

面向新能源并网的电力系统鲁棒调度模式

黎静华¹, 文劲宇¹, 潘毅², 崔晖²

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 为了应对大规模新能源并网下电力系统的多种随机因素, 提出了一种基于“鲁棒调度计划”+“鲁棒运行区域”的多时间尺度滚动调度模式。首先, 在分析传统多时间尺度调度模式存在问题的基础上, 提出了一种改进的多时间尺度鲁棒调度模式。然后, 阐述了鲁棒调度的基本实施过程, 通过算例对实施过程进行模拟, 并与传统调度模式进行对比说明了所提模式的优越性。最后, 对实现多时间尺度鲁棒调度模式的关键技术进行探讨, 为面向新能源并网的电力系统调度提供参考思路。

关键词: 鲁棒运行区域; 鲁棒调度系统; 多时间尺度调度; 新能源并网; 发电计划

Robust dispatching mode of electrical power system to cope with renewable energy power

LI Jinghua¹, WEN Jinyu¹, PAN Yi², CUI Hui²

(1. State Key Lab of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: To cope with the multiple stochastic factors of power system with large-scale renewable energy, a multi-time scale dispatching mode is proposed. The proposed mode is based on the rolling optimization of “robust dispatching plan” + “robust operational region”. First, the problems of traditional dispatching mode are analyzed. Based on these problems, an improved mode of robust dispatching is put forward. Then, the implementation process of robust dispatching is detailed and an example is studied to demonstrate the process. The advantages of the proposed mode are verified by comparing with the traditional dispatching mode. Finally, the key technologies to realize the proposed robust dispatching mode are discussed, which can provide the reference for the dispatching of power system connected with large-scale renewable energy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377027).

Key words: robust operating area; robust dispatching system; multi-time scales dispatch; renewable energy integration; generation schedule

中图分类号: TM71

文章编号: 1674-3415(2015)22-0047-08

0 引言

新能源的大规模并网, 给电力系统的调度运行带来困难和挑战^[1]。一方面, 新能源出力预测精度低, 使得调度计划与实际运行偏差大, 导致调度计划调整幅度大甚至不能平衡实际功率; 另一方面, 新能源固有的随机波动特性, 使得电力系统的调峰容量、调频容量以及备用容量难以准确确定^[2], 容易造成弃风、弃光、切负荷等现象。因此, 研究适

合于大规模新能源并网的电力系统优化运行调度系统, 实现多种强随机电源作用下电力系统的功率实时平衡, 尽量减少和避免弃风、弃光、切负荷等现象, 对促进和发展新能源电力的大规模使用, 具有重要意义。

对于如何应对以风电为代表的新能源电力的随机性问题, 已有大量的研究成果报道。目前大部分的研究集中在对含有随机风电的电力系统优化调度问题的求解上, 代表性的方法有假设风电服从某一种分布的解析法^[3-4]、采用随机模糊变量描述风电功率^[5]、模拟风电场景的方法^[6-7]和鲁棒优化方法^[8-10]。这些方法为应对新能源电力的随机性提供了途径。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377027); 国家电网公司科技项目(DZ71-14-001)

然而，电力系统运行调度中的功率平衡是一个逐步逼近实际运行点的控制过程，不仅需要研究基于某一个时间点的优化调度，还需要研究有效的功率逼近过程的模式、方法和相关技术。

当前，对于面向大规模新能源并网的电力系统运行调度功率平衡过程模式的研究并不多。文献[11-12]利用“日前调度计划”+“实时 AGC 控制”的两级模式实现微型电网中的功率平衡和能量管理，但该模式不适合于含大规模风电并网的大系统。这是因为由于新能源电力预测误差较大，日前调度计划与实际运行差距大，两级模式使得实时平衡时，AGC 控制压力很大，甚至难以平衡。为此，文献[13]对传统调度运行中的两级功率平衡模式进行改进，提出了一种含日前、日内、实时和 AGC 的多时间尺度协调调度模式和框架，实时跟踪负荷及风电的变化，逐级降低风电预测误差，有效地提高系统接纳风电的能力，该模式得到了广泛的认可和使用。文献[14]基于该模式，研发了一套华北电网的日内发电计划及实时调度系统；文献[15]利用日前、日内和实时滚动优化，实现风-光-储的协同优化调度。文献[16]研究多时间尺度下主动配电网的分布式电源协调控制。文献[17]从需求侧管理的角度，提出了与“日前 24h”、“日内 1h”、“日内 15min”、和“实时负荷调度”4 个时间尺度相适应的柔性负荷与电源侧之间的互动响应模型和策略。

已有文献为含大规模新能源电力系统的优化调度提供了很好的思路。但是，现有的功率平衡过程中在“日前”、“日内”和“实时”等各个时间尺度的滚动优化过程中，本质上仍是制定“应对某一个

预测情景(新能源电力、负荷)的调度计划”的模式。所制定的调度指令鲁棒性不强，导致实际运行中对调度计划的调节频繁；且无法预告当前系统运行的安全边界，以便调度人员根据运行计划的充裕程度做出及时准确的调整，从而能更主动调控随机变化的新能源电力。

为此，在已有研究的基础上，本文提出一种面向大规模新能源并网的电力系统鲁棒调度模式。通过滚动优化，得到适应新能源出力变化的鲁棒调度计划和鲁棒运行域。调度人员可掌握电力系统当前运行裕度，提前做出决策，摆脱当前对新能源“被动应对”的困境，实现较为主动调控含有大规模新能源电力系统。

1 传统多时间尺度电力系统调度模式

1.1 传统调度模式

传统的日前/日内/实时多时间尺度协调运行的工作过程如图 1 所示。图 1 中， \bar{P}_{Σ}^D 表示 t_1 时刻的日前计划负荷， P_{Σ} 表示 t_1 时刻的实际负荷， \bar{P}_{Σ}^D 表示 t_1 时刻的日内修正负荷(通过滚动超短期负荷预测进行修正)， $\Delta\bar{P}_{\Sigma}^D$ 表示 t_1 时刻日前计划负荷与实际负荷的偏差， ΔP_{AGC} 表示 t_1 时刻日内修正计划负荷与实际负荷的偏差，此部分偏差由 AGC 机组承担， ΔP_{NAGC} 表示 t_1 时刻通过滚动预测而缩小的偏差。

下面以 t_1 时刻(实心点所在时刻)为例，对传统的功率平衡过程进行说明。

日前优化计划：基于短期负荷预测结果，以系统运行成本最小为目标、系统安全运行限制为约束，

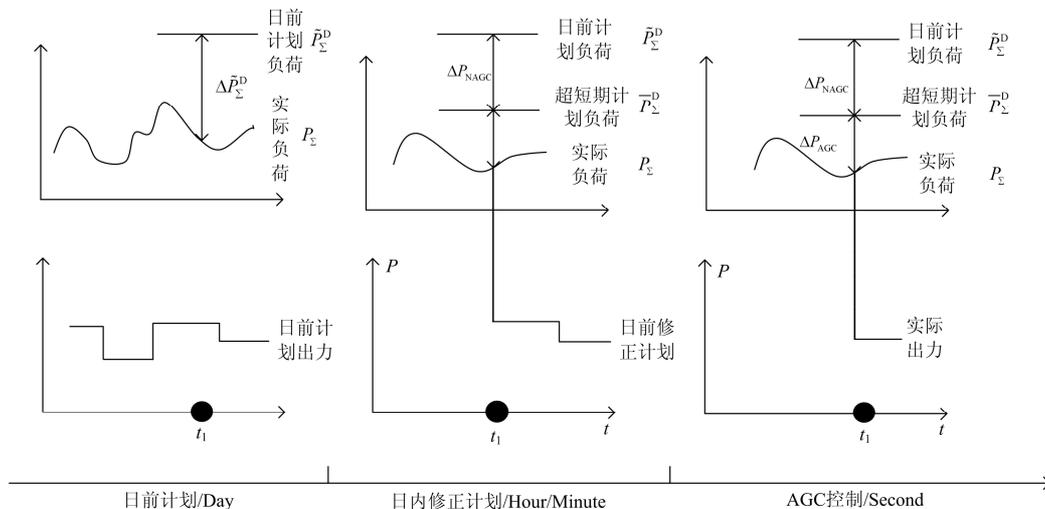


图 1 传统多时间尺度调度模式

Fig. 1 Traditional dispatching of multi-time scale

在各机组的出力限制范围内, 建立日前最优调度计划模型。图 1 中, 在 t_1 时刻, 日前计划负荷与实际负荷的偏差为 $\Delta \bar{P}_{\Sigma}^D$ 。

日内滚动计划: 基于日内的扩展短期/超短期负荷预测结果, 以系统运行成本最小为目标、系统安全运行限制为约束, 在各机组的出力限制范围内, 建立日内最优调度计划模型, 按设定的时间多次滚动地进行优化, 修正日前制定的调度计划。图 1 中, 在 t_1 时刻, 日内计划负荷与实际负荷的偏差由日前的 $\Delta \bar{P}_{\Sigma}^D$ 修正为 ΔP_{AGC} 。

AGC 实时平衡: 日内的预测偏差, 主要通过 AGC 机组来平衡。图 1 中, 在 t_1 时刻, 修正负荷 \bar{P}_{Σ}^D 与实际负荷的偏差 ΔP_{AGC} 由 AGC 机组承担。

至此, 实现了 t_1 时刻的功率平衡。

1.2 传统调度模式存在的不足

第 1.1 节所述的功率平衡模式运行在大规模新能源并网的系统时, 主要存在如下问题。

(1) 调度计划按照“满足预测负荷”的原则来制

定, 仍属于“确定性计划”。虽然通过滚动优化在一定程度上修正了“计划”与“实际”的偏差, 但由于新能源预测误差较大, 调度计划在实际运行中调整的幅度较大。

(2) 电力系统的安全运行区域未知, 调度人员工作被动。依赖于设置一定比例的旋转备用容量应对新能源的波动性和不确定性, 未能根据新能源的变化计算系统鲁棒运行的区域。调度人员不易判断当前的运行充裕度, 以便及时准确地制定出应对措施, 主动调控新能源的能力较差。

因此, 传统的滚动优化模式难以应对“多组随机变量”的电力系统的功率平衡。基于此, 本文提出一种面向大规模新能源并网的电力系统多时间尺度鲁棒调度模式。

2 鲁棒的多时间尺度电力系统调度模式

针对传统的电力系统调度模式存在的不足, 下面提出了一种面向大规模新能源并网的电力系统鲁棒调度运行模式, 如图 2 所示。

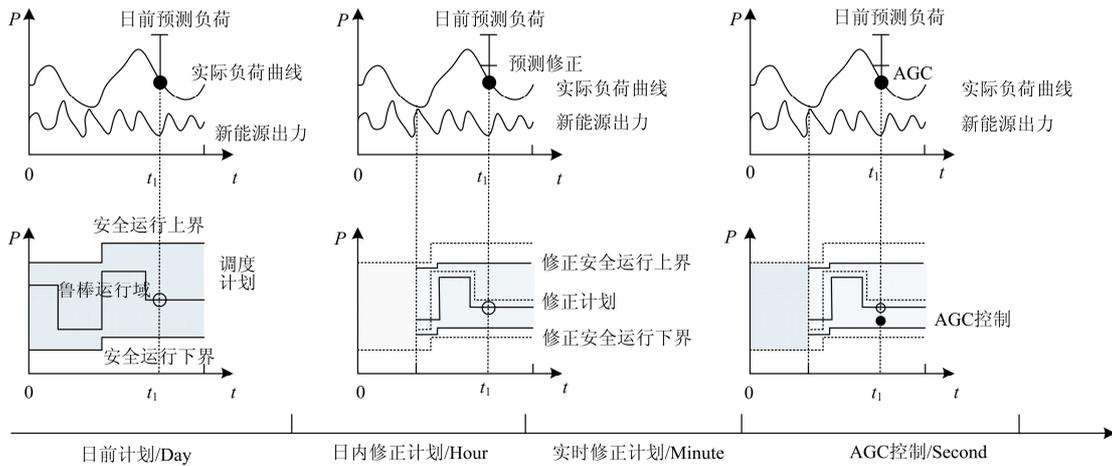


图 2 电力系统鲁棒有功调度模式

Fig. 2 Robust active dispatching mode of power system

(1) 日前鲁棒调度计划和鲁棒运行域。根据日前的负荷和新能源电力的区间预测结果, 制定能平衡在预测区间内变化的负荷和新能源电力的鲁棒的机组开停机计划。同时, 根据所制定的开停机计划, 计算系统具有的旋转备用容量、调峰容量和调频容量, 计算系统所能应对的新能源电力范围。基于此, 组成如图 3 所示的鲁棒运行区域。图 2 中的空心圆圈为 t_1 时刻的鲁棒调度计划。

(2) 日内/实时修正调度计划和鲁棒运行域。根据日内/实时的负荷和新能源电力的区间预测结果, 修正能平衡在预测区间内变化的负荷和新能源电力

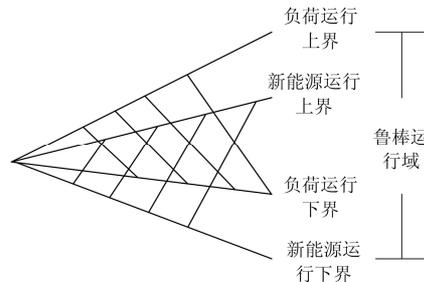


图 3 鲁棒运行域示意图

Fig. 3 Robust running domain

的鲁棒机组开停机计划, 同时修正鲁棒运行域。从

图 2 中看出, 通过修正, t_1 时刻的鲁棒调度计划与实际运行情况更为接近。且由于预测精度提高, 鲁棒运行区域也随之缩小, 节省了运行成本。

与传统的调度模式(图 1)相比, 所提的调度模式(图 2)具有如下优点。

(1) 图 2 的调度计划为鲁棒调度计划。根据日前/日内/实时预测的净负荷和新能源出力的变化区间, 建立能适应于该区间内变化的鲁棒调度计划优化模型, 解算出鲁棒的开停机方式, 如图 2 的调度计划/修正计划。鲁棒调度计划与传统的仅能应对某一预测场景的调度计划相比, 具有更好的鲁棒性和灵活性。避免了传统的确定性优化中, 机组的频繁启动或不能及时启动带来的功率不平衡等问题。

(2) 提供鲁棒运行域。计算鲁棒的开机方式下系统具有的正、负备用容量, 获得可以应对的新能源

出力的范围以及波动的范围。并基于此, 组成鲁棒运行域, 如图 2 中的实心填充部分。当新能源出力随机变化, 系统运行接近边界, 则提前预警, 事先制定应对措施。运行人员可以根据当前的运行状态, 判断系统运行的安全裕度, 提前做出应对的措施, 大大减轻了实时调度的压力, 可以及时主动地应对新能源的变化, 实现主动调控新能源。

3 鲁棒调度模式的实施过程

所提的鲁棒调度模式的具体实施过程为: 短期负荷、新能源区间预测→鲁棒调度计划制定→鲁棒运行域计算→超短期负荷、新能源区间预测→鲁棒调度计划修正→鲁棒运行域修正(边界)→实时 AGC 控制→输出调度指令, 如图 4 所示。所涉及的主要计算模块如下。

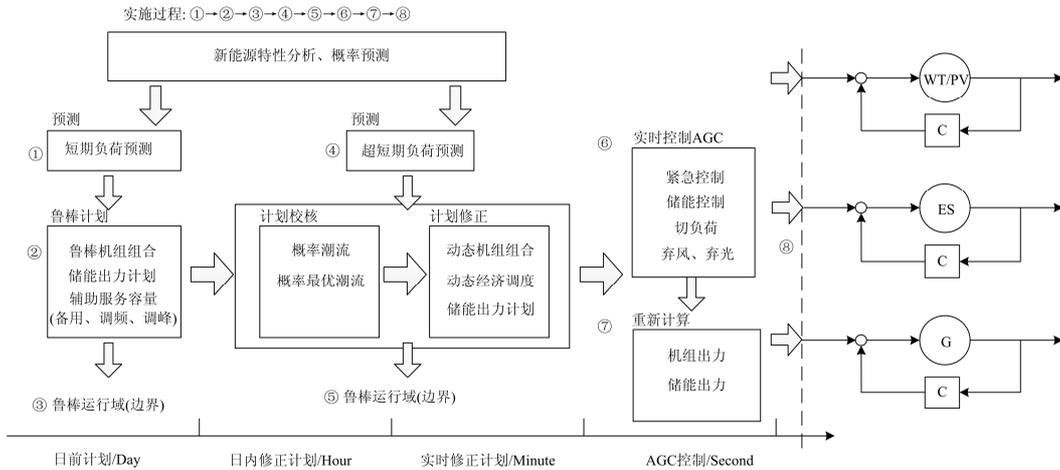


图 4 多时间尺度鲁棒有功调度实施过程

Fig. 4 Application process of robust dispatching system of multi-time scale

(1) 新能源特性分析/概率预测。基于新能源特性分析的预测, 预测新能源出力, 预测给定置信度下的新能源出力区间。例如文献[18]提到的风电功率波动性分析, 文献[19]提到的风电功率相关特性分析。

(2) 鲁棒调度计划制定。鲁棒调度计划制定的模型与方法已有不少研究报道^[8-10]。式(1)为一种基于新能源出力场景的鲁棒调度计划制定模型。该模型采用离散的场景代表新能源电力的随机特性, 所得的调度计划可以满足所有场景的变化。模型中, 不含难以处理的概率性约束, 计算简单、实用。

$$\begin{aligned}
 & \min E\{f(\mathbf{u}, \mathbf{P}^G, \mathbf{P}^W, \mathbf{x})\} \\
 & \text{s. t.} \\
 & \mathbf{h}(\mathbf{u}, \mathbf{P}^G, \mathbf{P}^W, \mathbf{x}) = 0 \\
 & \mathbf{g}(\mathbf{u}, \mathbf{P}^G, \mathbf{P}^W, \mathbf{x}) \geq 0 \\
 & \mathbf{u} \in \Omega_u, \mathbf{P}^G \in \Omega_{P^G}, \mathbf{x} \in \Omega_x, s = 1, 2, \dots, S
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: \mathbf{u} 表示机组的启停计划向量; \mathbf{P}^G 表示常规机组的出力向量, 包括参与调频机组和非调频机组; \mathbf{P}^W 表示新能源出力的场景向量; \mathbf{x} 表示包括系统网络节点有功、无功、电压幅值和相位在内的变量所组成的向量; \mathbf{h} 为系统功率平衡等式约束向量; \mathbf{g} 为包含旋转备用、支路潮流限制在内的不等式约束向量; f 为系统运行成本函数; E 为均值函数; Ω_u 、 Ω_{P^G} 、 Ω_x 分别为变量 \mathbf{u} 、 \mathbf{P}^G 、 \mathbf{x} 的可行域。模型中, f 、 \mathbf{h} 、 \mathbf{g} 、 E 、 Ω_u 、 Ω_{P^G} 、 Ω_x 的具体表达式在文献[20]中均有详细描述。

计算过程中, 首先根据预测得到的风电功率区间, 参照文献[21]的场景生成方法, 生成代表新能源电力特性的 S 个场景; 然后, 将所生成的场景代入式(1)进行计算, 得到的 \mathbf{u} 、 \mathbf{P}^G 则为能应对所有代表场景的鲁棒的计划。

(3) 鲁棒运行域计算。根据上述得到的鲁棒调度

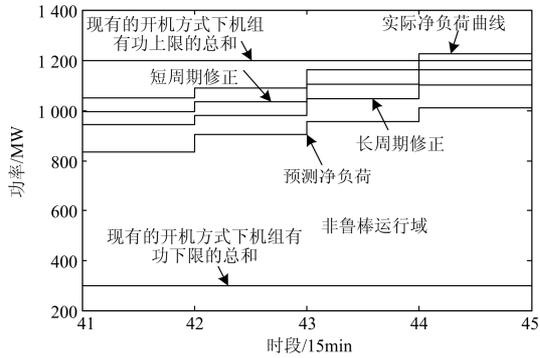


图 6 机组有功调整过程(传统模式)

Fig. 6 Adjustable process of active power (traditional mode)

日内修正(短周期修正): 按照修正的净负荷进行调度, 调整机组出力。从图 6 可以看出, 短周期修正后的曲线已非常接近机组的有功上限。

实时平衡: 从图 6 可以看到, 实际净负荷曲线在第 45 时段已超过了现有的机组有功上限总和。此时调度需要对计划进行快速的、较大的调整, 例如增开快速启停机组。调度人员的压力较大。

从整个有功调度的过程来看, 传统的功率平衡过程虽然可以通过滚动优化不断修正调度计划, 但由于未将鲁棒调度计划和鲁棒运行域纳入调度过程中, 调度计划难以适应新能源变化的现象将会时常发生, 且运行的边界也难以预估, 使得调度人员工作被动。

4.3 鲁棒的调度过程

日前计划: 根据预测净负荷曲线, 假定负荷预测误差为 0, 风电功率的预测误差范围为[-40%, +40%], 参照文献[21]的方法产生风电功率场景, 进而生成鲁棒调度计划。表 2 给出第 41 时段至 45 时段机组的鲁棒开机方式。

对比表 1 的开机方式, 表 2 中, 为了适应一定的风电变化范围, 在第 41 时段至 45 时段, 增开了机组 4。系统有功功率平衡过程如图 7 所示。图 7 中, 仅显示了系统能接纳净负荷的边界, 因为如何可视化包含旋转备用容量、调峰容量、调频容量以及净负荷接纳能力等多元因素的边界的问题尚需进一步研究。

表 2 鲁棒模式下机组的启停计划

Table 2 Units' scheduling in the robust mode

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
41	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
42	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
43	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
44	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
45	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0

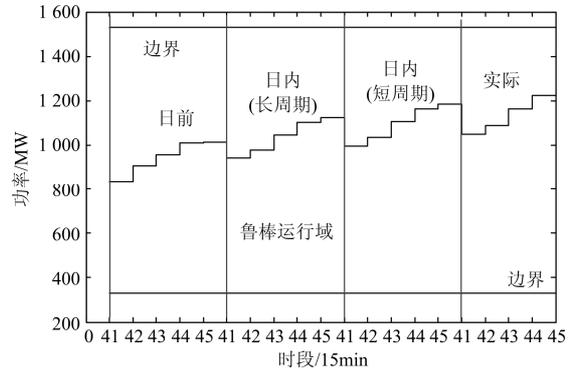


图 7 机组有功调整过程(鲁棒模式)

Fig. 7 Adjustable process of active power (robust mode)

从图 7 可以看出, 鲁棒的调度计划可以适应给定范围内风电和负荷的变化。从日前计划到实时功率平衡的整个过程, 所制定的开停机计划均能满足净负荷的要求, 调度人员无需进行大幅度调整。此外, 将鲁棒调度域纳入有功调度过程中, 可以实时看到当前运行的裕度, 以便及时做出调整。从图 7 可以看到, 在 41-45 时段, 也就是上午 11 点钟左右, 系统备用还处于比较宽裕的状态。

5 尚需研究的关键技术

本文提出了一个多时间尺度的鲁棒有功调度模式, 为实现图 2 所示的鲁棒调度模式, 仍有许多关键的技术问题尚需深入研究和发

5.1 新能源的特性预测和特性分析

与传统出力稳定可控的发电机相比, 新能源电力具有很强的随机波动性, 定量描述风电出力的随机特征并加以利用, 是主动调控新能源的关键技术之一。目前, 已有文献对风电序列的波动性^[18]和相关特性^[19]进行研究, 但这远不足以全面描述风电随机特性, 仍需要挖掘更多的特性指标, 更全面地反映和刻画风电出力的随机特性。

5.2 含随机电源的优化调度技术

对于新型电力系统优化调度问题, 在原来确定型变量的基础上, 引入了风电出力、光伏发电出力等不可控的随机变量。相应地, 其约束在传统模型约束的基础上, 增加了表征风电随机特征的概率函数约束和均值函数约束。此外, 还可能包含刻画随机变量特性如出力特性、波动特性、相关特性的概率分布等约束。

对于随机规划问题的求解, 虽然数学上有随机规划方法和鲁棒优化方法的分支, 但数学方法对求解问题的性质有要求, 例如假设随机变量服从某种常见的分布, 因此直接采用并不能求解实际问题,

这就需要对实际电力系统优化问题或数学方法加以改进, 使之相适应。因此, 如何处理优化模型中的随机变量成为求解问题的关键。

5.3 制定调整量最小的鲁棒调度计划

应对新能源随机波动的鲁棒调度计划, 已有不少的研究报道^[8-10]。对鲁棒调度计划进行调整, 可以适应不同新能源电力出现场景的变化。不同的鲁棒调度计划, 针对不同的新能源电力的场景, 其调整量是不相同的, 如何制定出总体调整量最小的鲁棒调度计划, 对减轻调度人员的压力, 保证电力系统安全稳定运行有重要意义。

5.4 鲁棒运行域的可视化研究

电力系统的安全运行区域需要采用多种因素指标进行衡量, 如前面所述的旋转备用容量、调峰容量、调频容量等等, 如何将这些因素用直观的可视化方法进行表征, 使得调度人员可以方便地了解当前系统运行的状态, 可为主动调控新能源电力提供重要的辅助信息。

5.5 不同时间尺度运行计划的协调

随着时间尺度的不断逼近, 预测精度的不断提高, 各时间尺度之间的调度计划和安全运行区域需要不断协调修正。如何协调各级之间的调度计划和安全运行区域, 既充分利用“时间尺度越短, 预测精度越高”的优势, 又使得调度计划平滑过渡, 调整量小, 实现以最小代价换取系统最安全的运行, 达到安全性和经济性最佳协调, 也是关键技术之一。

6 结论

本文构建了一种新的面向新能源大规模并网的电力系统的鲁棒优化调度模式, 设计了鲁棒调度系统的基本模块, 提出了实现鲁棒调度运行的关键技术。在调度过程中引入“鲁棒调度计划”+“鲁棒安全域”的思想, 与原来传统的“单一固定”的调度计划相比, 鲁棒调度计划具有更好的适应性。同时, 提供了电力系统安全运行区域, 为运行调度人员判断系统运行状态, 了解当前系统旋转备用容量、调峰容量、调频容量所能应对的新能源出力的波动范围, 提前做出应对措施, 实现主动调控新能源提供了新的思路和途径。

参考文献

- [1] 汪春, 吴可, 张祥文, 等. 规模化电动汽车和风电协同调度的机组组合问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 41-48.
WANG Chun, WU Ke, ZHANG Xiangwen, et al. Unit commitment considering coordinated dispatch of large scale electric vehicles and wind power generation[J].
- [2] 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.
- [3] LIU X. Emission minimization dispatch constrained by cost and wind power[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2011, 5(7): 735-742.
- [4] 张海峰, 高峰, 吴江, 等. 含风电的电力系统动态经济调度模型[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1298-1303.
ZHANG Haifeng, GAO Feng, WU Jiang, et al. A dynamic economic dispatching model for power grid containing wind power generation system[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1298-1303.
- [5] 马瑞, 康仁, 姜飞, 等. 考虑风电随机模糊不确定性的电力系统多目标优化调度计划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 150-156.
MA Rui, KANG Ren, JIANG Fei, et al. Multi-objective dispatch planning of power system considering the stochastic and fuzzy wind power[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 150-156.
- [6] 黎静华, 韦化, 莫东. 含风电场最优潮流的 Wait-and-See 模型与最优渐近场景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 15-23.
LI Jinghua, WEI Hua, MO Dong. Asymptotically optimal scenario analysis and wait-and-see model for optimal power flow with wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 15-23.
- [7] PAPPALA V S, ERLICH I, ROHRIG K, et al. A stochastic model for the optimal operation of a wind-thermal power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 940-950.
- [8] 杨明, 韩学山, 王士柏, 等. 不确定运行条件下电力系统鲁棒调度的基础研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊): 100-107.
YANG Ming, HAN Xueshan, WANG Shibai, et al. Fundamental research for power system robust dispatch under uncertain operating condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S): 100-107.
- [9] 梅生伟, 郭文涛, 王莹莹, 等. 一类电力系统鲁棒优化问题的博弈模型及应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 47-56.
MEI Shengwei, GUO Wentao, WANG Yingying, et al. A game model for robust optimization of power systems and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,

- 33(19): 47-56.
- [10] 李斯, 周任军, 童小娇, 等. 基于盒式集合鲁棒优化的风电并网最大装机容量[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 208-213.
LI Si, ZHOU Renjun, TONG Xiaojiao, et al. Robust optimization with box set for maximum installed capacity of wind farm connected to grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 208-213.
- [11] 徐立中, 易永辉, 朱承治, 等. 考虑风电随机性的微网多时间尺度能量优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 1-8.
XU Lizhong, YI Yonghui, ZHU Chengzhi, et al. Multi-time scale optimal energy dispatch of microgrid considering stochastic wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 1-8.
- [12] 郭思琪, 袁越, 张新松, 等. 多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 122-129.
GUO Siqi, YUAN Yue, ZHANG Xinsong, et al. Energy management strategy of isolated microgrid based on multi-time scale coordinated control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 122-129.
- [13] 张伯明, 吴文传, 郑太一, 等. 消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 1-6.
ZHANG Boming, WU Wenchuan, ZHENG Taiyi, et al. Design of a multi-time scale coordinated active power dispatching system for accommodating large scale wind power penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 1-6.
- [14] 陈之栩, 李丹, 梁吉, 等. 华北电网日内发电计划及实时调度系统[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 54-57.
CHEN Zhixu, LI Dan, LIANG Ji, et al. Intraday generation plan and real-time dispatch system of North China grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 54-57.
- [15] 朱海鹏, 王泽众, 张新平, 等. 风光储协同调度的多时间尺度决策方法[J]. 山东电力技术, 2012(3): 21-25.
ZHU Haipeng, WANG Zezhong, ZHANG Xinping, et al. Multi-time scale decision-making method of synergistic dispatch among wind power photovoltaic power and PEVs charging[J]. Shandong Electric Power, 2012(3): 21-25.
- [16] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 多时间尺度下基于主动配电网的分布式电源协调控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 1-8.
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Multi-time scale coordinated control of distributed generators based on active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 1-8.
- [17] 杨胜春, 刘建涛, 姚建国, 等. 多时间尺度协调控制的柔性负荷互动响应调度模型与策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3664-3673.
YANG Shengchun, LIU Jiantao, YAO Jianguo, et al. Model and strategy for multi-time scale coordinated flexible load interactive scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3664-3673.
- [18] 林卫星, 文劲宇, 艾小猛, 等. 风电功率波动特性的概率分布研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 38-46.
LIN Weixing, WEN Jinyu, AI Xiaomeng, et al. Probability density function of wind power variations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 38-46.
- [19] 黎静华, 文劲宇, 程时杰, 等. 考虑多风电场出力 Copula 相关关系的场景生成方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 30-36.
LI Jinghua, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. A scene generation method considering copula correlation relationship of multi-wind farms power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 30-36.
- [20] 黎静华, 韦化, 夏小琴. 求解机组组合问题的改进模式搜索算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 33-41.
LI Jinghua, WEI Hua, XIA Xiaoqin. Improved general pattern search filter algorithm for unit commitment problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 33-41.
- [21] 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.
LI Jinghua, SUN Haishun, WEN Jinyu, et al. A two-dimensional optimal technology for constructing wind power time series scenarios[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2544-2551.

收稿日期: 2015-05-08; 修回日期: 2015-10-09

作者简介:

黎静华(1982-), 女, 博士, 博士后, 主要从事电力系统优化运行与控制、新能源并网与规划等研究; E-mail: happyjinghua@163.com

文劲宇(1970-), 男, 博士, 教授, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行与控制、电能存储与电力安全、多端直流输电与直流电网、新能源并网与规划等研究; E-mail: jinyu.wen@hust.edu.cn

潘毅(1968-), 女, 博士, 教授级高工, 研究方向为电力系统优化调度等。E-mail: pany@epri.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)