

以太阳光为高温热源的 LNG 卫星站冷能发电系统

孙宪航 陈保东 王雷 宋士祥 马跃 张国军

辽宁石油化工大学石油天然气工程学院

孙宪航等.以太阳光为高温热源的 LNG 卫星站冷能发电系统.天然气工业,2012,32(10):103-106.

摘要 如何高效合理利用 LNG 所携带的冷能一直是人们关注的话题。为此,对 LNG 卫星站中 LNG 冷能利用方式及工艺流程进行了研究。以山东淄博 LNG 卫星站为例,建立了一种以太阳能加热的水为高温热源,LNG 储罐输出的 LNG 液态工质为低温热源的热力循环发电系统。设计了该系统的工艺参数,计算了该系统日均净发电量和能量利用效率,分析了该系统的经济性和环保效益。结果表明:在日供气量为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的山东淄博 LNG 卫星站中建立该热力循环系统,能量利用效率可超过 30% 且符合工程实际,年可发电 $27 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,每年带来约 30 万元的经济效益;同时,还可以节约气化 LNG 所需的燃料费用 6~8 万元/a,减少因燃烧煤炭和天然气而带来的 $400 \sim 1\,000 \text{ kg/a}$ 的 SO_2 排放量和 $56 \sim 146 \text{ t/a}$ 的 CO_2 排放量,实现了节能、环保、增效三赢。

关键词 LNG 卫星站 LNG 冷能利用 太阳能 高温热源 低温热源 热力循环 发电系统 山东淄博

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.10.025

充分高效地利用进口 LNG 携带的冷能,不仅可以节约能源、创造经济效益,而且能够避免 LNG 气化过程对环境造成的冷污染。现有 LNG 冷能利用方式主要有空气分离、冷能发电、低温粉碎、制造液态二氧化碳、低温冷库和轻烃分离等。

笔者将太阳能热水器原理应用于 LNG 卫星站来建立以太阳能加热水为高温热源,以 LNG 储罐输出 LNG 为低温热源的朗肯循环发电系统,在免费使用太阳能的同时也回收了 LNG 中蕴藏的宝贵冷能。下面以山东省淄博市的 LNG 卫星站为例来做具体分析。

1 LNG 卫星站利用太阳能热源的潜力

LNG 卫星站作为小型的 LNG 气化站具有与大型 LNG 接收站相似的功能,对于需要清洁能源而输气管网又不易到达的中小城镇或特殊厂家,LNG 卫星站成功解决了这一矛盾。近年来随着中国 LNG 产业的不断发展和城市管网供气安全的需要,LNG 卫星站得到了雨后春笋般地发展。内陆的 LNG 卫星站与沿海大型 LNG 接收站相比虽然没有取之不尽的海水作为热源来构建发电系统,但这也为以太阳能加热水为热源构建 LNG 低温冷能发电系统提供了可能^[1]。

山东省淄博市位于北纬 $35^{\circ}56' \sim 37^{\circ}18'$ 、东经 $117^{\circ}32' \sim 118^{\circ}31'$ 之间,属于半湿润,半干旱的大陆性气候;四季分明,年平均气温为 $12.3 \sim 13.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均无霜期为 $180 \sim 220 \text{ d}$,年平均日照时数为 $2\,542 \sim 2\,832 \text{ h}$,晴天平均日照时间为 8.5 h ,年平均太阳辐射总量为 $4\,704 \sim 5\,460 \text{ MJ/m}^2$,具有比较丰富的太阳能资源,地下水温度为 $10 \sim 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这为建立以太阳能热水系统为热源的 LNG 低温冷能发电系统提供了前提条件。

2 系统流程

山东淄博 LNG 卫星站设计日供气量 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$,卫星站内有 12 台立式储罐,单台容积为 106 m^3 ,站内有 8 台空浴式气化器,气化能力为 $1\,500 \text{ kg/h}$,LNG 储罐储存压力为 0.3 MPa ,储存温度为 $-146 \text{ }^{\circ}\text{C}$,外输管网输气压力为 0.6 MPa ,输气温度为 $5 \sim 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]。基于太阳能加热水为高温热源,输出 LNG 为低温热源的冷能发电系统基本工艺流程如图 1 所示。

以太阳光为热源的热力循环系统由太阳能集热器、智能控制循环系统、备用电加热器、管路连接系统、

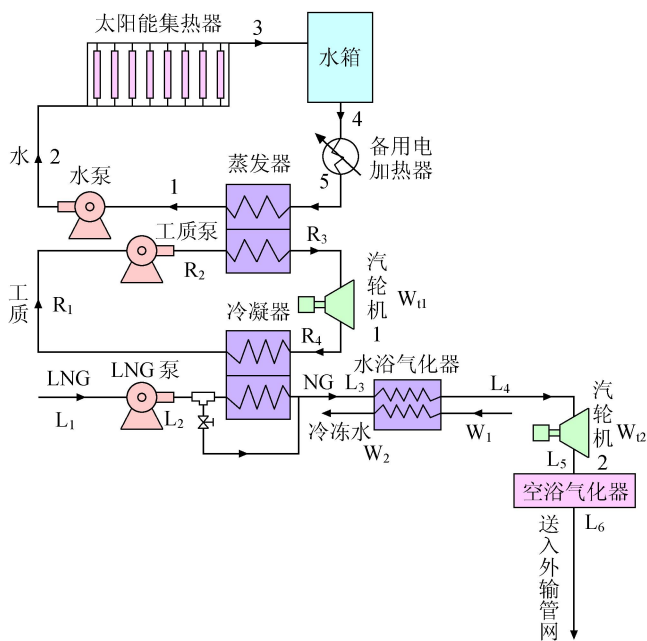


图 1 以太阳能为热源的 LNG 卫星站冷能发电系统流程图

水箱、支架等组成。由于系统受用户用气量的变化和天气变化的影响,当水温不符合热力循环的要求时,系统使用电加热方式来补充热量以保证热水供应持续^[3]。

循环中液态工质经工质泵加压后送入蒸发器,吸收循环热水提供的热量并蒸发,气态工质进入汽轮机 1,在汽轮机 1 内膨胀到冷凝压力后进入冷凝器,在冷凝器内被逆向流动的 LNG 冷凝为液态,最后进入工质泵,完成一个热力循环,通过汽轮机对外做功进行发电^[4]。

被 LNG 泵加压到 3.0 MPa 后的 LNG 为热力循环的工质提供冷量后被气化为气态天然气,但此时的气态天然气温度仍然低于 -40 °C,仍具有相当可观的

冷量,再使气态天然气进入水浴气化器为气化站内的中央空调提供冷冻水。当下游用户用气量处于高峰且 LNG 的流量已经超过了热力循环系统所需要的冷能时,可以通过旁通流量阀来调节 LNG 进入冷凝器的流量。经过水浴气化器加热后的天然气冷能已消耗殆尽,但经 LNG 泵加压到 3.0 MPa 的天然气仍然具有相当的压力能,再使天然气经过汽轮机对外做功,完成 LNG 冷能的多级利用。膨胀到 0.6 MPa 后的天然气再经过空温式气化器加热到 5~10 °C 后输送至外输管网^[5-6]。

3 系统参数设计与发电量计算

3.1 系统参数设计

3.1.1 LNG 在冷凝器中进出口温度的设计

上述热力循环系统的建立是以 LNG 进出冷凝器温度为确定值的前提下确定的,因此当 LNG 进出冷凝器温度确定后,工质的冷凝温度便已经确定。由于 LNG 在不同的压力下具有不同数量的冷焓,且冷焓在各个温度区间的分布也不同,所以 LNG 在冷凝器进出口的温度对于 LNG 冷焓的利用率有直接的影响。上海交通大学杨红昌在他的硕士论文中对 LNG 在不同压力下 LNG 冷焓随温度的分布进行了总结,如表 1 所示。

在忽略 LNG 成分影响的情况下,由表 1 可知在 3.0 MPa 下, LNG 的冷焓主要集中在 -162 ~ -43 °C, 占总冷焓的 95.98%, 因此为了充分降低 LNG 的冷焓损失,在上述发电系统流程中 3.0 MPa 下的 LNG 在冷凝器的进出口温度应选择 -146 °C / -43 °C^[7]。

3.1.2 工质冷凝温度的设计

当 LNG 在冷凝器进出口温度确定的情况下,由

表 1 不同压力下 LNG 气化过程中冷焓随温度的分布表

压力 /MPa	物理量	L 区	R ₁ 区	R ₂ 区	V 区	全部
0.6	温度区间/°C	-162/-133	-133/-122	-122/-69	-69/20	-162/20
	释放冷焓/kJ·kg ⁻¹	124.64	375.01	162.41	35.99	692.27
	释放冷焓/总冷焓	18.00%	54.17%	22.62%	5.21%	100%
2.5	温度区间/°C	-162/-98	-98/-88	-88/-44	-44/20	-162/20
	释放冷焓/kJ·kg ⁻¹	236.49	160.86	93.54	20.75	511.64
	释放冷焓/总冷焓	46.22%	31.44%	18.28%	4.06%	100%
3.0	温度区间/°C	-162/-92	-92/-80	-80/-43	-43/20	-162/20
	释放冷焓/kJ·kg ⁻¹	244.43	143.15	83.01	19.71	490.30
	释放冷焓/总冷焓	49.85%	29.20%	16.93%	4.02%	100%
7.0	温度区间/°C	-162/-59	—	—	-59/20	-162/20
	释放冷焓/kJ·kg ⁻¹	324.05	—	—	77.72	401.77
	释放冷焓/总冷焓	80.66%	—	—	19.34%	100%

卡诺定理可知工质的冷凝温度越低,则循环效率越高,因此冷凝器中最小传热温差越小越好,但是减小传热温差会导致冷凝器换热面积增加,低温工程中相关的大量文献推荐最小传热温差采用 3~5 °C。本设计中选取最小传热温差 α 为 5 °C,则工质的冷凝温度便确定为 -38 °C。本设计选取 R1270(丙烯)为循环工质(丙烯的沸点为 -47.72 °C,临界温度为 91.6 °C,临界压力为 4.55 MPa)。此时 R1270 的冷凝压力为 152.5 kPa。

3.1.3 太阳能集热器进出口水温的设计

设计太阳能集热器出口点 3 的温度为 $t_3 = 45$ °C,蒸发器出口点 1 的温度取当地全年平均水温为 $t_1 = 17.5$ °C。

3.1.4 工质蒸发温度的设计

由于受太阳能热水源的限制,如最小温差仍取 5 °C,则蒸发温度可取为杨红昌在硕士论文中提出的最佳蒸发温度 23.6 °C,此时工质 R1270 的蒸发压力为 780.6 kPa。

3.1.5 LNG 与工质流量的设计

设计卫星站内 LNG 气化量为 1 500 kg/h,按每天平均工作 8.5 h 计算,则供气量约 1.77×10^4 m³/d,可满足 0.5 万~1.0 万户的用气需求量。

冷凝器内的热平衡方程为:

$$\gamma q_R = q_{LNG} Q_{LNG1}$$

式中 γ 表示工质丙烯在 -38 °C 时的冷凝潜热,419.96 kJ/kg; q_R 表示工质的质量流量,kg/h; q_{LNG} 表示 LNG 的质量流量,kg/h; Q_{LNG1} 表示 1 kg LNG 提供给工质的冷量,650 kJ/kg。

代入数据得工质的质量流量 $q_R = 2\ 321.6$ kg/h。

3.1.6 太阳能集热器面积的确定

蒸发器内的热平衡方程为:

$$c_p q_R \Delta t_R + \gamma q_R = q_{热水} c_{热水} \Delta t_{热水}$$

式中 c_p 表示液态丙烯比定压热容,5.524 kJ/(kg·K); Δt_R 表示工质从工质泵出口到饱和温度的温度差,°C; γ 表示工质丙烯在 23.6 °C 时的气化潜热,364.62 kJ/kg; $q_{热水}$ 表示循环热水的质量流量,kg/h; $c_{热水}$ 表示循环热水的比热容,kJ/(kg·K); $\Delta t_{热水}$ 表示循环热水的温降,°C。

Δt_R 一般为 20 °C,代入数据得循环热水的质量流量 $q_{热水} = 9\ 549.7$ kg/h。

循环热水需要提供的热量为 $9\ 549.7 \times 4.2 \times (45 - 17.5) = 1\ 102.9$ MJ/h,设太阳能集热面积为 A ,太阳能集热效率为 90%^[4],循环热水吸收 90% 的热量,当地年平均太阳辐射总量为 4 704~5 460 MJ/m²,取

5 000 MJ/m²,晴天平均日照时间为 8.5 h,则每小时每平方米地面接收的太阳辐射量为 $5\ 000 / (365 \times 8.5) = 1\ 611\ 603.5$ J/(h·m²),由 $1\ 611\ 603.5 \times A \times 90\% \times 90\% = 1\ 102.9 \times 10^6$ 得 $A = 845$ m²。当遇到恶劣天气而靠太阳能集热器不能为循环热水提供足够热量时,需要开启备用电加热器来补充热量。

3.1.7 冷冻水质量流量的确定

冷冻水制备系统中,考虑 5 °C 的管路损失,设计冷冻水进口和出口温度分别为 17.5 °C 和 5 °C。水浴气化器中的热平衡方程为:

$$c_k q_k \Delta t_k = q_{LNG} Q_{LNG2}$$

式中 c_k 表示冷冻水的比定压热容,kJ/(kg·K); q_k 表示冷冻水的质量流量,kg/h; Δt_k 表示冷冻水进出水浴气化器的温差,°C; Q_{LNG2} 表示 1 kg LNG 提供给冷冻水的冷量,230 kJ/kg。

代入数据计算得 $q_k = 4\ 693.9$ kg/h。

3.2 系统发电量计算

假设汽轮机内部相对效率为 90%,发电机机械效率为 80%,忽略换热器的压损及管道损失。以下计算功量均以 1 h 为标准。

3.2.1 汽轮机 1 对外理论做功的计算

汽轮机 1 对外理论做功为:

$$W_{t1} = q_R (h_3 - h_4)$$

式中 W_{t1} 表示汽轮机 1 对外做功,kW·h; h_3 、 h_4 分别表示汽轮机 1 进、出口处工质的焓值,kJ/kg。

代入数据计算得 $W_{t1} = 95.6$ kW·h。

3.2.2 汽轮机 2 对外理论做功的计算

汽轮机 2 对外理论做功为:

$$W_{t2} = q_{LNG} (h_{L4} - h_{L5})$$

式中 W_{t2} 表示汽轮机 2 对外做功,kW·h; h_{L4} 、 h_{L5} 分别表示汽轮机 2 进、出口处气态天然气的焓值,kJ/kg。

代入数据计算得 $W_{t2} = 47.2$ kW·h。

3.2.3 系统循环净发电量的计算

系统理论循环净功为:

$$W_{net} = (W_{t1} + W_{t2}) - W_{p水} - W_{pR} - W_{pLNG}$$

式中 W_{net} 表示系统理论循环净功,kW·h; $W_{p水}$ 、 W_{pR} 、 W_{pLNG} 分别表示水泵、工质泵、LNG 泵的功耗,kW·h。

根据使用经验,对于 10 m³/h 流量的水泵功率约为 3 kW,则 $W_{p水} = 3$ kW·h,根据流量比例对应的 $W_{pR} = 1$ kW·h,LNG 出液泵功率根据 LNG 卫星站使用经验可取为 5 kW,即 $W_{pLNG} = 5$ kW·h。

代入数据计算得 $W_{net} = 133.8$ kW·h。

因此系统循环净发电量为 $W_{净} = 133.8 \times 90\% \times$

80% = 96.3(kW·h)。

当遇到恶劣天气而不得已开启备用电加热器时,备用电加热器每小时的功耗不得高于 96.3 kW·h,否则该系统就得不偿失,无经济性可言。

3.3 能量回收效率分析

3.3.1 以每小时循环热水提供的热量为计算标准

每小时循环热水提供的热量为 1 102.9 MJ,即 306.36 kW·h,则单纯的热力循环的热效率为:

$$\eta^{\text{热}} = \frac{W_{\text{H}} \times 90\% \times 80\%}{306.36} = \frac{95.6 \times 90\% \times 80\%}{306.36} = 22.47\%$$

系统的总效率为:

$$\eta^{\text{电}} = \frac{\text{得到的电功}}{\text{付出的能量}} = \frac{W_{\text{净}}}{306.36 + W_{\text{p,水}} + W_{\text{p,R}} + W_{\text{p,LNG}}} = 30.54\%$$

这样的能量利用效率在实际工程应用中还是相当可观的。

4 系统经济环保性分析

该系统需要面积庞大的太阳能集热器、水箱、备用电加热器、蒸发器、冷凝器、汽轮机以及各种类型的泵和配套的管路系统,一次投入成本较高,需要 120 万元左右。这在 LNG 市场初步发展阶段建立 LNG 卫星站时是需要谨慎考虑的。然而它带来的经济效益和节能环保效果是相当可观的。

由以上计算可知,以平均日照时间 8.5 h 计算,该系统在正常情况下日平均可以得到超过 800 kW·h 的电能,一年之中考虑 1 个月的恶劣天气所带来的影响,则年均可以生产超过 27×10^4 kW·h 的电能,折算成当前的电价年均可带来超过 30 万元的经济效益。该系统还节约了气化 LNG 所需的燃料。若以原煤、焦炭或者天然气为燃料,经计算该系统年均可以节约 6~8 万元的燃料费。因此,约 3 年即可回收投资,经济效益显著。

另外,该系统年均还可以减少因燃烧煤炭而带来的 400~1 000 kg 的 SO₂ 排放量,可以减少因燃烧煤炭或天然气而带来的 56~146 t 的 CO₂ 排放量。无论从节能还是环保角度来说都是难能可贵的^[8]。

5 结论

LNG 蕴藏大量可用冷能。本设计以太阳能为高温热源,LNG 为低温热源构建了热力循环,回收 LNG 冷能的同时也充分利用了人类取之不尽用之不竭的太阳能,可谓实现了节能、环保、增效的“三赢”。

1)利用 LNG 卫星站现有客观条件具备建立上述热力循环的可行性。

2)系统日均发电量超过 800 kW·h,能量利用率可观,超过了 30%,符合工程实际。

3)系统回收投资时间短,经济效益显著。

4)利用可能被浪费掉的 LNG 冷能和免费使用的太阳能,不仅省去了运行费用,还对节能环保做出了贡献,倡导了节能环保型社会的发展。

参 考 文 献

- [1] 刘新领.液化天然气供气站的建设[J].煤气与热力,2002,22(1):35-36.
- [2] 顾安忠.液化天然气技术[M].北京:机械工业出版社,2003:243.
- [3] 赵耀华,邹飞龙,刁彦华.新型平板热管式太阳能集热技术[J].工程热物理学报,2010,31(12):2061-2064.
- [4] 熊涛,何美凤.光热转换材料及太阳能热水器的现状和发展方向[J].材料导报,2010,24(10):57-60.
- [5] 程文龙,陈则韶,胡芑.电站中液化天然气可用冷能的回收利用[J].工程热物理学报,2001,22(2):148-150.
- [6] 徐文东,边海军,樊栓狮,等.LNG 卫星气化站冷能利用技术[J].天然气工业,2009,29(5):112-114.
- [7] 杨红昌.液化天然气(LNG)冷能发电系统的优化研究[D].北京:北京工业大学,2010.
- [8] BLUMBERGA A, ZOGLA GATIS, ROSA MARIKA, et al. Analysis of green investment scheme for energy efficiency measures in Latvia[M]// Climate Change Management.[S.l.]:springer, part 2, 2011:193-206.

(修改回稿日期 2012-08-14 编辑 居维清)