

含高比重可再生能源电力系统功率波动性平抑策略的探讨

孙元章, 鲍益, 徐箭*, 查晓明, 黎雄, 柯德平, 廖思阳

武汉大学电气工程学院, 武汉 430072

* 联系人, E-mail: xujian@whu.edu.cn

2016-04-10 收稿, 2016-07-25 修回, 2016-07-25 接受, 2016-10-21 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFB0900105)和国家自然科学基金(51477122, 51190105)资助

摘要 含高比重可再生能源电力系统的功率波动性给电网的安全可靠运行带来了巨大挑战, 采有何种方法平抑可再生能源发电的功率波动性, 保证电网的安全经济运行已成为世界各国研究的重点. 本文在对以风能和太阳能为主的可再生能源发电功率波动性、高耗能负荷的调节特性、以及天然气和石油管网特性进行详细调研的基础上, 提出了平抑含高比重可再生能源电力系统功率波动性的总体思路. 结合我国能源资源发展和负荷分布的特点, 提出通过转移中东部地区的高耗能负荷至可再生能源发电集中开发的西北部地区, 并开发高耗能负荷潜在的功率调节能力, 实现大规模可再生能源发电的部分就地消纳和波动性在电网送端的平抑. 提出在可再生能源分布式利用的电网受端, 利用天然气管网和石油管网与电网混合运行, 构建家庭和工业混合用能系统, 实现分布式可再生能源发电功率波动性在电网受端的平抑. 在此基础上, 论文详细阐述了在电网送端平抑可再生能源集中发电功率波动性的原理以及在配网侧平抑可再生能源分布式发电功率波动性的原理, 并评估了两种方式平抑可再生能源功率波动性的潜力.

关键词 高比重, 可再生能源, 天然气管网和石油管网, 高耗能负荷, 混合用能系统, 负荷响应

可再生能源的大规模开发利用对解决能源紧缺、环境保护等问题具有重要作用, 以风能、太阳能为主的可再生能源由于其清洁、环保的特点发展迅速^[1]. 然而由于以风能、太阳能为主的可再生能源电力具有大幅度波动性等特点, 可再生能源并网和消纳问题成为限制可再生能源电力发展的瓶颈^[2,3]. 2015年, 我国风电平均利用小时数仅为1728 h, 同比减小177 h^[4]. 2015年风资源丰富的西北、华北、东北等“三北”地区弃风现象更为严重, 吉林、甘肃、辽宁等省份风电平均利用小时数只有1430, 1184, 1780 h, 造成了大量清洁可再生能源电力的浪费.

为了实现大规模和分布式可再生能源电力的高

效利用, 世界各国都在研究有效消纳大规模可再生能源电力和分布式可再生能源电力的解决方案. 其中, 利用负荷侧响应平抑可再生能源电力的波动性近期得到了较多的关注. 近几年对中国内蒙古东部地区的某实际电解铝高耗能负荷的研究表明, 电解铝负荷在响应风电的随机波动性方面具有一定的快速功率调节能力. 同时利用风电-火电联合运行生产电解铝的循环经济示范工程项目已经投入运行^[5], 并实现了风电的就地消纳. 2015年10月8日, 中华人民共和国国家发展和改革委员会发布了《关于开展可再生能源就近消纳试点的通知》, 明确鼓励在可再生能源富集的甘肃省、内蒙古自治区率先开展可再生能源

引用格式: 孙元章, 鲍益, 徐箭, 等. 含高比重可再生能源电力系统功率波动性平抑策略的探讨. 科学通报, 2017, 62: 1071–1081

Sun Y Z, Bao Y, Xu J, et al. Discussion on strategy of stabilizing high proportion of renewable energy power fluctuation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 1071–1081, doi: 10.1360/N972016-00484

就近消纳试点^[6]. 此外, 冷热电联产机组和混合动力汽车等, 可以实现天然气、石油等能源与电能的混合运行^[7~9], 分担电网峰谷期间的调节压力并实现平抑分布式可再生能源电力的波动性. 2015年8月31日, 国家能源局也下发了《关于印发配电网建设改造行动计划的通知》, 鼓励用户参与电网削峰填谷, 实现与电网协调互动^[10].

基于上述背景, 本文提出了如下的可再生能源功率波动性平抑策略: 在可再生能源集中开发的电网送端利用高耗能负荷实现就地消纳并平抑风电功率波动, 在可再生能源分布式利用的电网受端, 通过构建家庭和商业混合动力系统以平抑可再生能源功率波动, 剩余部分通过大电网中的常规机组进行调节. 本文还通过详细的数据分析对该策略平抑可再生能源功率波动的潜力进行了评估.

1 中国可再生能源发展概况

1.1 中国电源结构分析及预测

长期以来我国电源结构以煤电为主. 2015年全国总发电装机容量为15.1亿千瓦, 其中煤电装机容量为9.9亿千瓦, 在总装机容量中占比65.65%, 风电装机容量为1.4亿千瓦, 占比9.61%, 光伏发电装机容量为4318万千瓦, 占比2.86%^[11]. 由于环境方面的压力, 当前的能源结构体系面临极大挑战. 国家能源局专家于2015年中国电机工程年会上指出, 预计到2020年, 我国电源总装机容量将达到21.2亿千瓦, 风电、光伏等可再生能源累计装机将达到3.4亿千瓦, 在总装机容量中占比16%; 2030年我国电源总装机容量达到29.6亿千瓦, 风电、光伏等可再生能源累计装机将达到5.92亿千瓦, 在总装机容量中占比20%. 由于风能、太阳能电力发展的不确定性, 本文考虑可再生能源发展的低、中、高方案. 低方案: 风能、太阳能装

机容量增速缓慢, 2020和2030年占总装机容量比重分别为13%和16%; 中方案: 风能、太阳能装机容量增速正常, 2020和2030年占总装机容量比重分别为16%和20%; 高方案: 风能、太阳能装机容量高速发展, 2020和2030年占总装机容量比重分别为20%和23%, 具体数据如表1所示.

1.2 中国可再生能源消纳面临的挑战

中国可再生能源消纳面临的挑战主要受风能、太阳能等可再生能源出力特性、电源结构及调节能力和体制机制性障碍等因素影响, 具体如下: (1) 可再生能源具有随机性和波动性, 在小时级时间尺度上可再生能源功率波动量对电网运行产生影响较大, 需要电网预留较大的调峰容量以应对, 东北、华北地区调峰电源少, 特别是进入冬季后, 大量热电联产机组承担供热任务, 调峰能力大大下降, 只能被迫弃风弃光^[12]. (2) 我国风能、太阳能等可再生能源资源主要分布在远离负荷中心的“三北”地区, 由于当地负荷少, 快速响应可再生能源电力波动性的电源不足, 致使消纳大规模可再生能源的能力不足. 同时“三北”地区电网框架薄弱, 跨省跨区的电力传输能力比较弱, 难以满足可再生能源大规模发展后的电力传输需求^[13]. (3) 可再生能源机组与火电机组在体制评价指标中存在冲突. 火电机组由于经济指标等要求需要达到一定利用小时数, 在负荷容量有限的条件下, 优先使火电机组达到相应指标, 导致多余的可再生能源不能并网, 被迫弃风弃光.

可再生能源发电的随机波动性对电网安全运行的压力随着其规模的增长将越来越大. 考虑可再生能源空间分布的平衡效果, 可再生能源发电在小时级尺度上的功率最大波动量若按可再生能源装机容量的15%(综合东北某省级电网GW级风电场群实测功率波动数据与爱尔兰岛全岛风电功率实测数据)估

表1 2020 和 2030 年风能、太阳能装机容量预测

Table 1 Prediction of China's electricity energy formation in 2020 and 2030

情景	2020年			2030年		
	装机(亿千瓦)	占比(%)	功率最大波动量 (亿千瓦)	装机(亿千瓦)	占比(%)	功率最大波动量 (亿千瓦)
低方案	2.70	13	0.405	4.70	16	0.705
中方案	3.40	16	0.510	5.92	20	0.88
高方案	4.20	20	0.630	6.81	23	1.02

算^[14], 3种情景下功率最大波动量如表1所示. 为了减少可再生能源的功率随机波动性对电力系统常规机组调节能力的需求, 迫切需要寻找其他途径平抑含高比重可再生能源电力系统的功率波动.

2 高比重可再生能源功率波动平抑策略

结合风能、太阳能等可再生能源的分布特点以及我国高耗能、冷热电联产、新能源汽车等产业的发展趋势, 本文提出了一种平抑高比重可再生能源功率波动性的新思路. 在可再生能源集中开发的电网送端, 转移中东部地区的高耗能产业到可再生能源资源丰富的西部和北部地区, 构建由可再生能源、电网常规电源和高耗能负荷联合运行电力系统, 实现大规模可再生能源通过高耗能负荷的就地消纳, 并利用高耗能负荷的快速功率调节特点, 在不影响生产工艺的前提下, 参与电力系统调频调峰, 利用高耗能负荷的调节特性削弱可再生能源发电的功率波动性. 在分布式可再生能源电力接入的配电网侧, 利用天然气管网、石油管网与电网混合运行, 构建综合能源网, 共同服务于居民和商业负荷. 居民和商业负荷

(如炊具、热水器、中央空调、新能源汽车等)设备根据分布式可再生能源波动信息选择用能方式, 在可再生能源出力峰值期间选择电力供能, 在电网电力不足时选择天然气或石油作为能源供应, 打造家庭和商业混合动力系统, 响应分布式可再生能源发电的功率波动特性, 实现“削峰填谷”, 从而缓解分布式可再生能源并网带来的调节压力. 最后将其余可再生能源并入区域互联电网并通过调度常规机组来平抑可再生能源发电的功率波动性, 由于可再生能源送端可调节高耗能负荷就地消纳和平抑波动性作用以及配电侧负荷实现混合供能和分布式平抑功率波动作用, 在送端和受端的可再生能源的波动性可以得到有效平抑, 确保并入到区域互联电网中的可再生能源发电功率波动幅度由常规机组的调节能力得到平抑. 平抑可再生能源电力波动性的具体模式如图1所示.

3 发电侧可再生能源功率波动性平抑方法

3.1 高耗能负荷特性分析

常规高耗能负荷不具备负荷响应能力, 不能参

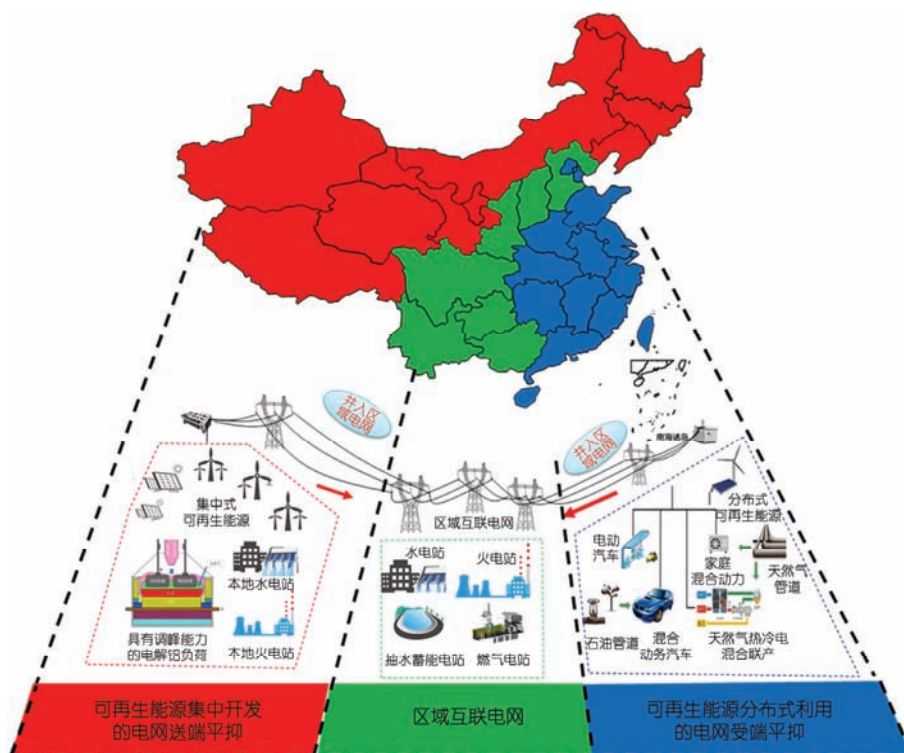


图1 (网络版彩色)可再生能源发电功率波动性平抑方法示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the renewable energy consumption method

与系统调节. 研究发现, 部分高耗能负荷通过改造后, 具备功率调节能力. 以电解铝负荷为例, 正常运行情况下, 电解铝对交流侧电压和频率变化不敏感, 通过定电流控制方式实现定功率运行^[15]. 然而, 通过现场运行实验表明, 电解铝负荷功率在 $\pm 10\%$ 范围内调节, 不会影响电解铝产品的质量, 而产量也只会略有轻微的影响. 特别是因故障失去电源时, 根据电解槽自身的蓄热情况, 夏季可以在3 h内、冬季可以在2 h内而不凝槽^[16], 这些特性为可再生能源的就地消纳和功率波动性的平抑提供了依据.

基于电解铝以上特性, 文献[5,17]提出基于饱和电抗器控制的电解铝负荷控制策略, 通过对饱和电抗器进行改造, 使电解铝负荷有功在毫秒-秒级的暂态时间尺度内迅速下降10%. 文献[18,19]提出利用励磁电压控制器调节电解铝负荷的方法, 并提出通过饱和电抗器与负荷交流侧电压协调控制策略, 使电解铝负荷有功功率暂态调节能力达到其额定容量的18%. 此外, 通过调整调压变压器的变比改变电解铝负荷端电压也可以实现电解铝负荷的秒级-分钟级的稳态调节. 总体控制原理如图2所示. 因此, 电解铝负荷有功功率在不同时间尺度上均可进行有效调节以响应可再生能源不同时间尺度的功率波动, 从而为可再生能源的就地消纳和送端平抑提供新的思路.

3.2 高耗能负荷平抑可再生能源波动性的能力测算

以电解铝工业为例, 受电价、环境等多方面因素的影响, 电解铝产能地区分布发生较大变化. 图3为近几年中国各省份和地区电解铝产能分布图. 电解铝产能具有明显的西迁趋势. 以2012年各省份电解铝产能分布与2015年各省份电解铝产能分布进行比较, 2012年河南、山东等中部省份分别占全国电解铝总产量的18.5%和10%, 新疆维吾尔自治区等西北省份仅占4.6%. 2015年新疆维吾尔自治区电解铝产量迅速上升, 占全国电解铝总产量的18.6%, 位居第二. 按照目前电解铝产业的发展预测, 电解铝产能将继续保持西迁的趋势. 未来, 新疆维吾尔自治区、甘肃省、内蒙古自治区等地区电解铝产能将占据中国电解铝总产能的绝大部分. 电解铝等高耗能负荷聚集于新疆维吾尔自治区、甘肃省、内蒙古自治区等可再生能源丰富地区, 为高耗能负荷就地消纳可再生能源提供了良好的条件.

电解铝需求量与国家经济密切相关, 到2030年中国人均GDP将接近中等发达国家水平^[20], 中国人均年铝需求量将达到当前德国等国家人均年铝需求量水平. 据此测算, 2020和2030年电解铝需求量分别为3700和5800万吨. 根据当前的生产工艺, 每生产一

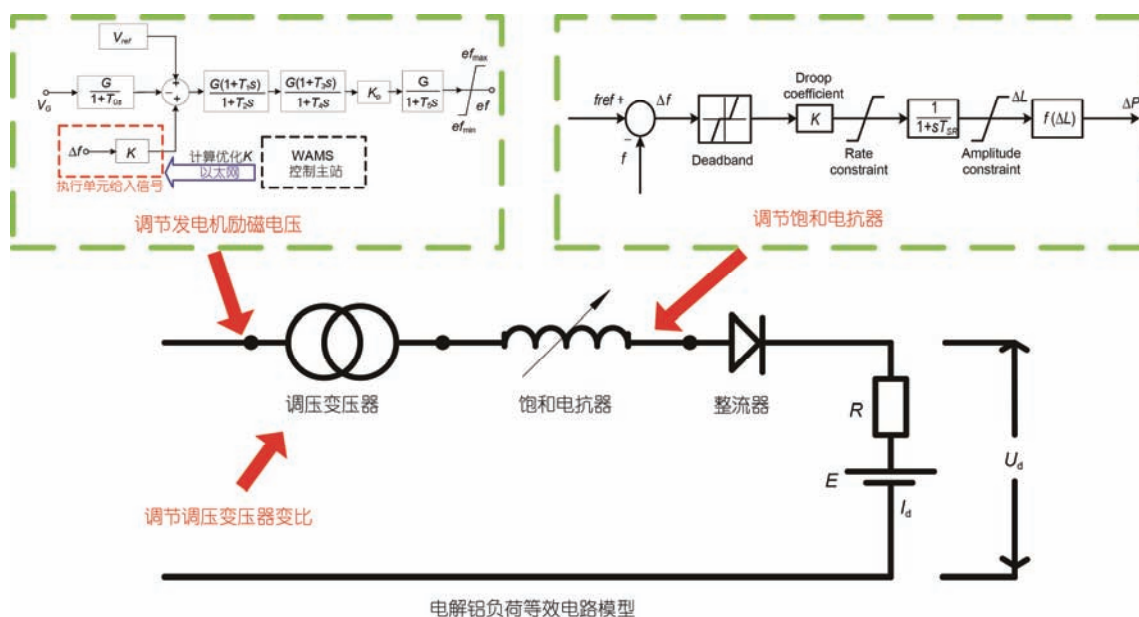


图2 (网络版彩色) 电解铝负荷调节原理图

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of the renewable energy consumption method

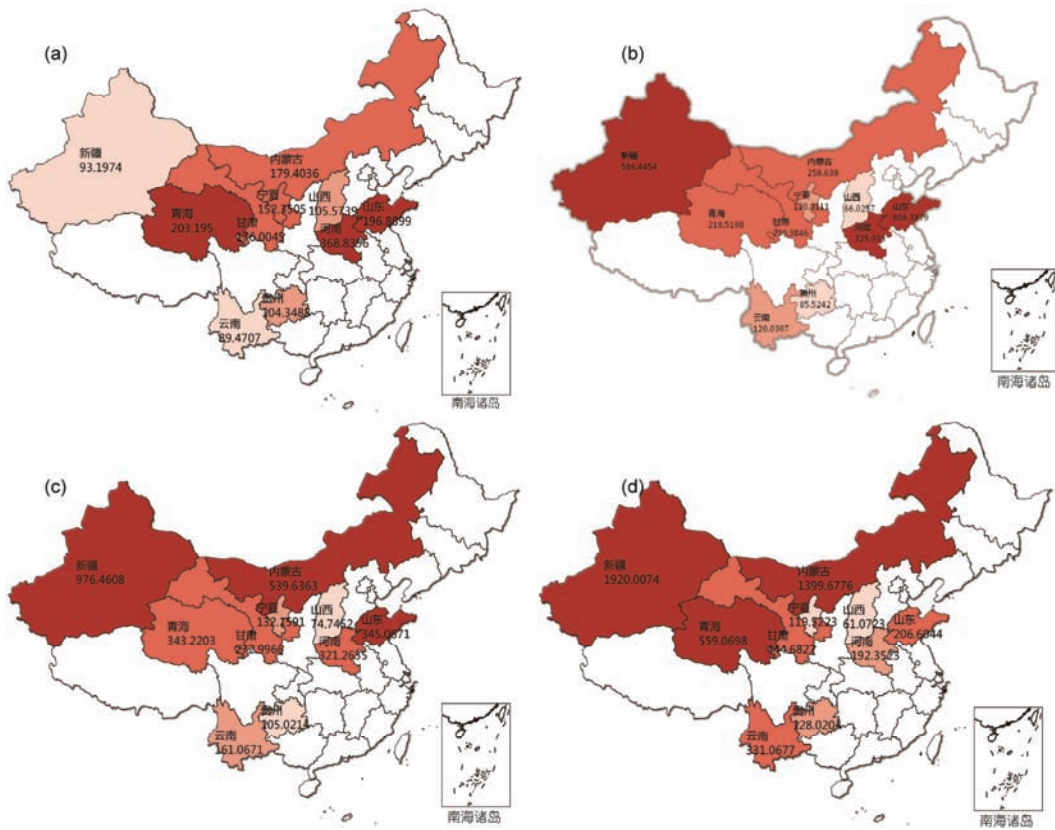


图3 (a) 2012年中国电解铝产能分布图; (b) 2015年中国电解铝产能分布图; (c) 2020年中国电解铝产能分布图; (d) 2030年中国电解铝产能分布图

Figure 3 (a) Distribution of electrolytic aluminum production capacity in China in 2012; (b) distribution of electrolytic aluminum production capacity in China in 2015; (c) distribution of electrolytic aluminum production capacity in China in 2020; (d) distribution of electrolytic aluminum production capacity in China in 2030

吨电解铝需要消耗电量14000 kW h, 2020和2030年全国电解铝产能折合成电量分别为5180和8120亿千瓦时。考虑电解铝年负荷利用小时数接近8000 h, 计算得到2020和2030年电解铝负荷功率分别为6475和10150万千瓦。假设电解铝负荷均已具备功率调节能

力, 功率调节能力按电解铝负荷额定功率的10%完全可调进行估算, 2020年电解铝负荷可以提供的调节功率为648万千瓦, 2030年电解铝负荷可提供调节功率为1015.0万千瓦, 占同年可再生能源发电最大波动量比例如表2所示。如果将电解铝负荷调节技术应用

表2 可再生能源发电最大波动量送端平抑能力

Table 2 The ability of stablizing the fluctuations of renewable energy at the sending-end power grid

年份(情景)		可再生能源发电装机容量(万千瓦)	电解铝负荷用电量(万千瓦)	可再生能源发电最大波动量(万千瓦)	电解铝负荷可调容量(万千瓦)	电解铝负荷可调容量占可再生能源发电最大波动量比例(%)
2020年	低方案	27000	6475	4050	648	16
	中方案	34000	6475	5100	648	12.7
	高方案	42000	6475	6300	648	10.3
2030年	低方案	47000	10150	7050	1015	14.4
	中方案	59200	10150	8800	1015	11.5
	高方案	68080	10150	10200	1015	10.0

到其他高耗能负荷将进一步增加高耗能负荷的调节能力. 例如氯碱工业, 氯碱负荷在2 h内可以实现40%的负荷调节能力^[21], 还将进一步提高可再生能源的就地消纳和功率波动性的平抑容量.

4 配电侧可再生能源功率波动性平抑方法

4.1 气电混合的居民和商业混合动力系统

气电混合型的分布式能源利用系统采用热力学第二定律的冷热电联供形式, 利用能源梯级效应, 把供电与供冷供热结合起来, 以提高能源的利用效率^[22]. 分布式能源利用系统以天然气为系统的一次能源, 通过燃气-蒸气循环机组发电, 利用发电后的尾部烟气余热生产高温热媒水, 用于制备生活热水和空调冷冻水. 分布式能源利用系统已逐步应用于实际, 以远大冷热电联产系统为例, 如图4所示, 小型燃气发电机通过天然气向楼宇供电, 非电空调用烟气及热水制冷, 满足供电、制冷、供暖等需求, 当不发电或者少发电的时候通过天然气补燃. 分布式能源利用系统也可以应用于城镇居民用户, 居民用户日常炊具、热水器、空调选择天然气或者电能作为功能能源, 实现能源高效利用.

4.2 油电混合的交通系统

电动汽车主要包括油-电混合动力汽车和纯电动汽车, 油-电混合动力汽车以电动马达作为发电机的辅助动力, 燃油经济性高, 具备电力动力系统与燃油动力系统相互切换功能, 纯电动汽车以电动马达作为发电机的主要动力, 清洁环保. 目前电动汽车充电

模式具有快速充电模式和慢速充电模式两种. 快速充电模式在20~30 min可为电动汽车电池提供50%~80%的电量^[23]. 一定规模的快速充电站聚集起来, 具备一定的可调度负荷和储能容量, 从而参与电力市场的调度. 文献[9]分析电动汽车电池的响应能力指出通过电动汽车参与电力市场调节, 大大减轻了含高渗透率风电的丹麦系统常规机组调节负担. 文献[24]指出电动汽车充电控制在未来电力系统运行将起到重要作用, 并介绍了充电控制效益及策略研究. 同步建设快速充电站、换电站实现与传统加油站配合, 用户根据实时电价、油价信息, 选择更经济的动力输入源, 从用户方面经济性最优, 从电网侧考虑解决了功率过剩的问题.

4.3 油-气-电混合的综合能源网

通过天然气、石油与电能多种能源的互补运行, 构建如图5所示的气电管网以及油电管网互联的综合能源网, 消纳分布式可再生能源的发电并平抑其波动性. 将天然气管道与配电网络互联构成气电混合的居民和商业混合动力系统, 用户(如混合动力燃气、冷热电联产用户)根据电价与气价信息选择天然气或者电力作为供能能源. 将石油管道与配电网络互联构成油电混合的交通系统, 混合动力汽车根据电价与油价信息选择石油或者电力作为供能能源, 纯电动汽车根据不同时段峰谷电价信息选择充放电. 通过制定新的市场竞价机制, 利用新型智能终端选择最优能源供给方案, 从而能够响应可再生能源的大幅度波动, 有利于电网的安全稳定运行. 通过气电混合以及油电混合, 加强不同能源之间的关联性, 在

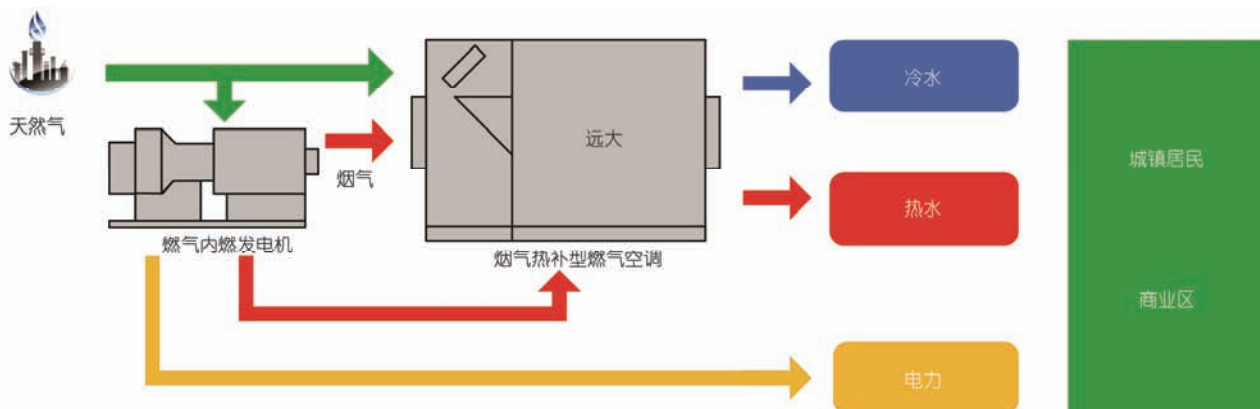


图4 (网络版彩色)气电混合动力系统(以远大冷热电联产系统为例)

Figure 4 (Color online) Gas-electric hybrid power system (CCHP system of Broad Group)

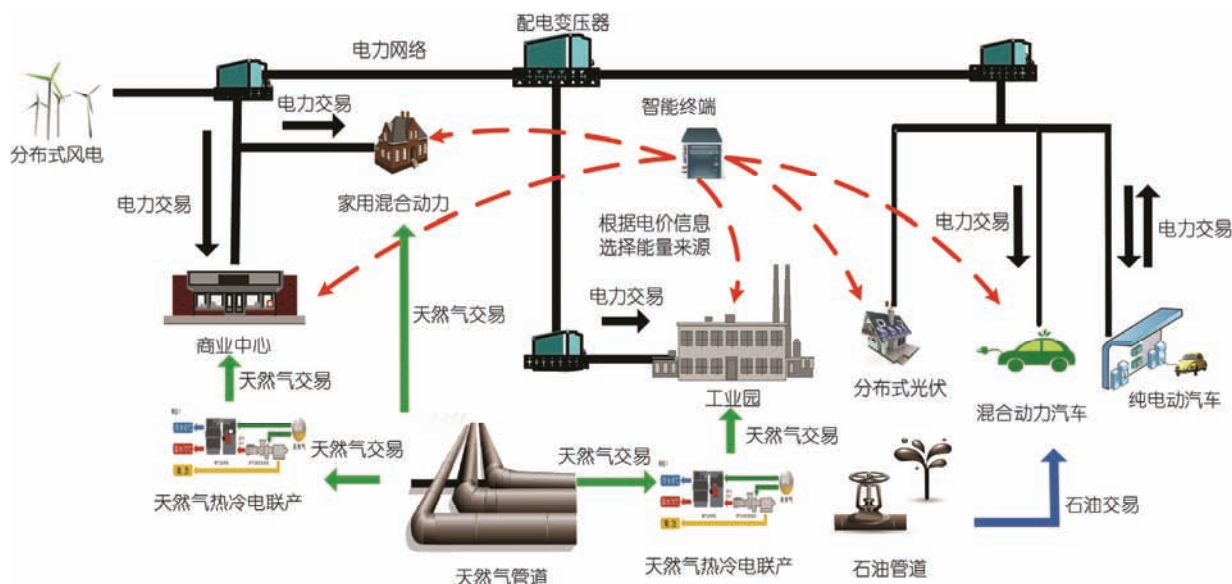


图5 (网络版彩色)综合能源网示意图

Figure 5 (Color online) Schematic diagram of integrated energy network

受端共同平抑可再生能源发电带来的波动性。

4.4 分布式可再生能源功率波动性受端平抑的能力测算

近几年,我国天然气的消费量呈上升趋势^[25],2010~2014年,我国天然气消费量以接近10%的增速持续上升,2015年我国天然气消费量为1910亿立方米,增速放缓但仍保持持续上升趋势。《BP2030世界能源展望报告》中指出未来15年内,中国的天然气消费量将以年均7.6%的速度迅速增长,2020年消费量达到3500亿立方米,2030年消费量达到4637亿立方米^[26]。

天然气作为城镇燃料,考虑一部分(约25%)通过构建居民-商业混合动力系统,实现气电混合运行,折算为电功率后可以作为平抑可再生能源的备用容量计算。此类天然气均能参与可再生能源波动性平抑,约占天然气消耗量的5%。因此,可以调节的城镇燃料用天然气消耗量分别为175和250亿立方米。以1立方米天然气可以转换为9.8度电计算,按照居民-商业负荷年利用小时数3000 h并且考虑20%的同时率进行估算,2020年,居民-商业混合动力系统可调容量约为1143万千瓦,2030年,居民-商业混合动力系统可调容量为1633万千瓦,占同年可再生能源发电最大波动量比例见表3。

我国电动汽车近几年得到迅猛发展。按照测算,

2020年,我国纯电动汽车和插电式混合动力汽车累计产销量超过500万辆^[27],2030年我国纯电动汽车和插电式混合动力汽车累计产销量达到1000万辆。

以电动汽车快速充电模式为例,快速充电模式下功率输出为20 kW。以目前加油站加油位估算电动汽车充电车位同时使用率:统计车辆通过率较高地段加油站,平均加油位的使用率为15%左右(夜间低谷时段车位利用率低于5%;白天高峰时段车位利用率约70%;平时利用率约20%),电动汽车同时充电率按加油站最低利用率4%估算,充电功率按照快速充电模式下(20 kW),2020和2030年电动汽车保有量为500和100万辆测算,2020年电动汽车可调容量为400万千瓦,2030年电动汽车可调容量为800万千瓦,占可再生能源发电最大波动量见表3。

仅以天然气发电为例来估算常规机组的调节能力。预计到2020和2030年,我国天然气发电装机将分别达到1和2.1亿千瓦。天然气机组主要分为两种类型^[28],一种为小容量适合于启停调峰的燃气电站(包含冷热电三联供),约占天然气机组总装机容量的10%,此类机组启停速度快,功率调节能力为装机容量的100%。另一部分为大容量的以热定电的燃气电站,约占天然气机组总装机容量的90%。为了提高效率,此类机组往往增加了余热利用,透平排烟通过余热锅炉加热蒸气,高温高压蒸气再到蒸气透平去做功。在实际运行中,大型燃气机组热态启动到带满负

表 3 可再生能源发电最大功率波动量受端平抑能力

Table 3 The ability of stabilizing the fluctuations of renewable energy at the receiving-end power grid

年份(情景)	可再生能源发电最大 波动量(万千瓦)	居民-商业混合动力 系统可调容量 (万千瓦)	电动汽车可调 容量(万千瓦)	居民-商业混合动力系统 可调容量占可再生能源 发电最大波动量比例(%)	电动汽车可调容量 占可再生能源发电 最大波动量比例(%)	
2020年	低方案	4050	1143	400	28.22	9.88
	中方案	5100	1143	400	22.41	7.84
	高方案	6300	1143	400	18.14	6.35
2030年	低方案	7050	1633	800	23.16	11.35
	中方案	8800	1633	800	18.56	9.09
	高方案	10200	1633	800	16.01	7.84

荷通常耗时90~120 min, 与普通燃煤机组相当. 因此, 此类机组的功率调节能力约为装机容量的10%^[29]. 据此测算, 2020和2030年, 天然气发电的调节能力分别为2800和5880万千瓦.

对可再生能源集中开发的电网送端平抑能力和配电侧分布式可再生能源的电网受端平抑能力以及常规机组调节能力进行汇总, 如图6所示, 可再生能源发展高、中、低方案下, 通过送端高耗能负荷与受端混合动力分布式调节平抑部分可再生能源功率波动量, 剩余的波动量通过常规燃煤、燃气机组和水电机组进行调节, 能够满足可再生能源功率波动调节需求.

5 问题与建议

上述研究和测算结果表明, 在大规模可再生能

源发电侧通过高耗能负荷就地消纳和平抑, 在配电侧分布式可再生能源发电可构建天然气、石油与电网互联的综合能源网平抑可再生能源波动性, 两种手段可以平抑部分可再生能源的功率波动性, 但要实现真正的规模应用, 两种平抑方法仍存在很多问题亟待解决, 如下:

(1) 高比重可再生能源电力系统频率稳定问题需要更加重视. 当大规模可再生能源接入到电网, 采用高耗能负荷就地消纳的模式, 形成高耗能负荷、电网常规机组和可再生能源联合运行时, 由于整个系统惯量变小, 需要预留足够的备用容量维持系统的稳定运行. 由于地理因素、经济因素等条件限制, 该地区无法建立足够的调频机组例如燃油、燃气机组提供充足的备用容量. 一旦系统出现较大的扰动, 由于系统惯量小, 备用容量不足, 容易导致系统失稳. 而且高耗能负荷属于工业负荷, 当系统出现故障导致高耗能负荷长时间处于断电状态时, 会给高耗能负荷产业造成巨大损失. 因此, 考虑利用高耗能负荷消纳大规模可再生能源时, 系统频率稳定问题十分关键.

(2) 高耗能产业转移政策. 对高耗能负荷进行改进, 使高耗能负荷具备负荷调节能力, 利用高耗能负荷的负荷调节特性, 在秒级、分钟级、小时级尺度上为系统提供快速功率调节支持, 可以有效缓解系统备用容量不足的问题, 为系统频率稳定提供有力支撑. 但目前具备负荷调控能力的高耗能负荷比较单一, 大多数高耗能负荷不具备负荷调节能力, 并且高耗能负荷并非由同一厂家集中生产, 同时大部分高耗能负荷产业仍分布在矿资源比较发达的西南、中部地区, 如何将高耗能产业转移至可再生能源丰富地区以及集中对高耗能负荷进行改造, 建立一套完善

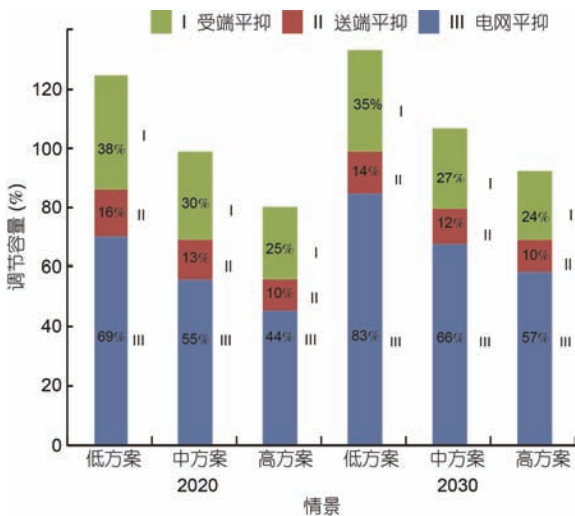


图 6 可再生能源发电功率波动性平抑能力汇总

Figure 6 The ability of stabilizing the fluctuations of renewable energy at the receiving-end and sending-end of power grid

的高耗能负荷消纳体系仍需要详细考虑。

(3) 天然气管网、石油管网与电网互联运行市场机制问题。天然气管网和石油管网尚处于独立运行阶段,与电网之间联系较弱,实现气电管网、油电管网互联的综合能源网技术手段有待进一步研究开发。其次,目前缺乏统一的市场统筹机制,综合能源网各个主体利益难以协调。

未来的一段时间内,我国将处于可再生能源与传统化石能源并存的时代,传统能源供应体系逐渐向清洁低碳能源体系转变。可再生能源消纳问题的瓶颈一旦突破,可再生能源在能源系统中的地位将得到进一步提升,从电量平衡的层面上升到电力平衡的层面,对国家的可持续发展,对能源、气候、环境的影响十分重大。因此,建议加快高耗能负荷的产业转移,提高可再生能源送端平抑可再生能源波动性的能力,提倡天然气、石油与电网之间的互联运行,鼓励用户参与系统调频计划,提高可再生能源受端平抑可再生能源波动性的能力。通过可再生能源送端和受端的共同平抑,削弱可再生能源波动性,为高比重可再生能源的接入打下基础。

6 结论

本文针对可再生能源功率波动性平抑问题,提出通过在大规模可再生能源的发电基地实现高耗能负荷的就地消纳,以及利用高耗能负荷的调节特性实现可再生能源发电功率波动性的平抑,在分布式可再生能源发电的配电侧,通过构建气电管网与油电管网互联的综合能源网系统平抑可再生能源波动性的思路。本文对两种模式平抑可再生能源波动性能力进行分析和测算,指出高耗能负荷具备较强消纳可再生能源能力,高耗能负荷的调节特性可以有效缓解大规模可再生能源波动性给电网造成的压力;构建气电管网与油电管网互联的综合能源网系统同样可以平抑大规模可再生能源的波动。通过在送端构建高耗能负荷与可再生能源、常规电源联合运行的高渗透率电力系统就地消纳可再生能源发电,受端构建气电管网与油电管网融合的综合能源网系统,有利于缓解电网企业输电通道建设和运行压力,有利于提高可再生能源发电企业设备利用效率,最大可能地利用可再生能源发电,确保我国大电网在高比例可再生能源发电的环境下仍然维持电网的安全经济运行。

参考文献

- Hart E K, Stoutenburg E D, Jacobson M Z. The potential of intermittent renewables to meet electric power demand: Current methods and emerging analytical techniques. *Proc IEEE*, 2012, 100: 322-334
- Global Wind Energy Council. Global wind energy outlook in 2014 Global Wind Report 2013-Annual market update, 2014
- Energy Research Institute National Development and Reform Commission. China wind energy development roadmap 2050 (in Chinese). 2014 [中华人民共和国国家发展和改革委员会能源研究所. 中国风电发展路线图 2050. 2014]
- National Energy Administration. Wind power utilization hours of provinces in China (in Chinese). 2016 [国家能源局. 各省 2015 年风电利用小时数. 2016]
- Xu J, Liao S Y, Sun Y Z, et al. An isolated industrial power system driven by wind-coal power for aluminum productions: A case study of frequency control. *IEEE Trans Power Syst*, 2015, 30: 471-483
- Energy Research Institute National Development and Reform Commission. Notice on Carrying Out the Pilot of the Nearest Consumptive Renewable Energy (in Chinese). 2015 [中华人民共和国国家发展和改革委员会能源研究所. 关于开展可再生能源就近消纳试点的通知. 2015]
- Wang R, Gu W, Wu Z. Economic and optimal operation of a combined heat and power microgrid with renewable energy resources (in Chinese). *Automat Electron Power Sys*, 2011, 35: 22-27 [王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化. 电力系统自动化, 2011, 35: 22-27]
- Ministry of Science and Technology of China. "Twelfth Five-Year" Plan for Electric Vehicle Technology Development (in Chinese). 2012 [中华人民共和国科学技术部. 电动汽车科技发展“十二五”专项规划. 2012]
- Pillai J R, Bak-Jensen B. Integration of vehicle-to-grid in the western Danish power system. *IEEE Trans Sustain Energy*, 2011, 2: 12-19
- National Energy Administration. Notice on issuing the action plan (2015-2020) for the construction and transformation of distribution networks (in Chinese). 2015 [国家能源局. 关于印发配电网建设改造行动计划(2015~2020)的通知. 2015]
- National Bureau of Statistics of China. Statistics communique on national economy and social development of China 2015 (in Chinese). 2016 [中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2015 年国民经济和社会发展统计公报. 2016]
- Wang Q K. Update and empirical analysis of domestic and foreign wind energy curtailment (in Chinese). *East China Elec Power*, 2012,

- 40: 378–381 [王乾坤. 国内外风电弃风现状及经验分析. 华东电力, 2012, 40: 378–381]
- 13 Gu Y, McCalley J D, Ni M. Coordinating large-scale wind integration and transmission planning. *IEEE Trans Sustain Energy*, 2012, 3: 652–659
- 14 Cui Y, Mu G, Liu Y, et al. Spatiotemporal distribution characteristic of wind power fluctuation (in Chinese). *Power Sys Tech*, 2011, 35: 110–114 [崔杨, 穆钢, 刘玉. 风电功率波动的时空分布特性. 电网技术, 2011, 35: 110–114]
- 15 Babu C A, Ashok S. Peak load management in electrolytic process industries. *IEEE Trans Power Syst*, 2008, 23: 399–405
- 16 Paulus M, Borggrete F. The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany. *Appl Energy*, 2011, 88: 432–441
- 17 Jiang H, Lin J, Song Y H, et al. Demand side frequency controls scheme in an isolated wind power system for industrial aluminum smelting production. *IEEE Trans Power Syst*, 2014, 29: 844–853
- 18 Jiang H, Lin J, Song Y H, et al. MPC-based frequency control with demand-side participation: A case study in an isolated wind-aluminum power system. *IEEE Trans Power Syst*, 2015, 30: 3327–3337
- 19 Liao S, Xu J, Sun Y, et al. Load-damping characteristic control method in an isolated power system with industrial voltage-sensitive load voltage-sensitive load. *IEEE Trans Power Syst*, 2015, 31: 1118–1128
- 20 Zhou X X, Lu Z X, Liu Y M, et al. Development models and key technologies of future grid in China (in Chinese). *Proc Chin Soc Electrical Eng*, 2014, 29: 4999–5008 [周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来的发展模式和关键技术. 中国电机工程学报, 2014, 29: 4999–5008]
- 21 Paulus M, Borggrete F. The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany. *Appl Energy*, 2011, 88: 432–441
- 22 Energy Research Institute National Development and Reform Commission. Guidance on the development of natural gas distributed energy sources (in Chinese). 2011 [中华人民共和国国家发展和改革委员会能源研究所. 关于发展天然气分布式能源的指导意见. 2011]
- 23 Lithium Battery Research Institute of Gao Gong. The panorama research report of electric vehicle charging station market in 2015 (in Chinese). 2015 [高工锂电产业研究所. 2015 中国电动汽车充电市场全景调研报告. 2015]
- 24 Wang X F, Shao C C, Wang X L, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies (in Chinese). *Proc Chin Soc Electrical Eng*, 2012, (1): 1–10 [王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述. 中国电机工程学报, 2012, (1): 1–10]
- 25 Jia C Z, Zhang Y F, Zhao X. Prospects of and challenges to natural gas industry development in China (in Chinese). *Natural Gas Ind*, 2014, 34: 1–11 [贾承造, 张永峰, 赵霞. 中国天然气工业发展前景与挑战. 天然气工业, 2014, 34: 1–11]
- 26 Ruehl C, Giljum J. BP energy outlook 2030. *Energy*, 2011, 20: 2
- 27 Energy Research Institute National Development and Reform Commission. Guide for the development of electric vehicle charging infrastructure (in Chinese). 2015 [中华人民共和国国家发展和改革委员会能源研究所. 电动汽车充电基础设施发展指南(2015–2020 年). 2015]
- 28 Du D Y, Huang H. Experience and enlightenment of gas generation abroad (in Chinese). *Shanghai Gas*, 2013, 2: 23–26 [都大永. 国外天然气发电的经验与启示. 上海煤气, 2013, 2: 23–26]
- 29 Zeng Y. Selection of gas cogeneration units and peak shaving capability elementary analysis (in Chinese). In: *Proceedings of Annul Meeting of CSEE Gas Turbine Power Generation Special Committee*. Chongqing: Article Collection of Annul Meeting of CSEE Gas Turbine Power Generation Special Committee, 2014. 29–32 [曾勇. 燃气热电联产机组选型及调峰能力浅析. 中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会 2014 学术年会. 重庆: 中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会. 29–32]

Summary for “含高比重可再生能源电力系统功率波动性平抑策略的探讨”

Discussion on strategy of stabilizing high proportion of renewable energy power fluctuation

SUN YuanZhang, BAO Yi, XU Jian^{*}, ZHA XiaoMin, LI Xiong, KE DePing & LIAO SiYang

School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

^{*} Corresponding author, E-mail: xujian@whu.edu.cn

The power fluctuation of power system with high proportion of renewable energy and its access have caused a huge challenge to the safe and reliable operation of the power grid. What kind of method should be adopt to stabilize the power fluctuations of renewable energy generation and what to do to ensure the safe and economic operation of power grid have become the focus of research in the world. On the basis of the detailed investigation and study over the power fluctuation of renewable energy based on wind and solar energy, high energy consumption load regulation characteristics, as well as natural gas and oil pipeline network characteristics, this paper puts forward the general idea about stabilizing the high proportion of renewable energy power fluctuation in China. The idea considers the concentrated renewable energy and the distributed renewable energy. First, considering the concentrated renewable energy. Combined with the characteristics of China's energy resource development and load distribution, a strategy of transferring high energy consumption load from eastern region to western and northern regions where renewable energy are developed centrally is put forward in this paper. The high energy consumption load such as electrolytic aluminium which was thought had no contribution to the satability of frequency before have developed a new role in this paper. The potential power regulation capability of high energy consumption load is developed to achieve the partly *in-situ* consumption and the stabilization of fluctuations of the large-scale renewable energy power generation. On the other hand, considering the distributed renewable energy. The method by combining power grid with natural gas pipeline network and oil pipeline network at the receiving-end of power grid of renewable energy distributed utilization is proposed to build the household and commercial hybrid energy system. This system mentioned above can achieve the stabilization of power generation fluctuation at the receiving-end of the power grid. The concept of combing power grid with natural gad pipeline network and oil pipeline network is novel. On this basis, a detailed explanation of the principle of stablizing the concentrated renewable energy power generation fluctuation at the sending-end of the power grid and the principle of stablizing the distributed renewable energy power generation fluctuation at the distribution network side are given in this paper. To improve the effectiveness of this method, the regulation capacity of the two ways to stabilize renewable energy power fluctuation with different development mode of renewable energy in 2020 and 2030 is evaluated in this paper. The result turns out that by transferring the power regulation capability of high energy consumption load to stable the concentrated renewable energy power generation fluctuation at the sending-end of the power grid and combining power grid with natural gas pipeline network and oil pipeline network to stable the distributed renewable energy power generation fluctuation at the distribution network side, the power system with high proportion of renewable energy would be in safe operation.

high proportion, renewable energy, natural gas pipeline and oil pipeline, high energy consumption load, hybrid power system, demand response

doi: 10.1360/N972016-00484