

DOI: 10.7652/xjtuxb201309001

天然气与电力长距离联合高效输送的可行性研究

张杨, 厉彦忠, 谭宏博, 李广鹏, 刘展, 王春燕
(西安交通大学制冷及低温工程系, 710049, 西安)

摘要: 为提高长距离能源输送效率,提出了一种新型联合输送模式。电力采用超导电缆输送,而液化天然气作为高温超导电缆的冷却工质,使得天然气输送和电力输送“同路”进行。初步设计了电缆与管路结构,建立了液化天然气输送模型,分析了影响能耗的相关因素。新型联合系统的效率与系统输送比成正比,与绝热结构的导热系数成反比。计算结果表明,联合输送系统的损耗率仅为传统输送系统的 1/3,其能源输送效率高达 96%。同时,由管道漏热引入的功耗占冷泵站总功耗的 85.1%。与传统模式相比,新型输送模式的效率高,节能效果显著。然而,管道漏热是最主要的功耗因素,更优良的长距离低温管道绝热技术可以显著降低联合输送系统的功耗。

关键词: 长距离输送; 高效; 液化天然气; 高温超导

中图分类号: TE832 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)09-0001-07

Efficient Long-Distance Energy Transmission Conception

ZHANG Yang, LI Yanzhong, TAN Hongbo, LI Guangpeng, LIU Zhan, WANG Chunyan
(Department of Refrigerating and Cryogenic Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A novel consortium model was proposed to improve the efficiency of long-distance energy transmission. In the present model, the liquefied natural gas (LNG) is used as the coolant for the high temperature superconducting power cable (HTSPC), and then both the electrical power and the liquefied natural gas are transmitted. A new structure of the power cable was designed and the effects of the parameters on the energy cost were examined on the basis of the transmission model of LNG established. The results show that the efficiency of the system increases with an increase in the transporting ratio and a decrease in the thermal conductivity of the insulation structure. The efficiency of the new system will reach up to 96% and the system loss rate is only 1/3 that of the conventional system. Moreover, the heat leakage of the cryogenic pipelines is the most important factor of the power consumption, resulting in 85.1% the total power consumption at the cryogenic pump station. It appears that the more efficient thermal insulation for the pipelines can significantly reduce the power consumption of the system.

Keywords: long-distance transmission; high efficiency; liquefied natural gas; high temperature superconductor

在经济飞速发展的今天,能源问题日趋突出。世界各地能源产地与能源消耗地往往相隔较远,使得能源的长距离输送成为能源消费链条中越来越重要的一环。实现大容量、远距离、低损耗能源输送理想的方式是采用超导输电。1995 年, Ishigohka 提出建立一条大容量长距离的超导直流输电电缆的设

想^[1]。该方案采用液氮、液氢作为冷却工质,操作温度较低,对制冷系统和绝热系统的要求相对较高,在高效传输电能的同时,也会消耗大量能量用于制冷,以维持液态冷却介质的需求。

基于高温超导和液化天然气(LNG)技术的发展,本文结合当前中国“西气东输”和“西电东送”的需求,提出了一种新型能源长距离输送模式,使得电能输送与天然气输送并举^[2]。新模式中 LNG 作为高温超导电缆(HTSPC)的冷却介质,同时也通过管道与电力并行传输。计算结果表明,该方案的能源输送效率高,节能效果显著。

1 天然气与电能输送及超导电缆现状

1.1 中国天然气输送

“西气东输”工程是指将中国西部的天然气输送至东部沿海地区使用,其气源主要来自中国西部地区(新疆、青海、川渝和陕甘宁)以及中亚地区。投产运行以及在建的“西气东输”工程有 3 条线路,如表 1 所示。

自西部大开发战略实施以来,中国天然气开发利用得到飞速发展,西部主要省份的天然气总产量从 2004 年的 $2.67\times10^{10}\text{ m}^3$ 增长到 2011 年的 $8.39\times10^{10}\text{ m}^3$ 。“西气东输”工程中,“西一线”处于基本负荷运行。2007 年,增输工程完成后,“西一线”全程运行压气站 22 座、压缩机组 44 台,站间平均输气距离为 177 km^[3]。

1.2 中国常规高压电缆输电

目前,中国输电网的电压已基本形成两个主要的等级系列,其中西北电网采用 110 kV/330 kV/750 kV 系列,其他电网采用 220 kV/500 kV/1 000 kV 系列。2004 年以来,“西电东送”工程年输送能力翻两番,到 2010 年已达 84 GW。随着电源建设逐步西移,到

2020 年,我国“西电东送”、南北互供的大容量远距离输电容量将达到 200 GW,输电距离将在 500~2 000 km^[4]。

2009 年底,新疆等西北地区已探明的煤炭储量为 $4.50\times10^{11}\text{ t}$,占全国已探明储量的 34.37%^[5]。煤炭资源外运的方式由传统的直接运输原煤变成输煤输电相结合,即将一部分煤炭资源通过坑口电站就地转化为电力资源后再向外输送。建设坑口电站可以快速增加电力装机容量,提高煤炭利用率,降低铁路系统的煤炭输送压力,同时对高压输电的需求迅速增长。

1.3 超导电缆输电

自 1911 年 Onnes 发现超导现象以来,超导技术的发展日新月异,如今超导技术已由实验室走向应用。从低温超导到高温超导的转变重点是合成超导材料技术上的突破,科学家们一直致力于寻找更高临界转变温度 T_c 的超导材料来实现超导技术的广泛应用。图 1 是超导材料的 T_c 随时间的发展表,从图中可知, T_c 从 10 K 以下一直提高到 150 K 以上。

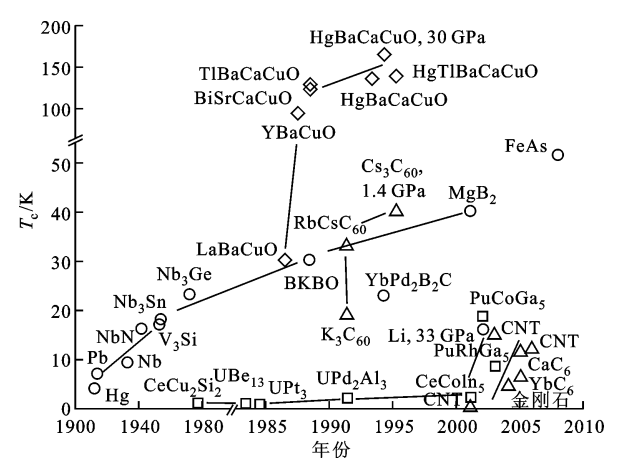


图 1 超导材料临界转变温度随时间的发展表^[6]

表 1 “西气东输”工程概要

线路名称	西一线	西二线	西三线
起点—终点	新疆轮南—上海白鹤	新疆霍尔果斯—广东广州	新疆霍尔果斯—福建福州
管道直径/mm	1 016	1 219	1 219
设计压力/MPa	10	10~12	10~12
主干线长度/km	3 900	4 865	5 220
输气能力/ $10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$	170	300	300
气源地	塔里木盆地等	中亚	中亚
工程概况	完成	2012 年底完成	2012 年 10 月 16 日开工

如图 1 所示,具有最高 T_c 的材料是 HgBaCa-CuO 系列,其中 Hg1223 最为突出,该材料在加压条件下 T_c 高达 164 K^[7]。由于高温超导用于电力输

送具有很多优势,HTSPC 输电技术的应用研究已在许多国家开展,表 2 列出了国内外在建或已建设的部分示范工程。

表 2 国内外 HTSPC 工程项目

国家	电缆参数	项目内容(进展)	年份
丹麦	30 m/36 kV/2 kA	并网试运行	2001
日本	500 m/77 kV/1 kA	完成送电试验	2004
中国	33.5 m/35 kV/2 kA	并网于昆明普吉变电站	2004
韩国	100 m/22.9 kV/1.25 kA	完成性能测试	2006
美国	350 m/34.5 kV/0.8 kA	并网于纽约州 Albany	2006
美国	600 m/138 kV/2.4 kA	应用于长岛变电站	2008
德国	1 000 m/10 kV/40 MW	城市输电网研究	2012

2 LNG 与电能联合输送方案分析

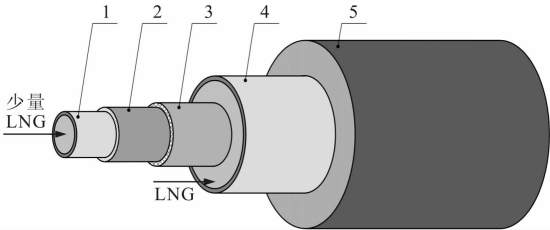
2.1 联合输送工作原理及电缆结构

作者提出一种 LNG 和高温超导联合输送系统,并申报了国家发明专利^[2]。该系统利用 LNG 为 HTSPC 提供低温环境,使电缆处于超导状态并输送电能,从而大幅度减少输电损耗,同时 LNG 在管道内并行传输。该方案实现天然气液态输送和高温超导电能输送的有机结合,是天然气和大容量电能联合远程输送的新方法。系统中设置冷泵站提供 LNG 保持过冷状态所需冷量和输送动力。本方法主要应用于长距离大容量输送天然气和电能的工程,可以实现(气网、电网)二网合一,大大节省运行能耗。

工作流程如图 2 所示。LNG 经过 LNG 泵分成两股,其中一股直接进入 LNG 输送外管道,另一股通过 HTSPC 终端之后进入 LNG 输送内管道。交流电 AC 经过换流站后转换为直流电 DC,然后通过 HTSPC 终端进入 LNG 输送管道内的 HTSPC 进行输送。冷泵站为 LNG 提供冷量和输送动力。在终点站,外管道的 LNG 与通过 HTSPC 终端后的内

管道 LNG 汇合并输出,DC 直流电通过 HTSPC 终端后输出。至此,系统实现了天然气与电能的联合输送。

方案中高温超导线材采用 Kang 等制备的 Hg1223 薄膜材料^[8], $T_c=133\text{ K}$,在 $T=131\text{ K}$ 时,该超导材料的电阻变为 0。经测算,该材料在 120 K 和零磁场条件下的临界电流密度 $J_c=2.6\times10^5\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。参照文献[1],HTSPC 设计参数为:直流电压 $\pm 250\text{ kV}$,电流 40 kA,输电容量 20 GW,分正负两极双线铺设。图 3 为 HTSPC 结构示意图。

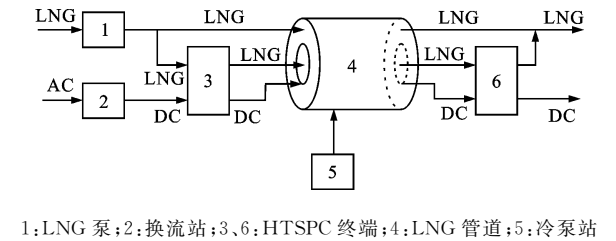


1:超导支撑管;2:超导层;3:电绝缘屏蔽层;4:LNG 管道;5:绝热层
图 3 HTSPC 结构示意图

2.2 系统关键参数

2.2.1 冷泵站进出口 LNG 参数 根据高温超导材料的零电阻转变温度,设定 LNG 最高温度为 120 K,为保证此时 LNG 过冷度不小于 10 K,则对应压力为 0.4 MPa。因此,冷泵站 LNG 的进口状态为 120 K、0.4 MPa;冷泵站 LNG 的出口状态为 110 K、1.85 MPa。

2.2.2 超导电缆参数 参照某 LNG 长输管线实例^[9],LNG 输送管径为 0.5 m,管材为不锈钢,LNG 流速为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。电缆具体设计参数见表 3。



1:LNG 泵;2:换流站;3、6:HTSPC 终端;4:LNG 管道;5:冷泵站
图 2 LNG 与电能联合输送系统原理

表 3 HTSPC 系统的设计参数

项目	参数	数值(名称)
额定参数	输电容量 P/GW	20
	电压/ kV	± 250
	电流/ kA	40
	工作温度/ K	110~120
	单线总长度/ km	3 900
冷却与动力系统	流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.0
	LNG 输送管径/ m	0.5
	LNG 总流量 $\dot{m}/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	161
	最大冷泵站间距/ km	200
	冷泵站数量	20
绝热结构	绝热材料	气凝胶粉末 (Aerogel beads)
	厚度 δ/m	0.5
	导热系数 $\lambda/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.011

3 联合输送系统的性能分析

3.1 系统冷量平衡

3.1.1 管道漏热分析 以联合输送系统的结构为基础的 LNG 输送管道模型如图 4 所示。LNG 输送分外管和内管,外管是绝热材料支撑管与超导支撑管组成的同心圆环,内管是超导支撑管。

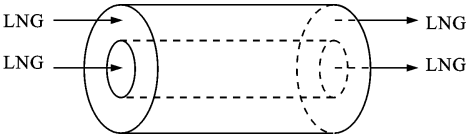


图 4 液化天然气输送管道模型

如果忽略 LNG 动能及位置势能变化,则相邻冷泵站间输送管道的能量方程为

$$\dot{m}(h_2 - h_1) = Q_{\max} + \dot{m}\nu(p_1 - p_2) \tag{1}$$

式中: h_1 、 h_2 分别为冷泵站出口、进口 LNG 的比焓; $Q_{\max}$ 为相邻冷泵站间 LNG 双线管道漏热量的最大允许值; ν 为 LNG 的平均比容; p_1 、 p_2 分别为冷泵站出口、进口 LNG 的压力。

由式(1)可得 $Q_{\max}$ 为 4 737 kW,也即漏热量最大允许值为 $11.84 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

对于绝热层来讲,管内侧对流热阻和钢管导热热阻可以忽略,则绝热层内表面温度近似等于 LNG 的温度,因此管道单位长度冷损计算公式为

$$q = (T_a - T_i) \left/ \left(\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \left(1 + \frac{2\delta}{d} \right) + \frac{1}{\pi\alpha(d + 2\delta)} \right) \right. \tag{2}$$

式中: q 为管道的单位长度冷损; T_a 为环境温度; T_i 为绝热层内表面温度; d 为绝热层内径; α 为绝热层外表面换热系数。

根据表 3 提供的绝热层参数,绝热材料平均导热系数^[10]为 $0.011 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,绝热层外表面换热系数^[11]为 $8.14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。 T_i 取 LNG 进出口温度的平均值 115 K。当环境温度为 298 K 时,由式(2)得出管道漏热量为 $11.494 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$,小于最大允许值 $11.84 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$,绝热结构符合要求。此时,相邻冷泵站间 LNG 双线管道的漏热量为 4 598 kW,全线总漏热量为 89.65 MW。相邻冷泵站间管道的压力损失由伯努利方程计算,得出最大冷泵站间距为 201.5 km,实际取值在允许范围内。

3.1.2 制冷热负荷 冷泵站提供冷量用于平衡管道漏热、低温泵压缩热和流动摩擦热,其中低温泵压缩热及流动摩擦热与泵轴功率相等,故冷量平衡为

$$Q_c = W_s + Q \tag{3}$$

式中: Q_c 为冷泵站制冷机热负荷; W_s 为冷泵站低温泵轴功率; Q 为相邻冷泵站间 LNG 双线管道的漏热量。

3.2 系统功耗

联合输送系统包括输电系统和 LNG 输送系统,其功耗也由两系统构成。输电系统功耗主要有交-直流变换损耗、电缆终端损耗、电阻损耗、电介质绝缘损耗和限流器损耗等。由实际工程测定,交-直流变换损耗约为额定输送功率的 1.4%^[12]。根据 Maguire 的研究,电缆终端损耗、电介质绝缘损耗和限流器损耗等较小,相对于系统总损耗可忽略不计^[13]。高温超导直流输电电阻损耗为 0,谐波电流等损失可忽略不计^[14]。LNG 输送系统功耗主要包括低温泵轴功率、制冷机轴功率。高温超导输电系统直流部分主要损耗为低温工质的漏热损失^[15]。因此,联合输送系统主要损耗为交-直流变换损耗、低温泵的轴功率和制冷机的轴功率。

3.2.1 低温泵轴功率 低温泵轴功率为

$$W_s = \frac{\dot{m}(p_1 - p_2)}{\rho\eta_p} \tag{4}$$

式中: W_s 为冷泵站低温泵的轴功率; ρ 为 LNG 的密度; η_p 为泵效率,取值 80%^[16]。

由式(4)得到单个冷泵站低温泵的轴功率 W_s 为 698 kW,全线低温泵的总轴功率为 13.6 MW。

3.2.2 制冷机轴功率 冷泵站制冷机操作温度为 100 K,制冷机效率取 0.3^[17]。根据制冷机效率与制冷性能系数(COP)之间的关系得制冷机的 COP 为 1/6.6。

由式(3)得 Q_c 为 5 296 kW,全线制冷热负荷为 103.25 MW,则冷泵站制冷机的轴功率为 34.95 MW,全线制冷机总轴功率为 681.5 MW。

综上,单个冷泵站总功耗为 35.65 MW,联合输送系统全线总功耗为 695.1 MW。在对应 LNG 流量下,联合输送系统平均功耗为 1 107 J·kg⁻¹·km⁻¹。联合输送系统的损耗特性详见表 4。

表 4 联合输送系统的损耗特性

项目	参数	数值
冷泵站	单位长度漏热量/W·m ⁻¹	11.494
	相邻冷泵站间管道漏热量/kW	4 598
	低温泵轴功率/kW	698
	制冷热负荷/kW	5 296
	制冷机轴功率/MW	34.95
	单个冷泵站总功耗/MW	35.65
全线系统	全线总漏热量/MW	89.65
	全线低温泵总轴功率/MW	13.6
	全线制冷热负荷/MW	103.25
	全线制冷机总轴功率/MW	681.5
	全线总功耗/MW	695.1

3.3 系统输送效率

3.3.1 系统输送比 在联合输送系统中,两种不同形式的能源(天然气和电力)可以“同路”传输,但各自输送容量相对独立。输送比 β 表征系统中输送电能(电量)与天然气容量(发电当量)之间的关系,即

$$\beta = P/\dot{m}q_{LHV} \eta_{NG} \tag{5}$$

式中: q_{LHV} =50 MJ/kg 为甲烷热值; η_{NG} =56% 为天然气发电效率^[18]。

从定义知, β 的取值由系统的设计参数决定。根据表 3 相关参数,本设计方案中 β =4.4。输送比对系统性能的影响将在后续章节中进行讨论。

3.3.2 输送损耗率 对于不同的能源输送模式,定义该模式下输送损耗率 ζ 为输送过程功耗 W_{loss} 与输送的总能量 W_{total} 之比,则输送效率 η 为

$$\zeta = W_{loss}/W_{total} \tag{6}$$

$$\eta = 1 - \zeta \tag{7}$$

不同方式的天然气和电能输送损耗率和效率详见表 5,表中同时给出了 W_{loss} 和 W_{total} 相对应的物理意义。

常规输电工程中,输电系统实际损耗由线路损耗和站点(变电站或换流站)损耗组成。以±660 kV 宁东—山东直流输电工程为例^[19],其损耗率为

$$\zeta = 0.000\ 030\ 8L + 0.015 \tag{8}$$

式中: L 为输电距离,km。

关于天然气,本文将“西气东输”中处于基本负荷运行的“西一线”作为计算对象。压缩机轴功率计算所依据的温度、压力、输气量和压气站间距等数据参照文献[3]。压缩机的轴功率采用等温压缩公式计算,并取压缩机的等温效率为 0.75,得压缩天然气(CNG)输送平均功耗为 408.24 J·kg⁻¹·km⁻¹。当输送距离为 3 900 km 时,CNG 的输送损耗率为 5.7%。

上节中计算的 LNG 平均输送功耗为 1 107 J·kg⁻¹·km⁻¹,是 CNG 输送功耗的 2.7 倍。在 β =4.4 的条件下,以常规电缆输电和 CNG 输送相结合的综合损耗率为 12.1%,然而联合输送系统的损耗率为 4.0%,仅是传统能源输送系统的 1/3。

3.3.3 损耗率特性 联合输送系统的损耗率与系统输送比有密切的关系。由式(5)和(6)联立得联合输送系统的损耗率 ζ_{con} 与 β 的关系式为

$$\zeta_{con} = \frac{\zeta_{LNG} - \zeta_E}{1 + \beta} + \zeta_E \tag{9}$$

表 5 不同输送模式的损耗率和效率

输送方式	过程功耗 W_{loss}	总能量 W_{total}	损耗率 $\zeta/\%$	效率 $\eta/\%$
常规电缆输电	输电损耗	输电容量	13.5	86.5
CNG 输送	压缩机功耗	总输气量的发电当量	5.7	94.3
LNG 输送	制冷机与低温泵的功耗之和	总输气量的发电当量	15.4	84.6
LNG 与电能联合输送	输电损耗、制冷机与低温泵的功耗之和	输电容量与总输气量的发电当量之和	4.0	96.0

注:常规电缆输电长度按照 3 900 km 计算。

式中: ζ_{LNG} 为 LNG 输送系统的损耗率; ζ_{E} 为电力输送系统的损耗率。

联合输送系统损耗率与输送比成反比关系,如图 5 所示,输送比越大,系统损耗率越小。如果按照表 5 中 $\zeta_{\text{LNG}} = 15.4\%$ 考虑,当 $\beta < 4$ 时, ζ_{con} 随着 β 的变化较大,而当 $\beta > 4$ 时, ζ_{con} 随着 β 的变化平缓。这表明 $\beta > 4$ 时,增加输电容量所带来的损耗下降效果不显著。由于增大输电容量会增加输电方面的技术难题,因此联合输送系统的 β 设计值在 4 附近时比较合理。

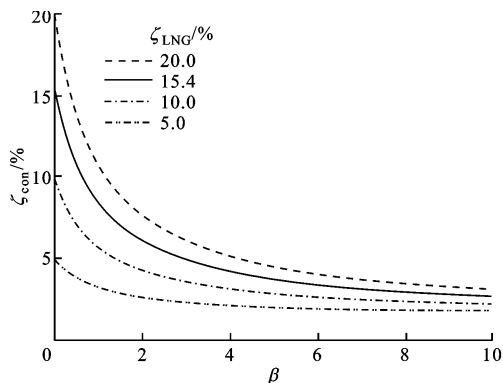


图 5 联合输送系统的损耗率随输送比的变化关系

由图 5 可知,影响联合输送系统损耗率的另一个重要因素是 ζ_{LNG} 。方案中由管线漏热引入的功耗占冷泵站总功耗的 85.1%,可见输送 LNG 的能量损失主要为管线的漏热。因此,提高低温绝热材料的绝热特性、改进管路的绝热结构,将显著减小 LNG 的输送功耗,进而降低联合输送系统的损耗率。

3.4 节能潜力

随着我国能源战略和西部大开发战略的实施,中国“西电东送”电量和“西气东输”气源的总产量增长显著,图 6 展示了 2004~2011 年电能与天然气气源总产量的变化趋势。

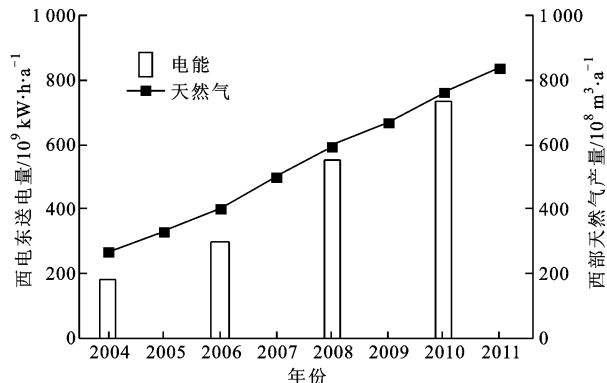


图 6 中国“西电东送”电量和“西气东输”气源总产量

如果将现有的压缩天然气输送和常规高压电缆输电系统改由 LNG 和电能联合输送系统替代,则会大大提高西部能源的输送效率。按照 $\beta = 4.4$ 计算,提高输送效率所节约的能量十分可观,占到当年“西电东送”输电总量的 9.9%。当前发电技术的煤耗^[20]是 $307 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,可推算出每年节约的标准煤量。图 7 显示了节约的电量和采用煤当量表示下的节能潜力。按照以上数据推算,2015 年可节省电能 $1.2 \times 10^{11} \text{ kW} \cdot \text{h}$,相当于 18.5 个百万千瓦级火电厂一年的发电量(电厂满负荷运行时间折算值取 $6480 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$)。

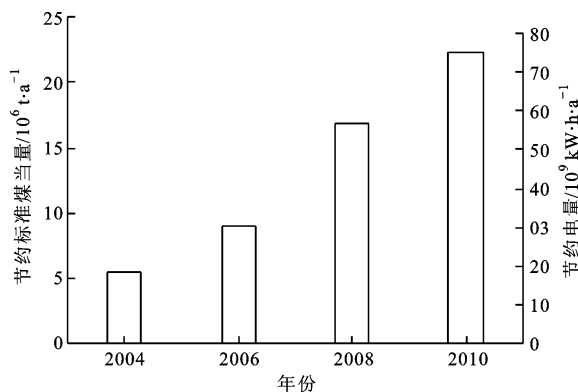


图 7 采用联合输送系统的节能潜力

4 结 论

(1) 本文提出一种天然气和电力联合输送方案。本方法主要应用于远距离大容量输送天然气和电能的工程,可以实现(气网、电网)二网合一,大大节省运行能耗。

(2) 以中国“西气东输”、“西电东送”为实例进行分析计算,并与现行的电力输送和 CNG 输送进行了对比。结果表明:本文提出的联合输送系统的能源输送效率高达 96%,比传统能源输送方式节能 2/3,显著提高了能源输送效率,具有较大节能潜力。

(3) 联合输送系统的输送效率与系统输送比关系密切。输送比越大,联合输送效率越高,但随输送比的增加,输送效率增加缓慢,存在合理的输送比。

(4) 联合输送系统中 LNG 管线的漏热是系统能耗的主要原因,漏热引入的功耗占冷泵站总功耗的 85.1%。提高低温绝热材料的绝热特性、改进 LNG 管路的绝热结构,将显著减小输送损耗。

参考文献:

- [1] ISHIGOHKA T. A feasibility study on a world-wide-scale superconducting power transmission system [J].

- IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1995, 5(2): 949-952.
- [2] 厉彦忠, 刘虎, 谭宏博, 等. 一种液化天然气和高温超导电能联合远程输送系统: 中国, CN 102679152 A [P]. 2012-04-20.
- [3] 林泊成, 周学深. 西气东输管道增输压气站设置 [J]. 石油工程建设, 2007, 33(6): 16-20.
LIN Bocheng, ZHOU Xueshen. Setup of compressor stations of West to East gas pipeline for increasing gas transportation capacity [J]. Petroleum Engineering Construction, 2007, 33(6): 16-20.
- [4] 王大中. 21 世纪中国能源科技发展展望 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 259, 267.
- [5] 孙翠芝, 叶大武. 中国原煤及商品煤硫分分布概况 [J]. 煤质技术, 2012(2): 5-9.
SUN Cuizhi, YE Dawu. Overview of sulfur content distribution in raw coal and commercial coal in China [J]. Coal Quality Technology, 2012(2): 5-9.
- [6] Coalition for the Commercial Application of Superconductors. Properties, history, applications and challenges [EB/OL]. [2012-11-13]. <http://www.ccas-web.org/superconductivity>.
- [7] GAO L, XUE Y Y, CHEN F, et al. Superconductivity up to 164 K in $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{m-1}\text{Cu}_m\text{O}_{2m+2+\delta}$ ($m=1, 2$, and 3) under quasihydrostatic pressures [J]. Physical Review: B, 1994, 50(6): 4260-4263.
- [8] KANG W N, LEE S I, CHU C W. Oxygen annealing and superconductivity of $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+y}$ thin films [J]. Physica: C, 1999, 315(3): 223-226.
- [9] 杨筱蘅, 张国忠. 输油管道设计与管理 [M]. 东营: 石油大学出版社, 1996: 77.
- [10] FESMIRE J E, AUGUSTYNOWICZ S D, ROUA-NET S. Aerogel beads as cryogenic thermal insulation system [C]// Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference. New York, USA: American Institute of Physics, 2002: 1541-1548.
- [11] 尹少慰, 杨洋, 曾从滔. LNG 管输保冷层厚度优化设计 [J]. 管道技术与设备, 2011, 1(1): 12-13, 57.
YIN Shaowei, YANG yang, ZENG Congtao. Optimal design of cold-retaining layer for LNG line [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2011, 1(1): 12-13, 57.
- [12] BREUER W, RETZMANN D, UECKER K. Highly efficient solutions for smart and bulk power transmission of "Green Energy" [C/OL]// 21st World Energy Congress, Montreal, Canada, 2010 [2013-05-17]. <http://www.energy.siemens.com>.
- [13] MAGUIRE J F, SCHMIDT F, HAMBER F, et al. Development and demonstration of a long length HTS cable to operate in the long island power authority transmission grid [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1787-1792.
- [14] KIM J G, KIM S K, PARK M, et al. Loss characteristic analysis of HTS DC power cable using LCC based DC transmission system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3): 5801304.
- [15] JIN J X. High efficient DC power transmission using high-temperature superconductors [J]. Physica: C Superconductivity, 2007, 460/461/462: 1443-1444.
- [16] DENG Shimin, JIN Hongguang, CAI Ruixian, et al. Novel cogeneration power system with liquefied natural gas (LNG) cryogenic exergy utilization [J]. Energy, 2004, 29(4): 497-512.
- [17] SEEGER B. Handbook of applied superconductivity [M]. Bristol, England: Institute of Physics Publishing, 1998: 691.
- [18] National Petroleum Council. Electrical generation efficiency: working document of the NPC global oil & gas study [EB/OL]. [2007-07-18]. <http://www.npc.org>.
- [19] 梁涵卿, 邬雄, 梁旭明. 特高压交流和高压直流输电系统运行损耗及经济性分析 [J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 630-635.
LIANG Hanqing, WU Xiong, LIANG Xuming. Operation losses and economic evaluation of UHVAC and HVDC transmission systems [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 630-635.
- [20] 中国电力企业联合会. 全国电力工业主要指标统计数据: 2012 年 6 月 [J]. 中国电力, 2012, 45(8): 104.
China Electricity Council. Statistics of the main index of the national power industry: June 2012 [J]. Electric Power, 2012, 45(8): 104.

(编辑 荆树蓉)