

# 电-气互联综合能源系统多时间尺度动态优化调度

梅建春<sup>1</sup>, 卫志农<sup>1</sup>, 张 勇<sup>2</sup>, 马洲俊<sup>2</sup>, 孙国强<sup>1</sup>, 臧海祥<sup>1</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏省南京市 210098;

2. 国网江苏省电力有限公司南京供电公司, 江苏省南京市 210019)

**摘要:** 对于时空相关的天然气管存, 应用多时间尺度/模型预测控制尤为重要。计及天然气管网的慢动态特性, 考虑暂态天然气系统变量存在时段耦合的特性, 提出了基于模型预测控制的多时间尺度优化调度策略, 使机组有功出力 and 气源产气控制过程更为平滑。其中, 以日前优化调度得到的有功出力值和产气量为参考值, 基于模型预测控制, 进行日内多时段滚动优化。最后, 对修改的 IEEE 24 节点电力系统和比利时 20 节点天然气系统进行算例分析, 验证了所提优化调度方法的可行性以及有效性, 并分析了气网管存对电-气互联综合能源系统运行的影响。

**关键词:** 电-气互联综合能源系统; 模型预测控制; 多时间尺度; 暂态能量流模型; 动态优化调度

## 0 引言

21 世纪以来, 能源消耗和全球环境问题日益突出, 许多国家都在寻求能源行业的转变和突破<sup>[1-2]</sup>。电力行业作为能源消耗的主要部门之一, 调整能源结构, 实现低碳环保运行尤为重要。相比于传统火电, 天然气发电更为清洁、高效。从 2012 年至 2040 年, 中国燃气发电比例预计将从 2% 增长至 12%<sup>[3]</sup>。截至 2016 年年底, 中国燃气轮机装机容量达到了 70 080 MW, 占全国总装机容量的 4.3%<sup>[4]</sup>。另一方面, 燃气轮机快速的响应特性可用于平抑间歇性新能源的波动, 从而有效支撑大规模间歇性新能源的并网与消纳<sup>[5]</sup>。因而在电力系统与天然气系统耦合逐步加深的趋势下, 电-气互联综合能源系统 (integrated power and gas energy systems, IPGES) 有望促进低碳可持续能源系统的构建。

值得注意的是, 天然气系统可通过管存 (line-pack) 及储气设施大规模存储天然气, 为电力系统运行调度提供备用。为保证 IPGES 的高效经济运行, 一方面考虑到天然气存储的时空相关特性, 需研究电力系统与天然气系统之间的多断面协调优化; 另一方面, 在不同的运行时间尺度上 (例如日前调度与日内调度), 由于净负荷预测精度的差异, IPGES 对天然气存储量的需求也截然不同, 因而有必要研究多时间尺度下的 IPGES 运行调度。

目前, 国内外学者针对 IPGES 运行调度开展了相关研究。文献[6-7]研究了 IPGES 的稳态能量流。文献[8]采用分布式协同优化方法对电力系统和天然气系统进行分布自治决策。文献[9-10]则研究了电力系统和天然气系统联合统一优化决策。文献[11]对天然气管网模型进行线性化处理, 运用线性优化方法求解 IPGES 最优能量流。文献[12]考虑风电场出力、电力负荷和天然气负荷的不确定性和相关性, 建立 IPGES 概率最优能量流模型。然而, 上述研究基于天然气系统的稳态潮流模型, 忽略了天然气管网的慢动态特性, 易导致计算结果与实际情况出现偏差。文献[13]提出了 IPGES 的多时段暂态能量流仿真。文献[14]以最小化压缩机耗成本为目标, 讨论了暂态模型下的优化调度。文献[15-16]建立了计及天然气管网慢动态特性的混合整数线性规划模型求解 IPGES 最优能量流。文献[17]建立了暂态模型下的 IPGES 双层联合优化调度模型。文献[18]则研究了天然气系统暂态模型下的 IPGES 概率最优能量流。

值得注意的是, 当前 IPGES 优化调度方法大多为开环优化调度方法, 即于某一时间断面或多时间段进行优化调度控制, 仍属于静态优化。而净负荷预测难免存在一定的误差, 且预测误差随着时间尺度的增加而增大。为减小净负荷预测精度较差对优化决策的影响, 可通过对时间尺度的划分来提高负荷预测精度, 但该方法忽略了实际系统运行对优化控制过程的影响, 易导致优化决策结果非严格最优; 相比而言, 模型预测控制 (model predictive control,

收稿日期: 2017-08-23; 修回日期: 2017-12-26。

上网日期: 2018-05-24。

国家自然科学基金资助项目 (51277052)。

MPC)作为一种系统优化控制方法,与细化时间尺度优化调度方法不同,引入了状态量反馈校正环节,从而能够修正预测误差等因素造成的优化调度偏差<sup>[19]</sup>。文献[19-20]基于 MPC,通过多时间尺度协调优化消纳微电网中间歇性分布式新能源。文献[21]将 MPC 引入能源互联网,研究了能源互联网的分布式优化调度。文献[22]以压缩机耗能成本最小为目标,考虑 MPC 对天然气管网进行优化调度。文献[23-24]考虑了稳态模型下的 IPGES 中储气设施的时段耦合特性,应用 MPC 进行优化调度。相对于电网,IPGES 包含存储设施、管存等多种动态元件,即时空关联性复杂。MPC 可充分考虑多能源系统中动态元件的运行特性,结合多时间尺度调度方法,可以对预期事件,如负荷波动、能源价格变化等,做出相应决策,因此基于 MPC 的 IPGES 多时间尺度运行控制具备一定的研究价值。

本文计及了天然气系统暂态潮流模型的时空耦合特性,提出了基于多时间尺度及 MPC 的 IPGES 动态运行优化方法。以日前调度策略为基准,以有功出力和产气增量为控制变量进行日内滚动优化调度。最后,通过算例分析验证了 MPC 能够提供更为合理的 IPGES 优化调度策略,同时分析了预测时间尺度对天然气管网管存的影响。

## 1 IPGES 优化调度模型

日前调度以最小化运行成本为目标制定下一日小时运行出力计划并下发。而日内滚动优化调度则是以日前调度计划为参考值,以系统实际运行出力为初值滚动优化。动态优化调度框架可参考文献[19-20]。

### 1.1 日前调度

日前以经济最优为目标进行优化调度,目标函数如下所示:

$$\min F = \min \sum_{t=1}^T \left( \sum_{u \in U} C_P(u) P_{\text{unit}}(u, t) + \sum_{w \in W} C_G(w) G_{\text{well}}(w, t) + \sum_{s \in S} C_S(s) S_{\text{Out}}(s, t) \right) \quad (1)$$

式中: $T$  为日前优化调度周期,取 24 h; $U$  为发电机组集合; $W$  为天然气源集合; $S$  为储气设施集合; $C_P(u)$  为发电机组  $u$  的发电成本; $C_G(w)$  为气源  $w$  的天然气价格; $C_S(s)$  为储气设施  $s$  提取天然气的成本; $P_{\text{unit}}(u, t)$  为  $t$  时刻发电机组  $u$  的有功出力; $G_{\text{well}}(w, t)$  为  $t$  时刻气源  $w$  的产气量; $S_{\text{Out}}(s, t)$  为  $t$  时刻从储气设施  $s$  中提取的天然气量。

### 1.2 日内滚动优化调度

传统 IPGES 优化调度控制多为开环控制方法,即从初始阶段一次性求取未来某一长时间段优化调度策略并下发。该方法适用于净负荷预测精度高、调度策略满足系统实际运行的情况<sup>[19]</sup>。但随着预测时间尺度的增长,净负荷预测精度下降,导致优化调度策略与系统实际运行出现较大偏差,无法满足系统实际调度需求。本文在日前调度的基础上提出基于 MPC 的日内滚动优化调度,其流程图如图 1 所示。

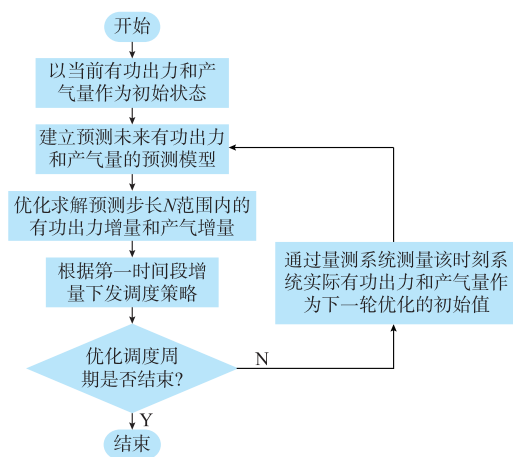


图 1 日内调度流程图

Fig.1 Flow chart of intra-day dispatch

MPC 主要由模型预测、滚动优化和反馈校正三部分组成,以当时系统状态作为初始状态,基于预测模型,通过求解未来有限时长的最优控制问题,得到当前时刻的控制行为<sup>[19,25]</sup>。本文以有功出力和产气量滚动预测值作为输入变量,以初始时刻电源和气源的实际量测值为初始值,以预测时域内有功出力增量和产气增量作为控制变量,进行滚动优化求解。

#### 1.2.1 预测模型

通过滚动优化求解控制变量,预测未来有限时域内发电机组有功出力和气源产气量。 $k$  时刻预测模型如下:

$$\begin{cases} P(u, k + n\Delta t) = P_0(u, k) + \sum_{t=\Delta t}^{n\Delta t} \Delta u_P(u, k + t) & n = 1, 2, \dots, N \\ G(w, k + n\Delta t) = G_0(w, k) + \sum_{t=\Delta t}^{n\Delta t} \Delta u_W(w, k + t) & n = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P(u, k + n\Delta t)$  和  $G(w, k + n\Delta t)$  分别为  $k$  时刻预测的未来  $k + n\Delta t$  时刻机组  $u$  的有功出力和气源  $w$  的产气量; $P_0(u, k)$  和  $G_0(w, k)$  分别为  $k$  时刻机组  $u$  和气源  $w$  的初始值; $\Delta u_P(u, k + t)$  和

$\Delta u_w(\omega, k+t)$  分别为机组  $u$  和气源  $\omega$  在  $k+t$  时刻的有功出力增量和产气增量;  $\Delta t$  为日内调度时间间隔;  $N$  为预测步长。

### 1.2.2 目标函数

相比于日前调度, 日内调度净负荷预测精度较高, 导致不同时间尺度下优化调度策略不同。日内调度目标函数以日前调度决策为参考值, 最小化日内调度的有功出力增量和产气增量, 如式(3)所示。

$$\begin{aligned} \min J(k) = & \sum_{t=\Delta t}^{N\Delta t} \sum_{u \in U} (P(u, k+t) - \hat{P}(u, k+t))^2 + \\ & \sum_{t=\Delta t}^{N\Delta t} \sum_{\omega \in W} (G(\omega, k+t)H_G - \hat{G}(\omega, k+t)H_G)^2 = \\ & \sum_{t=\Delta t}^{N\Delta t} \sum_{u \in U} \left( P_0(u, k) + \sum_{i=\Delta t}^t \Delta u_p(u, k+i) - \right. \\ & \left. \hat{P}(u, k+t) \right)^2 + \sum_{t=\Delta t}^{N\Delta t} \sum_{\omega \in W} H_G^2 \left( G_0(\omega, k) + \right. \\ & \left. \sum_{i=\Delta t}^t \Delta u_w(\omega, k+i) - \hat{G}(\omega, k+t) \right)^2 \quad (3) \end{aligned}$$

式中:  $\hat{P}(u, k+t)$  和  $\hat{G}(\omega, k+t)$  分别为  $k+t$  时刻的有功出力和产气量参考值;  $H_G$  为天然气热值。

### 1.2.3 反馈校正

受到负荷预测精度和环境等因素的影响, 通过预测模型计算所得预测值可能与系统实际运行有功出力和产气量存在偏差, 因此需要反馈校正环节进行校正, 即以当前系统状态量测值作为初始状态, 进行下一时刻的滚动优化调度, 以此构成闭环控制<sup>[19]</sup>。则下一时刻初始值为:

$$\begin{cases} P_0(u, k+\Delta t) = P_{\text{real}}(u, k+\Delta t) \\ G_0(\omega, k+\Delta t) = G_{\text{real}}(\omega, k+\Delta t) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_0(u, k+\Delta t)$  和  $G_0(\omega, k+\Delta t)$  分别为  $k+\Delta t$  时刻机组  $u$  和气源  $\omega$  的有功出力和产气量初始值;  $P_{\text{real}}(u, k+\Delta t)$  和  $G_{\text{real}}(\omega, k+\Delta t)$  分别为  $k+\Delta t$  时刻机组  $u$  和气源  $\omega$  的有功出力和产气量实际量测值。

## 2 IPGES 网络约束

### 2.1 电力网络约束

本文在构建 IPGES 暂态模型时, 考虑到电磁波在电网中以光速传播, 其暂态时间常数比气网小, 故采用电力系统稳态模型<sup>[13]</sup>, 现有许多论文已对此进行了详尽描述, 本文不再赘述。

### 2.2 天然气网络约束

#### 2.2.1 管道

对于天然气管道  $mn$ , 暂态模型下描述气网慢动态特性的偏微分方程表达式如下<sup>[13,16]</sup>:

$$\frac{\partial f_{l,t}}{\partial l} + \frac{\pi}{4} \frac{D^2}{RTZ\rho_0} \frac{\partial \Pi_{l,t}}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

$$f_{l,t} |f_{l,t}| + \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \frac{D^5}{FRTZ\rho_0} \frac{\partial \Pi_{l,t}^2}{\partial l} = 0 \quad (6)$$

式中:  $f_{l,t}$  和  $\Pi_{l,t}$  分别为  $t$  时刻长度为  $l$  处的管道流量和压力;  $D$  为管道内径;  $R$  为气体常数;  $T$  为气体温度;  $Z$  为气体压缩因子;  $\rho_0$  为标准状态下天然气密度;  $F$  为管道摩擦系数。

设  $\hat{\Pi}_{mn,t}$  和  $\hat{f}_{mn,t}$  分别为管道两端压力、流量的平均值, 则对式(5)和式(6)进行隐式差分近似得:

$$\frac{f_{n,t} - f_{m,t}}{x_{mn}} + \frac{\pi}{4} \frac{D^2}{RTZ\rho_0} \frac{\hat{\Pi}_{mn,t} - \hat{\Pi}_{mn,t-1}}{\hat{t}} = 0 \quad (7)$$

$$\hat{f}_{mn,t} | \hat{f}_{mn,t} | + \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \frac{D^5}{FRTZ\rho_0} \frac{\Pi_{n,t}^2 - \Pi_{m,t}^2}{x_{mn}} = 0 \quad (8)$$

式中:  $f_{m,t}$ ,  $f_{n,t}$  和  $\Pi_{m,t}$ ,  $\Pi_{n,t}$  分别为管道  $mn$  两端的流量以及压力;  $\hat{t}$  为时间步长;  $x_{mn}$  为管道  $mn$  长度。

设  $M_{mn,t}$  为管道  $mn$  于  $t$  时刻的管存, 管道首端为流入流量, 末端为流出流量, 则

$$(f_{m,t} - f_{n,t})\hat{t} + M_{mn,t-1} = M_{mn,t} \quad (9)$$

将式(9)代入式(7)得到  $t$  时刻管道  $mn$  管存计算等式:

$$M_{mn,t} = \frac{\pi}{4} \frac{x_{mn} D^2}{RTZ\rho_0} \hat{\Pi}_{mn,t} \quad (10)$$

### 2.2.2 储气设施

当天然气网络发生故障或波动时, 储气设施可作为稳定的气源提供天然气<sup>[26]</sup>。考虑其相邻时间段耦合动态过程, 约束如下:

$$\underline{S}_m \leq S_{m,t} = S_{m,t-1} + (f_{s,m,t}^{\text{in}} - f_{s,m,t}^{\text{out}})\hat{t} \leq \bar{S}_m \quad (11)$$

$$0 \leq f_{s,m,t}^{\text{in}} \leq \bar{f}_{s,m}^{\text{in}} \quad (12)$$

$$0 \leq f_{s,m,t}^{\text{out}} \leq \bar{f}_{s,m}^{\text{out}} \quad (13)$$

式中:  $S_{m,t}$  为  $t$  时刻节点  $m$  上储气设施的储气量;  $f_{s,m,t}^{\text{in}}$  和  $f_{s,m,t}^{\text{out}}$  分别为  $t$  时刻节点  $m$  上的储气设施注入、提取流量;  $\bar{S}_m$  和  $\underline{S}_m$  分别为节点  $m$  上的储气设施储气量上、下限;  $\bar{f}_{s,m}^{\text{in}}$  和  $\bar{f}_{s,m}^{\text{out}}$  分别为节点  $m$  上储气设施注入、提取流量的上限。

### 2.2.3 节点流量平衡方程

对于天然气节点  $m$ , 其流入和流出流量相等, 表示如下:

$$\begin{aligned} f_{w,m,t} + f_{s,m,t}^{\text{out}} + f_{c,m,t}^{\text{in}} + \sum_{n \in m} f_{l,m,t}^{\text{in}} = \\ f_{L,m,t} + f_{s,m,t}^{\text{in}} + f_{c,m,t}^{\text{out}} + \sum_{n \in m} f_{l,m,t}^{\text{out}} + f_{\text{GF},m,t} \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $f_{w,m,t}$  为  $t$  时刻节点  $m$  上的气源流量;  $f_{l,m,t}$  为  $t$  时刻节点  $m$  上的负荷流量;  $f_{c,m,t}^{nm}$  和  $f_{c,m,t}^{mm}$  分别为  $t$  时刻节点  $m$  分别为末端和首端的加压站流量;  $f_{l,m,t}^{nm}$  和  $f_{l,m,t}^{mm}$  分别为  $t$  时刻节点  $m$  分别为末端和首端的管道流量;  $f_{GF,m,t}$  为  $t$  时刻节点  $m$  上的燃气轮机消耗的天然气流量。

#### 2.2.4 其他约束

除了上述约束,天然气网络约束还包括气源流量约束、节点压力约束和加压站加压比约束,具体表述如下:

$$\underline{f}_{w,m} \leq f_{w,m,t} \leq \bar{f}_{w,m} \quad (15)$$

$$\underline{\Pi}_m \leq \Pi_{m,t} \leq \bar{\Pi}_m \quad (16)$$

$$\underline{C}_{mn} \leq \frac{\Pi_{n,t}}{\Pi_{m,t}} \leq \bar{C}_{mn} \quad (17)$$

式中:  $\bar{f}_{w,m}$  和  $\underline{f}_{w,m}$  分别为节点  $m$  上气源流量的上、下限;  $\bar{\Pi}_m$  和  $\underline{\Pi}_m$  分别为节点  $m$  压力上、下限;  $\bar{C}_{mn}$  和  $\underline{C}_{mn}$  分别为连接节点  $m$  和  $n$  的加压站加压比上、下限。

#### 2.3 耦合约束

燃气轮机是电网和气网之间的重要耦合元件,消耗天然气,产生功率并注入电力系统,其能量输入、输出转化关系如下:

$$f_{GF} = \frac{P_{GF}}{\mu_{GF} H_G} \quad (18)$$

式中:  $f_{GF}$  为燃气轮机消耗的天然气流量;  $P_{GF}$  为燃气轮机有功出力;  $\mu_{GF}$  为燃气轮机转化效率。

### 3 算例分析

本文通过修改的 IEEE 24 节点电力系统和比利时 20 节点天然气系统互联构建 IPGES 测试算例,详细网络数据可参考文献[15]和附录 A 表 A1 至表 A6,算例测试图形如附录 A 图 A1 所示。其中电力系统有 10 台发电机组、24 个节点和 38 条支路,天然气系统包括 21 条管道、20 个节点、2 个加压站、4 个储气设施和 2 个气源点。假定电网节点 1 和 15 上的发电机组为燃气轮机,分别由气网节点 10 和 2 提供天然气,转换效率为 43%<sup>[26]</sup>。同时电网节点 21, 22, 23 上发电机组为水电机组,共同组成发电机群,发电成本为 0。所有储气设施初始储气量为储气上限,且在优化调度过程中可以被充分利用。电负荷和气负荷 24 h 变化曲线见附录 A 图 A2 和图 A3。本文采用商业优化软件 GAMS 的大规模非线性优化求解器 IPOPT 进行优化计算。

#### 3.1 多时间尺度动态优化调度分析

日前调度以 1 h 为时间间隔,并设定最后一个时段的管存不低于  $1.3394 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。图 2 为日前调度各发电机组有功出力,由于水电机组成本为 0,各时间段都被充分调度,故不予考虑。

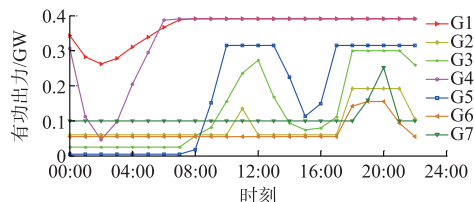


图 2 长时间尺度机组有功出力

Fig.2 Active outputs of generators in long-time scale

07:00 之前,电力负荷较低,主要由发电成本较低的燃气轮机 G1 和 G5 出力。07:00 后有两个电力负荷高峰,由图 2 可知,G1 和 G5 一直以最大出力运行,其他机组出力跟随负荷变化而改变。由此可知,日前调度下各机组出力不均匀,考虑经济性的同时牺牲了燃气轮机效率高、爬坡快的特性。

日前调度策略中天然气管网气源产气量变化图如图 3 所示。06:00 前,天然气源 W1 和 W2 产气量有较大波动,06:00 之后,虽然天然气负荷出现峰值,但根据气源产气成本,W2 产气量较低,而气源 W1 一直保持最大产气量,不利于调节。

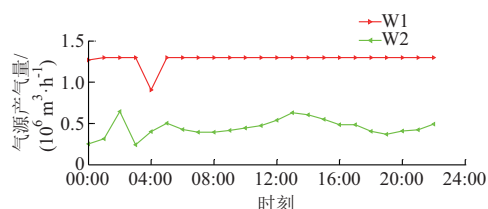


图 3 日前调度气源产气量

Fig.3 Gas production of gas source in day-ahead scheduling

基于 MPC 的日内优化调度,每隔 15 min 执行一次未来 1 h 内的滚动优化,并给出第一时间段的调度策略,各机组有功出力和气源产气量如图 4、图 5 所示。

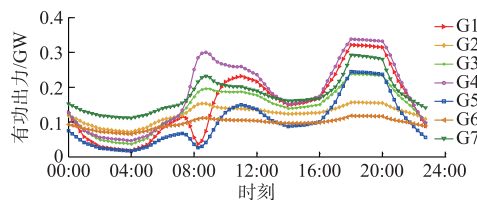


图 4 日内调度机组有功出力

Fig.4 Active outputs of generators in intra-day scheduling

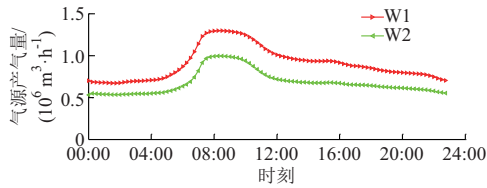


图5 日内调度气源产气量  
Fig.5 Gas production of gas source in intra-day scheduling

经过仿真分析可以看出,基于 MPC 的动态优化调度控制下的各机组有功出力 and 气源产气量整体上与日前调度有功出力值和产气量相同,但日内滚动优化调度考虑了系统实际运行情况,以有功出力增量和产气增量为控制变量,通过 MPC 反馈校正,在尽量保证经济性的同时,使得各机组有功出力以及气源产气量按照负荷波动而变化,因而调度结果更加平滑,同时在机组和气源调度策略中预留了燃气轮机 G1, G5 和气源 W1, W2 一定的出力裕度。

### 3.2 气网管存分析

由于天然气的慢动态特性,天然气可以部分储存在管道中,即为管存。暂态模型下,天然气管网管存具有时段耦合的特性,设置不同的预测步长,管存变化如图 6 所示。

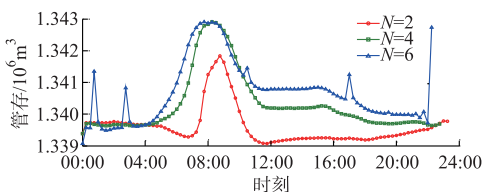


图6 天然气管存  
Fig.6 Line-pack of nature gas

图 6 中,09:00 左右天然气负荷达到峰值,当预测步长  $N=2$  时,天然气管存于 07:00 左右开始上升,负荷到达峰值后,管存迅速下降且维持在一个较低水平。当  $N$  取 4 和 6 时,天然气管网管存从 04:00 左右开始增加,预备未来时段天然气负荷峰值使用,且  $N=6$  时其管存量上升更为迅速。由图 6 可以看出,滚动优化调度针对天然气负荷高峰,可事先将天然气管存维持在较高水平以供气负荷高峰使用,且随着预测步长增大,气网管存可更早做出管存预备。同时,管存针对气网负荷波动的提前存储灵敏度亦会随着预测步长的增大而下降。且由于长预测时域内负荷波动更大,相应管存可能存在更大范围的波动。因而日内滚动优化调度需选取合适的预测步长。

值得一提的是,IPGES 联合安全运行需要保证能源供应充裕,尤其当天然气负荷达到峰值时,气网

管存下降,管道压力降低,可能导致气网设备故障,进而影响燃气轮机正常运行。图 6 中,预测步长越长,针对负荷高峰,气网管存更早、更快提升容量,且负荷峰值过后,仍保持较高水平,这一特性对于维持管道压力,保证 IPGES 安全运行具有重要作用,这也为后续 IPGES 安全性分析研究奠定了基础。

## 4 结语

本文针对传统天然气稳态模型下的 IPGES 开环优化控制计算结果与系统实际运行存在偏差,提出了基于 MPC 的气网暂态模型下 IPGES 多时间尺度动态优化调度策略。首先以经济最优为目标函数进行日前优化调度,然后以日前调度策略为基准值,提出有功出力与产气量调度偏差最小下的日内滚动优化调度。算例分析验证了多时间尺度调度的优越性,同时分析了气网管存与预测步长的关系。

随着电网和气网耦合的加强,IPGES 安全运行受到天然气供应、电网网络故障等因素的影响,后续将在 IPGES 多时间尺度协同优化的基础上深入考虑  $N-1$  安全约束。

本文受到江苏省电力公司科技项目 (J2018066) 资助,特此感谢!

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 1-7. DOI: 10.7500/AEPS20150512001. WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7. DOI: 10.7500/AEPS20150512001.
- [2] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11. DOI: 10.7500/AEPS20140613007. DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to Energy Internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11. DOI: 10.7500/AEPS20140613007.
- [3] U. S. Energy Information Administration. International energy outlook 2016 [EB/OL]. [2016-05-11]. [http://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf).
- [4] 中电联规划发展部. 2016 年全国电力工业统计快报数据一览表 [EB/OL]. [2017-01-20]. <http://www.ccec.org.cn/guihuayutongji/tongjixinxi/nianrushuju/2017-01-20/164007.html>.
- [5] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3305. WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of

- steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3305
- [6] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C R. A unified gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2156-2166.
- [7] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C R. Integrated energy flow analysis in natural gas and electricity coupled systems [C]// North American Power Symposium (NAPS), August 4-6, 2011, Boston, MA, USA: 1-7.
- [8] 瞿小斌,文云峰,叶希,等.基于串行和并行 ADMM 算法的电-气能量流分布式协同优化[J].电力系统自动化,2017,41(4): 12-19. DOI:10.7500/AEPS20160805007.
- QU Xiaobin, WEN Yunfeng, YE Xi, et al. Distributed optimization of electric-gas integrated energy flows using serial and parallel iterative modes for alternating direction method of multipliers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 12-19. DOI: 10.7500/AEPS20160805007.
- [9] UNSIHUAY C, LIMA J W M, de SOUZA A C Z. Modeling the integrated natural gas and electricity optimal power flow [C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, USA: 1-7.
- [10] AN S, LI Q, GEDRA T W. Natural gas and electricity optimal power flow [C]// IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, September 7-12, 2003, Dallas, USA: 138-143.
- [11] URBINA M, LI Z. A combined model for analyzing the interdependency of electrical and gas systems[C]// 39th North American Power Symposium, September 30-October 2, 2007, Las Cruces, USA: 468-472.
- [12] 孙国强,陈霜,卫志农,等.计及相关性的电-气互联系统概率最优潮流[J].电力系统自动化,2015,39(21): 11-17. DOI: 10.7500/AEPS20150611006.
- SUN Guoqiang, CHEN Shuang, WEI Zhinong, et al. Probabilistic optimal power flow of combined natural gas and electric system considering correlation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 11-17. DOI: 10.7500/AEPS20150611006.
- [13] 卫志农,梅建春,孙国强,等.电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真[J].电力自动化设备,2017,37(6):41-47.
- WEI Zhinong, MEI Jianchun, SUN Guoqiang, et al. Multi-period transient energy-flow simulation of integrated power and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 41-47.
- [14] MAK T W K, HENTENRYCK P V, ZLOTNIK A, et al. Efficient dynamic compressor optimization in natural gas transmission systems [C]// American Control Conference, July 6-8, 2016, Boston, USA: 7484-7491.
- [15] CHAUDRY M, JENKINS N, STRBAC G. Multi-time period combined gas and electricity network optimisation[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7): 1265-1279.
- [16] CORREA-POSADA C M, SANCHEZ-MARTIN P. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3347-3355.
- [17] LIU C, SHAHIDEHPOUR M, WANG J. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow[J]. Chaos, 2011, 21(21): 599-606.
- [18] SUN G, CHEN S, WEI Z, et al. Multi-period integrated natural gas and electric power system probabilistic optimal power flow incorporating power-to-gas units[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 412-423.
- [19] 董雷,陈卉,蒲天骄,等.基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度动态优化调度[J].中国电机工程学报,2016,36(17): 4609-4616.
- DONG Lei, CHEN Hui, PU Tianjiao, et al. Multi-time scale dynamic optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4609-4616.
- [20] 肖浩,裴玮,孔力.基于模型预测控制的微电网多时间尺度协调优化调度[J].电力系统自动化,2016,40(18): 7-14. DOI: 10.7500/AEPS20151123008.
- XIAO Hao, PEI Wei, KONG Li. Multi-time scale coordinated optimal dispatch of microgrid based on model predictive control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 7-14. DOI: 10.7500/AEPS20151123008.
- [21] 张彦,张涛,孟繁霖,等.基于模型预测控制的能源互联网系统分布式优化调度研究[J/OL].中国电机工程学报[2017-07-04]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20170704.1545.020.html>.
- ZHANG Yan, ZHANG Tao, MENG Fanlin, et al. Model predictive control based distributed optimization and scheduling approach for the energy internet [J/OL]. Proceedings of the CSEE [2017-07-04]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20170704.1545.020.html>.
- [22] MARQUES D, MORARI M. Model predictive control of gas pipeline networks [C]// Proceedings of the 1986 American Control Conference, June 18-20, 1986, Seattle, USA: 349-354.
- [23] ARNOLD M, NEGENBORN R R, ANDERSSON G, et al. Model-based predictive control applied to multi-carrier energy systems[C]// 2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada: 1-8.
- [24] ARNOLD M, NEGENBORN R R, ANDERSSON G, et al. Multi-area predictive control for combined electricity and natural gas systems[C]// 10th European Control Conference, August 23-26, 2009, Budapest, Hungary: 1408-1413.
- [25] 张伯明,陈建华,吴文传.大规模风电接入电网的有功分层模型预测控制方法[J].电力系统自动化,2014,38(9): 6-14. DOI: 10.7500/AEPS20130712012.
- ZHANG Boming, CHEN Jianhua, WU Wenchuan. A hierarchical model predictive control method of active power for accommodating large-scale wind power intergration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 6-14. DOI: 10.7500/AEPS20130712012.
- [26] 卫志农,张思德,孙国强,等.计及电转气的电-气互联综合能源系统削峰填谷研究[J].中国电机工程学报,2017,37(16):4601-

4609.

WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4601-4609.

卫志农(1962—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化。E-mail: wzn\_nj@263.net

张勇(1968—),男,高级工程师,主要研究方向:电网运行。E-mail: yongzh6108@vip.sina.com

(编辑 孔丽蓓)

梅建春(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统。E-mail: hhumeijianchun@163.com

## Dynamic Optimal Dispatch with Multiple Time Scale in Integrated Power and Gas Energy Systems

MEI Jianchun<sup>1</sup>, WEI Zhinong<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>2</sup>, MA Zhoujun<sup>2</sup>, SUN Guoqiang<sup>1</sup>, ZANG Haixiang<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd., Nanjing 210019, China)

**Abstract:** Aimed at spatio-temporal correlation of natural gas line-pack, it is significant to use multiple time scale and model predictive control. Considering the slow dynamic characteristics of natural gas pipeline network and the time interval coupling effect of transient variables of natural gas system, a multiple time scale optimal scheduling strategy based on model predictive control is proposed, which makes the control process of computing the active power outputs and gas production by gas resource more smoothly. And then, taking the active power output and gas production obtained by day-ahead scheduling as reference values, the multi-step rolling optimization based on model predictive control is carried out in intra-day scheduling. Finally, the modified IEEE 24-node power system and the Belgian 20-node natural gas system are used to verify the feasibility and effectiveness of optimization scheduling strategy, and the influences on the operation of the integrated power and gas energy systems of natural gas line-pack are analyzed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277052).

**Key words:** integrated power and gas energy systems; model predictive control; multiple time scale; transient energy-flow model; dynamic optimal dispatch