

# 小水电领域战略性新兴产业培育与发展

程夏蕾 朱效章 (亚太地区小水电研究培训中心 浙江杭州 310012)

**【摘要】**分析“超导体发电机”和“流速发电”技术在小水电领域的技术发展状态和应用前景,这些技术对未来小水电产业有着突破性(或颠覆性)和更新换代的影响,是对传统小水电的技术革命,符合我国“战略性新兴产业”培育与发展的目标。

**【关键词】**小水电 战略性 超导体发电机 流速发电 新兴产业 培育与发展

## 0 引言

目前,制约小水电发展的主要因素来自于经济效益和环境影响。如何通过技术进步来提高小水电经济效益,同时使其更加满足环境保护要求,是小水电发展面临的挑战。欧盟国家已经提出了一系列小水电发展战略文件,从政策和技术层面出台了一系列措施,以促进小水电可持续发展。其中,技术研究主要集中在新材料(如“超导体发电机”)和流速发电等领域,以有效地提高机组效率、降低成本并提高经济性;同时通过环境友好的小水电设计(如设定合理“生态流量”等),可以减少小水电对环境的负面影响。欧洲小水电的技术发展,一定程度上也反映了世界小水电的技术发展趋势。

“超导体发电机”和“流速发电”技术对未来的小水电产业有着突破性(或颠覆性)和更新换代的影响,是对传统小水电的技术革命,符合我国“战略性新兴产业”培育与发展的目标。由于这些技术在世界范围内还在试用和不断完善并逐步走向成熟的阶段,我国作为世界小水电数量和装机容量最多的小水电大国,要向小水电强国转化,必须积极参与这一“颠覆性”重大技术的研究、试制和推

广,力争在短期内加入世界先进行列,使这些关键技术有效地服务于我国小水电的持续发展。

## 1 超导体发电机技术

### 1.1 超导体变速发电机在小水电站中的应用

从中国和世界范围来看,超导体发电机的研制已有20~30a的历史,但由于早期超导体材料需在5K的(-268℃)低温下运行,其冷却与绝热系统技术复杂、成本较高,长期以来一直未能进入商业化实用阶段,更没有在小水电行业中得到实际应用。

最近,德国1家名为Zenergy Power plc的公司(简称ZP公司)宣称成功地为1座德国的旧小水电站改造扩容项目提供了1套超导体变速发电机,并在2010年底前后投入运行<sup>[1]</sup>。该电站名为赫斯乍得(Hirschaid),位于德国巴伐利亚州莱格尼兹河(Regnitz River),始建于20世纪20年代,装有3台1250kW的双水轮发电机(即2台水轮机共同拖动1台发电机,这在欧洲和大洋洲国家得到广泛应用,而我国尚未采用);该电站的业主和负责运营的公司为德国E.ON Wasserkraft GmbH公司(简称E.ON公司)。为提高电站效益,改善项目经济回报,E.ON公司决定对电站进行改造、扩容,先将3台机组中的1台从1250kW扩建为1700kW,并将其并入德国电网,带基荷运行。在改造扩建中,采用了“高温超导体”(HTS)技术,不仅使机组出力提高了36%,而且体积、重量都减少了。不再需要为扩容的机组进行大量扩建工程,而且

收稿日期:2012-08-08

基金项目:国家科技支撑资助项目(2012BAD10B00)

作者简介:程夏蕾(1958-),女,亚太地区小水电研究培训中心主任,教授级高级工程师,主要从事小水电技术研究和管理工作。

Email:xlcheng@hrcshp.org

大大减少了停电施工的时间,从而节约了改造费用。就目前来看,这是全世界第1座采用高温超导体发电机的小水电站。E.ON公司是德国可再生能源为最大的发电厂商,拥有133座中小水电站,总装机容量达132.5万kW,年发电量76.6亿kW·h,其中122座为径流式水电站。

目前E.ON公司正在对另1条名为莫塞尔河(Mosel)上的10座水电站进行类似的改、扩建工程的研究,这10座电站装机容量共为18万kW。E.ON公司准备先选择其中1座电站进行研究,评估采用超导体变速发电机的可能性;如可行,则可能对其余9座电站进行类似的改扩建工作。这将为崭新技术进入大规模商业实用阶段开创先例。

我国虽早已开展超导体发电机的研究工作,并在一些工业领域已得到实际应用,但小水电行业还从未涉及这一技术。从国内外研究、试用的情况看,这一技术堪称颠覆性技术,发展前景十分广阔。

### 1.2 超导体发电机的技术简况<sup>[2-3]</sup>

普通的铜导体具有电阻,通过电流时,产生热量为 $I^2R$ ,从而制约了铜导体通过电流的量。传统的发电机,其定子和转子线圈都是铜导体,发电机功率越大,其线圈尺寸也必须相应增大,因此整机的体积和重量也相应增大,这些就成为制约单台发电机功率增大的主要因素。

超导体是电阻为零的一种特殊导体,其通过的电流密度可比铜导体高100倍以上。用超导体制造的发电机,在定子、转子气隙中产生的磁通密度可以达到5特斯拉(Tesla,符号为 $T$ ,1特斯拉=10000高斯)以上,而常规发电机最高为1.7特斯拉。超导体由于是零电阻,几乎无损耗,不发热,从而可使单机极限功率提高很多倍。

早在1911年,世界上就发现了超导体的存在,但直到1987年超导体的发现才获得诺贝尔奖。又经过20a,到2007年才开始进入实用阶段。国际上最早研制的超导体发电机是采用NbTi(铌钛)合金制造的低温超导体,用4.2K(-269℃)的液化氦来维持存在,这种冷却介质的临界温度为5K左右,运行条件所需要冷却设备的复杂性及高成本,以及热绝缘系统的困难等,共同制约了早期超

导技术在旋转电机上的商业化实际推广,当时这种超导也被称为低温超导。

70年代以来,一些国家开展了“高温超导”的研究(HTS: High Temperature Superconductor),即设法使超导性能的临界温度高于5K,以减少冷却的难度。上述实例,即德国赫斯乍得水电站采用的导体就是由30K高压液化氦制成并维持存在的。目前,美国、瑞士、中国等国家发表了液氮超导体在实验室获得成功的信息,以液化氮代替液化氦,氮的液化温度为77K(-196℃),在空气中占80%,制取代价低,容易贮存运输,使用方便,且不必回收;而氦的液化温度为5K~30K,在空气中所占比例很低,制取代价高,渗透性极强,不易贮存运输,使用和回收极不方便。液氮超导体的出现,使超导体发电机技术的推广应用前景更为看好。

从能够获得的不完整资料来看,上述世界第1座采用高温超导体发电机的小水电站的技术简况如下<sup>[1]</sup>:

- 超导体的冷却介质为液态氮,临界温度为30K(-243℃)。
- 超导体所有材料不曾披露。
- 发电机转子中的励磁绕组采用了超导体,而定子绕组仍为传统的铜绕组(称之为“单导体”)。
- 发电机为变速发电机,联入1台变频装置,以稳定输出频率和电压(类似风力发电设备)。
- 由于采用了变频发电机,电站原装的定桨式水轮机不必改造为转桨式卡普兰水轮机,就能适应电站水头流量变化时,出力随之变化,大大简化了设备,降低了改造扩容的费用。
- 由于发电机可以变速运行,且可低速运行,因此取消了原有的变速齿轮箱,发电机与水轮机直接连接,又节省了相应的投资。
- 变速运行的水轮发电机的高效运行范围比固定转速的机组要多,且运行范围可延长。
- 由于机组允许变速运行,取消了传统卡普兰水轮机常用的双调节调速器,节约了相应的投资。
- 以上技术特性可带来机组年发电量增长10%

~ 25%。

· 据该公司估计, 如安装 1 台 5 000 kW 机组, 高温超导体变速发电机设备约需 300 万欧元, 而采用传统设备则需 370 万欧元。

根据目前能够查获的信息, 可以制成超导体的材料有 28 种元素(稀有元素)和几千种合金与化合物, 目前已经成熟的为铌钛(NbTi)合金。过去几十年, 在全球的努力下, 超导体临界温度每年仅能提高几度。目前利用液氮已有可能提高到 77 K (-196 °C), 比法国第 1 座超导体发电机的水电站采用的 30 K (-243 °C) 又有了较大提高。据专业生产超导体的法国公司介绍, 近 20 年来已经开发、研制了两代高温超导体。第 1 代 1G-HTS, 用的材料是钇-钡-氧化铜 Yttrium-Barium-Copper-Oxide (YBCO), 第 2 代 2G-HTS, 用的材料是铋-锶-钙氧化铜 Bismuth-Strontium-Calcium-Copper-Oxide (BSCCO), 都是具有金属性能的特殊陶瓷。有资料估计, 采用超导发电机体积可缩小 50%~80%, 重量可减少 50%~80%, 功耗(散热)可减少 2/3, 发电成本可降低 60%, 发电转换效率可达 99%, 年发电量可增长 10%~40%。小水电站正是最好的试点, 成熟后还可用于大型水电站。从理论上讲, 超导体发电机单机容量的极限可达 1 000 万 kW, 这是现在无法想象的。今后 5~10 a, 应当抓住时机, 促使超导体发电机在水电领域的应用早日成熟。

### 1.3 小水电应用超导体发电机的前景预测

国外研究表明, 目前超导发电机主要用于中小型水电站, 单机容量大约为 1 000 kW 的机组, 尤其适用于老电站的更新、改造、扩容。据欧洲小水电协会(ESHA)统计, 欧洲 56% 的水电站均已进入“更新改造周期”(建站 40 a 以上), 其中 32% 为 40~60 a, 24% 为 60 a 以上。这些老电站总装机容量达 1.3 亿 kW (包括大、中、小型电站), 其中 55% 属于立即需要处理的中小型和微型水电站。据测试, 如以超导体发电机替代原有机组, 每年可增加 1 250 h 的满负荷运用时间, 使原来应用传统发电设备的电站增加 25% 的发电量。原有 40 a 以上的老电站经改造、扩容后每年可增加发电量 900 亿 kW·h。

我国情况与上述欧洲情况相似。据统计, 迄今有 153.6 万 kW 的水电站运行 30 a 以上, 692.5 万 kW 的水电站运行 20 a 以上, 1 385 万 kW 的水电站为 10 a 以上。调查表明, 约有 800 万 kW 的小水电站存在各种问题, 亟需更新、改造、扩容。水利部制订的《农村水电站增效扩容改造项目》试点已启动, 要求在“十二五”期间对 1995 年以前建设的 5 700 余座总装机为 800 余万 kW 的老旧水电站实施增效扩容改造。估计“十二五”以后, 还会有更多老旧小水电站需要更新改造。目前, 扩容改造规划虽然都是在传统技术基础上制订的, 但要求也很高。比如在今明两年的 620 座试点电站中, 扩容改造后装机容量要增长 25%, 年发电量要增加 40% 以上(这可能是由于原有电站水平十分低劣, 通常不可能有如此高的增长)。如果采用高温超导体变速发电机这一新技术进行增效扩容改造, 效益将会有更大增长。由此可见, 超导体发电机在国内市场的前景十分广阔。

## 2 流速发电技术

### 2.1 流速发电简介

百余年来, 世界传统水力发电技术都是以河流中水位差形成的水头所提供的势能(potential energy)转化为电能的。从理论上讲, 水能除由水位差提供之外, 还可由流速提供, 国外称之为水力动能(hydro-kinetic energy), 用来发电即称为流速发电(hydro kinetic power), 也叫零水头发电(zero head generation); 但近百年来, 这一技术没有得到开发和应用。

近年来, 世界发达国家和我国大规模发展水力发电以后, 首先得到开发的中高水头资源逐步减少, 为减少淹没损失与移民拆迁费用, 对低水头、超低水头以及零水头发电技术的研究已经成为各国小水电的科研重点。一般的低水头和超低水头发电, 无论在电站布置和水轮机型式或结构方面, 基本仍是以传统技术为基础。而零水头水轮机的出现, 则是小水电技术的重大创新, 研究和推广这一崭新技术, 将为资源逐渐枯竭的小水电领域开辟一个重要的新天地。

虽然世界各国开始研究流速发电已有十几年历史,但真正研制成功零水头水轮机并建立试点电站的,还只是近两年的事。2009年,美国明尼苏达州密西西比河上1座建于1930年的水电站,原安装2台2200 kW的水轮发电机组,进行了扩容改造,在尾水出口加装了1台100 kW和1台150 kW的流速水轮机,使电站出力增加了5.7%,并正式成功投产发电。这可能是世界上第1座流速发电的小水电站(因为之前在英国可能已有海洋能的流速发电机研制投产)。这一技术,被称之为“hydro+”(水电增容),即“一水两用”。水流第一次经过原有水轮机发电后,到尾水出口又利用其流速再次发电。

## 2.2 第1座流速发电小水电站<sup>[45]</sup>

该电站名为美国陆军工程兵团第2号闸坝,位于明尼苏达州密西西比河上,原建于1930年,后经1987年、1995年两次改造,坝后建有1座小水电站,装有2台2200 kW水轮发电机组。由于环保制约,多年来美国大中型水电站已经无法继续建设,为缓解能源短缺,近年来美国水电界开始重视小水电的建设,特别是在利用旧电站方面做了大量研究。

2008年,位于休斯顿的1家名为“水电绿色能源”公司的技术开发商与上述电站所在城市黑斯汀市(Hastings)进行合作,将其长期研究的流速水轮机组应用于2号闸坝,以增加出力。经联邦电力监督委员会(FERC)正式批准开工,于2009年陆续投产,第1台100 kW、第2台150 kW,与原有2台2200 kW机组一对一安装。

该流速发电机组为装配式(modular),在工厂制造装配然后运到现场,安置在1台驳船上,船宽20 m,长6 m,中间有一大孔,水轮机悬置在孔的上方,运到现场时由门机操作将其沉入水中。水轮机的直径为4 m,具有3片轮叶,在水的流速为2 m/s时,转速为21 rpm,2台机组年发电量约为145万kW·h。由于不需要土建工程,故施工期较短,且施工期间原有电站不需停运,这对老旧电站的扩容改造实施十分有利。据计算,2台机的综合效率(coefficient of performance 或 water-to-wire effi-

ciency)为62%。

据称,该机组的研制获美国专利6955049号。

## 2.3 小水电应用流速发电的前景预测

随着条件比较好的中高水头水电项目的建成以及人们对环境问题的日益重视,小型水电项目的开发将逐步向低水头、超低水头甚至零水头目标发展。目前低水头电站开发面临的最大问题是土建工程量大,造价高。对数百座低水头电站的研究表明,同样容量的电站,当发电水头从3 m降到1.5 m,电站土建投资将增加5倍,而水轮机转轮直径增加2倍<sup>[6]</sup>。从运行角度看,目前低水头电站所采用的全贯流水轮发电机组和整装式灯泡贯流机组并不完全适用于超低水头段运行,勉强使用会带来运行效率低、噪音大、易气蚀、寿命短的问题。

美国电力研究院2007年的研究表明,美国到2025年可开发的流速与海洋发电(波浪、流速、潮汐)资源约为1300万kW,潜力巨大,目前仅刚刚起步。美国现有水电装机约占全国电力的8%,但却是可再生能源(风能、太阳能、地热、生物质能)的80%,故挖掘水电的重大创新技术意义深远、前景广阔。日前,黑斯汀市的流速发电机组造价还需3500美元/kW,比一般小水电贵,但比风电和太阳能发电(5000~8000美元/kW)便宜,今后还可能进一步研究来降低造价。

此外,美国有关学者还在开展一种低水头、流速发电的研究,即不完全为零水头,而是在超低水头的基础上,增加一部分流速水头以提高出力<sup>[7]</sup>。主要利用现有的低坝工程,在坝前水位上层取水(传统作法都是底部取水),利用一部分流速,经过跨坝的虹吸式管道将水引入坝后的厂房,安装传统的低水头水轮机组(轴伸贯流式)即可。为挖掘这一技术,现正对密西西比河上1座名为基奥库克(keokuk)的水电站进行可行性研究,其中部分工作准备委托笔者所在单位合作进行。

据不同的统计资料显示,美国现有低于30 m的低坝79000座(另一说法为65000座),其中只有约2000座建有小水电站,水能资源被白白浪费。因此利用这些老旧低坝,增设简单易行的低水头流速发电电站,潜力十分巨大。

我国情况也有类似之处,全国现有低于30 m的低坝 8 万余座,很多都只用于灌溉、防洪,未建相应的小水电站。在小水电资源开发率超过 60% 以后,如何挖掘已有低坝和老旧水电站的潜力,开发利用创新技术更深入有效地开展扩容增效将是小水电领域今后 5~10 a 的科研重点,为此提前开展规划研究应是一项紧迫的任务。

### 3 战略性新兴产业培育与发展政策建议

#### 1) 建立战略性新兴产业培育与发展国际合作机制

与发达国家建立合作研究机制。由于德国、美国等发达国家对此已进行了长期研究,取得了初步成果;为加快我国的研究步伐,初期应考虑引进一些技术或样机,结合自主研究,逐步消化、自制,赶上世界先进行列。

#### 2) 创造培育与发展战略性新兴产业的良好环境

国家层面制订中长期研究、开发、推广超导发电机和流速发电技术在小水电站应用的规划。力争在“十二五”期末开始筹建 1 座试验电站,总结经验,以便“十三五”期间推广应用,适时配合“农村水电站增效扩容改造”的重大战略措施,发挥其“颠覆性”的增效作用。

#### 3) 支持战略性新兴产业培育与发展的财政政策

超导发电机和流速发电技术在国内还未起步,如要开展相关研究,前期投入大、风险高,效益也不明显,需要政府投入来推动。

#### 4) 优先支持战略性新兴产业的融资政策

在政府前期投入,超导发电机和流速发电技术研究取得实质性研究成果阶段,可以鼓励感兴趣的企业加入产品试制、生产及推广,对这些企业,国家应给予积极的融资政策,加大支持力度。

#### 5) 建立战略性新兴产业研究与发展专项计划

由国家层面指定“项目”牵头单位,组织超导体研究单位、水轮发电机制造单位、小水电建设研究规划设计施工单位共同合作,有效推动这一高科技项目尽快从研究到实施并进入实用阶段。

#### 6) 培养多层次的战略性新兴产业的人才队伍

要扭转“小水电技术已经成熟,靠市场力量就足以推动其发展,无需政策支持和科研投入”的片面看法;要加大科研经费投入,建立专业的科研机构,培养专业人才队伍,从事小水电技术研发。

#### 7) 完善法律与政策环境

国家要为可再生能源战略性新兴产业培育与发展创造良好的法律与政策环境,制定相关条例,建立一个法规制度体系基本建立、发展规划体系基本健全的运行体制,保障可再生能源战略性新兴产业的快速健康发展。

#### 参考文献:

- [1] Andrew Tan. Super Conductor Technology Makes Hydropower Debut[J]. Hydro Review Worldwide, 2010(7).
- [2] 陈婷,戴庆忠. 高温超导同步电机的进展[J]. 东方电机, 2011(3).
- [3] 张庆川. 液氮超导发电机的探讨[J]. 电机技术, 1997(2).
- [4] Hydro Green Energy. Hydro Green Energy's 1st Project[EB/OL]. [2012-08-06]. <http://www.hgenenergy.com/hastings.html>.
- [5] Alex Tseng. Low Head Hydroelectric Projects Can Keep America Green[R]. 2009.
- [6] 程夏蕾,赵建达. 超低水头小型水电站技术发展[J]. 小水电, 2009(2).
- [7] Mohammad Shahidepour, Alex Tseng. The Prospects of Using Instream Flow Technology to Capture Energy Spilling Over Existing Low Head Dams In USA[R], 2009.

责任编辑 赵建达