

海水西调用于火力发电的研究

李建锋¹, 吕俊复², 郝继红¹, 杨迪¹, 冀慧敏¹

(1. 中国电力企业联合会科技服务中心, 北京 100038;

2. 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要:分析了海水由渤海西调用于冷却我国北方众多的空冷火电机组的可行性。计算表明,如果全部利用海水来冷却我国已投运和将投运的空冷火力发电机组,则每年可以节省标煤近 800 万 t,减少 CO₂ 排放 2 000 多万 t,同时能够向当地大气蒸发水汽 10 亿多 t,获取粗盐 3 000 万 t 以上,经济与生态效益显著。海水西调远期效益包括缓解我国西北土地荒漠化现象,增加可利用土壤面积,降低沙尘暴发生频率等。

关键词:海水西调;空冷机组;可持续发展;盐化工

中图分类号:TM611

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2009)11-0085-04

Feasibility study of thermal power generation cooling with seawater introduced from Bohai Sea to west China

LI Jian-feng¹, LU Jun-fu², HAO Ji-hong¹, YANG Di¹, JI Hui-min¹

(1. Scientific and Technical Service Center, China Electricity Council, Beijing 100038, China; 2. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The feasibility of thermal power plant cooling in northern China with seawater from Bohai Sea to west China is analyzed in this paper. Calculation shows that if all of the air-cooled power plants in north China are cooled by seawater, it will approximately save 8 Mt of standard coal every year and reduce discharge of CO₂ exceeding 20 Mt, furthermore, gigatons of steam will be evaporated to local atmosphere and more than 30 Mt of coarse salt can be obtained. It is very beneficial to the local economy and the environment. The long-run effects of sea water introduced to west China include delaying the aridization in north-west China, increasing usable soil areas and decreasing the frequency of sandstorm happenings, etc.

Key words: seawater introducing from Bohai sea to west China; ACC; sustainable development; salt chemical industry

我国北方地区蕴藏着丰富的煤炭资源,据统计,2005 年山西全省煤炭产量达到 5.5 亿 t,陕北地区也相继发现了大型与特大型煤矿,内蒙古自治区的煤炭资源累计探明储量达 2 400 亿 t,居全国第 2 位。由于交通运输能力、运输成本、环保压力等原因成为这些煤产区向外输煤面临的“瓶颈”。大量输出煤炭的同时,煤矸石等劣质燃料的堆存量也在急剧增加,比如山西省内的煤矸石堆存量已达 10 亿 t,每年还新增 8 000 万 t;大量的煤矸石不仅占用了大量的土地,也对当地环境造成了严重的污染。

为了解决上述难题,在陕北、山西以及内蒙等地建立火电厂,以煤换电,然后通过高压输电技术将所发电力输送到华北、东北等地区是很有必要的,同时,我国高压、超高压输变电技术的突破也给这种选择提供了技术支持。

在我国北方这些产煤地区,水资源相当匮乏。

我国人均淡水资源量仅 2 300 m³,只相当于世界人均的 1/4,而北方多年平均水资源总量仅占全国的 12%。另据水资源评价的最新结果,我国北方地区水资源总量还在不断减少,其中以黄河、淮河、海河和辽河地区最为显著,资源总量减少了 12%,北方部分流域周期性的水资源短缺情况加剧。据中国气象局资料,从 1976 年以来,我国北方降水量大幅减少,并出现持续性干旱,年平均降水量以每 10 年 2.99 mm 的趋势减少。随着人口的增长和社会经济的发展,北方水资源系统已经变得愈加脆弱。水循环在向不利的方向发展:降水和河水流量在时空上的不平衡分布;每年蒸发量与降水量之比过大,达到 84%;干旱、偏暖的气候使水平衡更进一步向不利的方向演变。

为了解决发电与节水的矛盾,在我国北方产煤区建设了大量的空冷火力发电机组,但是空冷机组

的一个劣势就是供电煤耗要远高于湿冷机组。因此,从我国渤海进行海水西调有可能在节能与环保方面一举两得。

1 我国空冷机组的发展

随着社会经济的迅速发展,电力需求急剧提高,我国电力装机容量也随之飞速增加,连续 3 年每年增加约 1 亿 kW,至 2008 年年底装机容量已接近 8 亿 kW,其中火电占据了绝对优势。根据一次能源供应状况,这一比例我国在今后一段时间内不会发生改变。

另一方面,与我国火电装机容量相对应,空冷机组在短短几年时间内也获得了巨大的发展,见图 1。截止到 2008 年 7 月,我国已投运以及已核准的空冷机组总容量已经达到 7 355.7 万 kW。目前我国空冷机组的单机最大装机容量已经达到 600 MW,1 000 MW 级空冷机组的建设已在论证过程中,预计将来我国空冷机组还会有更大的装机容量。

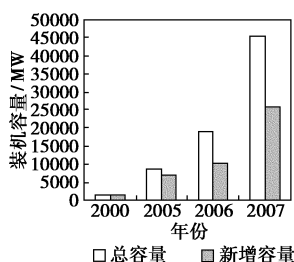


图 1 我国空冷装机容量的发展

2 空冷机组的能耗

与普通湿冷机组相比,空冷机组因为运行背压较高,所以能耗较高。以 600 MW 机组为例,我国 2007 年 600 MW 级亚临界发电机组的平均供电标煤煤耗为 328.47 g/kWh,平均厂用电率为 5.46%。部分 600 MW 空冷机组的经济性指标如表 1 所示。

表 1 部分亚临界 600 MW 空冷机组 2007 年年度经济性指标

电厂名称	机组编号	年运行时间/h	发电量/万 kWh	平均厂用电率/%		平均供电煤耗/ $g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	
				设计值	运行值	设计值	运行值
国电河北龙山	1	7653	300153	9.37	8.13	313.3	357.34
发电有限责任公司	2	3517	139612	9.37	8.14	313.3	353.85
大唐国际托克托	5	7400	334295	7.50	—	351.0	346.00
发电有限责任公司	6	8525	381105	7.50	—	351.0	348.40
陕西国华锦界	1	7437	324876	9.70	8.34	332.0	343.67
能源有限责任公司	2	5101	204404	9.70	8.35	332.0	342.00

从表 1 可以看出,与全国 600 MW 级亚临界机组的平均值相比,采用空冷发电方式可以使得平均供电煤耗增加 20.07 g/kWh;如果与相同纬度下的机组相比,这个差值会更高。因此电厂运行成本将大幅增加。

3 海水西调的能耗分析

从前面可以看出,空冷机组与湿冷机组比较能耗巨大,如果采用渤海水西调的方式来冷却空冷机组,将会使空冷机组改成湿冷机组,从而有利于降低汽轮机的运行背压,特别是降低了空冷机组夏季运行时的机组背压,也就提高了机组的安全运行性能与发电效率。

但是,我国空冷机组一般建设在距离内蒙、山西等煤炭资源丰富、海拔较高的地区,这样,将海水提升并输送至空冷电厂所在地需要消耗大量的能量,所以有必要仔细测算一下利用电力将海水输送至空冷电厂所在地所消耗的能量与增加的发电量之间的大小。

单位海水能耗可以采用下式计算:

$$W = gh(1 + \xi) / \eta_p \quad (1)$$

式中, W 为能耗, g 为重力加速度, h 为电厂所在地海拔高度, ξ 定义为沿程阻力系数, η_p 为水泵效率,因为海水可以通过管道输送,所以上式并没有考虑海水的沿途蒸发与泄漏。

假定湿冷发电厂的效率为 η , 供电煤耗为 a , 水的气化潜热为 r , 如果调入的海水完全用来蒸发以冷却凝汽器, 则每蒸发单位质量的海水的发电量 F 为:

$$F = r\eta / (1 - \eta) \quad (2)$$

因为

$$\eta = 3600 \times 1000 / (a \times 7000 \times 4.18) = 123/a$$

所以

$$F = 123r / (a - 123) \quad (3)$$

假定某空冷电厂改湿冷后发电节约煤耗为 b , 那么, 机组相同煤耗情况下可以多发电量 F_1 为:

$$F_1 = F_b / (a + b) \quad (4)$$

亦即

$$F_1 = 123rb / (a + b)(a - 123) \quad (5)$$

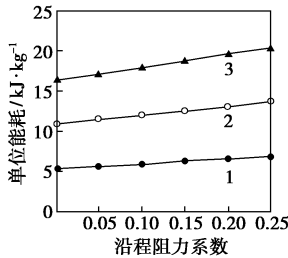
若 $F_1 \geq W$, 电厂由空冷机组改为湿冷在经济上是合理的。当然, 这只是从能耗的方面考虑, 而没有将生态效益考虑进去。

4 计算结果与算例分析

目前水泵的效率一般为 0.65 ~ 0.90, 而大型

水泵的效率在 0.90 左右。由于在海水西调过程中要尽可能采用大型水泵,因此水泵的效率可以取 0.90。根据上面的分析,计算结果整理如下。

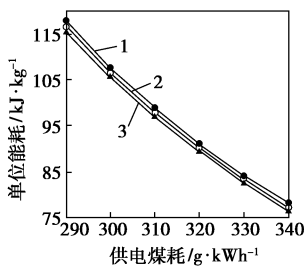
4.1 计算结果



海水提升高度/m:1—500;2—1000;3—1500

图2 海水提升能量与沿程阻力系数的关系

图2给出了不同沿程阻力系数情况下,将单位质量的海水提升到不同高度下所消耗的能量,从图2中可以看出,海水提升越高,沿程阻力系数越大。那么所消耗的能量就越大,因此,如果电厂机组采用海水西调的方式来冷却,那么电厂的选址海拔高度应该尽可能低一些;另一方面,由于管道输水的过程中流速越大,沿程阻力就会越大,消耗的能量也就越多。因此在输水过程中,管径应该尽可能大一些以降低水阻力,但是太大又会增加投资成本,因此具体取值时应进行较为详细的经济技术分析。



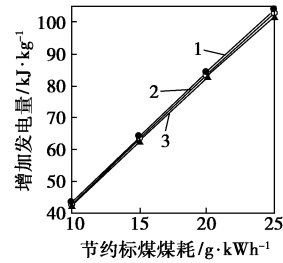
蒸发温度/°C:1—10;2—20;3—30

图3 供电煤耗与多发电量之间的关系

图3给出了不同蒸发温度条件下供电煤耗与多发电量之间的关系。图中横坐标的取值为湿冷机组的供电煤耗,同时取节能煤耗量 $b = 20 \text{ g/kWh}$,即如果采用湿冷方式后,将比原采用空冷机组的发电方式所能够节省下来的煤耗量。

在图3中可以看出,随着蒸发温度的降低,机组发电量不断增加;另一方面,越是能耗低的机组,采用湿冷的方式越是合算,因为机组能耗越低,空冷与湿冷方式发电量的差异就越大。对于 1 000 MW 超临界发电机组来说,由于其本身的设计供电煤耗量

很小,只有约 290 g/kWh ,因此一旦采用空冷方式,其能耗将会急剧增大。因此对于今后将要上马的 1 000 MW 超临界空冷机组更是应该慎重。



1—10°C;2—20°C;3—30°C

图4 节煤量与增加发电量之间的关系

图4给出了在湿冷机组供电煤耗为 330 g/kWh 的条件下节煤量与增加发电量之间的关系,从图4中可以看出,在湿冷机组供电煤耗一定的情况下,节煤量越高,增加的发电量就会越多;另一方面,在湿冷机组能耗既定的情况下,海水蒸发温度的降低对于增加发电量贡献相对要小一些。

综合考察图2、图3、图4可以发现,海水西调的能耗在提升 1 500 m 高程的情况下为 $16 \sim 20 \text{ kJ/kg}$,而在通过蒸发海水来冷却火电机组的发电方式下却可以增加发电量 $45 \sim 125 \text{ kJ/kg}$ 。因此,从能耗上来说,采用海水冷却发电机组是完全可行的。

4.2 算例分析

如果以 600 MW 级亚临界空冷机组与湿冷机组的平均值为基础来进行算例说明,可以估算出当采用空冷改湿冷的发电方式时机组每年所产生的经济与生态效应。

当机组采用海水冷却的方式时,大量的海水将会被蒸发到当地环境中,因此如果海水量足够大,就有可能给当地增加降雨量,从而缓解了我国北方地区的缺水状况,这对于北方地区的工农业生产以及环境的改善有着重要的作用;其次,由于海水的大量蒸发,海水的盐分将会被保留下来,而当地有着丰富的煤炭资源,这给发展当地的盐煤化工业提供了基础,比如可以利用海盐生产 NaOH 、 HCl 等化工原料;第三,因为这种方式能够大量生产海盐,所以可以将海边原来晒盐的大量土地置换出来,比如绿化、养殖等。

假定某 600 MW 空冷机组的海拔高度为 1 000 m,输水沿程阻力系数为 0.1,输水泵效率为 0.9,取海水浓度为 3%,年均蒸发温度为 20°C ,相关计算

结果见表 2,表 2 中取海水含盐 3%。

表 2 海水冷却经济性比较

冷却方式	空冷机组	空改湿机组
机组功率/MW	600	600
年满负荷运行时间/h	6000	6000
供电煤耗/g·kWh ⁻¹	348.54	328.47
年供电量/万 kWh	360000	360000
年耗煤量/万 t	125.47	118.25
年海水消耗量/万 t	0	881.86
海水耗能量/万 kWh	0	2934.09
海水耗能折煤量/t	0	9637.6
年总节煤量/万 t	0	6.26
年收获粗盐量/万 t	0	26.46

从表 2 中可见,1 台 600 MW 机组采用海水冷却方式后,将每年给大气中补充水分近 900 万 t,年节约标准煤 6.26 万 t,同时海水蒸发后产盐 26 万余 t。

如果将我国现有的和即将投运的 7355.7 万 kW 空冷机组都改成海水冷却方式,那么按照 600 MW 平均值为基础估算,可以得出每年将为大气补充水分约为 $7355.7/60 \times 881.86 = 10.81$ 亿 t,年节约标准煤 767.55 万 t,折算减排 CO₂ 2 000 万 t 以上,同时可以产盐 3 240 万 t 以上,具有巨大的环境与生态效益。

5 近远期目标

文献[1-4]详细论证了我国西北地区干旱的现状、成因以及通过海水西调的方式来改善当地生态环境,并论证了将会产生的巨大效益。按照文献[1-3]中设想,工程全部完成以后年输水量 1 000 ~ 2 000 亿 m³,提水高程约为 1 000 m 高度,输水长度达 5 000 km 以上,如果不考虑海水的蒸发和泄漏以及海水输送过程中的沿程阻力,仅需要的理论能耗就高达 $9.8 \times 10^{14} \sim 1.86 \times 10^{15}$ kJ,相当于 3 107 万 ~ 6 215 万 kW 的装机容量一年的发电量,总投资额将非常巨大。

就目前来看,比较可行、短期内可见效益的是调海水冷却火电机组,即在内蒙古煤炭资源丰富的赤峰、鄂尔多斯、乌海以及呼伦贝尔等地区建立大型坑口电站,电站发出的电力输送到我国电力紧缺的首都以及华北地区。然后从秦皇岛至葫芦岛沿海岸线某处开始建设引水渠道,经过赤峰折向西到鄂尔多斯以及乌海,如果有必要,从赤峰可以向北修建一条支线输水至呼伦贝尔。

从长远来看,海水西调工程可以如文献[1]中所设想的那样,将海水输送到更远的新疆。如果全部

工程建成以后,采用以核电为主,风电、太阳能电力为辅作为输水电源更为合适;第一,调水所需要的巨大功率可以由核电站提供,而风电、太阳能电站本身就具有输出功率不稳定的特点,大规模利用时电网所需要配置蓄能设施投资巨大,运行过程中能量损失也较多,而作为输水电源则对输出功率的稳定性要求相对宽松,甚至还可以利用输水渠道本身作为蓄能/调峰设施;第二,采用这些能源基本不排放 CO₂,使得本项目环保效益更高;第三,我国西北地区本身地域广大、人烟稀少,太阳能与风能资源丰富,也有利于建设大型的太阳能、风能电站;第四,大规模的太阳能电站的建设,增加了太阳能发电设备的产量,促进了太阳能利用技术的发展。

6 结语

就目前来看,利用海水冷却发电机组凝汽器在海边电厂已有很多应用,本身技术风险不大。但是随着冷却水的不断浓缩,高浓度含盐水的蒸发、防腐以及盐结晶等问题还需要认真考虑。

此外,海水沿途的防泄漏以及泄漏后引起的土地盐碱化问题也是必须慎重考虑的事情。

经过以上分析,可以得出如下结论:

(1)利用海水西调的方式来改变空冷机组的冷却方式,有利于提高机组的发电效率,降低机组的供电煤耗,节能效果显著。

(2)采用海水冷却火电机组的方式能够向当地大气环境蒸发大量水汽,有利于增加当地大气含水率,从而有利于增加降水量,对于缓解我国西北地区严重缺水的状况能够起到很重要的作用。

(3)海水蒸发后会结晶出大量的粗盐,利用我国西北地区煤炭资源丰富的特点,有利于在当地大力发展盐煤化工。

(4)工程实施程中的输水泄漏以及火电机组的防腐问题应该认真考虑。

参考文献

- [1] 陈昌礼.海水西调与我国沙漠和沙尘暴的根治[J].中国工程科学,2001,3(10):13-21,27.
- [2] 陈昌礼.海水西调是西北和华北北部可持续发展的需要[J].中国工程科学,2003,5(1):48-55.
- [3] 陈昌礼.海水西调是西部大开发的战略性基础工程[J].中国工程科学,2003,5(10):14-19,26.
- [4] 霍有光.海水西调与再造西北[M].石家庄:河北人民出版社,2005.■