

基于随机模型预测控制的电网联合调度

李 晖¹,王智冬¹,王 琥¹,彭超逸^{2,3},侯云鹤^{3,4},殷文倩^{3,4}

(1. 国网经济技术研究院有限公司,北京 102209;2. 南方电网电力调度控制中心,广东 广州 510530;
3. 香港大学 电机电子工程学系,香港特别行政区 999077;4. 香港大学 深圳研究院,广东 深圳 518057)

摘要:针对大规模风电并网给电力系统运行调度带来的问题,指出风电在小时级的波动性和不确定性是风电并网给系统运行带来的根本挑战,为应对该挑战,利用随机模型预测控制对含负荷响应的系统联合调度运行进行建模,并从数学上证明运行策略的全局最优性。通过算例仿真验证了负荷响应在小时级的灵活性对系统运行的经济性和风电消纳的重要作用。

关键词:风电;小时级时间尺度;负荷响应;随机模型预测控制

中图分类号:TM 761;TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.005

0 引言

随着我国风电并网规模的持续快速扩大,更加复杂和深层次的问题预期将不断出现。由于我国风能资源分布的原因,风电开发采用了大规模高集中和远距离的战略。在我国大规模高集中开发的模式下,区域风电场分布集中度高,来风情况相近,风电场间出力相关性高。因此,区域风电出力呈现出更大的波动性和不确定性,对维持电力系统的供电充裕性有重大影响,给传统电力系统的运行调度方法带来巨大的挑战^[1]。

传统运行调度方法主要应对负荷的波动性和不确定性,时间尺度较长,预测的精度也相对较高。然而,由于风电的波动性和不确定性的时间尺度较短,通常在小时内还有较大的功率出力波动,并且预测精度较低,故而平抑风电带来的出力波动性和不确定性需要充分利用系统短时间尺度的灵活性资源,并非简单调度发电机出力就能满足系统的安全运行要求^[2]。因此,适应大规模风电并网的电网调度运行需要重点考虑灵活性资源和常规发电机的协调,使电网在充分消纳风电的同时,实现系统的经济安全运行^[3]。

电力系统灵活性资源的主要来源包括电力市场与电网互联、灵活发电技术、储能元件的广泛应用、旋转备用、负荷响应等。小时内的负荷响应有助于减少电网安全约束调度的成本,降低用户电费成本,以及提高火电机组的运行灵活性^[4-5]。此外,由于负荷的功率占比远大于其他几种灵活性资源,因此,本文主要考虑负荷响应作为系统灵活性资源。

近年来,负荷响应作为一种能够为电力用户带来经济收益并辅助消纳新能源的重要技术手段,在

考虑负荷响应的电网联合调度方面已有一些研究。文献[6]建立柔性负荷与大电网互动的动力学模型,为后续研究提供了重要的理论基础。家用负荷、工业负荷等不同类型的负荷在实现负荷响应的具体技术路线方面有很大的差异。文献[7]通过应用随机优化和鲁棒优化的方法进行贯序调度和控制,论证了家用电器能够有效地提供负荷响应服务。文献[8]详细描述基于家庭电器实现负荷响应的硬件系统架构以及参与电价变动的响应控制策略。文献[9]将家电参与负荷响应的应用场景扩展至提供调频辅助服务。除家庭用电设备外,文献[10]表明暖通设备也具备通过负荷响应实现负荷平衡辅助服务的潜力,文献[11]考虑了空调冷水机组群控策略对于负荷响应的作用。在工业负荷方面,文献[12]提出高耗能大工业用户参与负荷响应的方法,并进行经济回报分析,文献[13]讨论火电厂厂用电作为一类负荷在发电侧参与负荷响应的方法。在负荷响应的影响因素和应用方面,文献[14]量化分析不同类型负荷在实现负荷响应时的相互影响,并建立量化分析模型,进一步完善了目前负荷响应的数学分析模型。文献[15]针对自主运行设备考虑负荷的自主控制行为对负荷响应的影响。文献[16]考虑电力市场这一运行环境对需求响应的重要影响。结合当前的调度运行实际需求,文献[17]讨论考虑风电接入情况下负荷响应对日前调度计划的影响。文献[18]从调度实际需求出发,提出负荷响应纳入调度运行系统的具体框架与技术路线。以上研究显示了负荷响应对于辅助波动性风电资源接入的巨大应用潜力和技术价值。

然而,在以上研究中,负荷响应仅用于抑制新能源出力的波动性,而并非利用其灵活性平抑新能源在短时间尺度内的随机性。针对以上不足,本文提出基于随机模型预测控制的考虑负荷响应的电网联合调度方法,充分利用负荷响应的灵活性,平抑风电在小时级时间尺度带来的波动性和不确定性。本文

收稿日期:2019-03-14;修回日期:2019-05-30

基金项目:国家重点研发计划支持项目(2016YFB0900100)
Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900100)

所提方法优越性在于:①利用模型预测控制作为整个调度方法的基本框架,可以充分利用风电的中期、短期和超短期预测,实现在日内、实时阶段对日前电网调度决策的滚动更新,实现系统联合调度的经济性和安全性;②考虑负荷响应小时级的灵活调节能力,平抑相同时间尺度的风电功率波动,提高风电的消纳能力,减少弃风;③所提方法可以在任意风电功率概率分布下,利用随机规划求出期望意义下电力系统的最优联合调度方案。

本文主要内容为:第 1 节主要说明本文调度方法的基本思想——随机模型预测控制的基本概念;第 2 节在随机模型预测控制思想的基础上,对考虑负荷响应的电网联合调度进行数学建模并给出求解方法;第 3 节对提出的联合调度模型求解策略的全局最优性进行理论分析论证;第 4 节采用 IEEE 6 节点系统和甘肃电网实际系统分别进行算例分析,验证所提方法的有效性和优越性;第 5 节给出本文的最终结论。

1 随机模型预测控制的基本思想

1.1 随机模型预测控制

模型预测控制是用来处理动态滚动时间尺度的优化控制问题。为了处理随机性问题给决策带来的影响,模型预测控制系统可采用随机性模型处理不确定性问题,然后通过连续的决策抵消不确定性的影响。另外,在模型中采用适当的积分器能够消除系统输出端的稳态误差。随机模型预测控制的数学表达式如(1)–(3)所示。

$$\min E \left\{ \sum_{k=1}^K f(x_k, u_k, \tilde{w}_k) \right\} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } x_{k+1} = g(x_k, u_k, \tilde{w}_k) \quad \forall k \quad (2)$$

$$h(x_k, u_k, \tilde{w}_k) \leq 0 \quad \forall k \quad (3)$$

其中, E 表示取目标函数期望值; f 为目标函数; k 表示系统所处时段, K 为总时段数; x_k 为系统状态变量; g 和 h 分别为等式约束和不等式约束表达式; u_k 为系统控制变量; \tilde{w}_k 为系统随机变量。目标函数式(1)表示在期望意义下优化系统在整个时间段内的运行状态,约束条件式(2)表示系统由于随机变量而带来的状态转移方程,约束条件式(3)表示系统控制变量、随机变量和状态变量满足的系统特性。

图 1 给出了模型预测控制的滚动优化模式示意图。采用模型预测控制方法时,在每一个时间段 k 内,对 $k, k+1, \dots, K$ 全部时间范围内的不确定因素进行预测,即约束条件式(2),并基于预测结果生成控制策略,但是策略仅在该时间段内实现。在下一个时间段到来时,更新预测信息,重复求解相同的控制策略,直到最后一个时间段 K 。整个过程需要求解 K 个子优化问题。

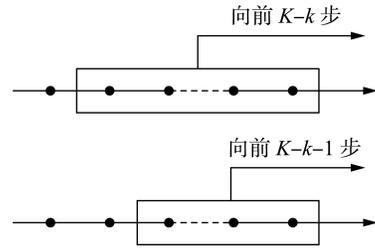


图 1 模型预测控制的滚动优化模式

Fig.1 Look-ahead pattern of model predictive control

采用模型预测控制对电网调度进行滚动优化的优点在于:第一,运行人员不是粗略地等待、观测不确定性场景,而是利用不断更新的预测信息,实时滚动地进行动态优化,使得因紧急情况而启动快速响应机组或发生切负荷事件的概率大幅降低;第二,优化模型不局限于场景,还可以引入连续概率密度函数,建立带有机会约束的优化模型。

以三阶段模型预测控制为例,滚动优化的求解过程如图 2 所示。

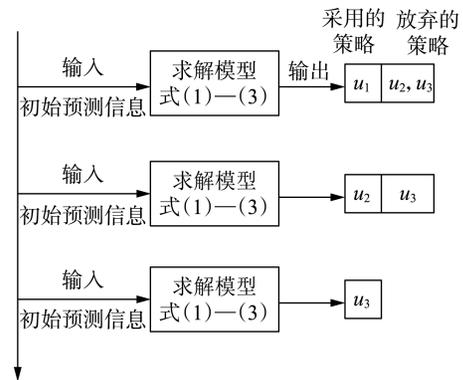


图 2 滚动优化的求解过程

Fig.2 Solution process of look-ahead optimization

1.2 基于随机模型预测控制的电网调度

大规模风电并网背景下考虑负荷响应的电网联合调度方法面临的主要挑战在于:①由于风电预测精度越接近,实时运行点越精确,因此电网调度需要充分利用不断更新的风电预测信息,滚动更新调度策略,满足系统运行的安全经济要求;②由于风电波动性主要反映在小时级时间尺度,负荷响应的灵活调节能力也集中在小时级时间尺度,因此考虑负荷响应的电网联合调度模型需要考虑系统在各小时之间的耦合关系,例如由于机组的爬坡能力,负荷响应的小时级调节能力带来的时段耦合等,因此调度策略应具有序贯最优性,即在整个调度时段上最优,而非单个时间点的最优;③由于风电出力的不确定性,调度策略的最优性需要建立在期望最优的意义上,并且考虑风电预测无法较好地利用概率分布刻画,调度模型需要兼容服从任意概率分布的风电预测模型。

由于随机模型预测控制可以根据模型输入(即

风电功率预测)的更新,不断输出最优策略,并且具有处理大规模序贯约束和期望型目标函数的能力,因此可以很好地处理考虑负荷响应的电网联合调度面临的挑战。因此,本文利用随机模型预测控制的思想,对考虑负荷响应的电网联合调度进行建模分析。

2 考虑负荷响应的电网联合调度

2.1 考虑负荷响应的联合调度框架

基于随机模型预测控制的框架,结合含负荷响应的电网联合调度呈现出的序贯特性,本文提出考虑负荷响应的电网联合调度模式,如图 3 所示,包括 I 个调度阶段和 T 个运行时段。值得一提的是,本文所提出的调度模式与当前电力市场的调度模式相容。

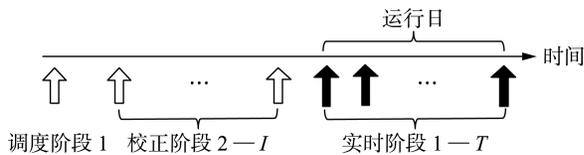


图 3 考虑负荷响应的系统联合调度

Fig.3 Power system coordinated dispatch considering demand response

具体而言,系统调度的最终目标是在实际运行日的一段时间内(例如 12 h)能够满足电力系统的功率平衡等安全性要求。以符合实际电力市场的日前、日内、实时 3 个阶段为例:在日前调度阶段,通过调度发电机出力 and 负荷响应生成初步的运行方式;然后,随着时间的向前推移,风电预测信息不断更新,在日内调度阶段调整发电机出力和负荷响应状态,对由于日前预测偏差引起的系统状态进行校正;同样地,在最终的实时运行阶段,根据超短期风电功率预测信息,在日前和日内决策的基础上叠加实时决策,再次调整发电机出力和负荷响应状态,使系统最终实时满足运行安全性和经济性的要求。值得一提的是,本文提出的运行方法可以不局限于 3 个阶段,具有很好的拓展性,可以考虑实时之前多次风电预测信息的更新,提高系统运行的安全性和经济性。

2.2 考虑负荷响应的联合调度的数学模型

本文建立的考虑负荷响应的联合调度模型基于如下 4 个基本假设:①本文主要考虑输电网级别的机组调度和负荷响应问题,因此利用直流潮流近似交流潮流约束,由于输电网的电压等级高,无功补偿充足,电感相对较大,因此直流潮流对交流潮流具有很好的近似度;②本文假设风电预测数据为模型的外生输入,不考虑具体风电预测方法和模型;③由于本文考虑的时间尺度较短,因此假定机组开机情况给定,不考虑机组启停的影响;④本文认为输电网级别下各时段的节点负荷响应可用节点负荷响应上下限约束、负荷响应爬坡约束来刻画,对于不同类型、

不同影响因素下负荷响应特性不再进行详细建模。

基于以上 4 个假设,在任意调度阶段 i ,以考虑负荷响应的联合调度成本最小化为目标建立数学模型,并满足系统运行的安全约束。

(1) 最小化运行成本。

$$\min E \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N (c_{in}^p p_{in} + c_{in}^d d_{in}) + \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N c_{in}^w s_{in} \right\} \quad (4)$$

其中, N 为总节点数; t 表示第 t 时段; i 表示第 i 调度阶段; n 表示第 n 个节点; c_{in}^p 为发电机调度单位成本; c_{in}^d 为负荷响应单位成本; c_{in}^w 为弃风成本; p_{in} 为发电机出力; d_{in} 为负荷响应功率; s_{in} 为弃风量。

(2) 机组容量与最小技术出力约束。

$$\underline{P}_n \leq p_{in} \leq \bar{P}_n \quad (5)$$

其中, \underline{P}_n 、 \bar{P}_n 分别为机组最小技术出力和容量。

(3) 机组爬坡能力约束。

$$\underline{R}_n \leq \sum_{i=1}^I p_{in} - \sum_{i=1}^I p_{i-1n} \leq \bar{R}_n \quad (6)$$

其中, \bar{R}_n 、 \underline{R}_n 分别为机组上爬坡和下爬坡能力。

(4) t 时段机组出力累计上下限约束。

$$\underline{P}_n \leq \sum_{i=1}^I p_{in} \leq \bar{P}_n \quad (7)$$

(5) 负荷响应约束。

$$\underline{D}_n \leq d_{in} \leq \bar{D}_n \quad (8)$$

其中, \underline{D}_n 、 \bar{D}_n 分别为负荷响应的下限和上限。

(6) 负荷响应的爬坡约束。

$$\underline{Z}_n \leq \sum_{i=1}^I d_{in} - \sum_{i=1}^I d_{i-1n} \leq \bar{Z}_n \quad (9)$$

其中, \bar{Z}_n 、 \underline{Z}_n 分别为负荷响应的爬坡下限和上限。

(7) t 时段负荷响应的累计上下限约束。

$$\underline{D}_n \leq \sum_{i=1}^I d_{in} \leq \bar{D}_n \quad (10)$$

(8) 系统节点功率平衡方程。

$$\sum_{i=1}^I (p_{in} + d_{in}) + \tilde{w}_n = \mathbf{B}_n \boldsymbol{\theta}_t^T + s_{in} + l_n \quad (11)$$

其中, \tilde{w}_n 为随机的风电出力; \mathbf{B}_n 为直流潮流的导纳矩阵第 n 行; $\boldsymbol{\theta}_t^T$ 为电压相角向量矩阵的第 t 行转置; l_n 为负荷大小。

(9) 系统潮流方程。

$$(\theta_{in} - \theta_{im}) / x_{nm} = f_{inm} \quad (12)$$

其中, x_{nm} 为线路 $n-m$ (节点 n 与节点 m 间线路) 的电抗; f_{inm} 为 t 时段线路 $n-m$ 上的潮流; θ_{in} 为 t 时段节点 n 的电压相角。

(10) 系统线路热极限约束。

$$-F_{nm} \leq f_{nm} \leq F_{nm} \quad (13)$$

其中, F_{nm} 为线路 $n-m$ 的热极限。

3 调度策略的生成和最优性证明

3.1 调度模型的算法流程

基于 2.2 节所建数学模型,完整的调度策略生成流程如图 4 所示。其具体过程如下。

(1) 在调度阶段 i , 输入第 i 步风电预测的信息, 由蒙特卡洛模拟生成场景树, 即 \tilde{w}_m 。

(2) 判断是否为第一阶段, 如果是, 转至步骤 (3), 否则执行步骤 (4)。

(3) 输入场景树, 求解式 (4) — (13) 所示的调度优化模型, 并记录本阶段的调度策略, 即为发电机出力以及负荷响应的大小。

(4) 将上一步调度策略作为发电机和负荷响应的初值。输入场景树, 求解式 (4) — (13) 所示的调度优化模型, 并记录本阶段的调度策略, 作为在初值上的调整量。

(5) 判断是否处于调度过程的最后阶段, 如果不是, 得到更新后的风电预测信息, 置 $i = i + 1$, 转至步骤 (1); 如果是, 转至步骤 (6)。

(6) 在第一阶段发电机和负荷响应基值的基础上, 叠加所有阶段的调度策略作为发电机和负荷响应的调整量, 最终输出每个阶段的调度策略, 决定最终发电机出力和负荷响应的状态。

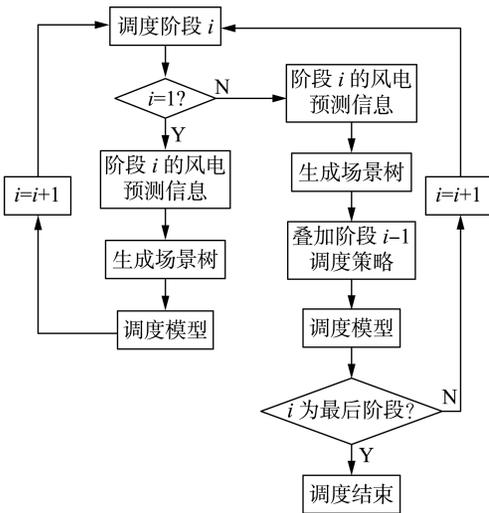


图 4 调度策略的算法流程

Fig.4 Flowchart of dispatch algorithm

3.2 调度策略的最优性证明

为了保证本文所提调度策略的经济性, 需要对调度模型的最优性进行讨论。

定理 1: 如果式 (4) — (13) 所组成的优化模型存在有限可行解, 则其局部最优解一定为唯一的全局最优解。

定理 1 的详细证明见附录。

4 算例

4.1 算例设置

本文基于修改的 IEEE 6 节点系统和中国甘肃电网实际系统分别进行算例仿真。其中, IEEE 6 节点系统中节点 1—3 接常规发电机, 节点 4—6 接负荷, 此外, 节点 1 还接入 1 台风机。修改后的 IEEE 6 节点系统拓扑结构图如图 5 所示。考虑运行日 12 h 的调度情况, 调度阶段为两阶段。发电机和负荷数据分别如表 1 和表 2 所示。所采用的甘肃电网数据取自文献 [19]。

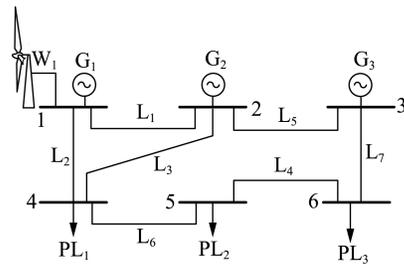


图 5 IEEE 6 节点系统拓扑图

Fig.5 Topology of IEEE 6-bus system

表 1 发电机数据

Table 1 Generator data

发电机	P /MW	\bar{P} /MW	R /MW	\bar{R} /MW	调度成本 c_{in}^d /元	
					第一阶段	第二阶段
G_1	10	100	10	10	10.0	12.0
G_2	37	75	7.5	7.5	11.5	13.4
G_3	45	90	9	9	12.0	15.6

表 2 负荷数据

Table 2 Load data

负荷	D /MW	\bar{D} /MW	Z /MW	\bar{Z} /MW	负荷成本 c_{in}^d /元	
					第一阶段	第二阶段
PL_1	0	83	30	30	12.0	15.3
PL_2	0	78	10	10	13.5	13.8
PL_3	0	88	5	5	15.7	18.6

4.2 算例分析

在 IEEE 6 节点系统下, 本文考察风电功率波动不剧烈和风电功率波动剧烈 2 个典型场景下不允许负荷响应和允许负荷响应时的运行成本和发电机出力情况。

场景 1: 风电功率波动不剧烈。在第一阶段对运行日 12 h 的风电功率进行预测, 如图 6 所示。从

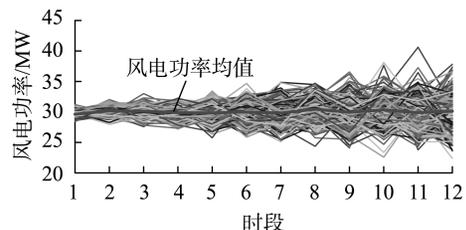


图 6 场景 1 下风电功率预测

Fig.6 Wind power prediction of Scenario 1

图中可以看出,预测误差随时间推移而增大,但风电功率的均值波动不大。

场景 1 下不允许负荷响应与允许负荷响应时的结果如图 7 所示。从图中可以看出,虽然发电机的小时内调节能力较差,但是由于风电波动较小,仅由发电机爬坡调节也能满足系统安全约束,几乎不需要调用成本较高的负荷响应。

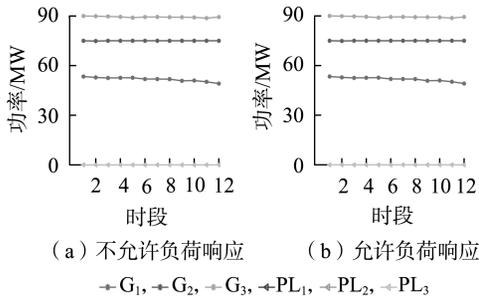


图 7 场景 1 下不允许负荷响应与允许负荷响应时结果
Fig.7 Results without and with load response for Scenario 1

图 8 给出了有负荷响应和无负荷响应时系统的运行费用。从图中可以看出,由于不需要调动价格更高的负荷响应资源,2 种情况下系统运行费用的差别不大,主要来源于发电机出力和弃风量的微小差异。

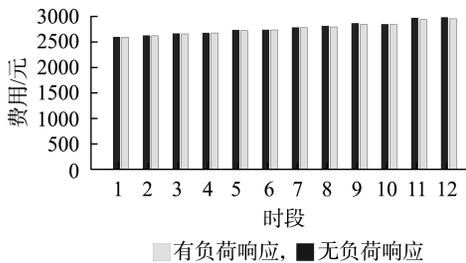


图 8 场景 1 下有、无负荷响应时系统运行费用比较
Fig.8 Comparison of system operation cost with and without load response for Scenario 1

场景 2: 风电功率波动较为剧烈。在第一阶段对运行日 12 h 的风电功率进行预测,如图 9 所示。从图中可以看出,预测误差随时间推移而增大,且风电功率的均值波动较大。

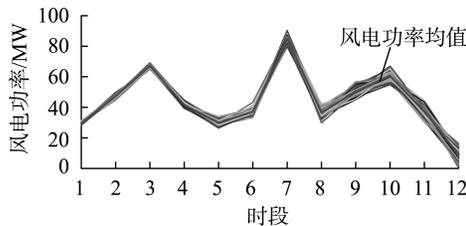


图 9 场景 2 下风电功率预测
Fig.9 Wind power prediction of Scenario 2

在场景 2 下,不允许负荷响应与允许负荷响应时的结果如图 10 所示。从图中可以看出,由于发电机的小时内调节能力较差,在风电波动较大时,为了消纳更多风电功率,需要调用负荷响应这种在小时

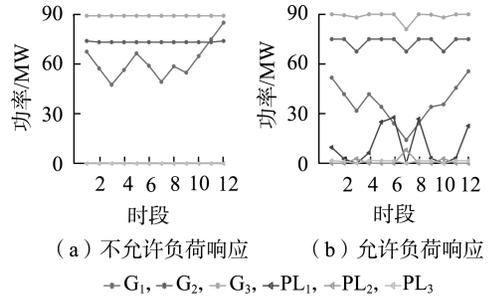


图 10 场景 2 下不允许负荷响应与允许负荷响应时结果
Fig.10 Results without and with load response for Scenario 2
内具有较强灵活性的资源,使系统满足安全运行的要求。

图 11 给出了有负荷响应和无负荷响应时系统的运行费用。从图中可以看出,由于风电波动剧烈,仅凭发电机的调节能力无法使系统消纳较多的风电功率,导致弃风量较大,运行成本较高。引入负荷响应后,系统可以充分利用风电资源,使运行成本下降。

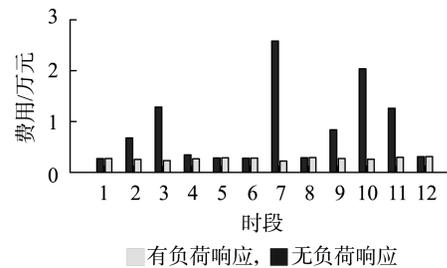


图 11 场景 2 下有、无负荷响应时系统运行费用比较
Fig.11 Comparison of system operation cost with and without load response for Scenario 1

在中国甘肃电网实际系统下,本文考察不允许负荷响应和允许负荷响应 2 种情况下的系统运行成本,算例结果如图 12 所示。可以看出,考虑负荷响应时的电网联合调度,可以有效提高电网对大规模波动性风电并网的消纳能力,并且有效降低电网的运行成本。

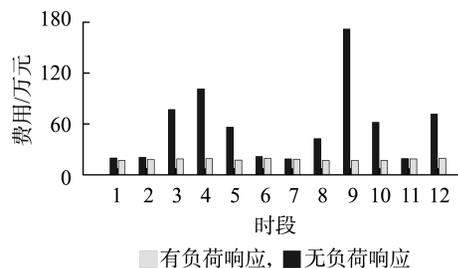


图 12 甘肃电网背景下有、无负荷响应时系统运行费用比较
Fig.12 Comparison of system operation cost with and without load response for Gansu Power System

5 结论

本文基于随机模型预测控制,提出了考虑负荷响应的电网联合调度方法,使系统能够充分利用负荷响应在小时级的灵活调节能力,平抑风电小时级

的波动性和不确定性,消纳更多的风电资源。

本文通过严格的数学推导,证明了所提出的调度方法生成策略的全局最优性,保障了系统运行的经济性。同时,通过算例仿真验证了负荷响应这一小时级灵活性资源的重要作用。尤其在风电波动性和不确定性较大时,负荷响应可以为系统带来更多的运行灵活性,使系统的运行成本下降,同时减少弃风,提高电网对风电的消纳能力。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] PENG Chaoyi, LEI Shunbo, HOU Yunhe, et al. Uncertainty management in power system operation[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2015, 1(1): 28-35.
- [2] PENG Chaoyi, HOU Yunhe, YU Nanpeng, et al. Risk-limiting unit commitment in smart grid with intelligent periphery[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4696-4707.
- [3] QIN Zhinjun, HOU Yunhe, LEI Shunbo, et al. Quantification of intra-hour security-constrained flexibility region[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 671-684.
- [4] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1-8.
LIU Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-8.
- [5] 田世明, 王蓓蓓, 张晶. 智能电网条件下的需求响应关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3576-3589.
TIAN Shiming, WANG Beibei, ZHANG Jing. Key technologies for demand response in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3576-3589.
- [6] 曾丹, 姚建国, 杨胜春, 等. 柔性负荷与电网互动的系统动力学仿真模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4227-4233.
ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. System dynamics simulation model of flexible load in interactive power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4227-4233.
- [7] CHEN Zhi, WU Lei, FU Yong. Real-time price-based demand response management for residential appliances via stochastic optimization and robust optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1822-1831.
- [8] HU Qinran, LI Fangxing. Hardware design of smart home energy management system with dynamic price response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1878-1887.
- [9] 汤奕, 邓克愚, 孙华东, 等. 智能家电参与低频减载协调配合方案研究[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2861-2867.
TANG Yi, DENG Keyu, SUN Huadong, et al. Research on coordination scheme for smart household appliances participating underfrequency load shedding[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2861-2867.
- [10] LU Ning. An evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1263-1270.
- [11] 杨瑾, 石坤, 杨建林, 等. 考虑平抑风电波动的空调冷水机组群控策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 108-113.
YANG Jin, SHI Kun, YANG Jianlin, et al. Group control strategy of air conditioning water chiller considering smoothing wind power fluctuations[J]. Electrical Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 108-113.
- [12] 唐哲, 吴江, 姚娜娜, 等. 考虑电网备用需求的高耗能企业鲁棒生产调度方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2128-2133.
TANG Zhe, WU Jiang, YAO Nana, et al. A robust production scheduling method of high energy-consuming enterprises considering providing power grid with reserve[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2128-2133.
- [13] 司凤琪, 顾慧, 叶亚兰, 等. 基于混沌粒子群算法的火电厂级负荷在线优化分配[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(26): 103-109.
SI Fengqi, GU Hui, YE Yalan, et al. Online unit load economic dispatch based on chaotic-particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(26): 103-109.
- [14] 李亚平, 周竞, 鞠平, 等. 柔性负荷互动影响量化评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 26-32, 67.
LI Yaping, ZHOU Jing, JU Ping, et al. Quantitative assessment method for interactive impact of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 26-32, 67.
- [15] 程瑜, 安旻. 主动负荷互动响应行为分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 63-70.
CHENG Yu, AN Su. Analysis of active load's interaction response behavior[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 63-70.
- [16] 赵鸿图, 朱治中, 于尔铿. 电力市场中需求响应市场与需求响应项目研究[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 146-153.
ZHAO Hongtu, ZHU Zhizhong, YU Erkeng. Study on demand response markets and programs in electricity markets[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 146-153.
- [17] 罗纯坚, 李姚旺, 许汉平, 等. 需求响应不确定性对日前优化调度的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 22-29.
LUO Chunjian, LI Yaowang, XU Hanping, et al. Influence of demand response uncertainty on day-ahead optimization dispatching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 22-29.
- [18] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 平衡风功率波动的需求响应调度框架与策略设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 85-92.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Framework and strategy design of demand response scheduling for balancing wind power fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 85-92.
- [19] Wind power simulation data [EB/OL]. [2018-10-01]. <http://www.eee.hku.hk/~yhhou/DataV2.pdf>.

作者简介:



李 晖

李 晖(1981—),男,河南信阳人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统规划设计(**E-mail**: lihui@chinasperi.sgcc.com.cn);

王智冬(1981—),男,吉林长春人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统规划设计、新能源并网以及消纳(**E-mail**:

wangzd1981@163.com);

王 斌(1979—),男,辽宁沈阳人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统规划设计、新能源消纳(**E-mail**: 1553820957@qq.com)。

Coordinated dispatch of power grid based on stochastic model predictive control

LI Hui¹, WANG Zhidong¹, WANG Xiao¹, PENG Chaoyi^{2,3}, HOU Yunhe^{3,4}, YIN Wenqian^{3,4}

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. China Southern Power Grid Dispatching Center, Guangzhou 510530, China;

3. Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;

4. Shenzhen Institute of Research and Innovation, The University of Hong Kong, Shenzhen 518057, China)

Abstract: Aiming at the problems brought by large-scale wind power integration to the operation and dispatch of power system, it is pointed out that the hourly fluctuation and uncertainty of wind power are the fundamental challenges, for which, the stochastic model predictive control is used for the modelling of system combined dispatch and operation with load response, and the global optimality of the operation strategy is verified mathematically. Case simulation verifies the importance of the flexibility of load response in hourly time scale to the economy of system operation and wind power accommodation.

Key words: wind power; hourly time scale; load response; stochastic model predictive control

(上接第 6 页 continued from page 6)

[17] 胡书举, 龚文明, 李丰林, 等. 一种并网逆变器无交流电压传感器控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 325-332.

HU Shuju, GONG Wenming, LI Fenglin, et al. Research on a kind of AC voltage sensorless control strategy of grid-connected inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 325-332.

[18] 卢子广, 林远, 胡立坤, 等. 新型三相 PWM 整流器无交流电压传感器控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 28-33.

LU Ziguang, LIN Yuan, HU Likun, et al. Three-phase PWM rectifier control without AC-voltage sensors [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 28-33.

作者简介:



孟岩峰

孟岩峰 (1980—), 男, 内蒙古武川人, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为风力发电控制与风电机组传动链地面测试技术 (E-mail: myf0512@mail.iee.ac.cn);

胡书举 (1978—), 男, 河南南阳人, 研究员, 博士, 主要研究方向为风力发电控制与可再生能源测试技术;

许洪华 (1967—), 男, 山东聊城人, 研究员, 硕士, 主要研究方向为风电、光电及其混合发电系统、可再生能源技术经济评价和政策。

AC voltage sensorless control method for grid-connected converter with parameter adaptive characteristics

MENG Yanfeng^{1,2}, HU Shuju¹, XU Honghua¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering,

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To address the applicability of voltage observers in the current AC voltage sensorless control technology, an AC voltage sensorless control method based on parameter adaptive voltage observer is developed. The principle of voltage observer based on the SOGI (Second-Order Generalized Integrator) is described. A frequency adaptive control method for voltage observer is proposed, which takes advantage of real-time phase-locked loop feeding back grid frequency signal. On this basis, the vector relationship is analyzed using simplified model, in the case that the inductance parameters deviate from their actual values. Moreover, an improved voltage observer with adaptive characteristics of inductance parameters is proposed. By applying the improved control approach, AC voltage sensorless control of grid-connected converter with adaptive characteristics of frequency and inductance parameters can be realized, which improves the grid adaptability of the grid-connected converter.

Key words: grid-connected converter; AC voltage sensorless; AC voltage observer; parameters adaptive characteristics

附录：

定理 1 证明。

证明：约束条件式(5)—(13)可统一的抽象成如下形式：

$$\boldsymbol{\alpha}_i^T \mathbf{x} \leq \beta_i \quad i \in \Omega \quad (\text{A1})$$

$$\boldsymbol{\gamma}_j^T \mathbf{x} = \delta_j \quad j \in \Psi \quad (\text{A2})$$

其中， $\boldsymbol{\alpha}$ 、 β 、 $\boldsymbol{\gamma}$ 、 δ 均为参数； i 、 j 分别为不等式和等式约束的序数， Ω 、 Ψ 分别为不等式约束集和等式约束集。

其中，线性不等式可以等价转化为：

$$\boldsymbol{\gamma}_j^T \mathbf{x} \leq \delta_j \quad j \in \Psi \quad (\text{A3})$$

$$\boldsymbol{\gamma}_j^T \mathbf{x} \geq \delta_j \quad j \in \Psi \quad (\text{A4})$$

因此，所有约束都可以重新整理为：

$$\boldsymbol{\mu}_k^T \mathbf{x} \leq \varepsilon_k \quad k \in \Phi \quad (\text{A5})$$

其中， $\boldsymbol{\mu}$ 、 ε 为参数； Φ 为新的不等式约束集， k 为不等式约束的序数。

假设 \mathbf{y} 、 \mathbf{z} 分别为满足式(A5)的变量，则有：

$$\boldsymbol{\mu}_k^T \mathbf{y} \leq \varepsilon_k \quad k \in \Phi \quad (\text{A6})$$

$$\boldsymbol{\mu}_k^T \mathbf{z} \leq \varepsilon_k \quad k \in \Phi \quad (\text{A7})$$

如果式(A6)和式(A7)分别乘以 π 和 $1-\pi$ ，且 $0 \leq \pi \leq 1$ ，则有：

$$\pi \boldsymbol{\mu}_k^T \mathbf{y} + (1-\pi) \boldsymbol{\mu}_k^T \mathbf{z} \leq \pi \varepsilon_k + (1-\pi) \varepsilon_k \quad (\text{A8})$$

整理为：

$$\pi \boldsymbol{\mu}_k^T \mathbf{y} + (1-\pi) \boldsymbol{\mu}_k^T \mathbf{z} \leq \varepsilon_k \quad (\text{A9})$$

对任意 $\mathbf{x} = \pi \mathbf{y} + (1-\pi) \mathbf{z}$ ，由于式(A6)—(A8)成立，因此 \mathbf{x} 一定也满足不等式(A5)。根据凸集定义，对于集合内任意变量 \mathbf{y} 、 \mathbf{z} ，变量 $\mathbf{x} = \pi \mathbf{y} + (1-\pi) \mathbf{z}$ ($0 \leq \pi \leq 1$) 也属于该集合，因此，由约束条件式(5)—(13)构成的集合为凸集。因此，原问题式(4)—(13)为凸优化问题，若存在有限可行解，则其局部最优解一定为唯一的全局最优解，证毕。

由定理 1，求解式(4)—(13)得到的调度策略一定是期望意义下全局最优的调度策略。