

# 匹配新能源电能并网的压缩空气储能站性能研究

郭祚刚<sup>1</sup>, 雷金勇<sup>1</sup>, 邓广义<sup>2</sup>

(1. 南方电网科学研究院, 广州 510663; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 压缩空气储能系统在电能释放环节依托节流降压阀进行调压的方法, 存在较大的空气压力能损失, 降低了压缩空气储能系统的能量转换效率。[方法] 引入喷射调压理论, 通过高压流体对低压流体的自动卷吸作用获得中压流体的方法来完成调压过程, 减少由节流降压阀引起的压力能损失。在研究过程中, 分别构建了融合“节流阀调压”、“固定式匹配器调压”以及“可调式匹配器调压”三种不同调压方式的压缩空气储能系统并进行了性能比较分析。[结果] 研究表明: “固定式匹配器调压”方法与“可调式匹配器调压”方法通过压力能回收, 使得首台膨胀机可做功气流总量分别增加了 2% 与 4.1%, 储能系统的能量转换效率也由节流阀调压储能系统的 59.26% 分别提升至 59.60% 与 59.97%。[结论] 性能优化后的压缩空气储能系统能够服务于新能源电能并网需求, 通过储能站与新能源电能发电站形成联合体的方式, 促进新能源电能的消纳。

**关键词:** 压缩空气储能; 喷射调压; 新能源电能; 电能品质

中图分类号: TM911; TK02

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)03-0026-07

## Performance Analysis of Compressed Air Energy Storage System for Grid-connection of Renewable Power

GUO Zuogang<sup>1</sup>, LEI Jinyong<sup>1</sup>, DENG Guangyi<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] There is an obvious pressure energy loss in the electricity output process of Compressed Air Energy Storage (CAES) system, which is caused by pressure regulating valves. The existing of pressure energy loss results in an efficiency drop of CAES system. [Method] In this manuscript, the ejector technology was introduced into CAES systems to finish the air flow pressure regulating process. The target air flow with middle pressure parameter could be obtained by high pressure air flow ejecting low pressure air flow in ejectors. It causes less pressure energy loss than pressure regulating valves. In this investigation, we built and analyzed the performance of three CAES systems with three different pressure regulating methods, including “pressure regulating process only through valves”, “ejectors with fixed throat area” and “ejectors with adjustable throat area”. [Result] The results show that ejector technology can recover the pressure energy loss by increasing working air flow amount. There is about 2% percent additional air flow under ejector with fixed throat area. There is also about 4.1% percent additional air flow under ejector with adjustable throat area. The energy conversion efficiency of CAES system with pressure regulating valves is 59.26%, and those of CAES systems with fixed ejector and adjustable ejector increase to 59.60% and 59.97%, respectively. [Conclusion] The optimized CAES systems can be combined with renewable resource power plants to form united-power plants, which has positive effect in grid-connection of renewable power.

**Key words:** compressed air energy storage; ejector technology; renewable energy resources; electricity quality

煤炭与石油等传统化石能源的消费过程, 通常

伴随着环境污染与温室气体排放等严峻挑战。通过发展可再生能源改善我国的能源消费结构, 能够从根本上缓解能源消费面对的严峻挑战。在我国能源消费结构的调整过程中, 太阳能发电与风力发电等可再生能源电力的占比将逐步提高, 至 2020 年,

全部可再生能源发电装机预计达到 0.68 TW,发电量预计达到  $1.9 \times 10^3$  TWh,可再生能源发电量占全部发电量的 27%<sup>[1]</sup>。

太阳能发电与风电具有间歇性与波动性等特点,其渗透率可达到 50% 以上,太阳能发电与风电等可再生能源电能的接入对电网安全以及电网电能质量将产生负面影响<sup>[2]</sup>。由于电网对波动性可再生能源消纳能力的局限性,弃风与弃光问题已较为突出,其中 2016 年度的全国弃风总电量达到了 49.7 TWh,弃光总电量也高达 7.0 TWh,随着风电与光电等装机容量的进一步提升,弃风与弃光问题将愈发严峻<sup>[3-4]</sup>。

为促进可再生能源电能的有效消纳,《关于促进储能技术与产业发展的指导意见(发改能源[2017]1701号)》于 2017 年正式发布<sup>[5]</sup>。指导意见提出采用储能技术与可再生能源场站共同组成联合体的方式,实现可再生能源电能的输出平滑与电能质量调节,进而提升电网的消纳能力。电能储存技术<sup>[6-7]</sup>主要包括物理储能(抽水蓄能,压缩空气储能与飞轮储能),电化学储能(锂电池储能,铅酸电池储能与液流电池储能等)与电磁储能(超导储能与超级电容器储能)。电化学储能具备充放电效率高的优点,但是储能电池的使用寿命偏短;电磁储能技术主要用于电能质量的瞬间响应,难以实现电能大规模储放;抽水蓄能与压缩空气储能技术属于大规模物理储能技术,机组使用寿命能达到 20 至 30 年,运行性能可靠,在我国拥有超过 30 座抽水蓄能电站,其中广州抽水蓄能电站的装机容量达到了 2.4 GW<sup>[8]</sup>;压缩空气储能技术于 1978 年、1991 年在德国与美国均实现了数百兆瓦级别的商业应用。近年来,国内针对压缩空气储能系统性能优化,进一步开展相关研究工作,以开发适合我国可再生能源电能并网需求的压缩空气储能技术。

可再生能源场站与储能站可通过形成联合体的方式,在对电能输出进行平滑与质量提升之后,接受电网调度,以期达到提升可再生能源电能消纳水平的目标。本文提出分散式风力发电站配置压缩空气储能站来形成联合体的思路,重点针对压缩空气储能系统做功环节储罐与空气膨胀机之间依靠节流降压阀进行调压存在压力能损失的现状,提出依托压力匹配器喷射调压的方式来降低调压损失,重点分析调压方式对压缩空气储能站性能的影响。

## 1 压缩空气储能技术发展现状

压缩空气储能技术是能够实现百兆瓦级别规模化利用的物理储能技术<sup>[9-11]</sup>。在储能阶段,将电网低谷电能或者波动性风光电能转变为压缩空气的压力能进行储存;在对外电能输出阶段,释放带压气流驱动膨胀机做功,进而驱动发电机输出稳定电能。在储能技术原理上,由于膨胀机入口空气流的温度、压力以及流量都能够精确控制,因而此种物理储能技术的输出电能质量较高。

按照输出电能阶段是否消耗天然气燃料,压缩空气储能技术可划分为补燃式压缩空气储能系统与非补燃式压缩空气储能系统。补燃式压缩空气储能系统配置了天然气燃烧器,将高温空气送入膨胀机内做功,提升了电能输出能力。非补燃式压缩空气储能系统不直接燃烧天然气进行补燃,通过回收储能过程的压缩热或者工厂排放废热等形式提升做功环节空气流的温度。非补燃式压缩空气储能系统不消耗天然气,膨胀机入口空气流的温度相对要低,同等流量与压力配置条件下,膨胀机输出功率较补燃式小。非补燃式压缩空气储能系统虽然输出功率低于补燃式压缩空气储能系统,但是摆脱了对天然气的依赖,实现了二氧化碳温室气体零排放。

国内外压缩空气储能电站的简要情况如表 1 所示。全球第一座商业化运营的压缩空气储能示范电站于 1978 年在德国投运,多年的可靠运行充分检验了此项物理储能技术的可行性以及可靠性<sup>[12-13]</sup>。鉴于可靠的运营检验及国内储能需求,国内压缩空气储能示范电站近年来发展迅速。

## 2 “分散式风力发电站及储能站”联合体

风力发电场输出的电能质量受风资源直接影响,电能输出具有间歇性与波动性。如图 1 所示,通过构建“分散式风力发电站与储能站”联合体的方式,可以结合储能站对风电出力进行平滑。

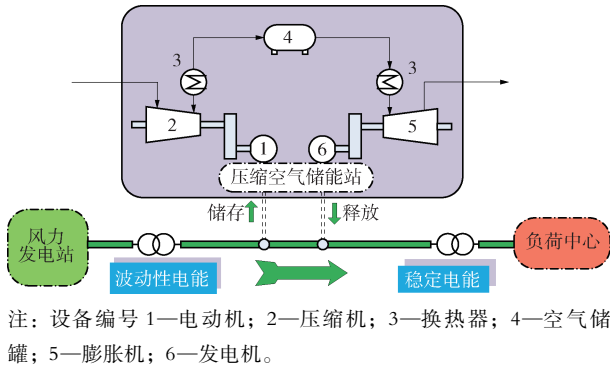
储能站在风电输出处于波峰时,进行电能储存;在风电输出降低时,通过储能站释放电能的形式进行补充,从而达到平滑风电出力,实现电能平滑的功能,减少风电对电网的冲击影响。

在本文分析中,分散式风力发电站的装机容量暂按 30 MW 进行设置,储能站容量按照 15% 进行配置,配置储能规模为 4.5 MW 级非补燃式压缩空

表1 国内外压缩空气储能示范电站

Tab. 1 Brief information of CAES system around the world

项目名称	投入年份	加热方式	放电功率 MW	效率 %	文献
德国 Huntorf 电站	1978 年	补燃式	290	43	[12-13]
美国 Alabama 电站	1991 年	补燃式	110	54	[14-15]
河北廊坊 1.5 MW 示范电站	2013 年	非补燃式	1.5 MW	52	[16]
安徽芜湖 500 kW 示范电站	2014 年	非补燃式	500 kW	33.3	[17]
贵州毕节 10 MW 示范电站	2017 年	非补燃式	10 MW	暂未公布	[18]
江苏中盐金坛 50 MW 示范电站	论证阶段	非补燃式	50 MW	暂未公布	[19]



注：设备编号 1—电动机；2—压缩机；3—换热器；4—空气储罐；5—膨胀机；6—发电机。

图1 分散式风力发电站与储能站构成的联合体

Fig. 1 United-power plant consist of distributed wind power plant and CAES system

气储能站，首次储能时间 2 h。

### 3 压缩空气储能站模块及分析方法

本文中的非补燃式压缩空气储能系统充分利用储能过程产生的压缩热，将此部分热能用于加热膨胀机入口空气气流，提升做功能力。非补燃式压缩空气储能站包括压缩机模块、换热器及储热模块、储气模块以及膨胀机做功模块。相应模块的计算方法及参数配置分小节进行简述。

#### 3.1 压缩机模块

压缩空气储能站的空气压缩过程为多变过程，多变指数用  $\gamma$  表示（取值 1.46），压缩单元入口空气温度（压力）记为  $T_i (P_i)$ ，出口空气的温度（压力）记为  $T_{i+1} (P_{i+1})$ ，增压比记为  $\beta_i$ 。压缩单元入口气流的焓值记为  $h_i$ ，出口气流的焓值记为  $h_{i+1}$ ，空气的质量流量计为  $q_m$ ，依据多变热力学过程空气各热力学参数之间的关系，可得：

$$\beta_i = P_{i+1}/P_i \quad (1)$$

$$T_{i+1} = T_i \cdot \beta_i^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (2)$$

空气压缩过程中单一压缩单元的压缩耗功  $w_i$  计算方法为：

$$w_i = (h_{i+1} - h_i) \cdot q_m \quad (3)$$

对于多级压缩过程的机械效率取  $\zeta_C = 93\%$ ，总体耗功  $W_C$  记为：

$$W_C = \frac{1}{\zeta_C} \sum_1^i w_i = \frac{q_m}{\zeta_C} \sum_1^i \Delta h_i \quad (4)$$

#### 3.2 换热器及储热模块

换热器及储热模块将空气压缩过程产生的压缩热进行储存，在膨胀机做功时用于加热膨胀机入口空气。储热模块内储热介质选择加压水，以循环泵驱动储热介质流动与循环。

#### 3.3 储气模块

本文设计的储能站储能功率 4.5 MW，空气质量流速为 8.24 kg/s，首次自常压储能至 8.0 MPa 允许时间为 2 h，暂配置 750 m<sup>3</sup> 储气空间，在 5.5~8.0 MPa 压力区间比较不同调压方式下储能站性能。

#### 3.4 储罐出口压缩空气的压力调节

压缩空气储能站为了维持较长的对外输出电能时间，储气空间内压缩空气储存压力大于膨胀机入口需求的空气压力。依托传统降压阀进行直接降压的情况下，会产生较大的空气节流压力能损失。本文将对比相同初始储气压力条件下，“传统节流降压阀”、“喉部通流面积固定的压力匹配器”以及“喉部通流面积可调节的可调式压力匹配器”这三类调压方式在压缩空气储能站中的应用，同时比较三种调压方式对压缩空气储能站性能的影响。

#### 3.5 膨胀机做功模块

电能释放过程中，利用膨胀机输出的轴功来驱动发电机输出稳定电能。空气在膨胀机内经历多变过程将内能转变为膨胀机轴功输出。膨胀机输出轴

功记为  $W_T$ , 多变指数用  $n$  表示 (取值 1.36), 膨胀单元入口空气温度 (压力) 记为  $T_a(P_a)$ , 出口空气的温度 (压力) 记为  $T_{a+1}(P_{a+1})$ , 膨胀比记为  $\beta_a$ 。

则有:

$$\beta_a = P_{a+1}/P_a \quad (5)$$

$$T_{a+1} = T_a \cdot \beta_a^{(n-1)/n} \quad (6)$$

设定空气膨胀过程的空气质量流量  $q_m$  等于压缩过程的质量流量  $q_m$ , 单一膨胀单元的膨胀输出功  $w_a$  计算方法为:

$$w_a = (h_a - h_{a+1}) \cdot q_m \quad (7)$$

对于多级膨胀过程的机械效率取  $\zeta_T = 95\%$ , 总体膨胀功  $W_T$  记为:

$$W_T = \zeta_T \sum_1^a w_a = q_m \zeta_T \sum_1^a \Delta h_a \quad (8)$$

### 3.6 储能站电能转换效率

储能站电能转换效率  $\eta$  定义为稳定运行区间内, 膨胀机输出功与压缩机消耗功的百分比:

$$\eta = \left( \frac{\zeta_C \zeta_T \sum_1^a \Delta h_a}{\sum_1^i \Delta h_i} \right) \cdot 100\% \quad (9)$$

## 4 压缩空气储能站配置及性能

非补燃式压缩空气储能站流程如图 2 所示, 在储能过程空气经过多级压缩提升压力后储存备用, 压缩热通过加压高温水的形式同步储存; 对外输出电能阶段, 储气室内释放空气经过换热器加热后进入膨胀机做功, 驱动发电机输出电能。

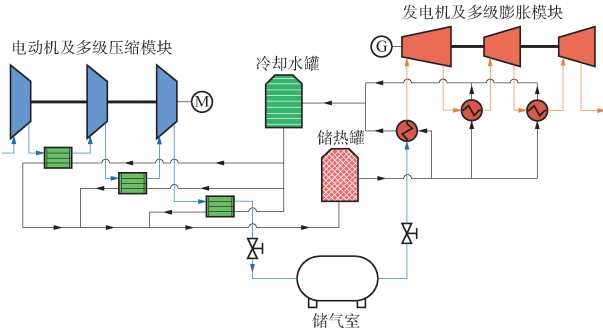


图 2 非补燃式压缩空气储能站示意图

Fig. 2 Schematic diagram of non-supplementary fired CAES system

### 4.1 多级压缩及膨胀参数配置

如表 2 所示, 储能阶段采用四级压缩, 首级压缩单元从大气环境吸入空气进行压缩, 吸入空气的温度取  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , 压力取  $0.101\text{ MPa}$ 。末级压缩单元出

口压力为  $7.96\text{ MPa}$ , 储能阶段空气质量流量为  $8.24\text{ kg/s}$ , 设置换热器对压缩单元出口空气流携带热量进行回收。

表 2 储能站多级压缩单元参数配置

Tab. 2 Parameters of multistage air compression section

多级膨胀	入口 $T/P$ /( $^\circ\text{C} \cdot \text{MPa}^{-1}$ )	出口 $T/P$ /( $\text{K} \cdot \text{MPa}^{-1}$ )	轴功率 /kW
一级压缩	25/0.101	170/0.35	1 278.43
二级压缩	40/0.35	170/1.06	1 147.56
三级压缩	40/1.06	170/3.18	1 147.56
四级压缩	40/3.18	145/7.96	928.61

注: 总轴功率为  $4.502\text{ MW}$ 。

多级膨胀单元的入口参数配置如表 3 所示, 采用压缩热将膨胀单元入口空气加热至  $152\text{ }^\circ\text{C}$ , 膨胀单元与膨胀单元之间采用换热器进行级间加热, 提高压缩空气流的做功能力。

表 3 储能站多级膨胀单元参数配置

Tab. 3 Parameters of multistage air expansion section

多级膨胀	入口 $T/P$ /( $^\circ\text{C} \cdot \text{MPa}^{-1}$ )	出口 $T/P$ /( $\text{K} \cdot \text{MPa}^{-1}$ )	焓降 /( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
一级膨胀	152/3.50	57/1.35	94.85
二级膨胀	152/1.35	24/0.35	127.81
三级膨胀	152/0.35	33/0.102	118.46

### 4.2 调压方式及其对储能站性能影响

压缩空气储能站完成预定储能过程后, 压缩空气钢质储罐内压力约  $8.0\text{ MPa}$ , 为维持储能站较长时间的稳定电能输出时间, 第一级膨胀单元入口压力设定为  $3.5\text{ MPa}$ , 起始压差约  $4.5\text{ MPa}$ 。

储能站运行过程中, 分别设置“节流降压阀调压 (后续简称: 节流阀调压)”、“节流阀 + 固定压力匹配器调压 (后续简称: 固定式匹配器调压)”以及“喉部通流面积可调整的可调式压力匹配器调压 (后续简称: 可调式匹配器调压)”三种调压方式, 对比分析相应压缩空气储能站的性能。

国内外现有投建的压缩空气储能站采用传统的节流阀完成降压调节过程, 如德国 Huntorf 电站储气压力为  $7.0\text{ MPa}$ , 首台膨胀机入口压力为  $4.0\text{ MPa}$ , 调压过程引起的节流压损为  $3.0\text{ MPa}$ <sup>[12]</sup>。如图 3 所示的节流阀调压过程, 其优点在于操作简单, 场景适应能力强, 缺点在于节流过程存在较大的压力能损失。

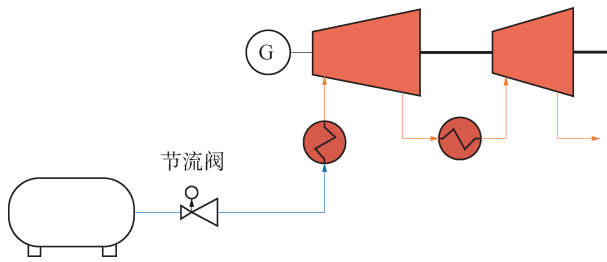


图3 节流阀调压方式

Fig. 3 Schematic diagram of air pressure regulating process with regulating valve

鉴于储能站做功阶段节流阀降压过程存在较大的压力能损失，本文作者结合燃煤与燃气发电厂凝汽器抽真空过程采用“抽汽器真空维持系统”启发，将压力匹配器技术引入压缩空气储能站，优化调压过程，融合压力匹配器调压的压缩空气储能系统已经获得多项国家发明专利授权<sup>[20-21]</sup>。压力匹配器产品的生产工艺已经较为成熟，国内的生产厂家包括青岛高远热能动力设备有限公司、辽宁飞鸿达蒸汽节能设备有限公司、西安千和能源科技有限公司与杭州杭辅电站辅机有限公司等。

如图4所示的固定式匹配器调压方式，在固定式压力匹配器入口配置节流阀，实现“节流阀+固定式压力匹配器”联动调压，相比于单独的节流阀调压方式，能够较好回收压力能损失，提高储能站效率。

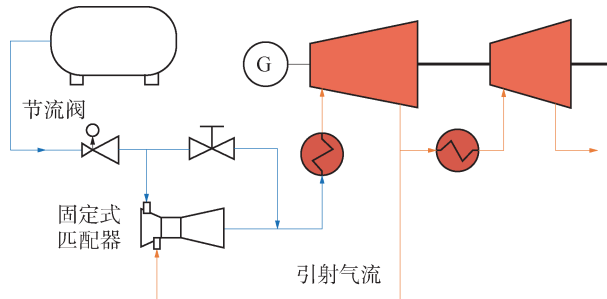


图4 固定式匹配器调压方式

Fig. 4 Schematic diagram of air pressure regulating process with fixed ejector

如图5所示，在固定式压力匹配器基础上发展起来的可调式压力匹配器，能够通过匹配器喉部流通面积的自动调整，实现全程自动控制。可调式压力匹配器因入口无需节流阀的联动配合，因而调节灵活性更强，调压过程压力能回收更加彻底。

作者早期论文已经对融合压力匹配器的压缩空气储能系统进行了相关报道<sup>[9]</sup>，本文结合压力匹配

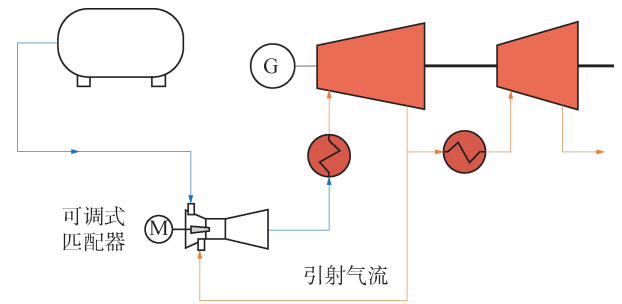


图5 可调式匹配器调压方式

Fig. 5 Schematic diagram of air pressure regulating process with adjustable ejector

器的性能分析方法，进行匹配器在工作参数下的性能计算，获得如图6所示性能结果曲线。

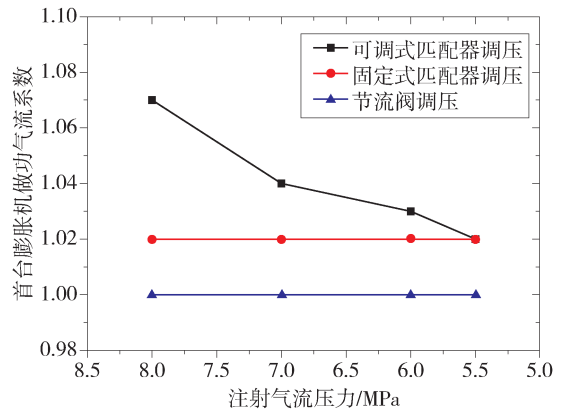


图6 调压方式与首台膨胀机做功气流系数

Fig. 6 Air flow relationship curves under different air pressure regulating styles for the first air expander

三种调压方式对首台膨胀机做功气流的系数结果显示：假定采用“节流阀调压”模式作为参考，首台膨胀机做功气流系数设定为1，高压气流通过直接节流变为3.50 MPa的首台膨胀机入口气流。“固定式匹配器调压”入口采用节流阀将高压空气节流稳压至5.50 MPa，利用5.50 MPa的高压气流引射首台膨胀机1.35 MPa的乏气，获得3.50 MPa的首台膨胀机入口气流，整个调压过程的压力匹配器引射系数恒定为0.02，因而整个调压过程做功气流系数提升至1.02。“可调式匹配器调压”模式能够实现8.0 MPa至5.50 MPa的全程自动压力跟踪与调节，可调式压力匹配器在入口滑压运行过程中的平均引射系数为0.041，首台膨胀机入口做功气流系数达到了1.041。

三类调压方式对应的压缩空气储能站效率如表4所示。储能站在储能阶段的储能功率为4.502

MW,在配置节流阀进行降压时,储能站效率为59.26%;在采用“节流阀+固定压力匹配器”进行联动降压时,较大程度回收了节流压损,储能站效率提升至59.60%;当采用“可调式匹配器”进行降压时,通过可调式压力匹配器的自动调节,实现压缩空气降压过程的全自动跟踪及压力能回收,储能站效率提高至59.97%。

表4 三类压缩空气储能站性能

Tab.4 Performance parameters of three types of CAES system

储能站类别	储能功率	放电功率	储能效率
	/MW	/MW	/%
节流阀调压	4.502	2.668	59.26
固定式匹配器调压	4.502	2.683	59.60
可调式匹配器调压	4.502	2.700	59.97

## 5 结论

在国家大力发展风电等可再生能源战略背景下,削减新能源电能接入对电网的冲击,维持电网稳定与可靠运行十分重要。本文结合国家储能行业指导意见中关于“新能源场站与储能站联合体”的构想,设置了由分散式风力发电站与压缩空气储能站组成的联合体并重点分析了储能站的性能。

通过非补燃式压缩空气储能站的调压优化及储能站性能结果对比分析,节流阀调压下储能站效率为59.26%,固定式匹配器调压下储能站效率为59.60%,可调式匹配器调压下储能站效率提高至59.97%。“固定式匹配器调压”与“可调式匹配器调压”均能较好的回收传统节流降压阀面临的压力能损失,将节流阀中损失的压能转变为空气膨胀机的额外做功气流,提升总体电能输出量,进而在一定范围内提升压缩空气储能站性能。

### 参考文献:

[1] 国家发展改革委. 可再生能源发展“十三五”规划: 发改能源[2016]2619号 [EB/OL]. [2016-12-10]. [http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201612/t20161216\\_830264.html](http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201612/t20161216_830264.html).

[2] 董旭柱, 吴争荣, 刘志文, 等. 智能配电网研究热点 [J]. 南方电网技术, 2016, 10(05): 1-9.  
DONG X Z, WU Z R, LIU Z W, et al. Research focuses on smart distribution systems [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(5): 1-9.

[3] 国家发展改革委, 国家能源局. 2016年风电并网运行情况

[EB/OL]. [2017-01-26]. [http://www.nea.gov.cn/2017-01/26/c\\_136014615.htm](http://www.nea.gov.cn/2017-01/26/c_136014615.htm).

[4] 国际能源网. “三弃”电量近1 100亿千瓦时, 损失487亿元! 2017年, 水、火、风、光、核到底弃了多少电? [EB/OL]. [2018-03-22]. <http://www.in-en.com/article/html/energy-2266640.shtml>.

[5] 国家发展改革委, 财政部, 科学技术部, 工业和信息化部, 国家能源局. 关于促进储能技术与产业发展的指导意见(发改能源[2017]1701号) [EB/OL]. [2017-09-22]. [http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201710/t20171011\\_863348.html](http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201710/t20171011_863348.html).

[6] 王焕然. 一种新型压缩空气储能系统的理论分析 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 15-19+56.  
WANG H R, Theoretical analysis of a novel compressed air energy storage system [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(2): 15-19+56.

[7] 石晶, 龚康, 刘洋, 等. 复合储能在微网中的应用研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 28-34.  
SHI J, GONG K, LIU Y, et al. Application of hybrid energy storage system in micro-grid [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(2): 28-34.

[8] 袁寿其, 方玉建, 袁建平, 等. 我国已建抽水蓄能电站机组振动问题综述 [J]. 水力发电学报, 2015, 34(11): 1-15.  
YUAN S Q, FANG Y J, YUAN J P, et al. Review on vibration problems of power units in commissioned pumped storage projects in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(11): 1-15.

[9] GUO Z G, DENG G Y, FAN Y C, et al. Performance optimization of adiabatic compressed air energy storage with ejector technology [J]. Applied Thermal Engineering, 2016 (94): 193-197.

[10] 张新敬, 陈海生, 刘金超, 等. 压缩空气储能技术研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2012, 1(1): 26-40.  
ZHANG X J, CHEN H S, LIU J C, et al. Research progress in compressed air energy storage system: a review [J]. Energy Storage Science and Technology, 2012, 1(1): 26-40.

[11] 郭祚刚, 邓广义, 范永春, 等. 压缩空气储能系统的理论分析及性能研究 [J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 38-44.  
GUO Z G, DENG G Y, FAN Y C, et al. Performance analysis of compressed air energy storage system [J]. Southern Energy Construction, 2014, 1(1): 38-44.

[12] CROTOGINO F, MOHMEYER K, SCHARF R. Huntorf CAES: more than 20 years of successful operation [C]//Solution Mining Research Institute. Spring Meeting, Orlando, Florida, U. S. A., 15-18 April 2001. Florida: Solution Mining Research Institute, 2001: 1-6.

[13] SWANEKAMP R. McIntosh serves as model for compressed-air energy storage [J]. Power, 2000, 12(2): 35-41.

[14] KRAIN H. Review of centrifugal compressor's application and development [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2005,



127(1): 25-34.

[15] CONNOLLY D. A review of energy storage technologies [R]. Castletroy: University of Limerick, 2009.

[16] 中国科学院工程热物理研究所. “超临界压缩空气储能系统研制”通过验收 [EB/OL]. [2013-07-25]. [http://www.cas.cn/ky/kyjz/201307/t20130724\\_3904638.shtml](http://www.cas.cn/ky/kyjz/201307/t20130724_3904638.shtml).

[17] 薛小代, 梅生伟, 林其友, 等. 面向能源互联网的非补燃压缩空气储能及应用前景初探 [J]. 电网技术, 2016, 40(1): 164-171.

XUE X D, MEI S W, LIN Q Y, et al. Energy internet oriented non-supplementary fired compressed air energy storage and prospective of application [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 164-171.

[18] 中国科学院工程热物理研究所. 国际首台10MW级压缩空气储能集成实验与验证平台开始系统联合调试 [EB/OL]. [2016-12-13]. [http://www.etp.ac.cn/xwdt/kydt/201612/t20161213\\_4720289.html](http://www.etp.ac.cn/xwdt/kydt/201612/t20161213_4720289.html).

[19] 清华能源互联网研究院. 中盐金坛盐穴压缩空气智能电网储能系统国家示范项目通过专家组论证 [EB/OL]. [2017-03-09]. <http://shupeidian.bjx.com.cn/news/20170309/812853.shtml>.

[20] 郭祚刚, 陈光明, 邓广义, 等. 提升压缩空气储能技术能量转换效率的方法及装置: 201310167904.9 [P]. 2015-09-30.

[21] 郭祚刚, 邓广义, 陈光明, 等. 热电联供的压缩空气储能方法及储能系统: 201310167854.4 [P]. 2016-01-27.

#### 作者简介:



GUO Z G

郭祚刚(通信作者)

1985-, 男, 湖南永州人, 高级工程师, 博士, 研究方向为综合能源系统, 压缩空气储能及新能源并网技术 (e-mail) guozg@csg.cn, gzg182@zju.edu.cn.

雷金勇

1982-, 男, 广东惠州人, 高级工程师, 博士, 研究方向为分布式新能源、微电网及综合能源系统。

邓广义

1966-, 女, 广东深圳人, 副总工程师, 教授级高级工程师, 研究方向为燃煤发电、燃气发电及储能技术等电力行业相关工作。

(责任编辑 郑文棠)

## 能源知识·带可调式压力匹配器的压缩空气储能系统优点

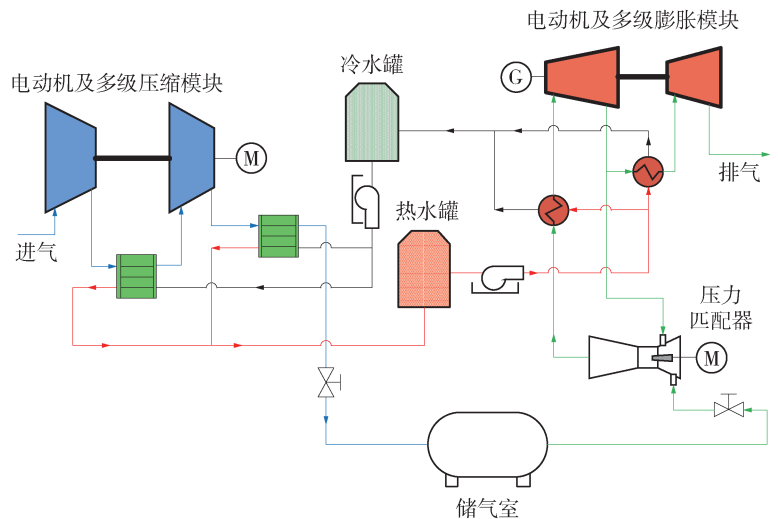
1) 考虑了储能阶段压缩热的储存与再利用, 整套系统无需消耗天然气。

2) 储能系统不消耗天然气, 后续运行过程无天然气消耗成本。

3) 可调式压力匹配器能够减少节流降压调压过程存在的压力能损失, 实现了首台空气膨胀机做功排气的压力再提升。

4) 可调式压力匹配器调压系统将原本在节流降压阀中损失的能量, 传递给了首台膨胀机做功排气, 实现了部分乏气的升压, 进而增加了首台膨胀机的做功气流量。

5) 高压储气罐出口气流调压方式的优化, 在一定程度上提升了压缩空气储能系统整体性能。



(《南方能源建设》编辑部)