

2018年压缩空气储能技术热点回眸

傅昊, 姜彤*, 崔岩

华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206

摘要 能源结构转型是世界各国正在面临的严峻问题。中国可再生能源丰富, 但高比例的可再生能源渗透对电网的安全运行提出重大挑战。储能作为协同新能源运行的有效手段, 可打破电能“即发即用”的特点, 实现能量的高效利用。在大规模储能背景下, 压缩空气储能以其自身的清洁、低成本等特点, 逐步成为研究热点。2018年, 压缩空气储能领域向示范工程、商业化初期不断迈进。本文回顾2018年压缩空气储能领域热点问题, 总结了该领域多能互补、液化压缩、盐穴储气、循环控温、协同水利发电等技术方面的突出进展。

关键词 压缩空气储能; 多能互补; 盐穴; 液化压缩

随着产业结构的升级和经济增长方式的转变, 中国能源结构已逐渐进入深刻调整期。国家能源发展“十三五”规划指出, “十三五”时期是中国实现非化石能源消费比重达到15%目标决胜期, 主体能源由油气替代煤炭、非化石能源替代化石能源的双重更替进程将加快推进。中国风能、太阳能等可再生能源资源丰富, 但空间尺度的分布不均和时间尺度的随机性波动性限制了其发展利用, 由此造成大量的弃风、弃光等资源浪费, 同时新能源的并网也对电力系统的安全稳定运行提出了更高的要求。电力储能技术作为未来电力系统发展的关键技术, 在新能源并网发电、电网调峰等领域有广泛的应用空间。2017年10月, 国家能源局再次下发《关于促进储能产业与技术发展的指导意见》, 这是中国大规模储能技术及应用发展的首个指导性政策。2018年是压缩空气储能技术快速发展的一年, 产业由研发示范阶段向商业化初期阶段过渡, 多项示范性工程开始建设或验收合格。同时国内外学者继续开展深入研究, 接连突破了多能互补、液化压缩、大

容量稳定储气、液气循环控温、协同水利发电等一系列关键技术, 成果卓著。在工程实施方面, 英国投运了世界上第一个5 MW/15 MW·h的液化空气储能电站; 采用先进绝热压缩方式的“盐穴压缩空气储能发电系统国家示范项目”正式落址于江苏金坛区。在理论层面, “多能互补+压缩空气储能”的能源发展新模式成为研究热点, 液气循环控温技术、协同水利发电的虚拟抽蓄技术也逐步成熟。

1 “多能互补+压缩空气储能”的能源发展新模式

多能互补分布式能源系统是指可包容多种能源资源输入, 并具有多种产出功能和输运形式的“区域能源互联网”系统。多能互补系统是传统分布式能源应用的拓展, 是一体化整合理念在能源系统工程领域的具象化。它不是多种能源的简单叠加, 而是在系统高度上按照不同能源品味的高低进行综合互补利用, 并统

收稿日期: 2019-01-05; 修回日期: 2019-01-10

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGHE0000KXJS1700086); 中央高校基本科研业务费专项(2018QN004)

作者简介: 傅昊, 博士研究生, 研究方向为大规模电力储能, 电子信箱: fuhaonceptu@sina.com; 姜彤(通信作者), 教授, 研究方向为大规模电力储能, 电子信箱: jiangtong@ncepu.com

引用格式: 傅昊, 姜彤, 崔岩. 2018年压缩空气储能技术热点回眸[J]. 科技导报, 2019, 37(1): 106-112; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.01.011

2 液态空气成为储能黑马

液态空气储能系统可以通过换热器、膨胀机、气液分离器实现空气液化,其存储容量较大,可达200 MW,但储存装置则相对较小,并且受地域限制因素影响较小,因此非常适合大部分地区推广使用。液态空气储能技术有很长的发展历史,其技术水平较成熟,并且液化空气储能系统无污染、对环境很好,相对储能成本较低,经济效益高,在低碳能源占据主要市场的将来会扮演重要角色,具有很好的发展前景。

一般来说,液态空气储能系统包括液化过程、能量存储过程、电力恢复过程3个过程,如图2所示。

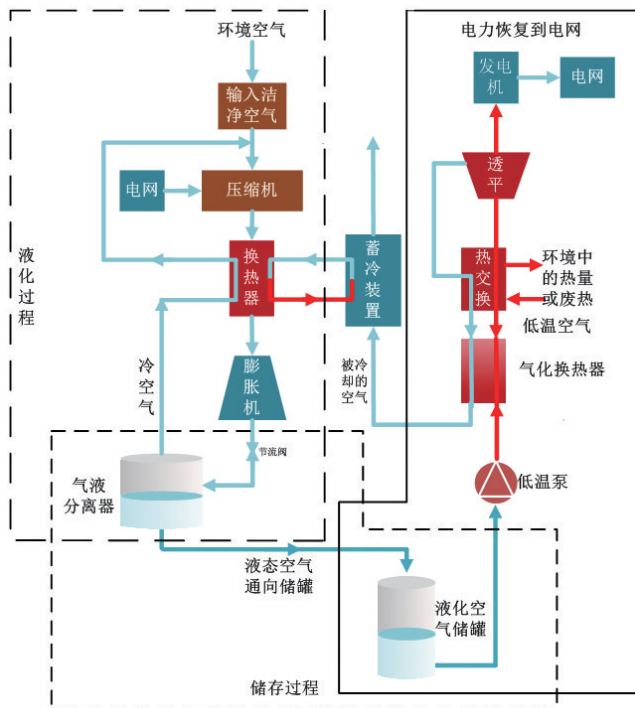


图2 液化压缩空气出能用原理示意

Fig. 2 Schematic diagram of liquefied compressed air energy storage

液化过程:电网夜间富余的电能驱动液化空气装置,使环境中的空气先洁净再压缩,然后进行换热冷却。最后将空气冷却至零度以下直至空气液化。

能量存储过程:经气液分离器分离后的液态空气从气液分离器下端口流到液化空气储罐中储存,液化过程中消耗的大部分电能被转化成了液态空气的冷能。

电力恢复过程:低温储罐中液态空气被引出,经加压吸热气化等一些列过程转变为高温高压气体,并通到透平中做功发电。

液化空气储能的介质是随处易得的空气,储能的整个过程不需要化石燃料作为补充,为完全“绿色”。当空气的温度通过使用液化设备冷却到大约 -196°C 时变成液体,一般700 L的环境空气可变为大约1 L的液态空气。液态空气作为储能介质具有较高的储能密度,每单位体积的有效能可达 $660\text{ MJ}^{[6-9]}$ 。

英国是率先提出“利用液态空气储能调峰”概念的国家,也是全球首个液态空气储能工厂的问世地。总部位于英国的长期储能公司Highview Power与回收和可再生能源公司Viridor合作开发了5 MW/15 MW·h的世界上第一个液态空气储能示范项目(图3),2018年6月正式启动。该项目得到英国政府提供超过800万英镑的资金支持,位于英国曼彻斯特附近Pilsworth垃圾填埋场,通过使用剩余电力(在非高峰时段)将空气冷却成 -196°C 的液体,然后将液态空气有效储存在低压隔热罐中。当需要动力时,从罐中抽出液态空气。气化膨胀驱动涡轮机,在不燃烧燃料的情况下产生电力。

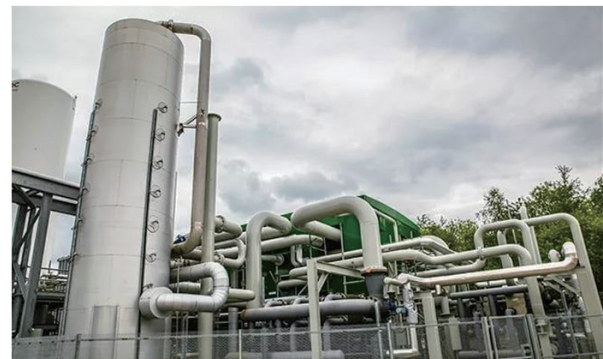


图3 2018年英国液化压缩空气储能示范项目
Fig. 3 Liquefied compressed air energy storage demonstration project 2018 in UK

随着液态空气储能技术在电网规模上得到验证,该工厂为全球范围更加广泛采用液态空气储能技术铺平了道路。液态空气储能系统的容量可以轻松且经济高效地扩展到数百兆瓦,并且可以在很长一段时间内轻松存储足够大约10万个家庭使用的电力,为可再生能源的发展利用开辟新的路径。

3 基于盐穴储气的储能技术成果丰硕

盐穴储气是采用人工方法在地下较厚的盐岩层或盐丘层中制造洞穴形成空间以储存气体的技术。盐穴储气库的建设一般采用水溶开采方式,其深度、容量、

间距和压力等参数根据不同的地形和地质条件而定。盐穴深埋于地下数百米至上千米,其力学性能稳定,承压能力强。同时,盐岩在高压下具有一定的塑性,具备自我修复损伤的能力,渗透率较低,能够保证储存溶腔的气密性。此外,盐穴的开采及使用技术成熟,具有储气容量大、寿命长、造价及运行维护费用低等优点,目前广泛应用于储存压缩天然气、石油以及高压空气等相关产品。盐穴储气技术为解决大型压缩空气储能电站的大容量储气问题提供了一种解决方案^[10]。

“盐穴压缩空气储能发电系统国家示范项目”于2017年5月获国家能源局批复,项目拟建设1套60 MW盐穴非补燃压缩空气储能系统,由清华大学与中盐金坛公司、中国华能集团共建。2018年12月25日,在该项目奠基仪式上,中国科学院院士卢强表示,压缩空气储能是促进能源高效利用的一项优选技术方案。该系统具有建设成本低、发电效率高、储能容量大、使用寿命长、绿色环保等特点,未来具有广阔的应用前景。图4为该示范项目原理图。

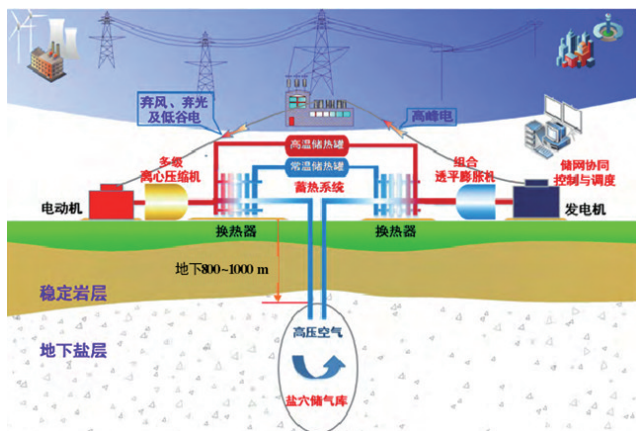


图4 60 MW×4 h 盐穴压缩空气储能国家示范项目原理示意

Fig. 4 Framework diagram of demonstration project of 60 MW×4 h SC-AA-CAES

该系统在压缩储能时,利用弃风、弃光或者低谷电驱动压缩机将空气压缩至高压并储存至地下盐穴;在电网负荷高峰期时,利用盐穴内储存的高压空气驱动透平做功,带动发电机发电并回馈电网。该系统可以吸纳电网低谷时的“弃能”,充分加以利用,使之转化为空气分子的内势能和热能。在用电高峰时,将分子势能和热能耦合释放完成做功发电,从而大幅度改善发电、用电的时空结构。这种调峰应急与调频稳压技术,可以增加电网的削峰填谷能力,优化电力资源配置,有

助于新能源发电并网及消纳,从而达到节能减排目的^[11-12]。

“盐穴压缩空气储能发电系统国家示范项目”落址于江苏省常州市金坛区,项目采用清华大学的先进非补燃压缩空气储能技术,利用金坛地下盐穴作为储气室,一期建设储能容量为60 MW×4 h压缩空气储能电站,系统电换电储能效率达到50%以上。该电站能够强力支撑江苏电网的调峰需求,促进电力系统经济运行,缓解峰谷差造成的电力供应紧张局面。未来将在金坛地区分期建设装机容量达到百万千瓦的压缩空气储能电站群。

4 高效控温技术推进液气压缩空气储能系统进程

随着液体活塞等概念的提出,以气水高速热交换为手段的液气混合压缩空气储能技术近年来发展迅速,极大提升了压缩空气储能系统整体的发电效率。所谓液体活塞,即令液体与气体直接接触并相互做功,图5为液体活塞主要原理。相比通过往复式压缩机、螺杆泵和叶片泵来实现空气压缩释放,气液做功过程中可快速实现热交换,利用水比热容大的特点为系统运行提供近似恒定的温度环境,使得压缩空气储能装置可以近似工作在等温状态下,具有更高的热传递效率。液气压缩还解决了直接空气压缩技术中无法克服的气体泄漏和摩擦损耗等问题,从另一个方面提高了系统的工作效率^[13]。

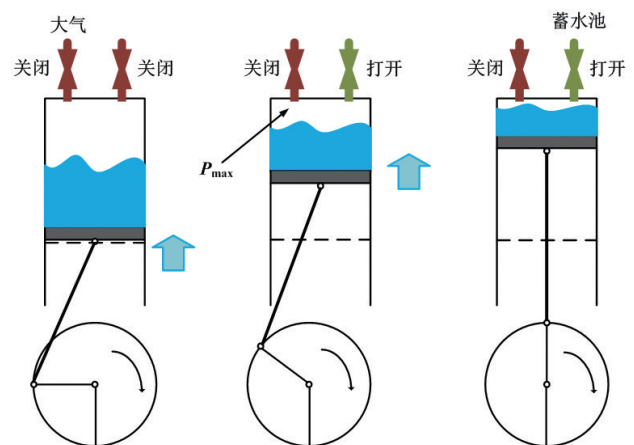


图5 液体活塞结构模型

Fig. 5 Physical model of liquid piston

液气混合压缩系统结构简单,控制方式灵活,但难点在于如何让液气两相更好地接触,以实现等温过程。2018年,国内外学者在液体控温方面开展了大量研究工作。明尼苏达大学Perry等^[14-15]通过改善压缩室的外形以及内部填充多孔介质的方法,增大液气两相接触面积,从而提高系统换热效率;Anirudh^[16]对比研究了干空气与湿空气对压缩过程中换热效率的影响;弗吉尼亚大学Chao等^[17]将喷射水雾和液体活塞相结合,在低转速60 r/min下进行水雾喷射,其中考虑了液滴尺寸、液滴总注入量和喷射方法(预混喷射和直接喷射)的影响。研究表明,减小液滴尺寸使得传热有更大的总表面积,最优尺寸20 μm ,更接近等温效果且直接喷射水雾效果更好。乔治亚理工学院的Adewale等^[18]提出了用可凝气体替代空气进行压缩的方案,以实现更好的控温效果。这些成果都极大推动了液气压缩技术的发展。

国内此方面起步较晚,与国外还存在一定差距,但发展势头正劲,呈现出一大批优秀的人才与成果。华北电力大学电力储能团队在借鉴国外先进研究成果的基础上,提出了新型等温压缩空气储能系统的设计方案(图6),该方案融合液体活塞、液压、液体喷淋、水力发电等多种技术,有效提高了系统的工作效率,为实现大规模储能发电提供了技术支持^[19-21]。

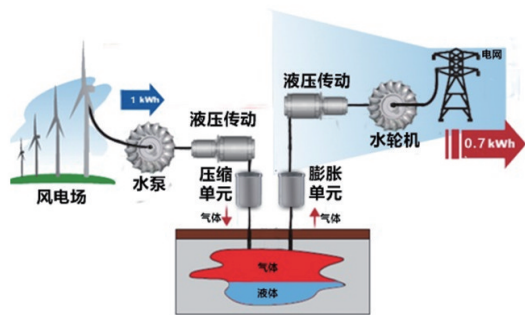


图6 等温压缩空气储能电站试验装置示意

Fig. 6 Schematic of test equipment for isothermal compressed air energy storage power station

5 压缩空气与抽水蓄能技术协同运行

抽水蓄能是目前最实用、最成熟的电力储能技术,它在电力负荷低谷期将水从下池水库抽到上池水库,将电能转化成重力势能储存起来,在电网负荷高峰期释放上池水库中的水发电,具有较高可靠性,且能灵活迅速地进行工况转换,具备削峰填谷、调相、黑启动等

功能。因此,在电力系统中设置一定的抽水蓄能电站,能在大量可再生能源接入电网的情况下确保电网运行的稳定性。但其缺点在于,抽水蓄能电站选址要求高,不能根据电网需要灵活配置,需要满足地质结构稳定、有足够落差、水资源充足等条件,施工难度大周期长,工程造价高等,因此在国内对抽水蓄能技术的推广受到限制。

2018年,一种虚拟抽蓄方案成为研发热点。虚拟抽水蓄能系统借鉴了“抽水蓄能”的概念,通过改变容器内压强值等效代替调节抽水蓄能电站高地势产生的势能,原理如图7所示。系统包括高压容器、低压水池、水泵和水轮机驱动的发电机组。系统采用气液混合的方式,空气作为能量存储介质,水作为中间运行介质,水泵消耗电能压缩空气储能,气体膨胀推动液体经过水轮机发电。西安交通大学在此基础上提出了一种新型的恒压泵送水力联合压缩空气储能系统,用于实现水利设备的恒压高效运行^[22]。

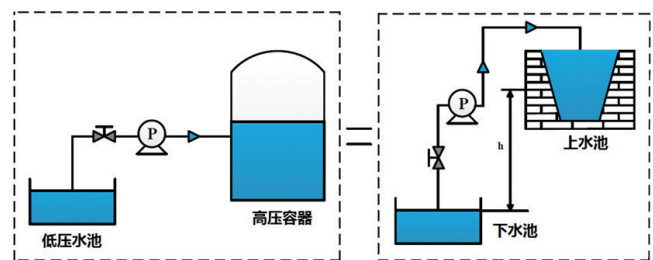


图7 虚拟抽蓄原理

Fig. 7 Principle of virtual pumped storage

针对压力容器内的压力随水位变化而产生的功率波动问题,国内外学者主要提出两种解决方案。其一是当高压容器内压强变化时,通过外部水泵或其他机械装置保持容器流入流出的液体量相等,从而间接控制气体压强;其二是在稳定气体压强的基础上,通过调速技术实现水泵水轮机的变速运行。可变速虚拟抽水蓄能系统采用的可变速抽蓄机组原理结构如图8所示,该装置主要由水泵水轮机、发电电动机、变频器和控制装置组成。水泵水轮机是系统的负载或原动机,自带机械调速器,发电电动机为交流励磁电机,可工作在发电和电动状态下,其交流励磁由变频器提供。此系统可实现电机的变速恒频运行。控制装置用于产生功率、转速、导叶开度信号,分别用于控制变频器、调速器和导叶^[23-24]。

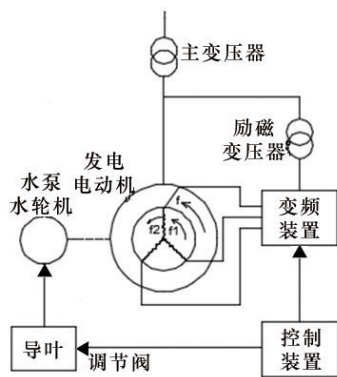


图8 可变速抽蓄机组结构示意图

Fig. 8 Structure of variable speed pumping and storage unit

根据可逆式水泵水轮机的特性知,其发出和消耗的功率与转速的三次方成正比。当转子机械转速发生改变,就可以调节电网和水泵/水轮机之间的交换功率,转速调节由可变速机组的励磁调速系统实现,励磁调速系统为电力电子器件构成的变流器。

6 结论

2018年是储能快速发展的一年,随着可再生能源比重的不断增大,大规模储能需求会越来越迫切。越来越多人力物力会投入到压缩空气储能技术的研发中去。压缩空气储能系统的特点在于其清洁高效,投资低,寿命长,响应迅速。它可以与太阳能、风能等新能源配合运行,可大幅提高可再生能源的利用率和效率,还能集成于微网、电动汽车中,产生的社会效益、经济效益和环境效益明显。但难点在于中小型CAES系统的储能容量与成本之间的矛盾,以及不同运行方式和存储模式之间的效率问题。目前,压缩空气储能系统正向模块化、大型化、高效化、清洁化发展,随着技术的不断发展与完善,其在未来蓄能技术应用中必将占有更高的比重,成为一种经济可行的储能技术。

参考文献(References)

[1] 张华煜, 陈上, 朱彤, 等. 含有绝热压缩空气储能的分布式能源系统供能特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊1): 142-150.
Zhang Huayu, Chen Shang, Zhu Tong, et al. Performance analysis of distributed energy system with adiabatic compressed air

energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Suppl 1): 142-150.

[2] 严毅, 张承慧, 李珂, 等. 含压缩空气储能的冷热电联供微网优化运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6924-6936, 7126.
Yan Yi, Zhang Chenghui, Li Ke, et al. The optimal operation strategy for hybrid combined cooling, heating and power microgrid with compressed air energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6924-6936, 7126.

[3] Amirhassan S, Maryam F, Muhammadali A A, et al. Exergy analysis and optimization of a CCHP system composed of compressed air energy storage system and ORC cycle[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 157: 111-122.

[4] Yan Y, Zhang C H, Li K, et al. An integrated design for hybrid combined cooling, heating and power system with compressed air energy storage[J]. Applied Energy, 2018, 210: 1151-1166.

[5] 杨承, 王旭升, 张驰, 等. 太阳能与压缩空气耦合储能的燃气轮机CCHP系统特性[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5350-5358, 5534.
Yang Cheng, Wang Xusheng, Zhang Chi, et al. Performances of gas turbine-based CCHP system combined with solar and compressed air energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5350-5358, 5534.

[6] 王维萌, 黄葆华, 宋亚军, 等. 10MW级深冷液化空气储能发电系统工程化应用研究进展[J]. 热能动力工程, 2018(12): 1-7.
Wang Weimeng, Huang Baohua, Song Yajun, et al. Research progress on the industrial application of the 10 MW power generation system based on liquid air energy storage technology[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018 (12): 1-7.

[7] 安保林, 王俊杰, 段远源. 联合液化空气储能的有机朗肯循环研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(3): 471-475.
An Baolin, Wang Junjie, Duan Yuanyuan. Research on the combining of organic rankine cycle and liquid air energy storage system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39 (3): 471-475.

[8] 何青, 王立健, 刘文毅. 深冷液化空气储能系统的热力学建模及分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(10): 127-132.
He Qing, Wang Lijian, Liu Wenyi. Thermodynamic model and exergy analysis of cryogenic liquefied air energy storage system [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(10): 127-132.

[9] Krawczyk P, Szablowski Ł, Karellas S, et al. Comparative thermodynamic analysis of compressed air and liquid air energy storage systems[J]. Energy, 2018, 142: 46-54.

[10] 韩红静, 梅生伟, 王国华, 等. 盐穴电池储能技术及发展前景

- [J]. 全球能源互联网, 2018, 1(3): 313-321.
Han Hongjing, Mei Shengwei, Wang Guohua, et al. Salt cavern battery energy storage technology and development prospects[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(3): 313-321
- [11] 何子伟, 罗马吉, 涂正凯, 等. 温压缩空气储能技术综述[J]. 热能动力工程, 2018, 33(2): 1-6.
He Ziwei, Luo Maji, Tu Zhengkai. Survey of the Isothermal compressed air energy storage technologies[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(2): 1-6.
- [12] 梅生伟, 公茂琼, 秦国良, 等. 基于盐穴储气的先进绝热压缩空气储能技术及应用前景[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3392-3399.
Mei Shengwei, Gong Maoqiong, Qin Guoliang, et al. An advanced adiabatic compressed air energy system based on salt cavern air storage and its application prospects[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3392-3399.
- [13] 傅昊, 张毓颖, 崔岩, 等. 压缩空气储能技术研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(23): 81-87.
Fu Hao, Zhang Yuying, Cui Yan, et al. Research development of compressed air energy storage systems[J]. Science and Technology Review, 2016, 34(23): 81-87.
- [14] Yan B, Wieberdink J, Shirazi F, et al. Experimental study of heat transfer enhancement in a liquid piston compressor/expander using porous media inserts[J]. Applied Energy, 2015, 154: 40-50.
- [15] Chao Z, Perry Y L, James D, et al. Design analysis of a liquid-piston compression chamber with application to compressed air energy storage[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 101: 704-709.
- [16] Anirudh S, Perry Y L, Farzad S How moisture content affects the performance of a liquid piston air compressor/expander[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 18: 121-132.
- [17] Chao Q, Eric L. Liquid piston compression efficiency with droplet heat transfer[J]. Applied Energy, 2014, 114: 539-550
- [18] Adewale O, Edem K, Zaky H, et al. Near-isothermal-isobaric compressed gas energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2017, 12: 276-287.
- [19] Zhang X, Xu Y, Zhou X, et al. A near-isothermal expander for isothermal compressed air energy storage system[J]. Applied Energy, 2018, 225: 955-964.
- [20] Jia G W, Xu W Q, Mao L, et al. Micron-sized water spray-cooled quasi-isothermal compression for compressed air energy storage[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2018, 96: 470-481.
- [21] Fu H, Jiang T, Cui Y, et al. Adaptive hydraulic potential energy transfer technology and its application to compressed air energy storage[J]. Energies, 2018, 11(7): 1-13.
- [22] Erren Y, Huanran W, Long L, et al. A novel constant-pressure pumped hydro combined with compressed air energy storage system[J]. Energies, 2015, 8(1): 154-171.
- [23] Chun T C, Cheng G S, Pei L W, et al. An MILP-based model for short-term peak shaving operation of pumped-storage hydropower plants serving multiple power grids[J]. Energy, 2018, 163: 722-733.
- [24] Bahadur S P, Shelly V. A novel pumped hydro-energy storage scheme with wind energy for power generation at constant voltage in rural areas[J]. Renewable Energy, 2018, 127: 802-810.

Focus on compressed air energy storage hotspots in 2018

FU Hao, JIANG Tong*, CUI Yan

School of Electrical and Electronics Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Abstract Transformation of energy structure is a serious problem for countries all around the world. China is rich in renewable energy but penetration of high proportion of renewable energy poses a major challenge to the safe operation of power grid. Energy storage, as an effective way to coordinate new energy sources, may break the characteristics of "ready-to-use" in electricity and achieve efficient utilization of energy. In terms of large-scale energy storage, compressed air energy storage has gradually become a research hotspot because of its clean and low cost characteristics. In 2018, compressed air energy storage stepped forward to demonstration project and commercialization. This paper reviews the hot topics in the field of compressed air energy storage in 2018, and summarizes and analyzes the outstanding advances in such technologies as multi-energy complementarity, liquefied compressed air, salt cavern gas storage, cyclic temperature control and synergistic hydroelectric power generation.

Keywords compressed air energy storage; multi-energy complementary; salt cavern; liquefied compressed air ●



(责任编辑 刘志远)