

超导技术电力应用研究的进展与前景

Progress in Superconducting Technology for Electric Power Application and Its Prospects

林良真

(中国科学院电工研究所, 研究员 北京 100080)

超导技术是近 30 年发展起来的高技术, 主要包括超导强磁技术和超导弱磁技术。由于它在这两个方面所能达到的功能水平是目前常规技术无法实现的, 所以已引起各国科技界的很大重视。

超导强磁技术的发展给电工技术带来质的飞跃, 许多过去无法实现的电工装备已成为现实, 或即将成为现实。如它可以在巨大的空间产生很高的强磁场而几乎不消耗电能, 从而为一些高技术如核聚变、磁流体发电等的实际应用和发展创造了有利条件。如果目前常规电工装备采用超导技术, 将大大改善性能, 若同步发电机采用超导励磁绕组, 可以大大提高电枢绕组上的磁场强度, 使电机的体积与重量明显减小, 而且使制造更大单机容量的同步电机成为可能。另外由于超导绕组没有焦耳热损耗, 因此节约的电能将是十分可观的。

由于超导技术的诱人前景, 许多国家都在致力于开发其在电工领域的应用。早在 1965 年, 美国 AVCO 公司就试制成一台立式旋转电枢的 8 千伏安超导电机。1969 年, 美国麻省理工学院试验成功一台 45 千伏安超导发电机模拟机组, 从而证明在发电机上采用超导励磁绕组的现实可能性。1972 年, 美国西屋公司又研制出一台 5 000 千伏安超导发电机。在此基础上, 美国、前苏联、联邦德国等都曾计划在 80 年代试制几十万千伏安级的超导同步发电机。与此同时, 美国还投入力量研究用于电力系统负荷调节的超导储能装置, 1982 年成功地研制出一个储能 30 兆焦耳 (8.4 千瓦时)、最大功率 10 兆瓦的超导储能装置, 并曾与伯尼维尔电管局的一条 500 千伏交流输电线联接, 进行消除交流输电线的低频振荡的实验。试验证实了超导储能对提高电力系统稳定性的效果。

但是, 由于超导线在交变磁场下存在交流损耗, 在工频条件下采用超导材料经济上无优越性。因此, 80 年代初期以前, 超导应用仅限于直流或脉冲工作状态, 超导技术应用领域主要是科学实验和

科学仪器等高科技领域。

直至 80 年代中期, 法国等研制成功丝径小于 1 微米的铌钛超导线, 使导线的交流损耗减小到可接受的水平, 为超导的应用打开了新的局面。此后, 法、捷、日、俄等国均积极开展了相应的研究。一方面深入进行极细丝超导线性能的研究, 一方面进行可能应用的研究。此期间法国和日本先后分别研制出 200 千伏安和 1 000 千伏安的超导变压器。

1986 年高温超导材料出现后, 使超导研究迈入新阶段。为了使高温超导材料在强电方面的应用变成现实, 须解决的关键技术问题是研制出实用的超导材料, 它不仅加工成长线, 而且在运行温度 (如 77K) 和一定磁场 (如 5 特斯拉) 下能够有足够大的电流密度 (如 10^4 安/厘米² 以上)。经过多年艰苦的工作, 美国超导公司 (ASC) 1994 年已研制出 361 芯 1 100 米长的 Bi-2223/Ag 超导带材, 其电流密度已达 1.3×10^4 安/厘米² (77K, 0 特斯拉), 该公司研制的 Bi-2223 线圈在 27K 下能产生 2.16 特斯拉的磁场, 美国 IGC 公司也研制出在 4.2K 下产生 2.6 特斯拉磁场的 Bi 系线圈, 在此基础上, 美国超导公司已提出一个在 2000 年实现高温超导在电力方面的应用计划。

一、超导技术在电力方面应用研究进展

60 年代, 国际上曾对超导技术在电力方面的应用给予极大的关注, 并开展一系列论证和一定规模的研究, 如开展超导同步发电机、超导储能以及超导输电等。但由于技术和经济上的原因, 这方面应用研究没有实现早期的目标。近年来, 随着极细丝交流超导线的出现以及高温超导技术的进展, 人们对工频电力应用又产生极大兴趣, 许多国家都相继开展超导故障限流器和中、小型超导储能装置的研究, 并预期在 2000 年逐步实现商用。

1. 超导电机

超导同步发电机具有效率高(比常规电机提高约 0.5~0.8%)、重量轻、体积小(可减小 1/3~1/2)、单机容量大(可达 100 万千伏安以上)和电机稳定性能好(同步电抗可减小到 1/4)等优点,因此多年来许多国家都在致力于超导同步电机的研究。但是,采用超导技术也给电机的设计、制造和安全运行带来一系列须解决的问题,如超导磁场绕组和电磁设计、超导绕组的阻尼屏蔽结构、电机的真空绝热和密封技术以及电机的致冷系统设计和液氮输送技术等。只有在这些技术问题得到完善解决并能保证电机长期安全可靠运行,超导电机才有可能在电力系统中获得实际应用。在解决技术问题的同时,超导电机经济性亦是须认真考虑的问题。日本日立公司和德国西门子公司认为,只有电机容量超过 100 万千伏安,超导电机才具有经济性,而美国西屋公司和美国电力协会认为,电机容量只要超过 30 万千伏安,超导电机即具有优越性。显然,超导同步发电机必须立足于大容量。但电机的单机容量又与电力系统密切相关。因此超导电机除了本身技术问题外,还将受各国电力发展政策制约。由于能源计划的变动,美、德等国原来计划 80 年代研制成几十万千伏安的超导同步电机,90 年代制成实用电机的计划已推迟或停止执行。前苏联已制成一台 30 万千伏安超导同步发电机,但在低温试验中发现低温容器有漏泄问题,待进一步改进。日本则一直坚持超导同步电机的研究并计划于 1995 年研制成一台 70 000 千兆伏安超导同步电机。

迄今为止超导同步发电机主要还只是转子励磁绕组采用超导材料,电机定子绕组由于是在 50 周工频下工作,在极细丝交流超导线出现以前都是采用常规导线。目前人们已开始研究定子绕组和转子绕组全部采用超导材料的全超导电机,这样超导电机的定、转子处于同一的温度空间,消除了室温气隙,亦无需单独的转子旋转容器,这不仅简化了电机结构,也简化了低温系统结构,提高了电机运行的可靠性。如果能进一步提高电机转子励磁绕组的磁通密度,并采用高温超导体作为磁屏蔽,还有可能免去铁芯和铁轭,将大大减轻电机的重量。目前德国和日本均在着手研制几十千伏安级的试验室全超导交流发电机。

2. 超导储能

超导储能装置是利用超导线圈直接将电磁能储存起来,在需要时再返还电网或其他负载。超导线圈没有焦耳损耗,可以长时间储存能量并可产生很强的磁场,其电流密度可比一般线圈高 1~2 个数量级,因此能达到很高的能量密度(约 10^8 焦耳/厘米³)。超导线圈储能效率高(可达 90%以上),响应速度快(几到几十毫秒),所以有广泛的应用前景。例如,超导储能装置可以用来调节电力系统的

尖峰负载,消除电力系统低频功率振荡,稳定电力系统的频率和电压;超导储能装置还可用于电力系统的无功功率补偿和功率因数调节,从而提高电力系统稳定性和功率输送能力。此外,它还可用作太阳能和风能的储能装置,备用电源或空间站电源,同时还可作为热核反应装置或军工装备的脉冲电源,是一种很有发展前景的应用项目。

美国自 1969 年以来就开始研究用于电力系统负荷调节的超导储能装置,1982 年研制成功的储能 30 兆焦耳(8.4 千瓦时)、最大功率 10 兆瓦的超导储能装置曾接入伯尼维尔电管局的一条 500 千伏交流输电线进行实验。1 200 小时的现场试验证明,超导储能装置确实起到抑制输电线路低频振荡和进行无功功率补偿的作用,系统总效率达 86%。但由于低温系统不够完善,尚未能正式投入使用。

80 年代以来,美国曾对建造 500 万千瓦时超导储能装置进行研究和方案论证。日本、德国等亦在认真进行超导储能的研究。根据近年来的研究,为改善电网质量和稳定频率,根据电网情况可以采用较小的储能装置(如 100 千瓦时),而对补偿尖峰负载等一般还需 100 万千瓦时以上的储能装置。因此,日、美等国除研究大型超导储能装置外,同时也注意中、小型储能装置应用的可能性。

3. 超导变压器

在交流极细丝超导线(丝径不到 1 微米)出现以前,由于超导线在工频条件下交流损耗很大,因此超导变压器没有经济上的优越性。超导变压器的经济可行性与超导材料交流损耗减小的程度紧密相关,主要优点是重量轻、体积小,同时由于超导线采用高阻值材料作其稳定基底,故障下的短路电流较常规变压器小。分析表明,超导变压器的重量(铁芯和导线)仅为常规变压器的 40%或更小,而且当容量超过 300 兆伏安时,有明显的经济优越性。

近年来法、日等国已先后研制出几百千伏安至千千伏安级的超导变压器。法国于 1988 年研制成一台 50 周单相超导变压器,其设计容量为 220 千伏安,电压比为 600 伏/1 040 伏,铁芯磁感应强度为 1.8 特斯拉,变压器总重(包括常温铁芯和线圈)约 100 公斤,仅为同容量常规变压器的 1/10。日本东芝公司这期间亦制成 500 千伏安、50 周超导变压器,其磁感应强度为 2.2 特斯拉。当前超导变压器一般采用室温铁芯并采用非金属低温容器的结构形式,由于低温容器和电流引线的热损,致使所研制超导变压器的效率比预想的低。如法国 220 千伏安超导变压器效率为 97.8%,而同容量常规变压器的效率可达 98.9%。因此,要使超导变压器获得实际应用,除须进一步减少交流损耗,提高超导线圈的稳定性外,还要注意研制低漏热非金属低温容器和改进电流引线设计(如采用高温超导电流引线)。

目前研制的最大的超导变压器是日本九州大学和东芝公司等研制的 1 000 千伏安、60 周超导变压器,但由于有交流超导线退化比常规超导线严重,经过两轮试验,该变压器容量仅达 577 千伏安。因此要使超导变压器获得实际应用,还要进行深入的研究。另外,由于超导变压器磁通密度一般小于 2 特拉斯,因此高温超导体亦有可能应用于制造超导变压器。美国应用超导公司(ASC)甚至预测,到 2000 年高温超导变压器有可能走向市场。

4. 超导电缆

超导输电主要是实现超导电缆技术,它是解决大容量、低损耗输电的重要途径。随着大城市用电日益增加,高压架空线深入城市负荷中心又受到许多因素的制约,因此须采用大容量电力电缆将电能输往城市负荷中心。但是,采用常规的油(水)冷电力电缆,由于受其负荷能力和临界长度的影响,很难满足使用的要求。在这方面超导电缆与常规电缆比较有明显优点。

超导电缆有直流和交流两种形式。由于直流超导电缆没有交流损耗,在输送同样功率情况下直流电缆尺寸较小,因而价格较低,但电缆两端需要大型整流和逆变装置,一般认为输电距离要达 200 公里以上时才较为经济。交流超导电缆由于有交流损耗和绝缘层介质损失问题,因而其额定功率将受到限制。虽然综合技术经济比较指出,在输运大容量电能时(如 1 000 兆瓦以上),超导电缆有竞争能力。但考虑到超导电缆结构和绝热技术比较复杂,要获得实际应用还要做不少工作。

随着高温超导长带研制取得进展,不少国家已将高温超导传输线列为中期的开发目标,进行可行性研究并着手进行高温超导电缆样机的研究。美国应用超导公司还准备研制 30 米长 4 000 安培的高温超导输电电缆并拟安装在现场进行长期考核试验,计划到 2000 年达到商用的目的。

5. 故障限流器

利用超导体在超导态时电阻为零和失超后呈现高电阻率(10^{-7} 欧米级)的特点,可以有效地限制电力系统故障时的短路电流。随着电力系统容量日益增大,充分有效地限制故障短路电流,降低断路器的开断容量,是电力系统面临的实际问题。目前系统故障时主要是通过高压断路器切断短路电流,由于电力系统容量日益增大,因此断路器开断容量要足够大才能满足要求,但这将使断路器的结构更加复杂和价格更加昂贵。超导故障限流器是利用超导体的超导/正常态转变特性,由零电阻快速转变到具有较高的电阻值,从而降低系统短路电流,降低高压断路器开断容量的要求。它动作时间快(大约几十微秒),可将故障电流限制在系统额定电流的二倍以内,比断路器开断电流小一个数量级左

右,并可降低回路的过电压。它集检测、转换和限制于一身,是一种有效的电力系统故障“保护”装置。

超导限流器不仅可采用超导体超导/正常态转变的特性,还可采用超导材料的磁屏蔽特性研制成磁屏蔽型故障限流器。它主要由外侧初级常规导体绕组,中间次级超导空心圆筒和内侧铁芯等同心配装组成。正常情况下,超导圆筒处于超导态,从而对初级绕组电流起屏蔽作用,因此它呈现很低的阻抗。在故障情况下,超导圆筒由于过电流而失超,失去对磁场的屏蔽作用,从而呈现出很大的阻抗。原则上它可以在一个周波(20 毫秒)内将故障电流限制在二倍额定电流以内。

法国 1988 年首先研制并试验了世界上第一台超导/正常态转变型超导故障电流限制器,尽管在当时尚有一些技术问题没得到很好的解决,但首次证明了超导故障电流限制器的可行性。1994 年初由 GEC-Alsthom 和 Alatel Alsthom Recherche 共同完成了工业化的 0.3 千伏 rms/1.25 千安 rms/5.3 千安峰值故障电流限制器系统的设计,计划已获批准,准备用两年时间建成该装置并进行电网试验。与此同时,还将进行 225 千伏和 400 千伏线路电流限制器的研究。90 年代初,日本首先由 Saga 大学研制并试验了一台超导故障电流限制器装置。这是一台集变压器和限流器于一身的装置,设计容量是 10 千伏安。紧接着,东芝公司和东京电力公司合作研制并试验了一台 6.6 千伏/1.5 千安超导故障电流限制器,该装置是由作为触发线圈的一对超导无感线圈与一个限流电抗线圈并联然后串联于输电线路构成。随后又研制并试验了一台 6.6 千伏/2.0 千安超导故障电流限制器,比原先的 6.6 千伏/2.5 千安限流器省掉了限流电抗线圈,直接利用触发线圈转换到正常态的高电阻来限流。

许多学者预言,就高温超导体强电应用而言,最先得到实际应用的将是高温超导故障限流器。虽然目前还存在不少技术难点,如低交流损耗的大电流(数千安)、高电压高温超导交流电缆及高温超导线失超传播和保护等,但随着技术的发展,高温超导故障限流器很有可能在下世纪初获得实际应用。

二、我国超导技术研究进展

我国于 60 年代开始低温超导研究,1965 年即用我国研制的第一代 NbTi 单芯超导线绕制成我国第一个 NbTi 超导磁体,并结合激光用电感储能装置和受控热核试验装置开始了超导磁体应用研究。1973 年,根据高能物理研究的需要,又开展了多丝 NbTi 超导线及高能探测器用超导磁体和脉冲二极超导磁体的研制。此后 20 年还结合电机、磁流体发

(下转第 19 页)

如前所述,近十几年来,我国海洋开发发展很快,预计今后仍将保持快速增长的势头。但是,当前海洋开发中存在着一种不容忽视的问题,即一方面海洋资源开发利用的程度不高,规模小,另一方面对资源的浪费和破坏却很大,而且出现了海洋环境污染,某些沿岸海域污染还相当严重。显然,随着今后海洋开发的更大规模展开和沿海社会经济高速发展,对海洋资源和生态环境的压力势必越来越大。因此,在大力开发利用海洋的同时,必须加强海洋开发管理,搞好海洋资源管理和海洋环境保护,促使海洋开发走上可持续发展的轨道。

加强海洋资源管理,除了依靠法律、行政和科技的手段之外,特别要重视研究经济管理方法。要

转变资源无价的传统观念,对海洋资源进行价值核算和评估,实行海洋资源有偿使用,利用价格来调节资源的供求关系,并把资源纳入国民经济核算体系,以保持海洋资源的合理和持续利用。在防治海洋污染保护海洋环境方面,今后要重点解决沿岸陆地污染源的控制,防止沿海城镇和工矿企业大量的生活污水和未经处理的工业废水直接向海洋排放。要加强对海洋污染的监测、预防和治理,加强海上环保执法队伍和技术装备建设,提高海上污染事故应急救治能力。争取经过十几年的努力,使近岸海域污染程度逐步减轻,重点污染区的环境有显著改善,并最终得到有效控制,为建设优美、洁净、舒适的滨海环境创造有利条件。(责任编辑 肖庆山)

(上接第 22 页)

电、超导磁分离技术、核磁成像以及各类实验室用超导磁体等方面开展了大量研究。据统计,1986 年底,我国共有约 40 多个单位,700 多人的科技队伍在从事超导材料、超导磁体和低温技术等方面的研究。我国研制的 NbTi 超导材料的主要性能指标已达国际先进水平,同时在超导磁体技术、低温技术及其基础研究方面,也都作出了成绩。如科健公司的 0.6 特拉斯核磁成像超导磁体通过鉴定并投入使用;合肥等离子体物理研究所于 1992 年研制成功 20 特拉斯的 NbTi—水冷铜线圈的混合磁体;中国科学院电工研究所和低温实验中心共同研制处理量为 3 吨/小时的超导高岭土磁分离工业样机,已通过科学院验收;中科院电工研究所的中心磁场为 4 000 高斯的砷化镓单晶炉用超导磁体系统已提交用户,武汉 712 所负责研制的 300 千瓦超导单极电机亦已试制成功。

在电力应用方面我国自 70 年代以来就围绕超导同步电机开展研究工作,上海发电设备成套所 1977 年研制成一台具有超导转子的 400 千伏安超导同步发电机,并进行了短时间并网发电试验。在此基础上曾研制出一台 400~800 千伏安超导同步发电机,并进行了多次试验,包括短时间的并网运行。

中国科学院电工研究所自 80 年代以来积极开展磁流体发电用超导磁体的研制工作。这是一种新型的热能直接发电方式,它具有高效率、低污染等显著优点。为了获得高的焓取出率和减少自用电消耗,超导磁体是磁流体发电必不可少的关键部件。电工研究所 1993 年已研制成功一个中心场强达 4 特拉斯,室温孔径为 0.44 毫米的圆鞍型超导磁体,准备提供磁流体发电试验用。

近十年来,我国投入相当力量,组织协调高温超导攻关工作,取得了一批瞩目的成果。在高温超

导电性应用和开发的一些主要方面,如体材料载流能力和在制备高温超导薄膜以及高温超导量子器件并用于地磁测量方面,目前已属世界前列。1994 年西北有色院和北京有色总院已成功地用 Bi 系带材研制出高温超导线圈。

三、超导技术应用研究的对策

随着国民经济持续增长,能源需求已日益增强,近十年来我国电力工业得到飞速的发展,华东、东北、华中、华北和西北五个电网已成为跨省大区电网。随着经济建设的迅速发展,我国近年来还兴建了许多化工、冶金、石油、机械和矿山等大型现代化企业,同时各城市也兴建了许多群体高层建筑和大厦。随着这些大型企业和高楼大厦的建成,供电系统出现了众多负荷中心。这些负荷中心不仅容量大而且不少还处于城市繁华地带,迫切需要解决输电和提高电网质量问题。另外,现代电力系统容量越来越大,其输电电压等级越来越高,相应的额定电流亦越来越大,一旦电力系统发生短路,其短路电流将可能超过 100 千安以上,这种故障短路电流将给电力系统的安全运行造成很大威胁。在这些方面,超导技术都将有所作为。因此,一旦超导技术在电力领域中获得应用,不仅会给电力系统的发展提供可靠的保证,而且将大大提高电力系统运行水平和降低损耗,从而创造巨大的经济效益。因此,当前应抓紧开展超导电力应用的研究,为我国在下世纪头十年建立超导电力应用方面的高技术产业打好基础。在重点抓低温超导应用研究的同时,要抓紧高温超导材料实用成材的研究和开发,逐步建立有一定规模的,在国际市场上有一定竞争能力的超导产业。(责任编辑 冷远猷、蔡德诚)