

超导电力技术新进展及其未来发展的思考*

林良真[†] 肖立业

(中国科学院电工研究所 北京 100080)

摘要 近年来高温超导材料研究取得很大进展,它在电力领域的应用研究已受到广泛关注,一些示范样机,诸如高温超导输电电缆、变压器、故障电流限制器、电机和储能装置已经研制成功并投入示范性试验.超导技术是21世纪具有战略经济意义的高新技术,文章将介绍高温超导电力应用研究的新进展及其未来发展的思考.

关键词 高温超导体,超导电力应用,超导电力技术

Recent advance and future in development of high temperature superconducting power technology

LIN Liang-Zhen[†] XIAO Li-Ye

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The high temperature superconductors (HTS) have been developed for use in the electrical power applications. Some demonstration devices based upon HTS such as transmission cables , transformers , fault-current limiters , motors and magnetic energy storage have been built and tested. It is foreseen that superconducting technology will be the prevailing high technology of 21 century. The activities in the development of high temperature superconducting power applications are summarized and thinking on the applications of superconducting power technology in future is also presented in this paper.

Keywords high temperature superconductor , superconducting power application , superconducting power technology

1 前言

超导电力技术涉及电气工程、物理学、材料科学、低温工程和自动控制技术等多门学科,是多学科交叉的一门新技术.超导电力技术与电气科学和工程联系十分紧密,许多有待研究的关键技术都包含在目前电工科学所涵盖的内容,如电能的产生、传输与储存、低温下的高电压与电气绝缘、基于电磁学的电气设备、低温下的电工测量与传感器、强场环境电磁学等.超导技术与电工学科的结合,势必进一步推动电工科学与工程的发展.

目前,许多电力装备都可以采用超导技术来提高其性能,如输电电缆、电机、变压器、储能装置等,同时,还可采用超导技术研制出常规技术所无法实

现的新型电力设备,如超导故障电流限制器等.超导电力技术的实际应用,不仅可以大大提高电器设备的单机容量和电网的输送容量并大大降低电网的损耗,而且可以明显改善电能的质量,提高电力系统运行的稳定性和可靠性,提高电网的安全性,并为电网向超大规模方向发展提供技术基础.

超导电力技术是一门有广泛应用和巨大发展潜力的高技术领域,是当代电工科学与工程重要的研究领域,也是目前国际科技发展的重要前沿.开展超导电力技术研究对推动电工学科的发展有十分重要的理论和实际的意义.

* 国家自然科学基金(批准号 50137020)资助项目
2005-07-13 收到初稿 2005-10-15 修回

[†] 通讯联系人. Email: lzlin@mail.iee.ac.cn

2 超导电力技术研究现状和进展^[1-3]

早在 20 世纪 60 年代,国际上就对超导技术在电力领域的应用给予了极大的关注,开展了一系列可行性论证和一定规模的研究,例如,开展超导同步发电机、超导储能以及超导输电等研究。但由于技术上和经济上的原因,这方面的应用研究没能实现预期的目标。80 年代,随着极细丝交流超导线的出现,许多国家对超导技术的电力应用又产生极大的兴趣,相继开展了超导电机、超导变压器、超导输电电缆和超导储能装置等的研究,并取得了实质性的进展。1986 年高温超导体发现后,人们更把超导电力应用研究的注意力转向高温超导材料。美国、日本和欧洲各国政府和相关大公司都投入大量的人力和资金,开展高温超导电力应用研究。

2.1 高温超导电缆

高温超导电缆是超导强电应用中的一个重要方面,电缆在电力设备市场份额中约占 5%—10%。由于电力电缆自场很低,约为 0.1T,目前商用的 Bi 系带材在液氮温区下的性能可以满足电缆的要求。液氮冷却的高温超导电缆与目前应用的油冷常规电缆相比,不会有因漏油污染环境和发生火灾的隐患。高温超导电缆还具有体积小、重量轻、损耗低和传输容量大的优点,从 20 世纪 90 年代起,美国、日本和丹麦等国都相继开展这方面的研究,并进行示范性实验。目前美国 Southwire,AMSC 公司等能源部和纽约州等支持下,预计在 2006 年分别研制出 200m、13.5kV/3kA,350m、34.5kV/0.8kA 和 660m、138kV/2.4kA 的三相高温超导交流电缆并将投入实际运行。近年来,日本东京电力公司(TEPCO)也一直致力于高温超导电缆的研究。2001 年东京电力公司和住友电工合作研制出 100m、1kA/66kV、输送容量为 114kVA 的三相高温超导交流电缆,并完成冷却试验、额定电流通电试验、负荷变动试验、过负荷试验和耐压试验等。TEPCO 的目标是研制出 66kV、1000MVA 的高温超导电缆为东京地区供电。2004 年,日本在经济、通商和工业省的支持下,Furukawa 电气公司和电力工业中心研究所(CRIEPI)等研制出 500m 长、77kV/1kA 单芯高温超导电缆,其目的是实验各种安装环境(如地下、过河等)下电缆的性能。此外,韩国于 2001 年制定了高温超导技术十年发展规划,韩国电工研究所(KERI)等采用美国 AMSC 的 Bi 系超导线

于 2004 年研制出长 30m、22.9kV/1.2kA 的三相高温超导交流电缆,韩国电力研究院(KEPRI)等采用日本住友生产的 Bi 系超导线,计划于 2005 年研制出 100m 长 22.9kV/1.2kA 的三相高温超导交流电缆。

“九·五”期间,中国科学院电工研究所与西北有色金属研究院和北京有色金属研究总院合作,开展了高温超导输电电缆的研究工作。先后研制成功 1m 长、1000A 和 6m 长、2000A 的高温超导直流输电电缆。在“十·五”国家高技术研究发展计划支持下,电工研究所于 2003 年研制出三相 10m、10.5kV/1.5kA 高温超导交流电缆系统。2004 年 12 月,中国科学院电工研究所与甘肃长通电缆公司等合作研制成功 75m、10.5kV/1.5kA 交流高温超导电缆,并接入到甘肃长通电缆公司 6kV 配电网中向车间供电运行。

2001 年,云南电力公司与北京英纳超导公司合资成立云电英纳超导电缆公司,从事高温超导电缆的研究开发,并于 2004 年完成 33m 长、35kV/2kA 高温超导交流电缆的开发,安装在云南普吉变电站中运行。

2.2 超导故障限流器

超导故障限流器是利用超导体的超导态—正常态转变的物理特性来达到限流目的,它融检测、触发和限流于一体,反应速度快,正常运行时的损耗很低,能自动复位,是十分理想的限流装置。在电力系统中安装超导故障限流器可大大降低短路故障电流,从而显著提高系统的稳定性和可靠性,大大改善电能质量,明显降低电网的建设和改造成本,并提高电网的输送容量。1989 年以来,美国、德国、法国、瑞士和日本等国家都相继开展了高温超导限流器(HTSFCL)的研究。2002 年,ABB 公司用 Bi2212 材料研制出 0.8kA_{rms}/8kV 电阻型高温超导限流器,它可以将短路电流从 20kA_{rms} 限制到 2.7kA_{rms},该限流器已在瑞士 Baden 的电力实验室成功地进行了试验。德国 Siemens 公司与加拿大 Hydro-Quebec 合作,1999 年完成利用 YBCO 薄膜研制 0.77kV/135A 电阻型限流器。他们在此基础上将进一步研制 1.0MVA 电阻型限流器。日本电力公司与东芝合作计划研究 500kV/8kA 超导限流器。作为第一步,首先研制了 6.6kV/2kA 限流器,并计划于 2010 年在 500kV 输电系统中配备高温超导限流器。

2002 年,中国科学院电工研究所研制成功我国

第一台新型高温超导限流器(400V/25A)。在此基础上,提出了多种新型高温超导限流器的原理。2004年,电工研究所完成50kJ/25kW超导限流-储能原理样机,并进行动态模型试验。在中国科学院知识创新工程、国家高技术研究发展计划和北京市科委等支持下,2005年中国科学院电工研究所研制成功10.5kV/1.5kA新型桥路式高温超导限流器,并于2005年8月安装在湖南娄底的110kV/10.5kV变电站中进行短路和运行试验。在进行三相短路实验中,该限流器成功地将短路电流从3.5kA限制到635A。

2.3 超导电机

超导电机是采用超导线取代常规的铜导线绕制电机的励磁绕组或电枢绕组。超导线的电流密度要比铜导线高约2个数量级且几乎无焦耳热损耗,因此在技术和经济上有一系列优点。如对超导同步发电机,其效率可比常规电机提高0.5%—0.8%;电机的整机重量可减小1/3—1/2,且体积小,电机同步电抗可减小到1/4,从而提高电机的运行稳定性。它还可省去铁芯,使电机的电枢绕组对的绝缘水平大大提高。同时,由于气隙磁通密度可比常规电机大数倍,单机容量可达百万千伏安以上。

但是,由于超导绕组必须运行在液氦或液氮温区,同时又因超导绕组电流密度大、绕组磁场高,因此,这也给电机的设计、制造和运行带来一系列新的技术问题,如超导电机的磁场绕组和电磁设计、超导绕组的阻尼屏蔽结构、超导绕组低温容器的真空绝热和密封技术和冷却、液氮输送技术以及超导绕组的稳定性和失超保护等都需要研究和解决。

迄今为止所研制的超导同步发电机只是转子励磁绕组采用超导线圈,电机的定子绕组一般仍然采用常规的铜绕组。这是因为电机的定子绕组由于是在50Hz工频下运行的,而超导体在交流运行条件下存在有交流损耗。

实用高温超导材料出现后,国际上对高温超导电机的研制也很重视。利用超导块材可以研制某些特种电机,如超导磁阻电机、超导磁滞电机等,而高温超导带材可用来绕制电动机的磁场线圈。美国海军对高温超导电机的研究给予了高度重视,并期望将来作战舰艇能采用包括高温超导电机、超导限流器、超导电缆、超导变压器在内的高温超导电力系统。美国空军也计划在新一代飞机中采用超导电机。2003年,美国超导公司AMSC和Alstom研制成功5MW高温超导单极电动机交付海军,随后在模拟船

舶上进行测试。在美国海军研究局的支持下,AMSC目前正在进行36.5MW、转速为120rpm的船舶推进用的高温超导电动机的研制,计划于2006年完成。德国Siemens公司2002年起开始研制4MVA船用同步电机,其转子超导线圈运行在25—30K温区,由G-M制冷机冷却,其制冷功率在28K下为45W,电机的定子线圈是采用常规水冷线圈。该电机于2005年研制成功并进行实验,其效率达98.7%,比常规电机高1%—1.5%。

我国在20世纪八九十年代曾开展低温超导同步发电机和超导单级电机的研制。近年来,在国家自然科学基金委员会的支持下,中国科学院电工研究所开展了高温超导电动机的应用基础研究。同时,武汉712所等也都结合将来可能的应用开展了高温超导电机的研究。

2.4 高温超导变压器

高温超导变压器与常规变压器相比有体积小重量轻的优点,它采用液氮作冷却剂,没有污染环境或火灾的隐患。高温超导变压器有很强的过载能力,在过载条件下短时间运行只导致冷却功率增加,而常规变压器过载约10%就有可能导致绝缘损坏。此外,在电力系统中采用超导变压器,当发生短路时,超导线圈还有限流的作用。20世纪90年代,美国、日本以及欧洲ABB公司等都在致力研究电力系统用的高温超导变压器,美国还计划研究容量为30MVA、变比为138kV/13.8kV、60Hz的三相高温超导变压器样机,因为这种容量和电压等级的变压器约占美国今后20年中中等容量变压器销量的50%。近年来一些国家主要致力研究特殊应用的高温超导变压器,如用于铁路机车的高温超导变压器等。2001年,德国Siemens公司已研制、试验成功用于铁路机车的1MVA高温超导变压器样机。

2003年,中国科学院电工研究所与新疆特变电工股份有限公司合作研制成功我国第一台26kVA、400V(37.5A)/16V(938A)、三相高温超导变压器。在此基础上进而研制630kVA、10.5kV(34.6A)/400V(909A)的高温超导变压器示范样机,并已于2005年12月在新疆特变电工股份有限公司并网运行试验,向车间供电。

2.5 超导磁储能

超导磁储能(SMES)是利用超导线圈作储能线圈,由电网经变流器供电励磁,在线圈中产生磁场而

储存能量. 需要时, 可经逆变器将所储存的能量送回电网或提供给其他负载用. 由于超导储能线圈几乎是无损耗的, 因此线圈中所储存的能量可以长久储存而几乎不衰减. 与其他储能系统相比, 超导磁储能具有很高的转换效率(可达 95%)和很快的反应速度(可达几毫秒). 正因为如此, 超导磁储能装置不仅可用于降低甚至消除电网的低频功率振荡从而改善电网的电压和频率特性, 而且它还可用于无功和功率因素的调节以改善系统的稳定性.

目前超导磁储能的研究主要是开发微型超导储能装置的实际应用. 美国、德国和日本等提出了开发 100 kWh 等级的微型超导储能装置的建议, 如用于磁浮列车、计算机大楼和高层建筑等用的超导储能系统. 美国 IGC 和 AMSC 的微型超导储能装置(1—10 MJ)已经商品化, 目前正在开发一种新的 D-SMES(即配电 SMES), 计划用于功率调节.

2004 年, 在中国科学院知识创新工程的支持下, 中国科学院电工研究所研制成功 100 kJ/25 kW 超导储能装置并进行实验研究. 目前电工研究所正在进行 1.0MJ/0.5MW 高温超导储能系统的研制, 计划于 2006 年进行该超导储能系统的系统集成及并网试验运行. 近年来, 清华大学、华中科技大学、华北电力大学都在开展超导储能系统的研究. 清华大学与保定天威集团公司合作, 于 2003 年 9 月研制完成 0.3MJ 超导储能磁体, 在此基础上于 2004 年 5 月完成 0.3MJ/150kVA 可控超导储能快速 UPS 系统. 华中科技大学也研制了 35kJ/7kW 直接冷却高温超导储能系统并将进行动态模型实验.

近年来, 中国科学院电工研究所等还开展了高温超导电磁物理基础、高温超导电力装置及其电磁特性以及含高温超导电力装置的电力系统稳态与动态控制策略等应用基础研究, 为进一步发展高温超导电力应用奠定基础.

总的说来, 我国超导电工技术在应用基础和实际应用研究方面都取得了很大进展, 在新超导材料探索 and 高温超导与机理有关的物理问题研究方面有新的贡献, 这些研究成果对高温超导技术应用也有一定价值. 我国在高温超导基础研究中, 一些研究成果是处于国际前沿水平, 并是原创性的. 在应用研究中, 不仅研制了出一些实用样机, 而且还提出一些新原理和新应用. 多年来, 还培养了一支优秀的科技队伍, 提高了我国超导电工技术的研究水平和创新能力. 但与国际先进水平相比, 我国有原创性的研究成果还较少, 应用研究大多处于实验研究阶段.

3 超导电力技术未来发展的一些思考

(1) 我国电力系统快速发展始于 20 世纪 70 年代末, 1978 年至 2002 年的 24 年间, 电力系统加速发展, 全国发电装机容量以平均每年 8.3% 的速度增长, 发电量以平均每年 8.16% 的速度增长. 到 2002 年底, 全国发电设备装机容量和发电量已居世界第二位, 装机总容量达 3.56 亿 kW, 2004 年装机总容量进一步达 4.4 亿 kW, 预计 2020 年我国总装机容量将达 9—9.5 亿 kW. 我国发电能源结构是一个以煤电和水电为主的状况, 水力资源大多集中在西南和西北, 煤炭资源集中在陕西、山西和内蒙西部这“三西”地区, 而大约 60% 的负荷则位于东部、南部沿海地区, 特别是京津唐、长江三角洲和珠江三角洲这三大负荷地区. 根据我国负荷分布、发电能源的结构和位置情况, 我国未来的电力流向必然是“西电东送、南北互供、全国联网”的格局. 预计 2020 年时, 西电东送的容量将达 1—1.3 亿 kW 左右(2030 年时将达到 1.7 亿 kW), 送电距离最长将达 2000km 左右. 2020 年, 预计南北互供能力也将达到 1000—1600 万 kW. 目前我国电力部门正在研究交流特高压输电(1000—1150kV 等级)和 ± 750 kV 直流输电的可行性及其技术问题. 当前, 我国电网相对薄弱, 电网的安全稳定性和供电可靠性仍然是电力系统面临的主要问题, 而目前的技术已不能适应大规模西电东送和全国联网的要求, 因而我国未来电力系统发展将面临非常严峻的挑战^[4].

随着高温超导材料和超导技术的发展, 超导电力技术将是本世纪电网技术发展的一个重要方向. 超导电力技术的应用将大大提高电力工业的发展水平, 促进电力工业的重大变革, 是对未来电力系统最具影响的新技术^[3]. 最近在美国和欧洲出现的多次大停电事故, 使得西方政府和工业界加快了超导电力技术的研究开发和产业化的步伐. 因此, 我们应对未来电力系统发展有重要影响的超导电力技术给予充分的重视, 制定适合我国国情的超导电力技术研究战略发展规划, 积极组织研究部门和工业应用部门, 共同开展超导电力技术及其应用的研究. 否则, 难以适应未来我国电力系统的变化和要求.

(2) 目前, 高温超导电力装置都是采用 Bi 系带材制造. Bi 系带材的制造工艺已比较成熟, 性能也可满足一般应用要求, 如美国超导公司生产的高强度 Bi 系带材(4.0—4.4)mm × (0.29—0.33)mm]

的临界电流密度 $I_{c0} \geq 115 \text{ A}$, 临界拉应力可达 300 MPa (77K), 临界拉应变可达 0.35% (77K), 单根长度可达 400 m , 甚至达 1000 m . 但是在液氮温区, Bi 系带材的电流密度随磁场增加下降很快, 同时具有明显的各向异性. 因此如采用 Bi 系带材绕制磁体并要产生几特斯拉的磁场, 必须在更低的温区下运行, 如 $20\text{—}30 \text{ K}$. 另外, Bi 系带材目前价格仍然很高, 对 $100\text{—}200 \text{ m}$ 长的 Bi 系带材, 其价格仍为 $100\text{—}150 \text{ 美元/kA}\cdot\text{m}$ 左右, 远没有达到原先提出的 $10 \text{ 美元/kA}\cdot\text{m}$ 的目标, 而近期很难进一步降低. 为此, 美、日等国目前都在致力发展第 II 代高温超导带材.

目前第 II 代高温超导带材主要是 Y 系涂层高温超导带材. Y 系超导体就其性能而言, 要比 Bi 系超导体高, 如 YBCO 薄膜临界电流密度在 77 K 下可达 10^6 A/cm^2 量级, 比 Bi 系带材高二个数量级, 而且在 77 K 下其磁场特性也远优于 Bi 系材料, 交流损耗也比 Bi 系材料低. 但是, 由于 Y 系材料的弱连接比较严重, 很难制备出像 Bi 系材料那样的带材. 尽管如此, 自 20 世纪 90 年代以来, 人们还是不断努力寻找各种方法来制备 YBCO 带材. 2001 年 6 月, 日本 Fujikura 公司制备出 10 m 长的 YBCO 带, 其电流密度达 $4.2 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ (77 K , 0 T). 目前美国超导公司已制备出 90 m 长的 Y 系涂层高温超导带材, 其临界电流可达 168 A/cm-w (77 K , 自场). 根据日本和美国的计划, 到 2007 年左右, 将制备出 500 m 长、临界电流达 300 A/cm-w 、制备速率为 5 m/h 的 Y 系涂层高温超导带材并实现商品化, 其价格预测可降到约 $50 \text{ 美元/kA}\cdot\text{m}$. 根据最新报道, 日本于 2005 年 8 月研制出 250 m 长、临界电流达 248 A/cm-w 的 Y 系涂层高温超导带材. 日本提出研制 Y 系涂层高温超导带材的最终目标是: 临界电流 $I_c > 500 \text{ A/cm-w}$ (77 K , 自场) 和 $> 50 \text{ A/cm-w}$ (77 K , 3 T), 交流损耗为 0.1 W/m , 机械强度 $> 800 \text{ MPa}$, 制备速率达 $20\text{—}30 \text{ m/h}$, 价格降到 $1\text{—}4 \text{ 日元/A}\cdot\text{m}^{[5]}$. 人们期望在不远的将来, 第 II 代高温超导带材在 77 K 下的性能最终有可能达到或接近传统的低温超导材料如 NbTi 在 4.2 K 下的性能. 因此第 II 代高温超导带材的发展和实际应用将会进一步促进超导电力技术的发展^[2].

MgB_2 是最近发展起来的新的超导材料, 超导转变温度为 39 K . 它是一种金属间化合物超导材料, 与 Bi 系超导材料相比, 具有各向异性较弱, 其传输电流基本不受晶界连通性的限制, 且制备工艺比较简单、价格低廉, 人们普遍认为它是一种很有应用前景

的超导材料.

目前, MgB_2 制备技术有很大进展, 已可制备出千米长的铜基 MgB_2 带材, 其临界电流可达 200 A (1 T , 20 K). 意大利 Ansaldo 公司正用这种铜基 MgB_2 带材绕制 MRI 的线圈, 其中心磁场为 0.5 T , 计划用它取代 0.25 T 的永磁 MRI 磁体, 并将于 2006 年开始投放市场.

超导电力技术的发展与超导材料研究密切相关, 我国在低温和高温超导材料研究方面都有很好的基础. 早在“九·五”期间, 我国就已开展第 II 代高温超导带材的研究工作; “十·五”国家高技术研究发展计划中也安排有 YBCO 带材研究项目. 但由于投入不足, 设备落后, 以致研究进展缓慢. 考虑到我国电力系统发展和超导电力技术发展的需要, 有必要大大加强第 II 代高温超导材料及其他新材料的研究. 目前, Y 系涂层高温超导带材和 MgB_2 线材都取得了令人瞩目的进展, 日本等也计划在 2006 年加紧高温超导的应用研究, 包括输电电缆、变压器、电机、限流器以及超导储能装置. 因此我国也应抓紧时机, 加速研制第 II 代高温超导材料, 以促进高温超导电力装备及应用的研究, 为满足我国电力事业日益发展的需要作出应有的贡献.

(3) 超导技术的应用与低温技术是分不开的, 超导体只有处在一定的低温环境中才可能具有超导性. 例如目前实用低温超导材料 NbTi 和 Nb_3Sn 的临界温度分别为 9.5 K 和 18.1 K , 因此, 一般它们要在液氮 (4.2 K) 温区下运行. 而目前的高温超导材料, 如 BSCCO 和 YBCO, 它们的临界温度分别为 110 K 和 90 K , 用它们制造的超导装置或器件, 一般也需在液氮 (77 K) 温区下运行. 因此, 需要为超导技术的应用提供合适的低温运行条件, 它是超导装置的一个重要且不可分割的部分. 低温技术直接关系到超导装置的效率和安全可靠性, 是超导技术能否实际应用的关键之一. 过去曾有不少超导装置就是因为低温技术不过关而不能发挥作用, 如前苏联的 300 MVA 的超导发电机、美国底特律的 120 m 长的高温超导输电电缆等未能投入实验或运行, 其主要原因都是低温系统出现问题.

超导装置的冷却技术对超导装置的应用是至关重要的. 超导装置冷却方式通常可以采用直接用冷却剂如液氮或液氦来冷却, 也可以采用制冷机直接冷却. 目前大型的液氮制冷机的制冷量 (4.2 K) 已可达数千瓦, 可以提供足够的液氮满足大型超导装置冷却的需要. 但是, 采用液氮或液氮浸泡冷却时不可

避免会有热损耗(电流引线和低温容器等的热损耗),因此在运行过程中要经常补充液氦或液氮,这给超导装置的运行带来很大的不便,特别是对运行在高电压下的超导电力装置.采用制冷机直接冷却超导装置可以解决运行过程中补充冷却剂的问题.目前,小型蓄冷型制冷机如 G-M 制冷机在 4.2K 下制冷量已达 2W,在 77K 下也可达数百瓦的水平,基本上也可以满足超导应用的要求^[2].在国际上,这些制冷机已是商品,但价格还是比较昂贵,使用寿命、可靠性等离电力应用的要求还有一定距离.国内目前大都处于研发阶段,有的虽有试制产品,但性能和可靠性都有待提高.

低温容器是保证超导装置或器件能长期、稳定地处于所需的低温环境中的关键设备,而且在超导装置运行时不能对其参数和性能有所影响.特别在电力系统中运行的超导设备,往往要求低温容器用无磁材料制成,以避免在低温容器中感应涡流并影响容器中超导磁体的磁感应强度等参数.目前用无磁材料如环氧玻璃纤维制成的低温容器,不论在性能上或价格上,离实用要求都有很大的距离.

低温与超导技术的关系不是简单地地为超导装置提供低温容器和制冷机的关系.低温技术直接关系到超导装置的效率和安全可靠性,目前我国低温技术发展水平还不能满足超导电力应用的要求,必须在发展超导应用研究的同时,重视低温冷却技术的研究与发展.

(4)发展超导电力技术是符合电力工业发展的需要的,高温超导电力技术的应用将是电力技术发展的根本趋势.根据电力系统发展的需要和高温超导技术的进展,对高温超导电力技术未来发展及应用有以下设想和建议:

高温超导限流器应从开发适用于配电网的示范样机开始,逐步向用于高压输电网(电压等级 110kV 及以上)的限流器方向发展.根据不同的要求,进一步开展超导限流器的新原理的研究;

高温超导电缆将主要发展应用于短距离大电流的场合,如城市配电、发电厂、变电站母线、电镀电解行业等;

超导储能系统则主要是发展小型分布式储能系统,主要用于改善用户端的电力质量和供电可靠性,

同时也将用于输电网以改善电网的稳定性;

超导电动机的主要应用对象是大型舰船的电力推进系统,而超导同步发电机的应用对象主要是电网的同步调相,对电网进行无功功率补偿,以改善电压品质和电网的稳定性;

对于超导变压器,首先将在一些特殊场合,如地下变电站、电力机车或舰船获得应用.由于这些场合对电气设备的占空有严格限制,高温超导变压器将能发挥其体积小优势.

正如国际电力工业界所认为的那样,超导电力技术和电力电子技术是电力工业的两大发展方向.因此,有机地结合超导电力技术和电力电子技术的优势研究新型 FACTS 装置也将是超导电力技术的重要发展方向之一.

目前,超导电力技术的各方面应用已经进入示范试验阶段,部分技术已经开始步入商品化阶段.因此,在 2007—2008 年期间,随着实用化的第 II 代高温超导带进入市场,高温超导电力技术的发展将会开始出现快速增长,所以今后 5—10 年是在超导电力技术产业的国际竞争中取得优势的关键时期.

电气化是现代社会发展水平的重要标志,电力作为基础能源和现代社会息息相关.超导电力技术是一门有广泛应用前景和巨大发展潜力的高技术,超导电力技术的实际应用势必将在电力系统中引发革命性的技术变革.

参 考 文 献

- [1] 林良真. 电工技术学报, 2005, 20(1):1 [Lin L Z. Transactions of China Electrotechnical Society, 20(1):1 (in Chinese)]
- [2] Narlikar A V. High Temperature Superconductivity. Berlin: Springer, 2004
- [3] Hull J R. Rep. Prog. Phys., 2003, 66:1865
- [4] 周小谦. 关于中国电网的发展与技术装备水平的提高. 见: 中国电工技术学会编. 电气技术发展综述. 北京, 2004. 1 [Zhou X Q. Development of Electric Network in China. In: China Electrotechnical Society. Summary of Development on Electrical Technique. Beijing, 2004. 1 (in Chinese)]
- [5] Shiohara Y. Highlights of Coated Conductor Development in Japan. Presented at 7th European Conference on Applied Superconductivity. Vienna, 2005