

太阳热直接发电技术的进展

倪秋芽

(中国科学院电工研究所, 副研究员 北京 100080)

一、太阳能发电的总体概况

将太阳辐射转换成电能,主要通过光伏发电系统或聚热系统来实现。前者利用半导体的光电效应,使太阳辐射直接变成电力;后者则将太阳辐射聚集起来,以热的形式供给按蒸汽循环或气体循环工作的热机,从而驱动发电机发电。近15年来,不论是光伏系统还是聚热系统都有了长足的发展。

据1994年12月召开的第一届世界光伏能量转换会议报道,1993年全世界太阳能电池模块投放市场的总容量达60兆瓦,1994年增加到72兆瓦,1995年则达90兆瓦。1995年,商售单晶硅太阳能电池模块的光电转换效率达15%。

与此同时,建立在美国南加利福尼亚的槽式线聚焦太阳热发电厂已经并网运行多年,总的电功率达354兆瓦,年平均效率达14%。电功率10兆瓦级的定日镜聚焦、塔式太阳热发电装置从1982年投入试验,运行7年的总发电量达 38×10^6 千瓦小时。而用点聚焦碟型集能器/斯特林发动机的太阳热发电装置的研制成果亦令人瞩目,1986年就创造了转换效率29.4%的记录,年能量效率则达23%。

尽管如此,上述诸类太阳能发电系统,除了槽式线聚焦的示范电厂外,离商用化都还有相当的距离。即使是槽式线聚焦太阳热发电,投资约为每千瓦3300美元,电价为每度9美分,以所报告的转换效率,尚不能和常规电厂竞争。采用定日镜的塔式系统的成熟程度不如槽式聚焦系统。斯特林系统虽然有比较优良的性能指标,但斯特林发动机工作在气体温度700℃,压力约12兆帕的条件下,高性能的斯特林发动机需要用氦气作工质,因此结构复杂,维护费用比前两种热发电系统更高。

光伏系统的问题仍然是光电池模块的转换效率低而制造成本高。虽然太阳能电池的制造成本随着技术的发展和需求量的增加而明显降低,然而,据上述国际会议的资料,至2010年,太阳能电池模块的价格将下降到每峰瓦2美元。通常,光电池模块的价格占光伏系统投资的50%,那么,到2010年,光伏系统的成本为每千瓦4000美元。根据优化设计所预测的电价为14美分/千瓦小时,即使是用费涅耳透镜的砷化镓电池系统效率达35%时,电价也需要11美分/千瓦小时。因此,不论是成本和

电价,光伏系统都比常规电厂高。

目前,各国发展太阳能发电,都附有财政补贴的措施,我国也不例外。然而,太阳能发电最终要纳入商用的轨道,在加快这一进程的方向上,除了继续改善现有各种太阳能发电系统的经济技术指标外,还亟须探讨一些新概念,而太阳热直接发电便是值得重视的新概念。

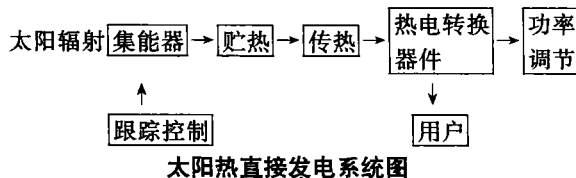
二、太阳热直接发电的特征

除了上述成本和效率方面的问题之外,光伏系统和聚热系统还各有一些特点。

光伏系统的构成比较简单,无运动部件、无噪声、无需维护,对于地区的水资源无特别的要求。但是,因为是光电直接转换,必须靠蓄电池组来满足阴天的负载需求;又因为所生电力是直流电,还必须配置逆变设备。

聚热发电系统的构成比较复杂,热机和发电机均属于运动部件,需要经常维护,又要求建设地区有足够的水资源。聚热系统可以用贮热方式,在太阳辐射不足以使热机正常工作时维持设备的运行。此外,聚热发电系统不需要逆变设备,但必须配置集能器跟踪控制装置。

所谓太阳热直接发电系统,则以热电能量直接转换器件为核心,其构成如框图所示。由框图可知,太阳热直接发电也是一种聚热发电系统,它的集能器贮热和传热部份与传统热发电系统的同类部分相似。另一方面,由于热电转换器件无运动部件、无噪声、无需维护,也无特殊的水资源方面的要求,因而又和光伏系统相同。尽管需要把直流电变成交流的功率调节装置,却可以免去在光伏系统的投资和电价中占有很大比例的蓄电池组。因此可以说,太阳热直接发电系统兼备了光伏系统和传统聚热系统两者的长处,它的竞争潜力和发展前景很大程度上取决于热电转换器件的经济技术指标。



三、热电能量直接转换器件的现状

目前可以作为太阳热直接发电系统中热电转换部件的器件有三种:热电半导体、热电子二极管和碱金属

热电变换器。

1. 热电半导体

1821年德国医生塞贝克发现的热电效应,直到半导体出现之后,才有了在能量转换方面应用的可能。本世纪50年代,苏联科学院院士约飞制造了利用白炽灯的散热,给无线电收音机供电的热电发电机。60年代初,美国便把热电半导体用于制作以放射性同位素或核反应堆为热源的空间电源。当时甚至已经有了研制以太阳辐射为热源的热电半导体电源的尝试。

用热电半导体制作的发电装置,可以大大简化太阳热发电系统中能量转换部件的结构。它可以在很宽的热源温度范围内工作,对集能器的要求不苛刻,发电装置的热电转换效率依赖于热源和冷源的温度,也依赖于热电半导体的性能指数。理论计算表明,如果性能指数 $Z=5 \times 10^{-3} [1/K]$,那么,当热源温度为973K、冷源温度为300K时,优化设计的热电发电装置的效率为32%。然而,迄今常用的热电半导体中,在300~1300K范围内性能指数最高的锗化硅(SiGe),其Z值仅达 $1.25 \times 10^{-3} [1/K]$ 。因此,实际上,热电发电装置的效率不超过10%。

性能指数Z由热电材料的塞贝克系数S、热导率 κ 和电导率 σ 决定, $Z=S^2\sigma/\kappa$ 。亦即,热电发电装置效率的改进主要取决于半导体材料的发展。探索和制备具有高性能指数的热电半导体,一直是世界范围十分活跃的研究领域。近年来发展的掺杂硅化物,如硅化铁(FeSi_2)、硅化钌(Ru_2Si_3)等,都是有希望在性能指数上超过SiGe的新的热电材料。

2. 热电子二极管

发现固体的热电子发射现象可以追溯到爱迪生的实验,利用这种现象的热阴极真空二极管,很早就被用作整流电路的元件,把它用于能量转换过程,也是比较自然的设想。当阴极受到加热而发射的电子被板极所收集,并且通过负载电路回到阴极时,实际上真空二极管就完成了热电能量转换的功能。在这种场合,常把热电子二极管称作热电子发电机。为了有效的转换,热电子发电机要求阴极一板极的间距尽可能小,在1/10毫米到微米的量级。经过数十年的探索,特别是确立了解决空间电荷问题的对策之后,大约也在60年代初,开始了热电子二极管的应用研究,并且首先考虑作空间电源。近十年来,热电子二极管的地上应用成为一些国家努力发展的方向,其中包括太阳热/热电子二极管直接发电装置的研究。和热电半导体相比,热电子二极管适合在热源温度1400~2000K的范围内工作,热电转换效率可达20%。充有铯蒸汽的热电子二极管因为能有效消除空间电荷的影响,使发电装置具有很高的面积功率密度(约为10瓦/平方厘米),而热电半导体发电装置的功率密度仅为0.05瓦/平方厘米,只略高于太阳电池。

将热电子二极管用于太阳热直接发电系统时,因为工作温度较高,于是增加了聚焦和传热部件的设计及制作的难度。另一方面,因为排热温度也比较高,可以考虑和热电半导体串联连接,构成组合式太阳热直接发电系统,以获得更高的转换效率。

3. 碱金属热电转换器

碱金属热电转换器是利用 $\beta''\text{-Al}_2\text{O}_3$ 固体电解质优

异的离子导电性质,以工质钠通过 $\beta''\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的等温膨胀为工作原理的高效率热电转换器件,它适合在热源温度700~1000℃的范围内工作,功率密度可达1瓦/平方厘米,介于热电半导体和热电子二极管之间,热电转换效率可超过30%,比前两者都高。

和热电半导体、热电子二极管相比,在面积型热电发电器件中,碱金属热电转换器是后起之秀。它是在 $\beta''\text{-Al}_2\text{O}_3$ 制备成功之后,1968年见于专利的新概念,至本世纪70年代末、80年代初才完成了原理验证,建立了基本理论。其后的10余年中,发展很快,迄今已经取得单管器件效率20%,36管模块的电输出为550瓦,连续运行14000小时等成果。美国、德国、日本的研究所和许多公司都积极致力于碱金属热电转换器的开发,应用目标则是空间电源及地上的电站。

碱金属热电转换器在投资方面的估计也令人振奋,据1993年美国密执根环境研究所对1000瓦输出,功率密度为0.3瓦/平方厘米、效率25%的燃烧加热碱金属热电转换器发电系统所作的分析,每年生产10000套时,投资为370美元。在采用张膜抛物线聚焦碟型集能器时,按太阳辐射的人射功率为1000瓦/平方厘米计算,1000瓦输出所需的集能器价格约为460美元,考虑到扣除燃烧器的费用以及器件本身的优化,采用碱金属热电转换器的太阳热直接发电系统的成本可能降到每千瓦1000~1500美元,比斯特林系统的成本低,能和常规火力发电厂相匹敌。又因为维护费降低,电价可以降到每度电6~7美分,比有任何太阳能发电系统的电价都便宜。

四、太阳热直接发电的挑战性

直接发电的概念最初是相对于传统的热能—机械能—电能的转换过程而言的。它将导致提高能源利用率、简化装置的结果,因而被称为继蒸汽机、电机和核能得到应用之后,能源技术发展的又一个重要阶段。

不论是热电直接发电还是传统的发电系统,其能量转换效率都受到卡诺循环效率的制约。于是直接发电的意义便在于,它有利于提高热源温度和在达到同样能量转换效率的前提下使系统大大简化。这无疑十分适合于太阳热发电系统。

上述三种热电能量直接转换器件都可以在高于太阳热蒸汽循环的温度下工作,而热电子发电和碱金属热电转换器的工作温度可以比斯特林循环的还高,表明了太阳热直接发电与传统聚热式太阳能发电相比在热电转换效率方面的优势。

特别要指出,碱金属热电转换器件因为可以作到熵的产生速率极小,其转换效率极接近于同样温度范围的卡诺效率,所以可以在比热电子发电机低得多的温度下达到很高的效率,是构成太阳热直接发电极有吸引力的能量转换器件。

总之,材料科学和热电转换器件的发展已经使太阳热直接发电成为可能,它将与传统的聚热系统、光伏系统相竞争,形成太阳能利用的新局面。

(责任编辑 肖庆山)