

以煤为主的多元化清洁能源战略

Strategy of Various Clean Energies with Coal Taking a Dominant Position

吴宗鑫 吕应运

(清华大学核能技术设计研究院 北京 100084)

为了实现 2050 年前后我国的社会经济发展达到中等发达国家水平,必须确保充足的清洁、高效能源的供应。由于能源部门资金密集度高、建设周期长,制定和实施中长期的能源发展战略是十分必要的。我国的经济的发展多年来一直受到能源供应短缺的制约,从 80 年代到 90 年代,能源部门作为国民经济发展的先行部门,得到国家重点支持,发展迅速。由于近年来“两个转变”的深化,产业结构正在调整,加上国民经济发展实现“软着陆”,使能源供需矛盾出现了缓解迹象。我国能源市场已开始与国际接轨。因国内需求增长迅速,现已大量进口石油,从石油出口国转变为净进口国。即将加入 WTO 更为我国利用世界油气资源提供了机遇,同时也面临竞争挑战。围绕全球气候变化的国际环境外交斗争日趋尖锐,又将对我国的能源发展产生新的压力。在这种新形势下,对我国未来能源发展和长期战略急需进行深入研究,有关机构和专家已经开展了工作。^{[1][2]}有的看法认为:今后 50 年将是我国一次能源结构实现从以煤为主向以油气为主过渡的时期,实现赶上中等发达国家水平的发展目标必须有以油气为主的一次能源结构的支持,且未来世界石油天然气资源可能提供我国所需的进口能源,故建立国际化、多元化能源供应体系应是我国未来能源供应战略目标,清洁煤战略的重点是发展高效燃煤发电技术。由于我国能源资源的特点和国内外的现实状况,未来能源结构调整的目标和实施路线对能源战略有重大影响,我们必须进行全面和有针对性的研究探讨。

一、我国未来的能源需求估计

按照我国社会经济发展的目标,2050 年我国人均 GDP 应达到 10 000 美元左右,1995~ 2050 年间的 GDP 平均增长率达到 5.8% 左右。届时我国人口控制在 16 亿,城市化水平将达到 70%,人均居住面积 35 平方米,每百人拥有汽车 12 辆,人均用电量 550 千瓦时/年。这样,在届时能源利用效率达到高于

OECD 国家目前水平的情况下(即届时我国工业产值能耗为 0.2 公斤标煤/美元,货运综合能耗为 23.8 公斤油/千吨·公里以及客运综合能耗为 27 公斤油/千人·公里),预计我国到 2030 年的一次能源需求量约为 33 亿吨标煤,2050 年的一次能源需求量将达 50 亿吨标煤左右,人均能源消费量 3.2 吨标煤(目前一些中等发达国家如韩国人均能源消费量为 4.66 吨标煤,西班牙为 3.77 吨标煤,葡萄牙为 2.77 吨标煤)。

二、未来我国能源发展的战略考虑

面对未来我国能源发展的重大挑战,包括国内常规一次能源供应不足、石油和天然气大量进口的安全保障、城市能源消费造成的空气污染、全球气候变化问题对 CO₂ 减排的压力等,我国应采取的对应战略,需要从以下 4 个方面来进行研究分析。

1. 国内常规能源资源供应不足

2050 年我国一次能源需求大约为 50 亿吨标煤,这不是一种过高估计的构想方案。但是根据目前有关机构的估计,2050 年时我国国内常规一次能源最大可能的获得量为:煤炭约为 30 亿吨,相当于 21.4 亿吨标煤;石油约为 1.5 亿吨,相当于 2.1 亿吨标煤;天然气约为 1 600 亿立方米,相当于 1.4 亿吨标煤;水电约为 300GW,按平均年运行 4 500 小时计算,相当于 4.1 亿吨标煤;核电约为 50GW,按平均年运行 7 000 小时计算,相当于 1 亿吨标煤。总计大约只有 30 亿吨标煤,与 50 亿吨标煤的需求量相比约有 20 亿吨标煤的缺口,弥补如此巨大缺口的途径无非有以下 3 个方面。

(1) 利用国内外两种资源、两个市场

我国现已采取了这一方针,并已着手多方开展工作,以求从国际市场和开发海外资源大量进口石油和天然气。但如果期望通过进口常规能源来解决约 20 亿吨标煤的一次能源的缺口(相当于 1998 年美国能源消费量的 64% 或 OECD 国家的 27%,也相当于世界能源大会/国际应用系统研究所预测的适

度增长方案下 2050 年全球一次能源需求量的 7%) , 那么无论是从国际市场的供应潜力, 还是从国家的能源安全保障考虑, 都是不现实不可行的。

(2) 充分利用可再生能源

我国正在推广太阳能的热能利用, 主要用于生活热水供应和太阳房等方面。但太阳能光伏发电的效率还比较低, 成本很高。因此, 目前还很难期望太阳能在未来我国能源中占有较大的份额。风能和生物质能是下世纪中叶前可实现大规模应用的主要可再生能源。我国有风力资源 253GW, 但风电设施平均年运行只有 2 500~ 3 000 小时, 到 2050 年即使有 200GW 开发利用, 其提供的一次能源量也只有 1.5~ 1.8 亿吨标煤。我国可用于能源利用的生物质能大约为 3.5 亿吨, 相当于 2 亿吨标煤。生物质能是一种分散型的能源, 要化费大量的劳力去收集并难以形成规模。随着经济的发达, 如果用于收集的劳力成本高于劳力的机会成本, 农民就不会花费时间去收集。自农村经济改革以来, 农村生物质能的使用量逐年减少, 农民更多转向购买商品能源。因此, 为满足未来的生物质能需求也必将转向新技术的利用, 例如生物质气化和生物质气发电等高品位的转换技术。即使都将得到充分开发利用, 在 21 世纪中叶前我国可再生能源可利用的量也仅约为 4~ 5 亿吨标煤, 占一次能源总供应的比重不到 10%。

(3) 大规模发展核能

核能是目前最有希望能大规模替代化石能源的一次能源。1995 年, 全世界的核发电量占总发电量的 17.7% , 占全世界一次能源供应量的 7%。而主要的工业发达国家核电的比重更大, 法国的核电量占总发电量的 77.1% , 韩国为 36.3% , 日本为 29.7% , 德国为 28.9% , 英国为 26.7% , 美国为 20.1% , 加拿大为 17.7%。如果达到美国 20.1% 的水平, 我国核电应占一次能源供应量的 9% ; 如达到日本 29.7% 的水平, 核电则占到一次能源的 15.3%。

在上述国家中核电的经济性已为实际运行经验所证明, 核电的发电成本可以与其他发电技术相竞争, 有些国家中核电的发电成本最低。

核电的燃料是铀, 据我国已探明的铀资源估计, 国内铀资源可提供 50GW 核电容量使用 40 年。根据目前了解的地质状况, 我国可能拥有更大的潜在铀资源蕴藏。我国还在进行快中子增殖堆的开发研究, 一旦它投入商业应用, 可使铀资源的利用率提高几十倍。

铀资源在国际上被认为是一种准国内资源。核发电成本中燃料费只占不到 20% , 燃料费中又包括天然铀采购费、铀浓缩、元件制造和后处理费用, 天然铀费用只占其中的 1/3。因此天然铀采购费只占核发电成本的 1/15。而在天然气联合循环发电技术

中, 天然气费用大约占到发电成本的 75%。一座 100 万千瓦核电站运行 1 年需要的天然铀费用为 720 万美元, 而一座 100 万千瓦天然气联合循环发电厂运行 1 年所需天然气的费用为 1.2 亿美元, 相差达 17 倍之多。此外, 天然铀运输和贮存都很方便, 贮存的基础设施的费用和贮存管理费也很低。我国有国产加浓铀元件制造的技术和设施, 在国际市场有利的情况下可以大量购进天然铀, 作战略储备, 具有很好的安全保障特性。而天然气和石油要求的基础设施的投资大, 贮存管理费用也高, 一般的储备量只有 3~ 6 个月, 其安全保障能力差。

核能是一种清洁的能源已为世人所共识, 核电厂的运行既不产生 SO_2 、 NO_x 、烟尘, 也不产生 CO_2 , 不仅有利于城市的能源环境, 也是能对 CO_2 减排产生重大贡献的技术。

2. 运输燃料严重不足

2050 年我国运输燃料的终端需求量预测约为 6.3~ 7.3 亿吨。此外, 工业、农业、服务业和居民家庭对于石油制品的终端需求量约为 2.8 亿吨标煤, 相当于 1.9 亿吨油当量。如果考虑石油炼制的损失以及运输和分配过程中的损失, 2050 年我国对石油的一次能源的需求量将达到约 9 亿吨。据有关资料估计, 2050 年我国国内石油供应量只可能达到 1.5 亿吨, 因此届时可能有 7.5 亿吨油(相当于 1998 年世界原油出口量的一半, 或接近于 2050 年全球石油需求量预测值的 1/5——据 WEC/IIASA 适度增长方案) 的巨大供应缺口。为解决如此巨大的供应缺口, 主要依靠从国际市场上进口并不现实可行, 因为这既受国际市场供应能力限制, 又将承受供应安全保障的巨大政治风险。解决这个矛盾的根本途径是煤的液化和煤制氢。

煤的液化有两种途径, 即直接液化和间接液化。直接液化主要是采用加氢液化工艺, 即将煤粉混合在重油内, 在 400~ 500 大气压、500~ 600℃ 下通入氢气, 在催化剂的作用下裂解反应生成汽油。间接液化工艺是先将煤气化, 生成氢和一氧化碳合成气, 由合成气再合成为甲醇。甲醇既可直接用作汽车燃料油的调合燃料, 也可通过进一步的合成反应转化成合成油。目前煤的液化已经成为一种成熟的工业技术, 主要问题是经济性差。世界上现有的最大的煤液化工厂是南非的 SASOL 厂。南非煤价很便宜, 每吨仅 7.5 美元, 其每吨合成油的成本为 1 072 蓝特(相当于每吨 238 美元), 显然目前在经济上没有竞争力。其未来的经济竞争力将取决于两个因素: 第一, 未来国际市场油价的上升; 第二, 煤液化技术的改进。这两个因素都将朝着有利于增强煤液化技术在未来燃料油市场的经济竞争力的方向发展。特别是通过建立煤的气化中心, 对煤的合成气加以综合优化利用, 将显著增强煤液化技术的经济

竞争力。这种综合利用工艺是先将合成气采用一次通过液化工艺生成甲醇,剩余的未反应的合成气再进入 IGCC ,用于燃气发电。这样既提高了煤合成气燃料的转化效率,又可以避免目前反复合成的复杂工艺流程,减少了大量工艺设备的投资,从而可使合成燃料的成本显著下降。

煤制氢是解决未来运输燃料供应的另一个重要方向。煤制氢技术首先是将煤气化生成合成气,再通过水蒸汽转移反应,将合成气中的一氧化碳转化为氢气和二氧化碳,最后通过分离工艺,将氢气从混合气体中分离出来,供给电动汽车的燃料电池作原料。以燃料电池作动力的电动车,其排出的尾气不含任何对环境有害的污染排放物,这样可以根本改变城市交通造成的严重大气污染。燃料电池的能源利用效率大约是内燃机汽车效率的 4~ 5 倍。因此,考虑煤制氢过程中的能量效率,其综合的能源利用效率也高于内燃机汽车的能量效率。目前大规模推广氢燃料电池电动车的主要困难是燃料电池的价格太高,电动汽车全寿命的成本高于内燃机汽车的成本。另外,大规模应用电动汽车还需解决氢的储存和运输分配等技术难题。

从整个能源系统考虑,运输燃料和石油制品的替代燃料只能通过煤的气化来获得,因此未来煤炭的利用将是优先用于煤制气,煤发电的 IGCC 技术也应与煤合成气的综合优化利用来加以统一考虑。因为发电除了可以采用煤之外,也可以选择核能发电、水力发电和可再生能源发电,而用这些能源则难以生产合成燃料。

3. 面对城市环境保护的挑战

如今,我国大多数城市都面临着大气严重污染的威胁。主要大城市如北京、重庆、太原、济南等,其空气中总悬浮颗粒物和二氧化硫的浓度都超过了国家二级标准,有些城市甚至已成倍超标。这种污染状况将严重损害人体的健康,已引起政府和公众越来越多的关注。以煤炭、生物质、石油产品为主的能源消费是大气中颗粒物的主要来源。大气中细颗粒物和超细颗粒物对人体健康最为有害。近年来,随着城市小轿车的发展,汽车尾气的排放也已成为城市大气污染的重要来源。

显然,随着经济的发展、人均收入水平的提高以及城市人口的增加,我国的城市能源消费量还将大幅度地增加。虽然各种控制和减少污染物排放的技术改进都十分重要,但根本的途径还在于采用清洁能源来代替目前直接燃烧大量的煤炭。因为城市居民家庭和服务业的终端能源使用大多以分散化的方式进行,难以采用经济有效的污染排放控制技术。

在 OECD 国家,居民家庭和服务业的终端能源消费几乎完全排除了直接使用煤炭。美国从 1945 年

开始,城市终端能源消费即已废除使用煤炭。目前美国居民家庭的终端能源消费中电力占 30% ,天然气约占 50% ,其它油品占 20% 。日本居民家庭的终端能源消费中电力占 40% ,天然气和城市煤气占 17.9% ,LPG 等油品约占 40% 。

为根本解决未来我国城市大气污染问题,必须调整城市的能源消费结构,将天然气和城市煤气优先用于居民家庭和服务业的终端能源消费,同时还要发展电力消费,使城市中燃料以清洁能源为主。如果假设城市居民家庭和服务业的终端能源消费中,天然气和城市煤气的比重达到 40% ,那么仅此 1 项,2050 年我国天然气和城市煤气的供应量就需达到 3 000 亿立方米,这也是对未来我国能源供应的重大挑战。

4. 面对全球气候变化问题和国际合作机制的挑战

据国际能源署(IEA)统计,1995 年全世界 CO₂ 的总排放量为 60 亿吨(碳),其中美国的排放量为 14.3 亿吨(碳),占全世界的 23.7% ,为世界第一排放大国 ;其次即为我国 ,1995 年的 CO₂ 排放量为 8.2 亿吨(碳),占全世界的 13.6% 。

根据 1997 年联合国气候变化框架公约第三次缔约方大会通过的“ 京都议定书” ,发达国家不得不对减排做出具体承诺,今后美国温室气体的排放水平要比 1990 年有所降低。

我国是发展中国家,没有减排温室气体的义务。随着今后人口增加和经济的不断增长,其能源消费量和温室气体的排放量均将大幅度增加,估计到 2020 年左右我国的 CO₂ 排放量将会超过美国,而成为世界第一排放大国。

国际上最终可能就全世界温室气体的总排放量和各国排放限额机制达成协议,以公平性为原则,即以人均排放量作为排放限额分配的准则。其中的一种构想方案是,从 2000 年到 2100 年的 100 年间,全球的 CO₂ 总排放量限制在 800Gt(碳),到 2100 年时大气中温室气体浓度将增加 1 倍 ;如果以 2000 年的 60 亿人口数作为基数,那么人均排放量即为 1.33 吨(碳)/年。如果我国今后能源结构不作重大调整,即不能大量使用不排放碳的核能和可再生能源,那么在 2050 年前,我国 CO₂ 的排放量就可能超过上述排放限制。

因此,大量使用核能和可再生能源,不仅是满足未来我国一次能源供应的需要,也将是面对未来全球气候变化问题挑战的需要。

三、结 论

1. 我国到 2050 年的长期能源战略,应是发展
(下转第 5 页)

m³, 考虑上游即将建设水库的拦洪作用, 将减为 70 亿 m³、80 亿 m³ 和 115 亿 m³。正常蓄水位 155m 方案有可靠的防洪库容 120 亿 m³, 这能使荆江河段的防洪标准达万年一遇, 甚至更高, 万无一失。

荆江河段防洪形势险峻。向南决口, 横扫洞庭湖圩垸; 向北决口, 荡涤江汉平原, 并威胁武汉市的安全, 其危害程度比一般大水库垮坝还要严重。因此需要像大水库那样考虑万年一遇左右的标准。从可能方面看只要三峡水库不承担减少分洪区分洪机会的任务, 155m 方案便能达到这样高的标准。

4. 考虑上游水库的作用, 能使万吨船队达重庆

155m 方案, 在航运方面可使万吨船队靠水库回水达涪陵。涪陵至重庆段江道仍处于天然状况, 但该段碍航点较少, 容易整治。因主要是枯水期天然流量小航深不足, 故可考虑用上游即将建设的水库调节, 将其枯水期的流量由 2 700m³/s 增至 4 500m³/s, 航深由 2.9m 增至 4.5m, 这样, 这段江道便可通行万吨船队。

5. 降为 155m 方案, 枢纽工程的修改并不太难

正常蓄水位 155m 方案需要对现设计施工的枢纽工程做适当的修改。

泄洪建筑物: 现设计的初期运用低水位 135m 的泄流能力(包括水轮机过水)为 51 840m³/s。155m 方案则要求这一水位的泄流能力为 80 000m³/s, 可通过不堵导流底孔、或扩大 90m 高程深孔的孔口尺寸、或将溢流孔改为 135m 以下的中孔等办法来达到这一泄流能力。

拦河坝: 坝顶高程只要改为浇注到 160m 即可。如已浇注到原设计高程, 可实行高坝低用。

水轮发电机型号: 155m 方案的最大发电水头比 175m 方案小了 20m, 需要修改水轮发电机型号, 其中对于已开始制造的, 155m 方案也能使用, 可暂不做修改, 待 20~30 年后更新时再换新型号; 对于尚未开始制造的, 可重新设计制造新的机组。

船闸: 现设计施工的为五级船闸。155m 方案只需其中的第 2~第 5 级。其底板高程 130m 可不修改, 其岸墙可只浇到 160m 高程。

本方案所提论点及内容, 有部分内容是过去有人提出过的, 有一部分内容则是新提出来的, 数值需进一步核定。

(上接第 11 页)

以煤为主的多元化清洁能源体系。

2. 水能、石油天然气、核能和可再生能源, 是多元化清洁能源的重要组成部分, 必须充分发展。

3. 清洁煤战略应以合成燃料为中心, 以煤制合成气为基础。在此体系中综合考虑合成运输燃料的生产和先进燃煤发电技术的发展应用。

4. 城市中的燃料必须使用清洁能源, 天然气与城市煤气应优先应用于居民和服务业的经济能源消费。

三、补述

本建议方案 2000 年 5 月完成时, 曾寄给了钱正英同志, 请她转呈国家领导人。她回信说已将本建议转给了三峡工程建设委员会副主任兼办公室主任郭树言同志。后见《科技导报》2001 年 2 期刊的《三峡工程应按一级开发, 一次建成, 分期蓄水, 连续移民》的建设方案全面实施》一文中说: “如果按照有些专家的建议, 硬性规定水库不得超蓄, 则下泄流量又将超过下游允许的安全流量, 对长江中下游地区的危害将比超蓄更为严重, 这显然是不可行的。”对此, 这里不得不再补述几句。

实际上, 按本文所提出的安排, 这种问题是不存在的。如在遇到 1870 年洪水时, 175m 方案安排下泄 77 000m³/s 流量, 与 155m 方案下泄的 80 000m³/s 的流量相比, 属同一流量级的流量, 即也是要使用荆江河段分洪区的。当三峡工程遇校核洪水时, 175m 方案的下泄流量将达 100 000m³/s 以上, 大大超过了荆江段河道和分洪区的承受能力, 不能确保荆江段河道的安全; 而 155m 方案的下泄流量则仍为 80 000m³/s, 不超过荆江河段河道与分洪区的承受能力, 即仍能保荆江河段的安全。只是在遇百年一遇以下洪水时, 175m 方案下泄量较小, 或不使用荆江河段的分洪区, 或比 155m 方案荆江河段分洪区的分洪机会少些而已。实际上对荆江河段的分洪区来说, 保障生命财产安全要比减少农业淹没损失重要得多。155m 方案虽然分洪机会多些, 因考虑了修建村台等措施, 所以生命财产安全有可靠的保障, 只是多年平均农业淹没损失要大一些。175m 方案分洪机会虽少, 多年平均农业淹没损失小, 但因未考虑修建村台等措施, 生命财产则无保障。155m 方案需要荆江段分洪区增修村台等措施所需的投资, 估计比 175m 方案移民增加所需投资的 1/5 还要小。综合权衡, 155m 方案配合在荆江河段的分洪区修建村台工程, 比 175m 方案合理得多。

其他有关问题, 这里就不一一补述了。

据以上所述, 我认为, 三峡工程的正常蓄水位由 175m 降为不超蓄的 155m 方案, 是明智的。

(责任编辑 蔡德诚)

5. 大力发展核能和可再生能源, 不仅是为了满足能源需求, 同时也是减少 CO₂ 排放的最有效措施。核能更是当前和今后长时期内唯一现实的能大规模替代化石燃料的集中型能源。

参考文献

- [1] 周凤起, 周大地主编. 中国中长期能源战略. 北京: 中国计划出版社, 1999
- [2] 中国气候变化国情研究组. 中国气候变化国情研究. 北京: 清华大学出版社, 2000

(责任编辑 王宏章)