准确的,从而降低VPAA的性能。WF_3和WF_5的风电功率预测不准确,小于实际风电功率。同时,WF_3和WF_5的装机容量分别为99 MW和98 MW,处于中等水平。因此,与实际风力发电相比,WF_3和WF_5可获得更为合适的调度计划。因此,在风电场调制层的作用下,风电场可获得比实际风能曲线更好的输出特性。其中,WF_4和WF_7的逆风功率利用率可高达100%,WF_1的利用率可同比提高约41%。由此可知,HMPC策略的反馈校正和调度方法是有效且可行的。

4.4　计算性能分析

将所提算法与传统的方法进行对比分析,其结果如表7所示。由表7可知,整个过程的计算时间不仅包括优化过程,还包括数据输入和参数计算。根据表中每一层的时间尺度,可以清楚地确定优化时间。首先,对所提策略的日间调度和实时调度层进行仿真,与CAPD方法进行比较。其次,在比较中考虑风电场间的调度,每次优化需大约15次迭代。由此可知,滚动层优化需要更多的优化时间。随着优化时间的增加,所需的计算时间也急剧增加。但由于模型是离线优化模拟的,若计算策略是在线实施的,则每个优化可以在不到2 s的时间内完成,符合实际应用需求。

表7　每种方法的计算性能

Tab.7　Calculation performance of each method

方法	计算时间/s	滚动优化时间/s
日内调度层+实时调度层	639.676	24+96=120
常规有功功率分配(CAPD)	76.525	1
日内调度层+实时调度层+ FPAA	642.475	24+96=120
日内调度层+实时调度层+ VPAA	642.481	24+96=120
HMPC	2 216.514	24+96+288+1 440=1 848

5　结论

针对分布式风电场大规模风电集群在电力系统并网中存在的有功功率调度与控制问题,提出了一种基于动态电力调度的分层模型预测控制(HMPC)策略,并通过与传统的调度和计划分配算法进行比较,得出以下结论:

1)所提策略通过数值特征方法进行分层分析,提高了优化模型中风电预报数据的准确性;

2)所提策略能有效提高WPC传输路径的利用率,能充分利用WPC的多个时间尺度和适应因子的预测信息减少限风,提高了调度的准确性;

3)所提策略主要集中在风电集群中的调度,下一步研究工作中可将其引入到光伏发电集群、潮汐发电集群等其他可再生能源中。

参考文献

[1]　韩自奋,景乾明,张彦凯,等.风电预测方法与新趋势综述[J].电力系统保护与控制.2019,47(24):178-187.
Han Zifen, Jing Qianming, Zhang Yankai, *et al*. Review of wind power forecasting methods and new trends[J]. Power System Protection and Control. 2019,47(24): 178-187.

[2]　刘琦,方俊钧,赵洁,等.基于DSA功率预测模型的风电分层有功调度控制策略[J].电力建设.2019,40(2):63-70.
Liu Qi, Fang Junjun, Zhao Jie, *et al*. Layered wind power dispatching control strategy based on DSA power prediction model[J]. Electric Power Construction. 2019,40(2): 63-70.

[3]　Zhao H, Wu Q, Wang J, *et al*. Combined active and reactive power control of wind farms based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1177-1187.

[4]　Džafić I, Jabr R A, Halilovic E, *et al*. A sensitivity approach to model local voltage controllers in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1419-1428.