

能源互联网背景下电气互联系统的削峰填谷调度方法

文/国网上海市北供电公司 余思钧 许鸣吉 潘冬东 武昀骏 施一鸣

国网公司正处于建设世界一流能源互联网企业的转型阶段，电气互联综合能源系统则是能源互联网的基础和过渡，可以通过P2G技术和燃气轮机组的协调作用，抑制系统负荷波动，缓解系统的负荷高峰。

选题的背景及意义

国网公司正处于建设世界一流能源互联网企业的转型阶段。与智能电网相比，能源互联网（Energy Internet, EI）通过互联网和智能存储技术将有大规模存储能力的系统与能源传输高效的系统紧密地联系在一起，有效地消纳大规模可再生能源，提高能源利用效率。

电气互联综合能源系统（Integrated Electricity and Gas—energy System）则是能源互联网的基础和过渡。一方面，随着天然气开采技术的不断发展，天然气系统与电力系统的联系日益密切；另一方面，电转气（Power to Gas, P2G）技术逐渐成熟，P2G技术是指利用电能

将水（ H_2O ）和二氧化碳（ CO_2 ）转化为氢气（ H_2 ）或甲烷（ CH_4 ）的过程，将可再生能源的富余出力转化为天然气后进行存储。电力系统和天然气系统之间的耦合程度因此加深，形成闭环系统，能量可以在其间双向流动，如图1所示。在电气互联系统的运行方面，在满足区域内能源需求的同时，可以通过P2G技术和燃气轮机组的协调作用，抑制系统净负荷波动，缓解系统的负荷高峰。

在上述背景下，本文提出电气互联系统的削峰填谷调度方法，建立考虑削峰填谷的电气互联系统模型，设计基于目标加权法的遗传算法，通过IEEE57-NGS19电气互联系统，验证了上述

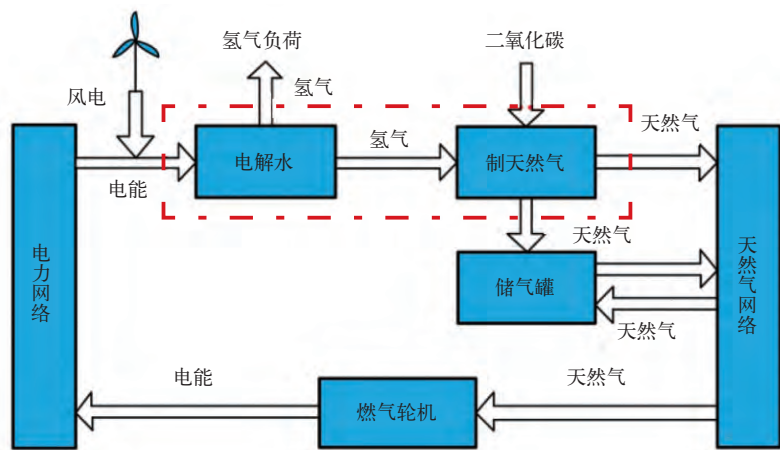


图1 电气互联综合能源系统示意图

模型具有良好地抑制净负荷波动的能力。

电气互联系统的削峰填谷原理

不同于常见的削峰填谷方法，本文对削峰填谷中的电负荷进行了新的定义。定义电负荷、P2G功率与燃气轮机出力、风电场出力的差为净负荷，将净负荷方差最小作为最优调度目标。削峰填谷能有效地增加网络传输能力，同时提高系统的可靠性和经济性。由于P2G设备良好的储能特性以及燃气轮机动态响应快速的特性，本文通过P2G设备和燃气轮机对净负荷进行削峰填谷，电气互联系统的削峰填谷原理如图2所示。

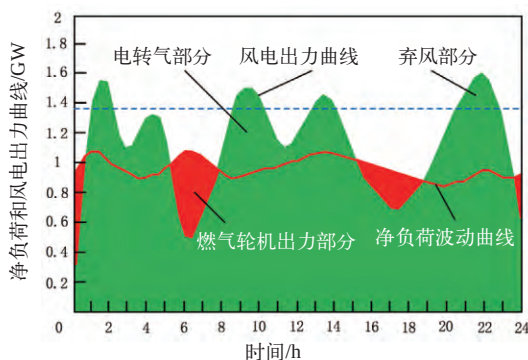


图2 削峰填谷原理示意图

由P2G和燃气轮机耦合的电气互联系统可以通过这两种装置对系统进行削峰填谷，其主要过程为：用电低谷时段，P2G设备将电能转化成天然气储存起来，减少系统中的弃风现象；用电高峰时期，天然气通过燃气轮机转化成电能，为需求侧提供电能。

算例仿真与分析

1. 算例设计

本章对IEEE57-NGS19电气互联系统构造了测试算例。如图3所示，其中左半部分为57节点的电力系统网络拓扑图，包含了50个电力负荷节点，7个发电机节点，80条输电线路。设置节点1、3、8处分别接入燃气轮机组，有功上限为580 MW，转化效率为43%；设置节点9、12处分别接入风电场集群，出力上限为900 MW，弃风成本为1 000元/MW·h。

如图3所示，其中右半部分为19节点的天然气系统网络拓扑图，包括19个天然气负荷节点，2个天然气供给站，19条天然气管道，设置节点B、H、N、P处分别接入储气罐，容量上限为0.25 Mm³，成本系数为4.5万元/Mm³。

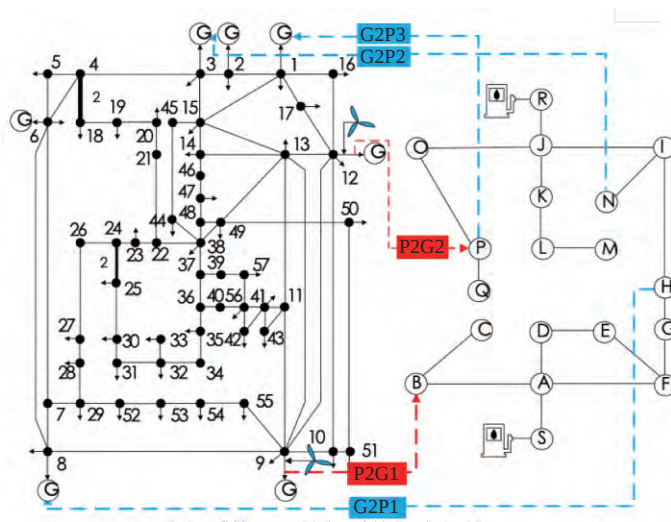


图3 电气系统和天然气系统耦合拓扑图

设置天然气节点P、N、H处的储气罐分别与电力节点1、3、8处的燃气轮机组相连，进行G2P工作。设置电力节点9、12处的风电场集群分别与天然气节点B、P处的储气罐相连，进行P2G工作。

如图4所示，本文设置的日电负荷分为高峰、非峰谷和低谷时段。其中，高峰时段为8:00~11:00和18:00~23:00；非峰谷时段为7:00~8:00和11:00~18:00，低谷时段为23:00~7:00。设置的日天然气负荷与日电负荷类似。根据文献记载设置了日风电场可用出力曲线。

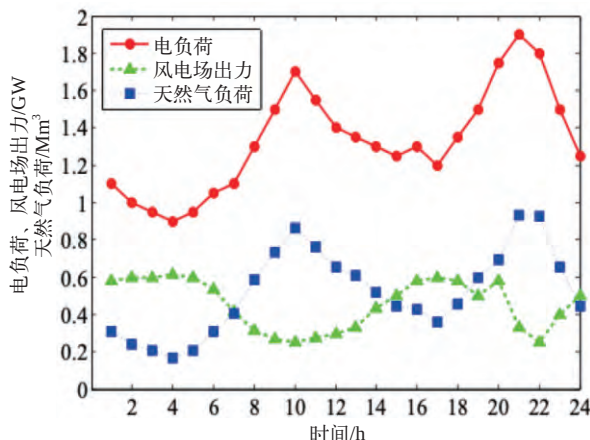


图4 日电负荷、风电场出力、天然气负荷曲线

2. 结果分析

取值比值 $\beta/\gamma=0.1$ ，对上述算例进行求解。遗传算法的迭代情况如图5所示，目标函数在850次左右趋近于收敛，最小值为 0.43×10^7 万元。

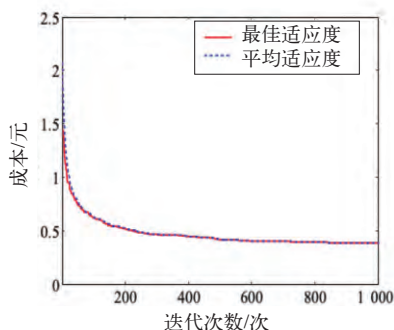
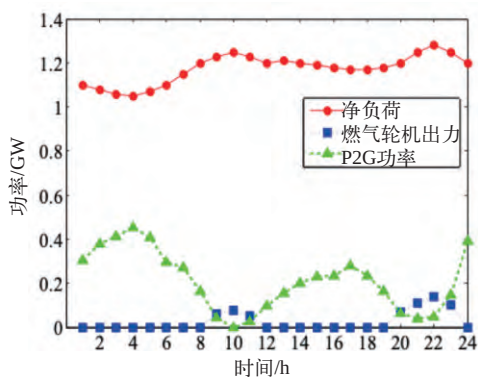
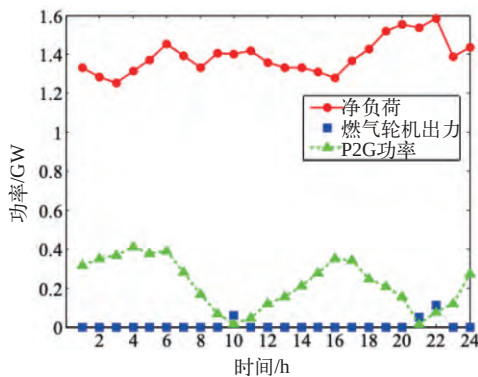


图5 遗传算法迭代曲线 ($\beta/\gamma=0.1$)

当 $\beta/\gamma=0.1$ 时,各个时段的日净负荷、燃气轮机组出力、P2G功率变化如图6a所示;当 $\beta/\gamma=10$ 时,如图6b所示。不难发现,2:00~6:00和14:00~19:00这两个时段的P2G功率最大。此时,大量风电难以消纳,剩余的风电通过P2G转化为天然气进行存储,增加了电负荷低谷时的净负荷,起到了“填谷”的作用。9:00~11:00和20:00~23:00这两个时段的燃气轮机组出力最大。此时,燃气轮机组将存储的天然气转化为电能,减少了电负荷高峰时的净负荷,起到了“削峰”的作用。因此,电气互联系统通过P2G和燃气轮机组的协同工作,使系统净负荷曲线变得平滑,起到了“削峰填谷”的作用。



(a) $\beta/\gamma=0.1$



(b) $\beta/\gamma=10$

图6 日净负荷、燃气轮机组出力、P2G功率曲线

3. 削峰填谷效果和经济性能的协调分析

电气互联系统的运行成本最低目标和削峰填谷效果最好目标是两个不同的目标,本文通过加权求和法,将多目标优化问题转化为单目标优化问题,通过设置不同的权值比 β/γ ,可以反映出两个不同目标的重要性。

分别对 $\beta/\gamma=0.1、0.5、1、2、3、5、8、9、10$ 这9种不同情况逐一进行仿真,系统的净负荷方差和、净负荷最大峰谷差、运行成本、弃风成本的变化如图7所示。不难发现, β/γ 越小,净负荷方差和、净负荷最大峰谷差越小,削峰填谷效果越好; β/γ 越大,运行成本、弃风成本越小,系统经济性能越优。可见,削峰填谷模型抑制净负荷曲线波动效果越好时,系统的弃风量就越大,系统的经济成本也随之增加。因此,电力和天然气调度部门可以根据实时需求,调整权值比 β/γ ,以此来兼顾削峰填谷效果和经济性能。

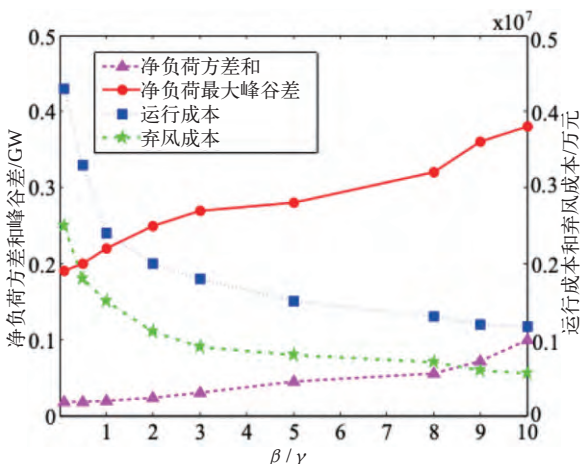


图7 不同 β/γ 情况下,净负荷方差和、净负荷最大峰谷差、运行成本、弃风成本变化曲线

结束语

国网公司正处于建设世界一流能源互联网企业的转型阶段,电气互联综合能源系统则是能源互联网的基础和过渡。本文提出了电气互联系统的削峰填谷调度方法,通过仿真,表明了上述模型具有良好的抑制净负荷波动的能力。仿真表明,电负荷低谷时,P2G可以大量消纳风电,增加净负荷,起到“填谷”作用;电负荷高峰时,存储的天然气通过燃气轮机组转化为电能,减少净负荷,起到“削峰”作用。但是,削峰填谷模型抑制净负荷曲线波动效果越好时,系统的弃风量就越大,系统的经济成本也随之增加。EA