

适应大规模风电接入的多时序协调有功经济调度研究与应用

大规模风电消纳已成为当前电网调度运行的重要挑战。首先分析了日前、日内和实时等不同时序风电及对电网运行影响差异；在此基础上提出了多时序协调的有功经济调度体系，通过日前、日内到实时的滚动修正，统筹解决运行备用、爬坡能力和AGC备用等计划编制问题；最后基于该方法在陕西电网实际运行情况，阐述了该方法在消纳风电所产生的实施效益。

王俊锴¹ 王康¹ 郭少青² 迟方德¹ 张德亮²/1.国网陕西省电力公司电力调度控制中心 2.北京清大科越股份有限公司

0 引言

风电大规模接入已成为电力系统调度运行的重要挑战。从日前到实时，风功率预测准确度不断提升，制约风电消纳的关键因素也随之改变。当前围绕各时序下风电消纳问题，已经有大量的研究成果。

文献[1]分析了风力发电对旋转备用的影响，提出在日前经济调度中必须预留足够的备用容量以适应风功率预测偏差。文献[2]提出了含风电的鲁棒优化调度方法，结合风功率预测偏差合理预留备用容量，提升风电消纳能力。文献[3]综合考虑环境成本及网络约束，提出了风火联合发电调度。文献[4-6]则立足于日内滚动计划，研究了日内滚动计划中机组爬坡约束等对风电消纳的影响。文献[7]提出了实时调度过程中经济负荷调度计算方法，通过优化AGC容量提升风电消纳能力。文献[8]则是在风光储联合发电系统通过优化储能系统调度策略，提升储能与风电的协调特性，提升风电消纳能力。文献[9]提出了同一控制区两

级调度风电实时协调控制策略，其目的也是提升电网AGC性能，提升风电消纳能力。

综上所述，日前、日内和实时等不同时间尺度影响风电消纳的因素并不一致，当前的研究往往集中于某一个时序的风电消纳制约因素，而对多时序协调下的经济调度方法研究较少。为此，首先分析了不同时序下风电消纳的主要制约因素，以此提出了多时序协调的有功经济调度框架和各时序的有功经济调度模型；最后基于该方法在陕西电网实际应用情况，阐述了该方法的使用效益。

1 风电消纳关键因素分析

1.1 日前调度关键因素分析

在日前时间尺度，有功经济调度中需要根据风功率预测编制未来一天各时段发电机组出力计划曲线。由于日前风功率预测当前准确率还比较低，因此要求日前有功经济调度必须考虑可能的风功率预测偏差，预留足够的运行备用容量。运行备用容量预留不充分也是日前有功经济调度建模中限制风电消纳的主要制约因素。

为了保证预留足够的运行备用容量，在日前有功经济调度中需要基于历史数据，分析风功率预测误差分布特性。以陕西电网为例，陕西电网调度中心近年来加强风功率预测技术研究，目前日前风功率预测误差可控制在95%以内，然而由于风电装机增长迅速，5%的



王俊锴/高级工程师

关键词/Keywords

有功经济调度·
多时序协调·
风电·
发电计划·
运行备用·

偏差对电力平衡的影响依然较为突出。

1.2 日内调度关键因素分析

在日内时间尺度，有功经济调度是基于日内风功率预测数据对未来1~2 h内的发电机组出力计划重新编制，以逐步修正日前风功率预测偏差给发电机组出力计划带来的影响。由于日内风功率预测准确率大幅提升，日内有功经济调度可以适当放宽对运行备用的要求。以陕西电网为例，日内风功率预测偏差能够控制在1.5%以内，其对电力平衡的影响已经较小。

但是风功率出力波动性的影响成为日内有功经济调度必须考虑的问题，风功率波动幅度较大，容易造成由于燃煤机组爬坡能力不足、出力跟踪不及时，进而造成大幅的负荷缺额。为此必须在日内有功经济调度中考虑发电机组爬坡特性，评估系统爬坡能力充裕程度。

1.3 实时调度关键因素分析

在实时调度时间尺度，有功经济调度主要是微调未来5~10 min后运行点的发电机组出力，以进一步适应消纳风电的要求。由于实时调度时间跨度较小，因此系统爬坡能力对风电消纳的制约程度较轻。而由于风电出力的随机性较强，导致在实时调度所涉及的5~10 min时间尺度上必须考虑AGC调节容量需求，满足风电出力的随机性波动变化。

2 多时序协调有功经济调度方法

2.1 多时序协调有功经济调度框架

基于上述各时序制约风电消纳的关键要素分析，所提出的多时序协调有功经济调度框架如图1所示。各时序之间不仅需要细化该时序制约风电消纳的关键因素，正向还需要为下一时序的关键因素进行评估，反向还需要对上一时序的制约因素执行过程中的变化趋势进行预测，从而实现在各时序之间的协调一致^[10]。具体来说：

1) 在日前有功经济调度中，不仅需要考虑各时段运行备用满足要求，还需要评估各时段爬坡能力。

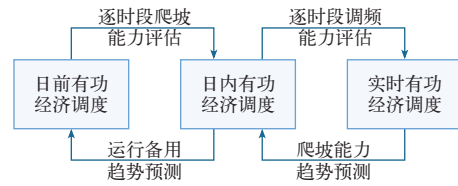


图1 多时序协调有功经济调度框架

2) 在日内有功经济调度中，不仅需要考虑系统爬坡能力约束，还需要评估各时段的调频能力，并将未来的运行备用趋势及时反馈日前有功经济调度阶段。

3) 在实时有功经济调度中，不仅需要考虑AGC备用容量，还需要考虑机组调频响应对爬坡能力的影响。

2.2 日前有功经济调度

按照多时序协调对日前有功经济调度提出的要求，模型以购电成本最低为目标，所需要的约束包括有功功率平衡、支路潮流约束、发电机组出力上下限约束、机组运行备用约束、系统运行备用约束以及机组爬坡能力约束，可表示为

$$\begin{aligned} \min_{P_{G,t}} \quad & \sum_{t=1}^{T_{DA}} c_G P_{G,t} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} e^T (P_{G,t} - P_{D,t}) = 0 \\ F^{\min} \leq T(P_{G,t} - P_{D,t}) \leq F^{\max} \\ P_G^{\min} \leq P_{G,t} \leq P_G^{\max} \\ P_{G,t} + P_{R,t} \leq P_G^{\max} \\ e^T P_{R,t} \geq P_{R,t}^{\min} \\ -\Delta P_{G,C} \leq P_{G,t} - P_{G,t-1} \leq \Delta P_{G,C} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中， $P_{G,t}$ 、 $P_{D,t}$ 和 $P_{R,t}$ 分别为时刻 t 发电机组出力向量、节点负荷预测向量和发电机组运行备用向量； T_{DA} 为日前经济调度优化时段数； c_G 为发电机组的上网电价向量； e 为单位列向量， T 为节点支路有功功率转移因子矩阵； $F^{\max}$ 、 $F^{\min}$ 分别为支路潮流上、下限向量； $P_G^{\max}$ 、 $P_G^{\min}$ 分别为发电机组出力上、下限向量； $\Delta P_{G,C}$ 为发电机组爬坡能力向量； $P_{R,t}^{\min}$ 为时刻 t 时系统运行备用需求最小值。

2.3 日内有功经济调度

按照多时序协调对日内有功经济调度提出的要求，日内有功经济调度模型优化目标与日前一

致，所需要考虑的约束中由于日前经济调度能够保证系统备用充足，因此日内可不考虑系统运行备用约束，而需要考虑AGC调节裕度约束和系统爬坡能力约束，可表示为

$$\begin{aligned} \min_{P_{G,t}} & \sum_{t=1}^{T_{ID}} c_G P_{G,t} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} e^T (P_{G,t} - P_{D,t}) = 0 \\ F^{\min} \leq T(P_{G,t} - P_{D,t}) \leq F^{\max} \\ P_G^{\min} \leq P_{G,t} \leq P_G^{\max} \\ e^T (P_G^{\max} - P_{G,t} - P_{R,t}) \geq P_{AGC,t}^{\max} \\ e^T \Delta P_{G,C} \Delta T \geq P_{C,t}^{\min} \\ -\Delta P_{G,C} \leq P_{G,t} - P_{G,t-1} \leq \Delta P_{G,C} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中， T_{ID} 为日内经济调度优化时段数； ΔT 为优化时间间隔； $P_{AGC,t}^{\min}$ 、 $P_{C,t}^{\min}$ 分别为系统AGC调节需求、系统爬坡能力需求。

2.4 实时有功经济调度

实时有功经济调度主要用于对机组出力微调，为消纳风电在实时有功经济调度阶段，必须考虑机组AGC调节容量满足要求，相对于日内有功经济调度，不需要考虑机组爬坡相关约束，可表示为

$$\begin{aligned} \min_{P_{G,t}} & c_G P_{G,t} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} e^T (P_{G,t} - P_{D,t}) = 0 \\ F^{\min} \leq T(P_{G,t} - P_{D,t}) \leq F^{\max} \\ P_G^{\min} \leq P_{G,t} \leq P_G^{\max} \\ P_{G,t} + P_{AGC,t} \leq P_G^{\max} \\ e^T P_{AGC,t} \geq P_{AGC,t}^{\min} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中， $P_{AGC,t}$ 为发电机组AGC的调节容量向量。

3 系统开发与实施效益

3.1 系统开发

基于所提出的多时序协调的有功经济调度方法，陕西电网部署实施了多时序有功经济调度系统。该系统部署于安全生产Ⅱ区，根据风功率预测系统、负荷预测系统及EMS系统等提供的基础数据，实现对发电机组发电计划的多时序滚动修正，以动态调整发电机组发电计划，使之适应风

功率波动要求，提升电网清洁能源消纳能力。

该系统架构如图2所示。EMS系统一方面将实时电网运行状态，特别是网架数据和发电机组实际功率传递给多时序有功经济调度；另一方面接受多时序有功经济调度系统所编制的发电机组发电计划指令，并将其发送至各发电企业；风功率预测系统、负荷预测系统则分别进行多阶段的风功率和负荷预测，将预测结果传递至多时序有功经济调度系统。

多时序有功经济调度系统开发采用B/S架构，调度运行人员可登陆安装在调度台的工作站浏览使用。

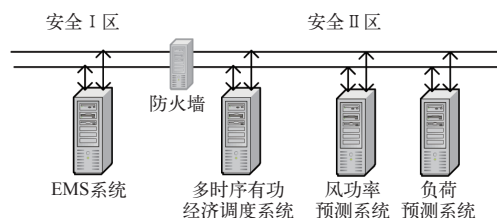


图2 多时序有功经济调度系统架构

3.2 实施效益

多时序有功经济调度系统从研发部署至今，已实施运行超过了两年时间。在提升风电消纳能力，确保电力有序供应等方面发挥了突出的效益。其实施效益可概括为如下几方面。

1) 提高运行备用水平，提升了风功率预测偏差的包容性。以2017年为例，逐月风功率日前预测偏差与逐日平均运行备用对比如图3所示，其中3月是风功率日前预测偏差最大的一个月，最大预测偏差达到320 MW，通过实施多时序有功经济调

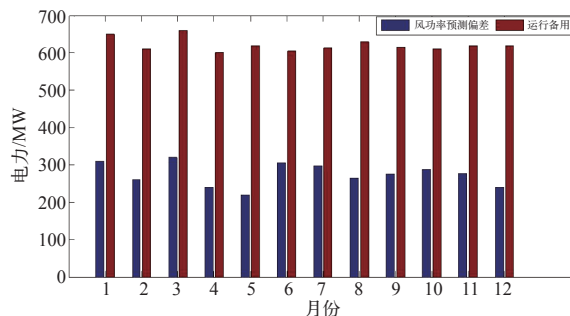


图3 风功率预测偏差与运行备用对比

度,运行备用在该月平均达到660 MW,确保了不会因为风功率预测偏差导致备用不足,不能消纳的情况。

2) 提高爬坡能力,保证了风电出力波动下煤电机组调整的及时性。通过实施日内有功经济调度,确保了时段间煤电机组爬坡能力满足风功率波动要求,逐月时段间爬坡需求与预留爬坡能力对比如图4所示。从图4中可以发现,通过滚动修正,保证了煤电及时响应风功率变化。

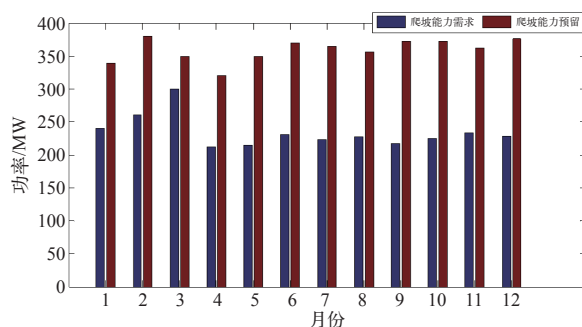


图4 爬坡能力需求与预留情况对比

3) 确保了AGC调节能力充足,保证了风功率波动下电网频率稳定。实施至今,未发生因风功率波动导致的频率偏差超过控制要求,连续两年频率控制合格率达到100%。

4 结束语

针对风电大规模接入对电网不同时序调度运行的影响分析,提出了多时序协调的有功经济调度方法,该方法通过在日前、日内和实时三个时间尺度上的协调互动,预留充足的运行备用、爬坡能力和AGC调节能力,保证了系统对风电预测偏差、波动性的适应性。该方法在陕西电网的实际应用表明,该方法能有效提升电网运行效益,确保风电的可靠消纳。

参考文献

- [1] 李有亮, 麦立, 王磊. 风力发电对电网旋转备用的影响及对策 [J]. 电气应用, 2017, 36 (15): 73-77.
- [2] 王功臣, 邓长虹, 夏沛, 等. 考虑机组优化选取的含风电电网滚动优化调度方法 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (11): 55-60.
- [3] 崔杨, 周海涛, 严干贵, 等. 考虑环境成本及网络约束的风-火联合发电调度 [J]. 电网技术, 2017, 41 (11): 3457-3462.
- [4] 梁钰, 李明扬, 方连航, 等. 计及含蓄热机组快速爬坡能力的风火联合电力系统调度 [J]. 热能动力工程, 2017, 32 (增刊1): 74-79, 130-131.
- [5] 刘立阳, 吴军基, 孟绍良. 基于预测控制的含风电滚动优化调度 [J]. 电工技术学报, 2017, 32 (17): 75-83.
- [6] 董京营, 高红均, 刘俊勇, 等. 风电接入下的时序渐进滚动修正调度模型 [J]. 可再生能源, 2017, 35 (11): 1711-1718.
- [7] 计丽霞, 吴秋芳, 李志宏. 一种新的混合算法在环境经济负荷调度中的应用 [J]. 电气自动化, 2015, 37 (5): 76-77, 107.
- [8] 徐英成, 张焰. 风光储联合发电系统中的储能系统调度策略研究 [J]. 电气自动化, 2013, 35 (5): 27-29.
- [9] 谢旭, 吴继平, 罗亚洲, 等. 同一控制区两级调度风电实时协调控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (11): 114-119.
- [10] 李璐, 郑亚先, 陈长升, 等. 风电的波动成本计算及应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (19): 5155-5163, 5396.

(收稿日期: 2018-02-14) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告