

超导电力技术即将带来电力工业的革命*

肖立业 林良真

(中国科学院电工研究所 北京 100080)

摘要 人们认为,超导体在电力方面出现大规模应用的时间距离我们还非常遥远.然而,随着最近几年来实用高温超导材料的研制取得重大的进展,高温超导电力技术的应用已经成为现实,预期将在2010年左右出现大规模的应用,并将带来电力工业的革命.因此,下一个10年将是国际超导技术竞争最关键的10年.我国的经济发展很快,电能需求量增加十分迅速,对电能质量的要求也越来越高.常规电力技术已经无法满足我国电力发展的需要,超导电力技术是实现我国电力发展目标的必由之路.文章有代表性地介绍了超导电缆、超导限流器、超导磁储能系统、超导变压器和超导旋转电机等的基本工作原理及研究发展历史,并着重介绍高温超导电力应用研究的现状、应用前景、经济可行性及基本物理问题.

关键词 超导电缆,超导限流器,超导磁储能系统,超导变压器,超导电动机,超导发电机

SUPERCONDUCTING POWER TECHNOLOGY WILL LEAD THE POWER INDUSTRY REVOLUTION

XIAO Li Ye LIN Liang Zhen

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

Abstract Since high T_c superconducting (HTS) tapes for practical applications became commercially available over the past few years, the development of superconducting power technology has achieved significant progress. It is foreseen that superconducting technology will be the prevailing high technology of the 21st century, and that superconducting power equipment will be commercialized soon, enjoying a large-scale worldwide market before 2010. China's economy is expanding fast, and the demand for electricity is increasing quickly. At the same time, higher electricity quality will be required. Traditional power technology will no longer be able to satisfy future requirements, so superconducting power technology would be the best solution, leading a revolution in the power industry. The history, present status and prospects of superconducting power technology as well as the economic benefits and basic physics problems involved are reviewed.

Key words superconducting power cable, superconducting fault current limiter, superconducting magnetic energy system, superconducting transformer, superconducting motor, superconducting generator

1 引言

随着经济和社会的发展,人们对电能的需求量日益增长.根据预测,到2000年、2010年和2020年,我国的装机容量可分别达到300GW、550GW和800GW.目前,我国的燃煤发电量约占总发电量的75%,水力发电量约占总发电量的23%,核电、太阳能发电和风力发电等约占20%.其中水力发电站大多集中在西、南部地区,燃煤发电站的多数靠近煤碳资源比较丰富的地区.电能消耗情况是:电动机的电能消耗量占总发电量的60%—70%,而负荷中心大

多数在中、东部及沿海地区.

电能需求量的日益增长使得电力系统的容量越来越大,与此同时人们对电能质量的要求也越来越高.为了改善电能的质量并提高电力系统的稳定性和可靠性,要求电力系统各部分电气紧密连接,从而使电力系统向更大规模的方向发展.加上我国电力资源的分布不均和负荷分布不均所造成的矛盾日益突出,使得长(远)距离高压输电成为必要.因此,我国电力系统的发展趋势是:电力系统的容量越来越

* 中国科学院和教育部留学回国人员科研启动经费支持项目
1999-09-29收到初稿,1999-10-15修回

大,电网向超大规模方向发展,在不远的将来,我国各地区的电网将联成一体.三峡电站建成运行后,这一趋势将更为明显.

然而,由于常规电力设置和电力系统自身存在着如下一些缺陷,严重地阻碍了电力系统的发展:

第一,随着电网容量的增加和规模的不断扩大,电力系统的短路容量越来越大.一般情况下,短路电流约为额定电流的 20 倍.不加限制的短路电流对电气设备和正常的工业生产带来很大的危害,这种危害甚至可能是灾难性的,因为短路电流在许多电气设备中会产生高温和很大的洛伦兹力,它所引起的电压和频率不稳定性将对某些用户产生严重的后果.不仅如此,巨大的短路电流还可能导致电力系统的崩溃.目前,在配电系统中广泛采用的快速熔丝不具备自动复位的功能,在输电系统中尚无有效的限流设备.从电网的结构上和运行方式上入手来降低短路电流,其造价非常昂贵.目前,对付短路故障的办法是用最先进的六氟化硫(SF_6)断路器直接开断故障线路,这是一种被动的对付短路故障的方法.目前, SF_6 断路器的最高开断容量约为 63kA,要进一步提高其开断容量是非常困难的.由于受现行技术的限制,要扩大电网的输送容量与规模,必须对短路电流采用有效的限制措施.

第二,常规发电机组的过载能力较低,并且电力系统中缺乏能对功率振荡和功率失衡作出快速反应(或补偿)的功能设备.这就使得电力系统的功率只能维持基本的相对的平衡.因此,一旦电力系统发生扰动特别是较大的扰动(如短路故障),可能导致严重的功率失衡,从而引起系统崩溃并对电力系统产生破坏性的危害.常规电力系统是依赖于机组的惯性.继电保护和自动控制来保持系统的稳定性,这一做法已经不能适应电力系统发展的需要,必须寻找新的致稳思路,以缓和甚至消除电力系统中的扰动所造成的影响.

第三,常规电力系统的效率受到铜、铝等基本导电材料的限制,要进一步提高难度很大.我国电网的功率损耗约占总发电量的 8.5%,这是一笔巨大的浪费.1997 年,我国发电容量约为 200GW,电网的功率损耗达到 17GW,相当于一个三峡电站的发电容量.预计到 2010 年,我国的总发电容量将达到 550GW,电网的总损耗将高达 47GW.目前,我国发电量的 75%来自燃煤发电,而燃煤发电会带来环境污染问题.通过显著降低电网的损耗,不仅可提高效率,而且可降低燃煤发电量,从而减少污染排放量.

第四,常规电气设备占地面积大,而人口密集的大中城市正是负荷中心.我国是一个人口大国,土地紧缺,而人口多集中在中、东部地区.一方面,随着经济的不断发展,城市人口和较发达的地区人口密度会越来越高.另一方面,随着电能需求量的不断增长,城市和中、东部地区对电网建设占地的需求量也越来越大.要解决这一矛盾,必须使电力系统有根本性的变化.

第五,可再生能源如太阳能发电、风力发电和潮汐能发电的能量密度低,并且容易受气候条件的影响.要使这种能源得到充分有效的利用,必须采用新的技术措施改善其品质,并使其能更为有效地与大电网联结.

采用超导电力技术,不仅可以大大提高单机容量和电网的输送容量,大大降低电网的损耗,而且还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,降低电压等级,提高电网的安全性,降低电网的占地面积和电网的造价及改造成本,并使超大规模电网的实现成为可能.不仅如此,通过大容量的超导输电系统,可将排污的发电厂建在煤矿和油田附近,或将核电站建在比较偏远的地区,从而改善人类生存环境的质量.通过超导储能,还可大大改善可再生能源的电能质量,并使其与大电网有效地联结.

2 超导电力应用研究发展概况

1908 年,荷兰莱顿实验室的 K. Onnes 成功地将氦气液化,并于 1911 年研究汞在低温下的电阻率随温度的变化时发现了超导现象.在随后的近半个世纪中,人们发现成千上万种材料在不同的临界温度($\sim \text{mK} - 23.2\text{K}$)以下可以转变为超导体(即低温超导体).直到 60 年代,实用的非理想第二类超导材料 NbTi 和 Nb_3Sn 陆续被发现后,超导电力应用的研究才得以全面地开展.这个时期,高场超导磁体技术获得了突破性的进展;各种超导电力设备的原理性研究结果和模型相继出台.当时,由于超导线的交流损耗太大,超导电力应用的研究发展比较缓慢.80 年代初,低交流损耗的极细丝复合多芯 NbTi 超导材料研制成功后,超导电力应用的研究再次活跃起来.

1986 年,IBM 瑞士研究中心的 J. G. Bednorz 和 K. A. Müller 发现了 La 系高温超导材料.随后的两年时间里,“高温超导热潮”象厄尔尼诺现象一样

席卷全球, Y 系、Bi 系和 Tl 系高温超导材料(临界温度为 85—125 K)相继被发现. 高温超导电力设备可在液氮温度运行(77 K), 与低温超导电力设备相比(运行于液氮温度 4.2 K), 不仅运行成本大大降低, 而且磁-热稳定性大大提高. 在“高温超导热潮”的推动下, 很多国家和跨国公司都制定了各自的超导技术发展战略. MIT 的科学家迅速组建了美国超导公司(ASC), ASC 在 Nasdaq 上市, 的股票十分抢手. 继 ASC 之后, 美国又有几家超导技术公司相继成立.

自那次“科学厄尔尼诺”现象以来, 实用化高温超导材料的研究已经取得了长足的进展. 与此同时, 高温超导电力应用的研究蓬勃地开展起来, 而低温超导电力应用的研究则相对萎缩了. 在过去 10 多年的超导技术研究中, 政府的投入仍占主要部分, 研究工作的大部分也在高等学校和研究机构进行. 近几年来, 美国、日本和欧洲各国政府以及世界各大公司投入了大量的人力和资金, 用于超导电力应用的研究. 在 21 世纪即将来临之际, 超导电力技术产业化的呼声越来越高. 储能量为 1—10 MJ 的小型低温超导磁储能系统(SMES)已经商品化, 高温超导限流器也即将商品化, 高温超导电缆将于近期在发电厂和变电站得到实际的应用, 高温变压器已成功通过了试验运行, 高温超导磁储能系统和旋转电机也有相应的模型问世.

2.1 实用高温超导材料的发展现状

性能良好的超导材料是超导电力应用的基本前提, 所以在介绍电力应用之前, 先介绍一下实用超导材料的发展现状. 实用低温超导材料已经完全产业化, 各种低温超导磁体已经商品化. 多年来的实践表明, 低温超导材料在电力技术方面的实际应用的空间比较有限, 超导电力技术应用前景将主要取决于高温超导材料的发展情况.

目前, 粉末套管法(PIT)是制备 Bi 系复合导线的流行工艺, 采用 PIT 制备长 1.0—3.0 km 的银(或银合金)基 Bi 系多芯复合导线的技术已经比较成熟. 临界电流密度(J_c)为 100—200 A/m²(77 K, 自场), 长度为 1 km 左右的 Bi 系多芯复合导线开始商品化. ASC、IGC、丹麦 Nordic 超导技术公司(NST)和澳大利亚金属制造公司(MM)等都能提供多种复合高温超导线, 其价格约为 600—900 美元/kA·m. 表 1 列出了几种电力设备和高场磁体对复合导线性能的要求. 由表 1 可见, 复合高温超导线的 J_c 、长度等已经基本上达到了电力应用的要求, 从而为开展

电力应用的研究奠定了基础. 随着复合高温超导线成材工艺的改善, 其性能可望进一步提高, 价格可望在几年内大幅度降低.

表 1 几种高温超导电力设备和高场磁体对高温超导复合导线性能的要求

设备名称	J_c /A/m ² (77 K, 自场)	I_c /A (77 K, 自场)	磁场 / T	运行温度 / K	交流损耗 / m W/A·m	弯曲半径 / m	弹性应变 / %	导线长度 / m
超导限流器	10—100	100	0.3—3	40→65 ¹⁾	0.4	0.15—0.05	0.2—0.4	200—1000
超导电动机	100	300	4	> 25	N/A ²⁾	0.05	0.2—0.3	1000
超导发电机 (100 MVA)	10	100—200	4—5	20→65	N/A	0.1	< 0.2	500—1000
超导电缆	10—100	30 ³⁾	< 0.2	> 65	0.15	0.01	> 0.4	100—1000
超导变压器	10—100	200 ⁴⁾	0.15	20—65	0.25	0.1—0.2	0.1	250—3000
超导磁体	10—1000	300—500	> 20	4.2→65	N/A	0.01	0.5	500—1000

1) 箭头表示商用之前的值至具有商业价值将到达的值; 2) 在相应磁场下的数值尚未得到; 3) 只表示单根导线应达到的临界电流; 4) 数字下划线表示相应应用的最高要求

2.2 超导电缆

由于采用无阻的、能传输高电流密度的超导材料作为导体, 所以超导电缆具有体积小、重量轻、损耗低和传输容量大的优点. 采用超导电缆后, 电网的电压等级可以大大降低. 计算表明, 额定传输容量越大, 输电距离越远, 则超导电缆在经济上越具竞争优势. 因此, 超导电缆更适合大容量长距离输电.

1961 年, McFee 首先设计了利用 Nb 作为导体的 200 V、100 GVA 的直流电缆和用 Pb 作为导体的 3 kA、600 MVA 的单相交流同轴电缆. 1975 年至 1985 年, 美国 Brookhaven 国家实验室(BNL)在美国能源部(DOE)和费城电力公司的支持下, 开展对 Nb₃Sn 超导电缆的研制. 他们采用双螺旋结构, 先后研制出 3 根长 10 m 的交流电缆, 并研制出 1 根长 115 m、135 kV、1000 MVA 的同轴交流电缆. 与此同时, Los Alamos 国家实验室(LANL)则研制出长 300 m、100 kV、5000 MVA 的直流 Nb₃Sn 电缆, 损耗小于输送容量的 0.1%.

1986 年, 高温超导材料发现后, 随着银基 Bi 系高温超导材料的性能的提高, 发达国家相继开展了对高温超导电缆的研制. 在 DOE 的支持下, 1996 年美国电力研究所(EPRI)和 Pirelli 电缆公司及 Southwire 公司采用 ASC 的 Bi-2223/Ag 带状导线合作研制出长 30 m、115 kV、2 kA 的三相交流高温超导电缆模型, 其目标是研制 1 km 的高温超导电缆.

据最近的《High T_c Update》一刊报道, Southwire 将于近期安装一段长 30 m、12.5 kV、1.25 kA 的三相高温超导电缆试验线, 并将在 Carrollton 的 3 个电站安装类似的电缆。Pirelli 电缆公司的近斯目标是 2000 年在底特律 Edison 变电站安装一根长 130 m、24 kV、2.4 kA 的三相交流 HTS 电缆, 以取代现有的 9 根铜电缆。与原来的 9 根铜电缆相比, 该 HTS 电缆的总直径减少 66%, 总重量由 8170 kg 减少到 110 kg。近年来, 日本东京电力公司 (TEPCO) 也一直致力于 HTS 电缆的研制。1995 年, 他们研制出长 7 m、66 kV、1 kA 的三相交流电缆, 其阻抗为常规电缆的 10%。1997 年, 他们又研制出长 50 m、2 kA 的交流电缆。测试表明, 该电缆在加 1.73 m Ω 负载时的交流损耗为 0.28 W/m。图 1 是该电缆的概貌。TEPCO 的目标是研制出 66 kV、1000 MVA 的 HTS 电缆为东京地区供电。1998 年, 在国家超导中心的支持下, 中国科学院电工研究所、北京有色金属研究院和西北有色金属研究院合作研制出我国第一根长 1 m、1 kA 的单相直流高温超导电缆。目前, 我们正在研制长 6 m、2 kA 的高温超导电缆, 预计将于 2000 年完成该电缆的全部研制工作。中国科学院电工研究所已经开始与江苏新远东电缆公司合作研制实用型高温超导电缆, 以用于短距离内传输大电流的场合, 如电镀厂、发电厂和变电站等。



图 1 日本东京电力公司 50 m 长、2 kV 的高温超导电缆

2.3 超导限流器

当电力系统发生短路故障时, 线路的短路电流

将迅速增加。如果不采取任何措施, 短路电流可达到额定电流的 20 倍左右。巨大的短路电流对电力系统的稳定运行和电气设备会带来严重的威胁。超导限流器 (SFCL) 是短路电流的克星。当线路的电流超过超导体的临界电流时, 超导体失超, 从而在线路中迅速串入一个电阻, 这样短路电流就会被有效地限制。基于这种工作模式的 SFCL 叫电阻型超导限流器, 其工作原理如图 2 所示。

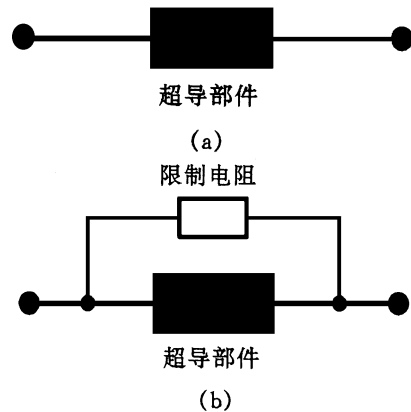


图 2 电阻型超导限流器原理

SFCL 的另一种工作模式是感应模式: 初级线圈 (常规线圈) 和次级回路 (超导线圈或超导屏蔽圆筒) 紧密耦合, 线路的电流流经初级线圈, 次级回路短接。正常运行时, 初级线圈在铁心中产生的磁通几乎完全被次级超导回路所产生的反向磁通抵消。因此, 正常运行时, 初级线圈对线路的电流表现为一个很低的阻抗。当发生短路故障时, 流经初级线圈的电流迅速增大, 相应地, 次级回路的感应电流也迅速增大。当次级回路中的电流大于临界电流时, 次级回路失超。这时, 次级回路不再是无阻的了, 初级线圈产生的磁通不能被次级回路的感应磁通完全抵消, 所以初级线圈对线路的电流表现为一个高阻抗, 从而使短路电流得到有效的限制。当故障消除后, 线路的电流减少, 次级回路恢复到超导态。图 3 是一种感应模式的超导限流器的原理图。

在电力系统中安装 SFCL, 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。SFCL 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, 克服了熔断器只能使用一次的缺点。

1974 年, O. K. Maward 和 L. D. McConnell 分别申请了有关 SFCL 的专利, 美国阿贡实验室和 EPRI 率先对电阻型 SFCL 进行了研究。1983 年, 低损耗极细丝 NbTi 多芯复合导线的问世使得超导体在

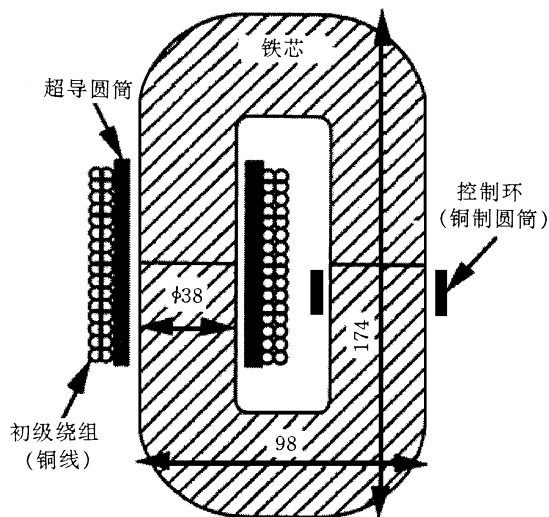


图3 一种感应式超导限流器原理

SFCL 方面的应用研究活跃起来,工业发达国家相继开展了这方面的研究工作,提出了多种 SFCL 的原理和方案,并对原型 SFCL 进行了试验研究.经过多年的研究,面向配电系统的低温超导限流器(LTSFCL)的研究取得了一些重要的进展.1994年,东芝公司采用极细丝 NbTi 交流复合导体研制成功 6.6kV/2.0kA 的 SFCL.测试结果表明,该限流器的反应时间为 0.1ms,它可将短路电流从 25.8kA 限制到 4.0kA.图4是该限流器的限流特性曲线.GEC Alstom、法国电力公司和 Alcatel Alstom 研究所合作,对电阻型 LTSFCL 进行了综合研究.1993年,他们研制成功一台 7.2kV/1kA 的电阻型 SFCL,该 SFCL 能将短路电流从 20kA 限制到 3.0kA,其反应时间约为 5ms.1995年,该研究组又研制成 40kV/315A 的 SFCL,它可将短路电流从 11kA 以上成功地限制到 1.1kA 的水平.

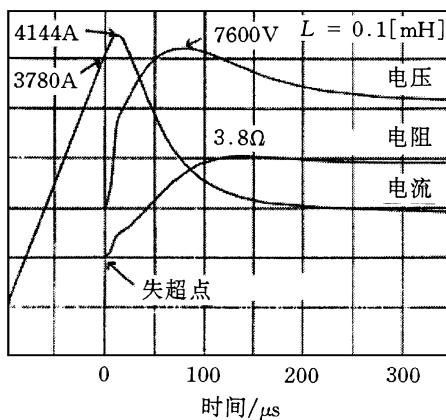


图4 日本东芝公司 6.6kV/2kA 低温超导限流器的限流特性曲线

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.ABB 瑞士研究中心一直从事屏蔽型 HTSFCL 的研究.1996年,他们利用高温超导体烧结成的圆环作为次级回路,成功研制出一台 1.2MVA 三相 HTSFCL.该限流器成功地通过了 60kA 的短路试验,它可将短路电流限制到约 700A,并已在在一个电厂成功地试验运行了近两年.ABB 公司正在研制闭环冷却的 10MVA 三相 HTSFCL,预期将很快会投入实际运行.1995年,美国 Lockheed Martin 公司(LMC)与 ASC,LANL 等合作,研制成一台 2.4kV/2.2kA 的 HTSFCL.该限流器在加州成功地通过了 6 周的试验运行,其反应时间为 8ms,并对相隔 800ms 的两个连续短路故障(每一故障持续 400ms)作出了成功的反应,并能将短路电流降低约 60%.LMC,ASC 和 IGC 已经研制成功 15kV/10.6kA 的 HTSFCL,该 HTSFCL 已成功地通过了试验.LMC,ASC 和 LANL 正在合作研制 15kV/20kA 的 HTSFCL,已于 1999 年 7 月在美国加州 Edison 变电站投入试验运行.在我国,中国科学院电工研究所已成功研制出一台 1kV/100A 的 SFCL 样机,并与北京开关厂合作开展了 7.2kV/400A 的 HTSFCL 的研究,以将 SFCL 与无触点开关配合使用.中国科学院电工研究所还与中国长江三峡开发总公司下属的宜昌能达通用电气公司签订了研制实用型 HTSFCL 的合作协议,以期在三峡第一期工程中采用 HTSFCL,解决现有断路器开断容量不足的问题.经过多年的研究开发,面向配电系统的 HTSFCL 已接近实用的水平,适应于供电系统和输电系统的 HTSFCL 研究也在计划中.LMC,TEPCO 和东芝公司等国际大公司已将 HTSFCL 的产业化提上日程.TEPCO 用于 SFCL 的研究经费是每年 100 万美元,并计划 2010 年在 500kV 的输电系统中配备 HTSFCL.

2.4 超导电机

超导电机包括静态超导电机(即超导变压器)与旋转超导电机(即发电机和电动机).由于采用超导绕组,运行电流密度和磁通密度大大提高.因此,与普通电机相比,超导电机具有体积小(小于常规电机体积的 50%)、重量轻、损耗低、效率高(可达 99%以上)、极限单机容量大、长时过载能力强(可达到额定功率的 2 倍左右)的优点.对于超导发电机来说,同步电抗可减少到常规电机的 1/3 到 1/4,所以其运行的稳定性也将大大提高.研究表明,单机容量越大,则超导电机在经济上越具竞争优势.

早在 60 年代,国际上就开展了对超导电机的研究.当时,由于超导线的交流损耗较大,研究工作进

展不大.80年代初,低损耗的极细丝复合多芯超导材料研制成功后,超导电机的研究出现新的进展.1983年,法国 Alsthorm 公司研制出一台 220kVA 的低温超导变压器.与普通变压器相比,该超导变压器的铁芯重量减轻 91.5%,铁芯损耗减少 85%,总损耗减少 55%.80年代中,美国 Westinghouse 公司、日本埼玉大学等作过 1000 MVA、500kV 级的低温超导变压器的概念设计,并作过一些原理性的模型样机的研究.

1987年后,有关超导变压器的研究大多逐步转入高温超导变压器.1997年4月,ABB在日内瓦电力公司的一家电厂安装了一台 18.7kV/420V、630kVA 的三相 HTS 变压器,并成功通过了测试和试验运行.该变压器采用 ASC 的 Bi-2223 银基复合超导导线制成.ABB 计划在 2001 年完成 10 MVA 的 HTS 变压器的研制任务.日本九州大学研制了一台单相 6.6kV/3.3kV、500kVA 的 HTS 变压器,运行于 77K,效率为 99.1%.当运行于 66K 时,容量可提高到 800kVA,而效率可进一步提高到 99.3%.图 5 是该变压器的外形图.日本九州技术研究所与住友电气公司合作研制的 500A 高温超导变压器已经成功地用于实验室的高温超导线的交流特性的研究,与一台常规的用于该项实验研究的电源相比,其重量减少了 97%.美国 IGC 公司和 Waukesha 公司正在合作研制容量为 30 MVA、变压比为 138 kV/

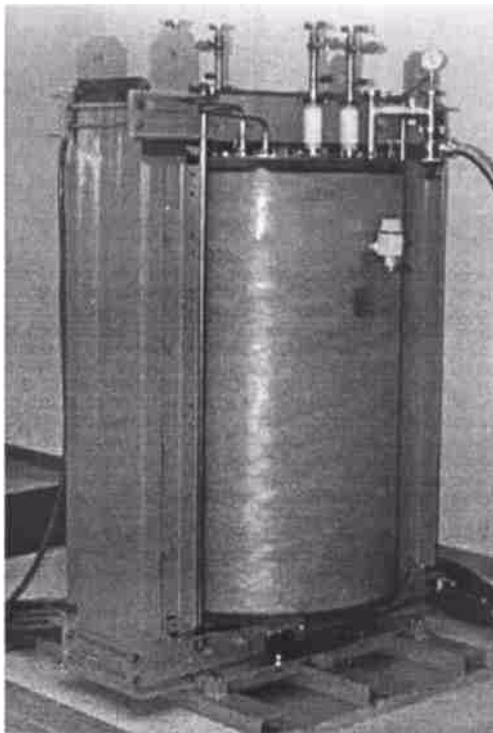


图 5 日本九州大学 500kVA 高温超导变压器

13.8kV 的三相 HTS 变压器,因为这种容量和电压等级的变压器约占美国以后 20 年中等容量变压器销量的 50%.该变压器使用的超导导线为银基 Bi-2212 复合导线,运行于 20—30K,计划于 2001 年完成.在 DOE 的支持下,ASC,ABB,LANL 和法国电力公司对 10 MVA 的 HTS 变压器进行合作研究,他们的目标是研制 30 MVA 以上的 HTS 变压器.在我国,中国科学院电工研究所已经与保定变压器厂签订了高温超导变压器的合作研究协议,并将用于配电系统的高温超导变压器的实用化作为合作的目标.

超导旋转电机的研究始于 60 年代.1969 年,MIT 首先研制成功一台 45kVA 超导发电机.1972 年,Westinghouse 研制成 5 MVA 的超导发电机.日本、法国、德国也相继开展了类似的研究.1977 年,上海发电设备研究所研制出一台 400kVA 的超导发电机,并进行了入网试验运行.1981 年至 1983 年,EPRI 和 Westinghouse 对 300 MVA 超导发电机进行了合作研究.他们曾计划进一步研究 1—4 GVA 的超导发电机,但由于经费问题,研究进行了一半就停止了.1983 年,中国船舶总公司 712 所、中国科学院电工研究所和浙江大学等合作研制我国第一台 300kW 超导单极电机.电机的定子是一对 NbTi 超导螺线管线圈,中心场达到了 4.78 T,而电枢区域的磁场达到 0.75 T.1992 年,该电机成功地进行了满负载试验,且运行性能稳定.

1996 年 2 月,在 DOE 的支持下,美国 Reliance 电力公司(REC)成功研制出一台四极 HTS 同步电动机,其转速为 1800rpm,HTS 线圈工作于 27K,能连续输出 147kW 的功率(比设计的 92kW 高出 60%).计算表明,该电动机的峰值负载可达到 294kW.1997 年 8 月,DOE 进一步支持 REC 开展 3.7 MW 的 HTS 电动机的研究工作,计划在 2001 年完成全部研制工作.美国海军对单极 HTS 电动机的研究给予了高度重视.1996 年,利用 ASC 和 IGC 提供的两个跑道型 HTS 线圈研制的单极电动机,在 4.2K 和 28K 下可分别输出 122kW 和 82kW 的功率,转速达 11700rpm,电枢电流为 30kA.美国海军希望将单极超导电动机用于船舶推进.最近,美国海军与 ASC 签署了合作研制 18.7 MW 的高温超导电动机的合同,计划一年之内投入 150 万美元启动该项合作研究.

1994 年,在美国通用电气公司(GE)领导下,开展了 100 MVA 高温超导发电机的概念设计与评估

工作,并研制用于该发电机的跑道型 HTS 线圈.该 HTS 线圈由 3500 m Bi - 2223 带(由 IGC 提供,25 K 下的临界电流为 34 A)制成,总安匝数为 40 kAT,完全满足 100 MVA 发电机的需要.1988 年,日本通产省开展了一项长期的超导发电机研究计划,即 Super G - M 计划.该计划分两步,第一步是利用 NbTi 超导线研制 70 MVA 的低温超导发电机(第一步已于 1998 年完成).在试验时,发电机由一台同步电动机驱动,发电机的输出功率又反过来提供给电动机,它能输出 79 MW 的功率.1000 h 的连续试验运行表明,它已经完全达到甚至超过了设计指标. Super G - M 计划的第二步是研制 200 MVA 的 HTS 发电机,其中包括 3 个转子和 1 个定子的研制,目前正在研制之中.

2.5 超导磁储能系统

超导磁储能系统(SMES)是利用超导材料制成的线圈,由电网(经变流器)供电励磁在线圈中产生磁场而储存能量,在需要时可将此能量(经逆变器)送回电网或作其他用途.由于储能线圈由超导线绕成并维持在超导态,故线圈中所储存的能量可以几乎是无损耗地永久储存下去,直到需要释放它为止.因此,与其他储能系统相比,SMES 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,SMES 不仅可用于调节电力系统的峰谷,而且可用于降低甚至消除电网的低功率振荡,从而改善电网的电压和频率特征;此外,可用于无功和功率因素的调节,以改善系统的稳定性.

70 年代,随着实用低温超导材料的出现,美国 LANL 在 DOE 的支持下,率先开始对 SMES 进行了研究.沿美国太平洋西海岸有两条并联的大功率交流输电线路和一条直流输电线路.交流输电线路全长 1456 km,三相 500 kV,每回路稳定传输功率为 2160 MW.这 3 条输电线路把美国西北地区的强大电力输往加利福尼亚的用电中心.然而西北电力系统的稳定却受到这两条远距离大功率交流输电的影响.观测表明,在交流输电线路上,会产生一种频率为 0.35 Hz 的负阻尼振荡,振荡的峰值达到 300 MW.为了消除这种振荡,波尼维尔管理局(BPA)和 LANL 提出采用 SMES 为上述交流输电线路的负阻尼振荡提供同样频率的正阻尼振荡,以改善整个电力系统的稳定性.1978 年,LANL 开始研制 30 MJ 的 SMES.1982 年,该 SMES 系统投入了试验运行.自 1983 年 11 月 1 日起至 1984 年 3 月 8 日止,系统连续地调制了一个低频干扰信号,线圈充

放电次数超过 10 次,表明了其对电网的稳定作用.整个结果表明,超导储能系统可以成功地在一个复杂的电力系统中运行.但后来由于当时低温系统的水平和故障而停止了运行.

1987 年,美国战略防御立案办公室提出了一个储能为 20.4 MWh 的超导储能工程实验模型(ETM)的计划.该计划的目标在于在经济上显示一个全尺寸的超导储能系统用作军事目的和电力应用的作用.由于冷战结束,该计划第一阶段完成后就中止了.1993 年,Alaska 州 Anchorage 电力公司开始建造 1800 MJ 的 SMES,以改善 Alaska 电网供电的可靠性.该 SMES 耗资 4300 万美元,已完成大部分设计制作的工作,并将于 2000 年投入运行.

为了实现超导储能的实际应用并为日本超导储能技术的独立发展作出贡献,日本成立了超导储能研究会,它的 50 个成员单位包括了日本最有名的大学、研究单位、各类工厂和公司.自 80 年代中期以来,它进行了大量的分析、设计和实验研究工作,提出了开发超导储能的 30 多项建议,其中包括用于磁浮列车 10 层计算机大楼和 50 层高层建筑等用的超导储能系统,参与了通产省自然能源局提出的 100 kWh 等级的超导储能计划.以日本东京大学和国际超导技术中心为主进行的上述 100 kWh、480 MJ 的超导储能系统,其主要部位的研制已圆满完成,并将进行建造.日本九州大学研制的 3.6 MJ 和 360 MJ 低温超导 SMES 已经在九州电力公司投入试验运行.德国、意大利和韩国等也开展了 SMES 的研究.中国科学院电工研究所从 90 年代初以来一直在开展微型 SMES 的研究,1997 年已成功地试验了 25 kJ 的 SMES 原型样机.据报道,美国 IGC 和 ASC 的 SMES(1—10 MJ)已经商品化.最近的《High T_c Update》报道,ASC 即将向奥地利的一家铝厂出售一台 SMES,并将在今年春季进行安装调试工作.ASC 目前正在开发一种新的 D-SMES(即配电 SMES),用于功率调节.

由于高温超导线的性能与 SMES 的要求尚有一些距离,有关高温超导 SMES 研究的报道不多.1998 年,芬兰 Tampere 理工大学研制了一台 5 kJ 的 HTS-SMES 模型.该 SMES 的超导磁体由 11 个双饼 Bi - 2223 线圈组成,外径 317 mm,内径 252 mm,高 66 mm,工作于 20 K,运行电流 160 A(平均电流密度为 85 A/m²),总安匝数为 160 kAT,磁体系统采用 G - M 制冷机冷却.德国 EUS 也于 1998 年研制出一台 8 kJ 的 HTS-SMES 原型样机.法国电力公

司计划开展 MJ 级的 HTS - SMES 的研制工作,其中 HTS 线圈将产生 6T 的磁场。

2.6 超导电力系统

80 年代,日本最先开展了对超导电力系统的模拟研究,该模型系统包括 1500 MVA 发电机、超导变压器和超导电缆。90 年代初,日本电气技术实验室(ETL)最先提出了全超导电力系统的概念设计。目前,名古屋大学正在开展对包括超导限流器、超导电缆和超导变压器的电力传输系统的模拟研究。其中所使用的超导变压器为 6kV/3kV,1000kVA,SFCL 为 6kV/200A,超导电缆为 5m,6kV/650A。

3 经济可行性分析

一项新技术和发明能否得到推广,关键往往不在于技术上的问题,而在于经济上的问题。根据目前的技术水平估计,容量在 300 MVA 的超导发电机和容量大于 30 MVA 的超导变压器比常规的更为经济。同样,大容量(>1 GVA)长距离(>200km)的超导电缆比常规输电线路的经济性更高。随着电力系统容量的不断增长,电机的单机容量将向更大规模方向发展,电能的输送也将向超大容量、远距离方向发展。因此,超导电力设备将具有很大的经济优势。

研究表明:对于 300 MVA 的电机来说,超导发电机和变压器的总功率损耗只为对应的常规电机的 40%。超导电缆的功率损耗只占其输送容量的 0.1%左右,比常规电缆的 7%低得多。如果包括制冷功率,超导电缆的总损耗约为常规电缆的 35%。据统计,我国电能的近 60%—70%被各种电动机消耗。如果采用超导电动机,可将效率提高 1%—1.5%,其节约的电能是非常可观的。目前,我国输电系统和配电系统(T&D)的损耗约为电力系统容量的 8.5%。采用超导电缆和变压器后,可将该损耗减少至 4.2%。如果采用超导发电机,则可将发电-输电-配电的总效率提高约 5%。据统计,如果全部采用超导电缆、超导电动机和超导发电机,则按现在的电价和用电量计算,我国每年可分别节约 400 亿元、400 亿元和 120 亿元(共 920 亿元)。

当然,以上的帐目还没有包括采用超导电机和电缆所降低的电网的建设费用、改造费用和通过提高效率降低污染排放量所带来的经济效益。污染会造成经济“溢出”(即外部经济效果)。我国燃煤发电量约占总发电量的 75%。通过提高效率,可减少煤的消耗量,降低污染排放量,从而减少经济“溢出”。

据统计,我国燃煤释放的 SO_2 占全国总排放量的 85%, CO_2 占 85%, NO_x 占 60%,烟尘占 70%。1997 年,我国 SO_2 的总排放量为 2346 万吨。我国酸雨区域正在迅速扩大,已经超过国土面积的 40%。1995 年酸雨所造成的经济损失达到 1165 亿元。其中燃煤发电对环境污染的贡献占很大的比例。如果采用超导电力技术,使总的发电-输电-配电的总效率提高约 5%,则目前我国可节约用电约 1125 万千瓦,即可以少建 11 座百万千瓦的燃煤发电厂。

随着电能需求量的日益增长,电网向超大规模方向发展。与此同时,人们对电能质量提出了更高的要求。SMES 可以大大改善电能质量,降低特殊用户为维持高质量电能所付出的高额成本,并可减少扰动和瞬时故障对电力安全运行系统造成的危害。因此,SMES 的广泛应用将产生巨大的社会效益。

在电力系统发生的故障中,90%以上为短路故障,短路故障电流约为额定电流的 20 倍。因此,短路故障对电力系统的稳定可靠运行会造成巨大的威胁。一般说来,电气设备按短路容量设计,所以很不经济。在电力系统中安装 SFCL,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。因此,SFCL 所带来的巨大经济效益和社会效益是难以估量的。

4 前景预测

一般说来,一项新技术往往会在某一时间上出现大的突破,从而使相关产品的性能大大提高而价格大大下降,进而使其得以迅速推广,并产生巨大经

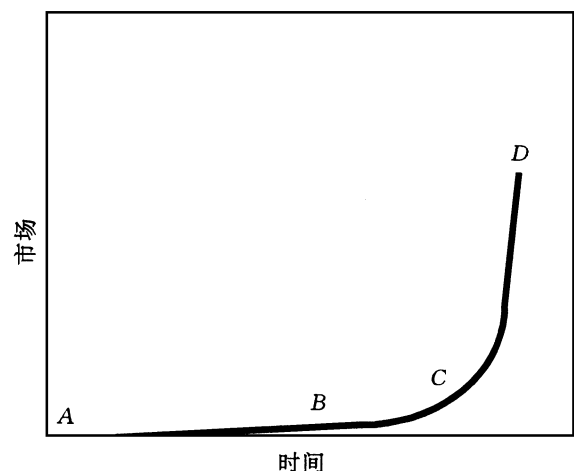


图 6 新技术的市场增长模型

A——发明或发现； B——少量市场需求；
C——大的技术突破； D——大的市场需求

济效益(图6)。国际科技界和产业界普遍认为:超导技术形成规模产业的问题不是“是否”的问题,而是“何时”的问题。根据第五届国际超导工业高峰会议(即ISIS-5)的预测:作为21世纪具有重大战略意义的高新技术,超导电力技术(将以高温超导为主)将会在2010—2015年左右出现大规模的应用;2010年,全球超导电力技术方面的产业将达到74亿美元(其中SFCL占35亿美元,SMES占15亿美元,超导变压器占15亿美元),占整个超导产业的29%;到2020年,全球的超导产业将可达到2440亿美元,其中电力方面将达到700亿美元。

1997年,美国IGC的创始人C.H. Rosner根据科技界和产业界的估计,得出如下预测:SFCL、超导变压器、超导电缆、超导电动机、超导发电机的商品化时间将分别是1999年、2002—2006年、2002—2010年、2010—2020年、2020年。表2列出了高温超导电力应用的现状、商品化时间及其市场情况的预测。根据Rosner的预测,到2010年左右,除超导发电机外的其他超导电力设备,将都可达到商品化阶段,其中高温超导限流器将会达到大规模应用的程度。Rosner非常肯定地说:21世纪将是“超导技术时代”,超导技术对于21世纪将如同半导体技术对于20世纪一样具有重要的意义,而21世纪的超导材料将如同20世纪的铜一样被普遍地使用。因此,超导电力技术的应用前景是相当广阔的,但下一个

表2 高温超导电力应用的现状、商品化时间及其市场情况的预测

应用	研究单位	主要参数	状况	商品化的时间	市场 ¹⁾
超导电缆	EPRI等 Southwire Pirelli等 东京电力 超导中心	30 m, 115 kV, 2 kA 三相交流 30 m, 12.5 kV, 1.25 kA 三相交流 130 m, 24 kV, 2.4 kA 50 m, 2 kA 6 m, 2 kA	通过试验 即将安装 2000年安装 通过试验 1999完成	2010— 2020年	1 ²⁾
超导限流器	ABB ABB US-LMC US-LMC US-LMC	磁屏蔽型 1.2 MVA, 三相 10 MVA, 三相 2.4 kV/2.2 kA, 三相 15 kV/10.6 kA, 三相 15 kV/20 kA, 三相	成功运行 研制阶段 成功试验 成功试验 1999年完成	1999年	3 ²⁾
超导电动机	Reliance Reliance 美国海军	200 hp, 27 K, 1800 rpm 5000 hp 167 hp @ 4.2 K, 112 hp @ 28 K, 11700 rpm 单极	通过实验 2000年完成 通过试验	2002— 2010年	1 ²⁾
超导发电机	美国 GE Super G-	100 MVA 发电机, HTS 跑道型线圈 25 K, 40 kAT 200 MVA	完成 研制阶段	2020年	N/A
超导变压器	ABB 九州大学 美国 IGC ASC等 ABB	18.7 kV/420 V, 630 kVA 6.6 kV/3.3 kV, 500 kVA @ 77 K, 800 kVA @ 66 K 138 kV/13.8 kV, 30 MVA @ 20—30 K 10 MVA 10 MVA	实验运行 实验运行 2001年完成 研制阶段 2001年完成	2002— 2006年	1 ⁵⁾
SMES	芬兰 T. U. 德国 EUS 法国 EC	5 kJ, 160 kAT, ODB17, 11D252, H66 8 kJ 1 MJ, 6 THTS 线圈	试验模型 试验模型 计划	N/A	1 ⁵⁾

1)指2010年的市场,单位为亿美元/年;2)高温超导设备;3)主要为低温超导 SMES

10 年将是国际超导技术竞争的关键时期。

5 基本物理问题

实用低温超导材料的制备已经非常成熟,其基本的材料科学问题和物理问题也相当明朗,应用基础理论也比较完善。目前,除了它在超导磁储能方面的应用比高温超导材料具有很大优势外,在电力应用的其他方面将无法与高温超导材料竞争。然而,实用高温超导材料的制备还不很成熟,高温超导体与低温超导体的物理性质差异较大。因此,在超导电力技术走向大规模应用之前,还有以下物理问题值得研究。

5.1 高温超导体弱连接及热激活磁通蠕动的问题

由于受弱连接的影响,高温超导材料的 J_c 在 1 T 的磁场范围内迅速衰减。在液氮温区,较高磁场下的 J_c 与实际应用的要求相差很远。考虑到某些超导电力设备中将出现较高的磁场,因此,应在研究弱连接的物理机理的基础上,进一步减少弱连接。有些超导电力设备(如 SMES)将在某些时候运行于持续电流模式,磁通蠕动将使持续电流较快地衰减,在研究磁通蠕动的物理机理的基础上,提出减少磁通蠕动的方法。

5.2 高温超导体的磁通钉扎和磁通运动的问题

高温超导体的磁通钉扎及磁通运动问题是高温超导电力应用的首要问题。目前,有关高温超导体磁通钉扎的物理机理和磁通运动的物理模式仍然不是十分清楚。应在研究此问题的基础上,提出提高 J_c (特别是在 77 K 温度下的 J_c) 的方法,提出 $J_c(T, B)$ 曲线的物理解释及其数学表达式。与低温超导体不同,高温超导体是一种具有强烈各向异性和弱连接的极端第二类超导体。因此,其内部的磁通运动过程(即磁-热耗散过程)比较复杂。高温超导电力应用必须尽量减少交流损耗。然而,目前没有一个普遍接受的用于分析高温超导体的磁通运动的物理模型,对如何减少交流损耗缺乏切实可行的方法。因此,高温超导体的磁通运动和交流损耗的问题也是必须解决的问题。

5.3 高温超导电力设备内部复杂电磁场问题

电力设备的瞬变过程一直是一个很有趣的课题。由于高温超导体不仅具有强烈的各向异性,而且其 J_c 在低场部分对外场的变化非常敏感,高温超导电力设备瞬变过程中的电磁场问题必定是一个十分复杂的非线性问题。

5.4 高温超导交流线圈的热稳定性和失超传播过程分析

由于交流线圈内存在着交流损耗以及各种干扰,交流超导线圈内部始终存在热量耗散.因为线圈内各种 J_c 和外场有较大差异,其内部各处的交流损耗相差较大.因此,保证线圈内部温度分布的均匀性和稳定性(即线圈的稳定运行)是十分必要的.目前,有关交流高温超导线圈的稳定性问题的研究很少.此外,交流高温超导线圈的失超传播过程也是值得研究的物理问题.

6 结束语

目前,SMEs 已经形成商品,高温超导限流器即将形成商品,高温超导电缆也将投入运行,超导电机已经成功地通过了试验.2010 年左右,高温超导电力设备将比较全面地产业化.考虑到超导电力技术的应用前景,发达国家和世界各大公司对超导电力应用研究给予了高度的重视和大力的支持.因此,下一个 10 年将是国际超导电力技术竞争的关键时期.

我们也看到我国经济正开始起飞,工业用电和民用电的增长速度比西方国家快得多.随着我国电网规模和容量的不断扩大,电网的稳定性、可靠性和安全性的问题将变得更为明显,加上我国电力资源分布不均和负荷分布不均造成的矛盾日益突出,常规电网的高功率损耗以及电网建设用地和我国日益膨胀的城市人口的矛盾等问题,迫切需要突破传统的思想和技术限制,采用新的技术来解决我国电网所面临的问题.因此,超导电力技术的到来无疑给我国带来一次千载难逢的机会,超导电力应用研究对我国将具有更大的现实意义和长远意义.正因为如此,我们热切地希望我国政府部门和科技界能对超导电力应用研究予以高度的重视,从而为我国在 21 世纪具有经济战略意义的国际超导技术产业中占有一席之地打下坚实的基础,使我国能更好地面对“超导技术时代”带来的机遇和挑战!

致谢 作者真诚感谢北京大学物理系阎守胜教授在本文写作过程中提出的有益的建议,并感谢中国科学院电工研究所余运佳研究员和高智远副研究员给予的帮助.

参 考 文 献

- [1] Rosner C H. *Advances in Cryogenics Engineering*, 1998, 43 A: 1—24
- [2] Sato K, Hayashi K, Ohkura K *et al.* *Proceeding of 15th International Conference on Magnet Technology*. Beijing: Science Press, 1998. 24
- [3] 林良真等. *超导电性及其应用*. 北京:北京工业大学出版社, 1998. 第二章,第五章[LIN Liang - Zhen *et al.* *Superconductivity Application*. Beijing: Peking Polytechnic University Press, 1998. Chapter 2, Chapter 5 (in Chinese)]
- [4] Grant P M. *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, 1997, 7: 112—133
- [5] Montgomery D B. *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, 1997, 7: 134—145
- [6] *Superconductor Week*, 1998/08/05—1999/01/11
- [7] Balachandran U. *ISTEC Journal*, 1998, 11(1): 35—42
- [8] Iwata Y. *ISTEC Journal*, 1998, 11(1): 60—65
- [9] Juengst K P. In: *Proceedings of 15th International Conference on Magnet Technology*. Beijing: Science Press, 1998, 18—23
- [10] Li Z. *Prospects for the medium- and long-term development of China's electrical power industry and analysis of the potential market for superconductivity technology*, ORNL/Sub/97 - SX339 V/1

作者简介



肖立业,男,1966 年出生.现为中国科学院电工研究所副研究员、超导技术研究室常务副主任(主持工作)和超导电工开放实验室主任,并担任中国电工技术学会超导应用专业委员会秘书长.研究方向为超导电力技术.发表论文 20 多篇. E-mail: xiao@iee.ac.cn



林良真,男,1935 年出生,中国科学院电工研究所研究员、博士生导师.现为国家超导专家委员会委员、中国电工技术学会理事兼超导应用专业委员会主任、国际低温工程委员会委员、国际制冷学会第一专业委员会委员和《电工电能新技术》主编.先后从事电力系统稳定性、大能量电感储能技术和超导技术及其应用方面的研究.获得国家科技进步三等奖和两项中国科学院科技进步二等奖等,发表论文 80 多篇. E-mail: lzlin@iee.ac.cn