

改进的光热复合压缩空气储能系统设计方案及其仿真分析

陈晓弢^{1,2}, 王国华³, 司 杨¹, 梅生伟^{1,2}, 薛小代^{1,2}, 陈来军^{1,2}, 张学林²

(1. 青海大学 启迪新能源学院, 青海 西宁 810036; 2. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和
仿真国家重点实验室, 北京 100084; 3. 江苏加怡热电有限公司, 江苏 常州 213000)

摘要:在现有光热复合压缩空气储能(ST-CAES)实验系统的基础上,提出了一种ST-CAES的改进设计方案。通过引入回热系统和双脉宽调制(PWM)变流技术,实现了压缩热的回收利用与“柔性”并网。从影响ST-CAES膨胀发电系统性能的热力学参数、最大效率控制2个方面开展稳态与动态研究,分别建立了稳态热力学模型和膨胀发电机最大效率转速模型。搭建了ST-CAES并网发电系统的动态仿真平台,仿真分析表明,采用压缩空气先由回热系统预热、再经太阳能集热系统加热的技术路线可进一步提升系统的储能效率;采用双PWM变流器接入电网的控制策略,可在满足负荷功率需求的前提下,实现膨胀发电系统最大效率运行。

关键词:光热复合压缩空气储能系统;储能效率;双PWM变流器;热力学分析;最大效率转速;最大效率控制
中图分类号:TM 91 **文献标识码:**A **DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.05.003

0 引言

清洁能源作为未来接入智能电网的主导能源,其大规模开发与利用是全球能源发展的必然趋势^[1]。然而,以风电、光伏发电为代表的清洁能源具有间歇性和波动性的特征,其大规模接入不仅会引发严重的弃风弃光问题,亦给智能电网的安全、稳定、高效运行带来了一系列的挑战。如何有效缓解弃风弃光难题,实现清洁能源对化石能源的逐步替代,已成为建设智能电网亟需解决的关键问题。

“智能电网+大规模储能技术”是解决当前弃风/弃光问题、保证智能电网高效和经济运行的有效措施之一^[2]。目前,较为成熟的大规模物理储能的技术主要有抽水蓄能和压缩空气储能CAES(Compressed Air Energy Storage)系统。相较于抽水蓄能,CAES具有选址灵活、综合能源利用率高等优点^[3]。然而,目前已商业化运行的德国Huntorf电站和美国McIntosh电站均存在天然气依赖和污染物排放的问题^[4],限制了其在智能电网中的推广与应用。

在CAES中引入外部热源可解决上述电站对天然气的依赖问题^[5],这也日益成为研究人员关注的焦点。相关机构围绕太阳能光热与CAES集成领域开展了理论与仿真研究^[6-8]。仿真结果表明,引入外

部热源的CAES可有效提升系统的储能效率。其中,透平膨胀机与高速同步发电机作为CAES中的释能发电环节,是影响系统储能效率的关键因素之一^[9-10]。

释能发电环节采用透平膨胀机直联高速发电机,通过脉宽调制(PWM)变流器“柔性”接入电网的技术方案^[11](相较于机械减速器),因其具有对转速的快速跟踪控制和输出功率的灵活调节能力,逐渐成为小型CAES接入电网的主流方式。相关学者针对上述方案从仿真分析、最大效率控制策略等方面开展了研究工作,积累了丰富的理论与实验经验^[12-15]。

基于上述研究基础,青海大学联合清华大学团队在青海西宁搭建了世界上首套100 kW光热复合压缩空气储能(ST-CAES)实验系统^[16]。该系统集成了太阳能高效集热与低焓损储热技术、高速透平膨胀发电一体化设计技术、管线钢储气技术等多项前沿技术,开辟了提高储能效率和光热资源综合高效利用的新途径^[17],为实现智能电网多种形式能量的存储与利用提供了一个具备多种功能的实验平台。

本文以ST-CAES实验系统为研究对象,从回收利用压缩热、优化透平膨胀机变工况运行参数和双PWM变流器并网控制策略3个方面入手,提出了改进的ST-CAES设计方案。围绕上述改进方案,开展了热力性能分析,建立了透平膨胀机最大效率转速模型,提出了ST-CAES最大效率转速的跟踪控制和输出功率的调控策略,搭建了热力学模型和并网发电系统仿真平台,最后分析了并网发电系统在最大效率转速运行下的输出特性。

1 青海大学ST-CAES实验系统工作原理与总体改进方案

青海大学ST-CAES实验系统由压缩机、太阳能集热系统、管线钢储气罐、透平膨胀机和高速发电机组成,其中释能发电环节采用透平膨胀机与高速永

收稿日期:2018-02-15;修回日期:2018-03-13

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51621065);青海省科技成果转化专项(2017-GX-101);青海省自然科学基金资助项目(2017-ZJ-932Q);国家电网公司科技项目(SGRI-DL-71-15-006)

Project supported by the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (51621065), the Scientific and Technological Project of Qinghai Province (2017-GX-101), the Natural Science Foundation of Qinghai Province (2017-ZJ-932Q) and the Science and Technology Program of SGCC (SGRI-DL-71-15-006)

磁同步发电机一体化设计,组成高速透平膨胀发电机 HTG(High speed Turbo-Generator)。

ST-CAES 实验系统包括储能和释能 2 种工作模式,其中储能模式包括储气和储热 2 个过程。储气时,电能驱动空气压缩机将空气压缩至高压并存储在管线钢储气罐内;储热时,太阳能集热系统将光热收集并存储在高温导热油罐中。释能时,储气罐释放的压缩空气流经换热器被高温导热油加热后驱动 HTG,发出的高频交流电为电阻箱和照明负载供电。

ST-CAES 实验系统具有能量综合利用率高、使用寿命长、运行和维护成本低、工作过程中零污染物排放等诸多优点。然而,因压缩环节采用风冷方式降低压缩机的级间进气温度,导致压缩过程产生的压缩热并未得到回收利用;释能发电系统发出的电能目前只供给独立负载,未来并网时,由区域负荷波动引起的 HTG 频率与输出功率调节问题尚未解决。

针对上述问题,本文分别从以下 3 个方面对 ST-CAES 进行改进(流程如图 1 所示):①加入回热系统,即利用存储的压缩热预热进入太阳能集热系统的压缩空气,可以实现压缩热的回收利用,进一步提高储能效率;②针对透平膨胀机的变工况运行特性,将 HTG 的最大效率控制问题转化为对最大效率转速的跟踪控制问题,建立 HTG 最大效率转速模型;③加入双 PWM 变流器,利用机侧 PWM 变流器控制 HTG 跟踪最大效率转速、网侧 PWM 变流器调节输出功率,可在满足区域电网需求功率的同时,实现透平膨胀机在最大效率点运行。

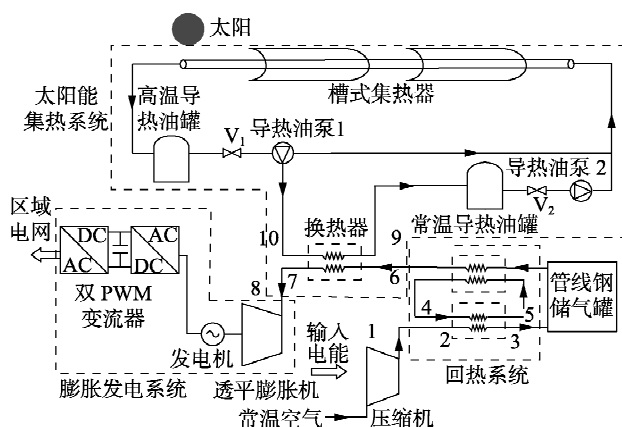


图 1 改进的 ST-CAES 结构图

Fig.1 Structure of improved ST-CAES

2 系统热力学分析

2.1 热力学分析

本节基于如下假设对改进的 ST-CAES 开展热力学分析:①回热系统的储热装置采用绝热模型,压缩空气经回热系统预热后的出口温度为固定值;②储气罐采用等温模型,即在整个充放气过程中,储气罐内的温度时刻等于环境温度,换热器出口处的

空气温度为固定值;③各级压缩机的压缩比相等,每级透平膨胀机的膨胀比相等;④考虑压缩机和透平膨胀机的机械损失以及发电机的损耗。

系统的储能效率定义为:

$$\eta = \frac{W_{\text{TG}}}{W_{\text{Com}} + W_{\text{Sol}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$W_{\text{Sol}} = Q_{\text{Sol}} \eta_{\text{Col}} \eta_{\text{Sol}} \quad (2)$$

其中, η 为系统的储能效率; W_{TG} 为 HTG 输出的电能; W_{Com} 为压缩机及其辅助设备消耗的总电能; W_{Sol} 为槽式光热集热系统的折算电能,即根据目前槽式光热电站的技术水平,将系统所利用太阳能折算为所发出的电能; Q_{Sol} 为输入系统中的太阳能热量; η_{Col} 为太阳能槽式集热系统的集热效率; η_{Sol} 为太阳能发电效率。

2.2 系统热力性能分析

改进的 ST-CAES 的参数如下:透平膨胀机级数为 2,压缩机级数为 4,储能发电时间为 0.5 h,管线钢储气罐最高压力为 8 MPa,储热介质为导热油 VP1,回热系统为管壳式换热器。

由工程热力学理论可知,影响透平膨胀机输出电能的主要参数包括:进气压力、温度、质量流量^[18]。透平膨胀机作为 ST-CAES 的释能发电环节,是影响系统储能效率的关键因素。为了探求热力性能参数与储能效率之间的关系,本节分析了 HTG 进气压力、进气温度和质量流量对系统储能效率的影响。分别研究了当 HTG 的进气温度从 453 K 增加至 503 K、进气压力由 3.6 MPa 上升至 5.5 MPa 以及质量流量由 1.835 t/h 提高到 6.835 t/h 时,热力学参数与系统储能效率的变化趋势。

在 HTG 入口质量流量确定的条件下,分析进气压力、进气温度对系统储能效率的影响机理,结果如图 2 所示,其中 HTG 质量流量为 3.835 t/h。由图 2 可知,在同等温度下,系统的储能效率随 HTG 进气压力的升高而增大;当进气压力相同时,储能效率随进气温度的升高也呈增大趋势。例如,在进气温度为 473 K 的条件下,若进气压力为 3.6 MPa,储能效率为 50%,当进气压力上升至 5.5 MPa 时,储能效率能够提升 2.7%;当进气压力为 4.7 MPa 时,若将进气温度由 453 K 升高至 503 K,储能效率则提升 5.5%。

图 3 为 HTG 进气温度为 473 K 的条件下,储能效率随进气压力和质量流量变化的规律。由图 3 可知:质量流量为固定值时,储能效率随着进气压力的增加而升高;进气压力为固定值时,储能效率随着质量流量的增加而升高。以进气压力为 4.7 MPa 为例,质量流量由 1.835 t/h 上升至 6.835 t/h,储能效率仅提升 1.1%。

在 HTG 的进气压力为固定值时,分析系统储能效率与进气温度、质量流量的变化关系,结果如图 4

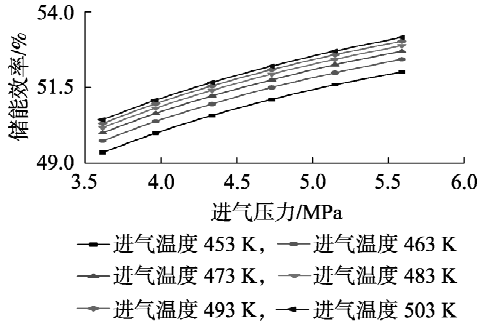


图 2 HTG 进气压力和进气温度对储能效率的影响

Fig.2 Effects of inlet air pressure and inlet air temperature of HTG on energy storage efficiency

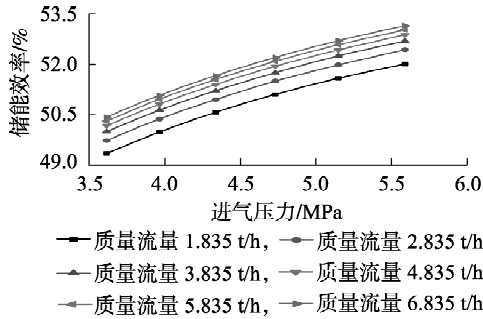


图 3 储能效率与 HTG 进气压力和质量流量的关系

Fig.3 Relationship among energy storage efficiency, inlet air pressure and mass flow rate of HTG

所示。由图 4 可得出如下结论:进气温度为固定值时,储能效率随着质量流量的增加有一定程度的升高;质量流量为固定值时,储能效率随着进气温度的增加有明显的提高。例如,当质量流量为 3.835 t/h 时,进气温度由 453 K 增加至 503 K,储能效率可提升 5.6%。

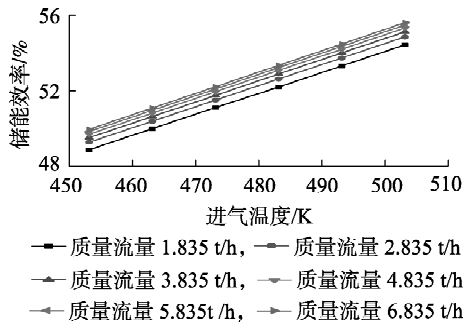


图 4 储能效率与 HTG 进气温度和质量流量的关系

Fig.4 Relationship among energy storage efficiency, inlet air temperature and mass flow rate of HTG

由以上分析结果可得:增大 HTG 的质量流量对储能效率的提升是有限的;提高 HTG 的进气压力和进气温度可以有效地提升系统的储能效率。需要说明的是,提高进气压力对储气罐、调节阀及 HTG 的耐压水平提出了更高的要求。从工程经济角度出发,提高进气温度比提高进气压力便于实现。因此,引入回热系统的 ST-CAES 可有效地提升系统的储能效率。

值得一提的是,上述研究是基于 HTG 稳态运行工况下得出的结论。然而,为了满足区域负荷功率需求,HTG 需频繁变工况运行,其效率不仅与进气温度、进气压力和质量流量有关,还与不同工况下的转速密切相关。因此,有必要围绕 HTG 变工况运行条件下的系统性能特性,研究 HTG 的最大效率控制问题。

3 HTG 最大效率转速模型

HTG 作为 ST-CAES 中的热-机-电转换设备,其输出功率 P 与机械转矩 M_m 可分别表示为^[18]:

$$P = f(T, \pi, \dot{m}_a) = N\eta \dot{m}_a C_p T_{in} [1 - \pi^{(1-k)/k}] \quad (3)$$

$$M_m = P/n = N\eta \dot{m}_a C_p T_{in} [1 - \pi^{(1-k)/k}] / n \quad (4)$$

其中, C_p 、 π 、 $\dot{m}_a$ 、 T_{in} 、 k 、 n 和 η 分别为定压比热容 (kJ/(kg·K))、膨胀比、质量流量 (t/h)、进气温度 (K)、绝热系数、转速 (r/min) 和效率; N 为透平膨胀机级数。

基于第 2 节的假设,在系统释能发电过程中,HTG 的入口温度为固定值。因此当区域需求功率变化时,通过控制膨胀比和质量流量即可调节 HTG 的输出功率以满足负荷需求。由相似原理可知,透平膨胀机在变工况运行时具有与额定工况运行相类似的性能曲线^[19],为了使透平膨胀机变工况下的效率达到最优,转速、质量流量、膨胀比间的运行特性曲线需满足如下关系:

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{ad}} = \frac{n}{n_d} \quad (5)$$

$$n = \frac{\sqrt{1 - \pi^{(1-k)/k}}}{\sqrt{1 - \pi_d^{(1-k)/k}}} n_d = \frac{A}{A_d} n_d \quad (6)$$

其中, $n/n_d \in (0.4, 1.2)$; 下标 d 表示相应变量的设计值。透平膨胀机在额定转速下运行时,效率 η 和相似流量 x 之间的关系由式(7)所示多项式拟合。

$$\eta_{nd}(x) = -0.1x^5 + 0.8x^4 - 2.3x^3 + 2.8x^2 - x + 0.6 \quad (7)$$

其中, $x = \dot{m}_a \sqrt{T_{in}} / P_r$, P_r 为进气压力; $\eta_{nd} \in (0.4, 0.6)$ 。

当透平膨胀机在非额定转速运行时,其运行效率曲线具有与式(7)所示曲线相似的特性,将不同转速下的效率曲线簇的最大效率点连接并采用多项式拟合的方式,可得不同转速下最优效率的数学表达式为:

$$\eta_{\max}(x) = -0.8x^3 + 0.8x^2 + 7.1x + 52.58 \quad x \in (0.45, 1.5) \quad (8)$$

由式(8)可知,透平膨胀机的最大效率为相似流量 x 的函数,即其与膨胀比和质量流量相关。将式(6)代入式(5)可得:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{ad} \frac{n}{n_d} = \dot{m}_{ad} \frac{A}{A_d} \quad (9)$$

由式(9)可知,转速与膨胀比和质量流量之间存在耦合关系,故可将最大效率控制问题转化为最大效率转速控制问题。将式(9)代入式(3)可得:

$$P = NC_p T_{in} \eta \dot{m}_{ad} \frac{A}{A_d} A^2 \quad (10)$$

由式(10)可得 A 的表达式为:

$$A = \left(\frac{P}{NC_p T_{in} \eta \dot{m}_{ad}} A_d \right)^{1/3} = \sqrt{1 - \pi^{(1-k)/k}} \quad (11)$$

进一步,由式(11)可得膨胀比为:

$$\pi = \left\{ 1 - \left[\frac{P \sqrt{1 - \pi_d^{(1-k)/k}}}{NC_p T_{in} \eta \dot{m}_{ad}} \right]^{2/3} \right\}^{k/(1-k)} \quad (12)$$

联立式(6)、(10)、(11),可得变工况运行时,HTG 的最大效率转速与需求功率 P 之间的最大效率转速模型为:

$$n_{\eta_{\max}} = n_d \frac{A}{A_d} = n_d \left[\frac{P \sqrt{1 - \pi_d^{(1-k)/k}}}{NC_p T_{in} \eta_m \dot{m}_{ad}} \right]^{1/3} \frac{1}{\sqrt{1 - \pi_d^{(1-k)/k}}} \quad (13)$$

其中, η_m 为效率设计值; P 为负荷需求功率。因此,当已知负荷需求功率时,计算最大效率转速的计算流程如图5所示。

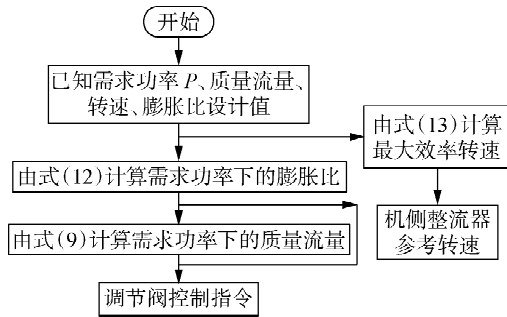


图5 最大效率转速计算流程图

Fig.5 Flowchart of calculating maximum efficiency speed

4 双 PWM 变流器控制策略

为了实现 ST-CAES 机侧最大效率转速的跟踪控制和“柔性”并网。本节提出了高速同步发电系统电机侧整流器和电网侧逆变器的控制策略。膨胀发电系统中的双 PWM 变流器由电机侧整流器、直流侧电容和电网侧逆变器及其控制电路构成,拓扑结构如图6所示。

4.1 高速同步发电机模型

ST-CAES 中的高速同步发电机为永磁同步发电机,其转子运动方程为:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M_m - M_e \quad (14)$$

$$M_e = 1.5p[\psi i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq}] \quad (15)$$

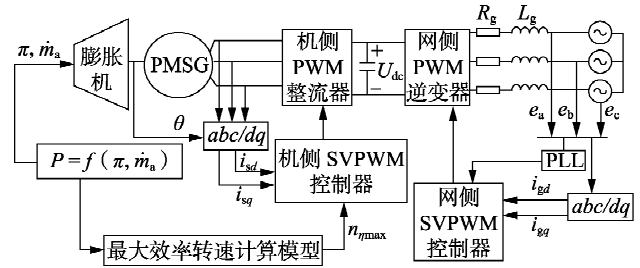


图6 膨胀发电系统最大效率控制图

Fig.6 Control block of expander-generator system's maximum efficiency

忽略永磁同步发电机的铜耗和铁耗,即可认为发电机输出的有功功率 P_c 与电磁功率 P_e 近似相等,即:

$$P_c = P_e = \omega_m M_e \quad (16)$$

其中, M_e 为电磁转矩; L_{sd} 、 L_{sq} 分别为定子直轴、交轴电感; ω_m 为永磁同步机的转子机械角速度; p 、 ψ 、 J 分别为电机极对数、转子磁链、转动惯量,均为常数。

4.2 机侧变流器控制策略

高速同步发电机是一个强耦合、复杂的非线性系统^[20]。为了简化控制,采用 d 轴定子电流 $i_{sd} = 0$ 控制策略,此时由式(15)可得高速同步电机的电磁转矩为:

$$M_e = 1.5p\psi i_{sq} \quad (17)$$

由式(17)可知,通过控制定子 q 轴电流分量 i_{sq} ,即可实现对电磁转矩的控制。由式(14)可知,通过对电磁转矩的控制,进而改变 HTG 的转子机械角速度。当 ω_m 等于 HTG 最大效率角速度 $\omega_{\eta_{\max}}$ 时,即可实现膨胀发电系统在最大效率状态运行。机侧变流器的控制结构如图7所示。图中, ω_s 为永磁同步机的电角速度; L_d 、 L_q 分别为永磁同步发电机 d 轴和 q 轴电感; u_{dref} 、 u_{qref} 分别为 d 轴和 q 轴电压参考值; U_α 、 U_β 为 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压参考值; θ 为三相坐标系下 A 相与 d 轴的夹角。

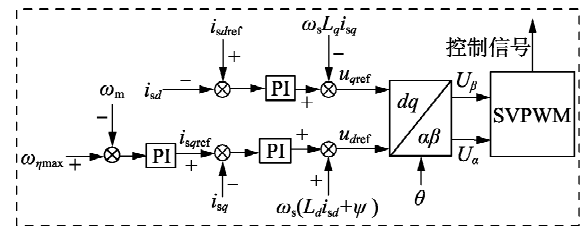


图7 机侧变流器控制结构

Fig.7 Control block of generator-side converter

4.3 网侧变流器控制策略

网侧变流器的控制策略既要维持直流电压恒定,还需实现输出有功与无功的解耦控制,为此网侧逆变器控制架构如图8所示。图中, ω_g 为电网角速度; L_g 为电网的等效电感; e_d 、 e_q 分别为负载侧 d 轴和 q 轴电压分量; u_{gdref} 、 u_{gqref} 分别为电网侧 d 轴和 q 轴电压参考值。

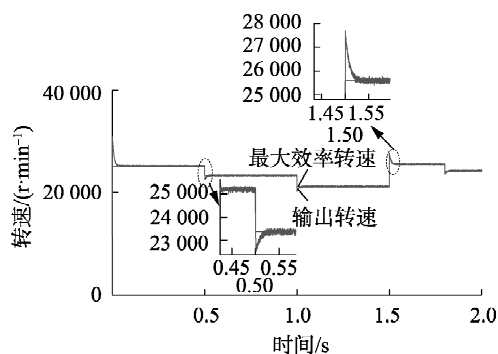


图12 HTG 变工况转速变化曲线

Fig.12 Curve of HTG speed in variable working condition

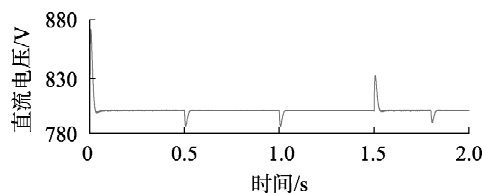


图13 直流侧电压变化曲线

Fig.13 Curve of DC voltage

较好的电压稳定能力。

图14为膨胀发电系统输出至电网的相电压与相电流的仿真结果。在0.5s之前,输出电流与电压同相位,此时为单位功率因数输出;在0.5s时,因需求功率降低,此时输出电流的幅值也迅速降低;在1.5s时,需求功率升高,使输出电流幅值也快速增加。变流器的动态响应速度快,仿真过程中网侧相电压由大电网支撑,从而保持不变。

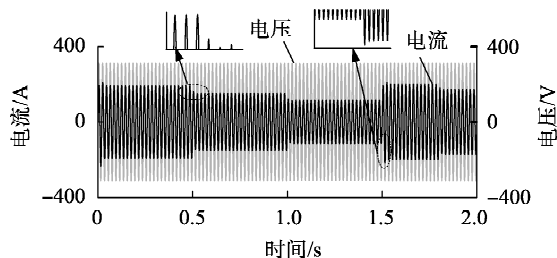


图14 输出电压和电流变化曲线

Fig.14 Curves of output voltage and current

综上,HTG的最大效率转速协调控制策略能够实现ST-CAES膨胀发电系统在变工况运行条件下控制膨胀发电系统工作在最大效率点,并具有响应速度快、控制精度高、超调量小等优点。

6 结论

本文以ST-CAES实验系统为基础,引入回热系统和双PWM变流技术,实现了压缩热的回收利用和“柔性”并网。热力学分析和并网仿真结果表明,经改进的ST-CAES在促进压缩热能的高效回收利用、平抑区域电网负荷波动、灵活调节输出有功和无功功率等方面发挥了重要的作用,未来有望成为智能电网中的能量枢纽,实现多种形式能源的消纳与

供给。需要说明的是,本文的研究工作仅停留在理论和仿真阶段,所提方法尚未进行实验验证。笔者后期的研究将改进ST-CAES实验平台,通过实验对所提技术方案进行验证。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京:中国电力出版社,2015: 85-86.
- [2] 罗星,王吉红,马钊. 储能技术综述及其在智能电网中的应用展望[J]. 智能电网,2014,2(1):7-12.
LUO Xing, WANG Jihong, MA Zhao. Overview of energy storage technologies and their application prospects in smart grid[J]. Smart Grid, 2014, 2(1): 7-12.
- [3] BUDT M, WOLF D, SPAN R, et al. A review on compressed air energy storage: basic principles, past milestones and recent developments [J]. Applied Energy, 2016, 170: 250-268.
- [4] 徐国栋,程浩忠,马紫峰,等. 用于缓解电网调峰压力的储能系统规划方法综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):3-11.
XU Guodong, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. Overview of ESS planning methods for alleviating peak-shaving pressure of grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 3-11.
- [5] 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 Xinjing, CHEN Haisheng, LIU Jinchao, et al. Research progress in compressed air energy storage system: a review[J]. Energy Storage Science and Technology, 2012, 1(1): 26-40.
- [6] LINDEN S V D. Integrating Wind Turbine Generators (WTGs) with GT-CAES (Compressed Air Energy Storage) stabilizes power delivery with the inherent benefits of bulk energy storage[C]// ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. [S.l.]: ASME, 2007: 379-386.
- [7] 徐玉杰,陈海生,刘佳,等. 风光互补的压缩空气储能与发电一体化系统特性分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(20): 88-95.
XU Yujie, CHEN Haisheng, LIU Jia, et al. Performance analysis on an integrated system of compressed air energy storage and electricity production with wind-solar complementary method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 88-95.
- [8] UDELL K, BEEMAN M. Thermodynamic analysis of an advanced solar-assisted compressed air energy storage system [C]// ASME 2016, International Conference on Energy Sustainability Collocated with the ASME 2016 Power Conference and the ASME 2016, International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology. [S.l.]: ASME, 2016: V002T01A006.
- [9] 刘斌,陈来军,梅生伟,等. 多级回热式压缩空气储能系统效率评估方法[J]. 电工电能新技术,2014,33(8):1-6.
LIU Bin, CHEN Laijun, MEI Shengwei, et al. Cycle efficiency evaluation method of multi-stage RCAES system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(8): 1-6.
- [10] MEI Shengwei, WANG Junjie, TIAN Fang, et al. Design and engineering implementation of non-supplementary fired compressed air energy storage system: TICC-500[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(4): 600-611.
- [11] 宋洁,赵波,梁丹曦,等. 压缩空气膨胀发电系统最大效率跟踪控制策略[J]. 储能科学与技术,2017,6(1):154-161.
SONG Jie, ZHAO Bo, LIANG Danxi, et al. Strategy for tracking maximum efficiency of a expander-generator system of compressed

- air energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(1): 154-161.
- [12] 姚骏, 廖勇, 瞿兴鸿, 等. 直驱永磁同步风力发电机的最佳风能跟踪控制[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 11-15.
YAO Jun, LIAO Yong, QU Xinghong, et al. Optimal wind-energy tracking control of direct-driven permanent magnet synchronous generators for wind turbines[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 11-15.
- [13] 王成山, 马力, 王守相. 基于双PWM换流器的微型燃气轮机系统仿真[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 56-60.
WANG Chengshan, MA Li, WANG Shouxiang. Simulation of a microturbine system based on double PWM converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 56-60.
- [14] KOKAEV V, SHARKH S M, MOSHREFI-TORBATI M. Maximum power point tracking of a small-scale compressed air energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 985-994.
- [15] LEMOFOURT S, RUFE A. Hybrid energy storage systems based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency point tracking[C]//European Conference on Power Electronics and Applications. Dresden, Germany: IEEE, 2006: 10.
- [16] MEI Shengwei, LI Rui, XUE Xiaodai, et al. Paving the way to smart micro energy grid: concepts, design principles, and engineering practices[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2017, 3(4): 440-449.
- [17] 梅生伟, 李瑞. 智慧微能源网及工程实践[J]. 中国人工智能学会通讯, 2016, 6(10): 1-5.
MEI Shengwei, LI Rui. Smart micro energy internet and its engineering application[J]. Chinese Artificial Intelligence Association Communication, 2016, 6(10): 1-5.
- [18] 沈维道. 工程热力学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2016: 115-118.
- [19] 邹滋祥. 相似理论在叶轮机机械模型研究中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 46-49.
- [20] 魏静微. 小功率永磁同步发电机设计特点[J]. 微电机, 2003, 36(3): 11-13.
WEI Jingwei. Design characteristic of a light-power magneto alternator[J]. Micromotors, 2003, 36(3): 11-13.

作者简介:



陈晓弢

陈晓弢(1982—),男,甘肃兰州人,讲师,博士研究生,主要研究方向为储能技术与应用(E-mail: chenxiaoyao_qhu@foxmail.com);

王国华(1970—),男,江苏金坛人,高级工程师,主要研究方向为压缩空气储能技术、新型热力系统等(E-mail: jtwgh6320@163.com);

司杨(1982—),男,四川绵阳人,副教授,硕士,通信作者,主要研究方向为新能源并网与发电技术(E-mail: lurkaries@gmail.com);

梅生伟(1964—),男,河南新野人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统控制、大规模储能技术等(E-mail: meishengwei@tsinghua.edu.cn);

薛小代(1982—),男,山东蒙阴人,副研究员,博士,主要研究方向为大规模储能技术、新能源发电等(E-mail: xuexiaodai@tsinghua.edu.cn);

陈来军(1984—),男,湖北天门人,副教授,博士,主要研究方向为大规模储能技术、电力系统分析与控制等(E-mail: chenlaijun@tsinghua.edu.cn);

张学林(1989—),男,河南新乡人,工程师,硕士,主要研究方向为热力系统、大规模储能技术等(E-mail: mrxuelin@163.com)。

Improved design scheme of solar thermal compressed air energy storage system and its simulation analysis

CHEN Xiaotao^{1,2}, WANG Guohua³, SI Yang¹, MEI Shengwei^{1,2}, XUE Xiaodai^{1,2}, CHEN Laijun^{1,2}, ZHANG Xuelin²

(1. School of Qidi (TUS) Renewable Energy, Qinghai University, Xining 810036, China; 2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Jiangsu Jia Yi Thermoelectric Co., Ltd., Changzhou 213000, China)

Abstract: An improved design scheme of ST-CAES (Solar Thermal Compressed Air Energy Storage) is proposed based on the existing ST-CAES experimental system. The reclamation of compressed heat and flexible grid-connection are realized by integrating regenerative system and dual-PWM (Pulse Width Modulation) convert technique. The steady-state and dynamic research is carried out from two aspects that influencing the performance of ST-CAES expansion generating system, i.e. the thermodynamic parameters and maximum efficiency control, and the steady-state thermodynamic model and the rotational speed model with maximum efficiency of expansion generator are established respectively. The dynamic simulation platform of ST-CAES grid-connected system is built, and analysis shows that the technical route, in which the compressed air is firstly preheated by the regenerative system and then heated by the solar collector system, can further improve the energy storage efficiency, and the grid-connection control strategy with dual-PWM converter can realize the maximum efficiency operation of the expansion generating system on the basis of meeting the load demand.

Key words: ST-CAES; energy storage efficiency; dual-PWM converters; thermodynamic analysis; rotational speed with maximum efficiency; maximum efficiency control