

特约专栏

高温超导限流器的研究进展

张翠萍

(西北有色金属研究院 超导材料研究所, 陕西 西安 710016)

摘要: 对高温超导限流器(HTSFCL)的国内外发展及研究现状进行了评述。高温超导限流器作为一种理想的故障限流器,它的研制涉及物理、材料学、电力电子、低温工程等多领域学科的知识与技术,是一项多学科技术的综合。目前在世界范围内有18个国家参与了高温超导限流器的研制,已完成挂网试运行和正在运行的高温超导限流器有19台,分布在7个国家。在中国现有3台处于试运行中,其中1台运行于世界上第一个超导变电站——甘肃白银超导变电站内。世界各国的研究现状显示,高温超导限流器的技术趋于成熟,然而大规模的商业化应用还面临着几个制约因素:超导线材的高昂价格,维持低温运行的成本,技术标准的制定,市场对高品质电力的需求等。只有降低超导材料的成本和高温超导限流器的运营成本,才会出现超导限流器的大规模应用,使之成为保障电力网络稳定安全运行的一个理想选择。

关键词: 高温超导故障限流器; Bi2212 超导带材; YBCO 涂层导体; 短路电流; 变电站

中图分类号: TM471 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2017)05-0335-09

Progress and Status of High Temperature Superconducting Fault Current Limiter

ZHANG Cuiping

(SMRC, Northwest Institute for Non-Ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The progress and development of high-T_c superconducting fault current limiter (HTSFCL) in the world have been reviewed. As an ideal fault current limiter, the development of high temperature superconducting fault current limiter has been a multidisciplinary technology, which related to physics, material science, electronic engineering and cryogenic technology. The study and fabrication of HTSFCL have been improved in 18 countries, and 19 HTSFCLs have been installed in different substations in the world, which had been operated or has been operating in seven countries at present. In China, three HTSFCLs are operating in Yunnan, Tianjin and Baiyin. One of them is installed in the first superconducting substation in the world - Baiyin Superconducting Substation in Gansu province. Analyzing to the research works on SFCL in different countries, it is concluded that the HTSFCL technologies have been improved, but large scale commercial application is still facing several challenges, such as high price of superconducting wires, the operation cost of maintaining low temperature, building product standardization and the market demand for high-quality electric power, etc. If the superconducting materials price and the HTSFCL operating cost are reduced, the large-scale application of the superconducting fault current limiter will be realized, so as to protect the power grid operating stably and to make HTSFCL as an ideal SFCL in the future.

Key words: high-T_c superconducting fault current limiter; Bi2212 superconducting wire; YBCO coated conductor; short-circuit current; transformer substation

1 前言

因为经济发展对电能需求的增长,我国发电及电力运输网络的规模越来越大^[1]。据中国电力统计数据,2015

年9月我国发电装机容量已经突破 14×10^8 kW^[2-5], 年总发电量达 5.73×10^8 kW/h, 超过了美国成为世界第一。目前,我国的电力网络以“西电东送”、“北电南送”、“全国联网”为特点^[6], 形成跨区域、远距离、大规模的电能输运状态,并以火电(67.4%)为主,可再生能源水电(22.2%)、风电(7.0%)、太阳能(1.9%)为辅,兼有核电(1.4%)等不同发电方式相组合的形式(2014年数据),形成供电输电互联,并向智能电网发展。如此迅速发展的发电、输运使得电网系统的短路电流水平增大,使部分地

收稿日期: 2017-04-22

作者简介: 张翠萍,女,1968年生,高级工程师,Email:

zhangcp6813@126.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.05.03

区的短路电流已经达到甚至超过了断路器的遮断容量,而且上升趋势越来越快,已经威胁到电力系统的安全运行。目前国内外电力设备的高压断路器的额定短路开断电流在 63 或 50 kA 以下。“2007 年以来,广东电网多个 500 kV 站点的 500 kV 和 220 kV 母线短路电流水平超过了断路器的遮断容量”^[7]。“2008 年华东电网的枢纽变电站短路电流超过了站内断路器遮断容量 50 kA”,“在 2009 年初广东电网对珠三角 5 个枢纽变电站进行了 500 kV 配电装置改造,遮断电流由 50 kA 上升到 63 kA,但在 2015 年夏,仍有 6 个站点短路电流超标”。因此,“如何限制故障电流已成为电力工业面临的重大技术与经济问题之一”^[8]。

通常限制电力系统中的短路电流是从调整电网结构、改变系统运行方式、加装限流设备等 3 个方面进行^[9],具体的方式有:提高电压等级,母线分段运行,小电抗接地,采用高阻抗变压器,串联电抗器,背靠背技术,采用故障限流器等^[10,11]。对于不同电压级别,采用的限流方式不同,理想的方法是采用故障限流器(FCL – Fault Current Limiter)。

故障限流器的研究开始于 20 世纪 70 年代,目前主要有 4 种类型:串联谐振型(所有电压级别和超高压)、并联开关型(<20 kV)、超导型、电子式(或固态型,尚处于理论研究阶段)。一般的故障限流器仍然会使电力设备成本增加,用电质量降低,电子系统稳定性减弱等。最为理想的限流器应该对电网的正常运行无影响,在出现故障时,能够限制短路电流到额定电流,并且开断时间极短。超导材料的出现,就使得这种理想的限流器得以实现。因为超导材料具有“正常 – 超导态”的转变特性,在其超导状态下电阻为零不消耗电能,当电网中的故障电流大于超导体的临界电流 I_c 时,超导体失超出现大电阻从而限制短路电流。它的正常 – 超导态转变时间小于百微秒,其开断时间 t 极小,不同于限流熔丝或使 LC 谐振回路脱谐等限流方法需要依靠机械动作来实现导电状态的变化,所以,超导故障限流器(SFCL – Superconducting Fault Current Limiter)是最为理想的故障限流器。

目前已研究的超导限流器的种类有:电阻式、磁饱和和铁芯式、磁屏蔽式、桥路式、变压器式、混合式等多种。在主要挂网试运行中,电阻式和磁饱和铁芯式采用的比较普遍,本文对这两种超导限流器的结构原理进行简单的介绍^[12]。电阻式超导限流器主要由一个超导电缆绕制的触发线圈并联一个限制线圈(常规或超导)而成。正常运行时,线路电流全部通过超导触发线圈。发生故障时,短路电流超过超导临界电流 I_c ,超导线进行超导 – 正常态转变,超导触发线圈呈现高阻,短路电流被转移到限制线圈,从而抑制了故障电流。电阻型超导限流

器具有结构简单、响应时间快、电流过载系数低和正常运行压降低等优点,但是在承载大电流时,会出现散热引发的机械问题和故障后超导恢复问题等。

磁饱和铁芯式是利用交流绕组的阻抗来限制故障电流的。它由两个完全相同的铁芯电抗器组成,其中一个铁芯内的直流磁场与交流磁场同向,另一个反向。交流磁场由交流铜绕组形成,直流磁场由直流超导绕组形成。交流铜绕组相互串联并串联入电网中,直流超导绕组相互串联形成独立直流回路。系统正常运行时,电网交流电流通过交流铜绕组输送,超导绕组产生直流偏置磁场,使铁芯深度饱和,交流电流产生的交流磁场不足以使铁芯脱离饱和区,系统呈现低阻抗,电流正常通过。当出现大的故障电流时,交流线圈在铁芯中产生的磁动势接近直流磁动势,铁芯由饱和态进入非饱和态,交流绕组呈现高阻抗,系统自动限流。磁饱和铁芯式超导限流器的反应时间和恢复时间都非常短,不足之处是直流超导绕组中产生的交流感应电流会增大压降和能量损耗。

超导限流器安装在电网中将会实现低损耗通流和高效限流,能够增强电力系统的安全性、可靠性,提高电力质量。它与现有的电力系统保护设施兼容,通过调节允许的电流峰值能增加电力系统的灵活性,减少断路器和熔断器的使用,可延缓电力设备的更新,提高系统的运行容量等,因此超导限流器的应用会带来巨大的经济效益。

2 超导限流器的研究发展与现状

2.1 低温超导限流器

1982 年,英国皮布尔斯电机公司(NEI Peebles Co., Ltd.)采用低温超导 NbTi 线建成了第一个低温超导故障电流限制器(LTSFCL),如图 1 所示。级别为 3 kV/566 A,饱和铁芯型低温超导样机^[13,14],使超导技术第一次用于电网中的故障电流的限制。时至今日,可以将超导限流器的发展分为 3 个阶段:第一阶段(1979 ~ 1995),以 NbTi 超导线材为线圈的低温超导限流器研制;第二阶段(1996 ~ 2000),以 Bi2212 或 Bi2223 超导线材(高温超导第一代带材 1G)为主的高温超导限流器研究;第三阶段(2000 ~ 至今),采用 YBCO 涂层导体(高温超导第二代带材 2G)为限流线圈的高温超导限流器研制。

从第一台低温超导限流器的开始,法国和日本就相继展开了低温超导限流器的研究。1988 年法国阿斯通电力公司^[15]采用低温超导线材 NbTi 研制了 225 kV 低温超导限流器,在法国 63 kV 电网中进行了 40 kV 的实验运行,这是低温超导限流器中做得最好的样机。从 1992 年开始,日本 Seiei 大学、东芝、Kyoto 大学、AIST 也相继开展了低温超导限流器的研究,其中有用 NbTi 线圈制作

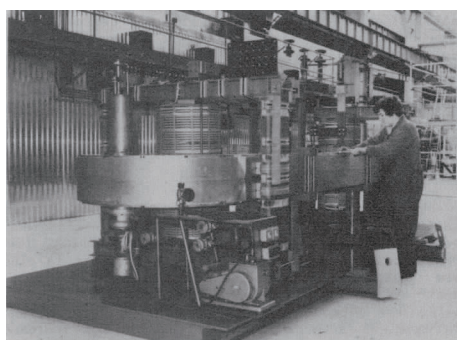


图1 1982年英国皮布尔斯电机公司制作的世界上第一个低温超导限流器样机^[13]

Fig. 1 First superconducting fault current limiter prototype with low - T_c superconductor NbTi wires fabricated by NEI Peebles Co., Ltd. in 1982^[13]

的 200 V/13 A 三相电抗型超导限流器的实验室样机^[16]。但是低温超导材料以液氢制冷, 费用非常高, 使得低温超导故障限流器的研究受到很大限制, 因此并没有实际挂网的试验运行。直到 1986 年发现了高温超导材料, 液氮替代了液氢, 使制冷费用大幅降低, 才让超导限流器的研究逐渐活跃了起来。

2.2 高温超导限流器

1996 年, 瑞士的 ABB 公司 (Asea Brown Boveri Co., Ltd.)^[17-19] 利用高温超导 Bi2212 环作为屏蔽筒, 成功研制出世界第一台挂网运行的高温超导限流器 (HTSFCL), 级别为 1.2 MVA 的三相屏蔽型超导限流器, 安装在 Loentsch 水电站, 进行了近两年试验运行 (如图 2), 从此引领超导研究者进入了超导限流器的第二阶段。在此阶段, 超导限流元件主要以 Bi 块材或带材为主, 还有 YBCO 薄膜、块材等。这时因为超导材料制备的复杂性, 世界各国在高温超导限流器研究中呈现出相互合作又相互竞争的状态, 下面主要从欧洲、美洲、亚洲各国的研究状况进行论述。

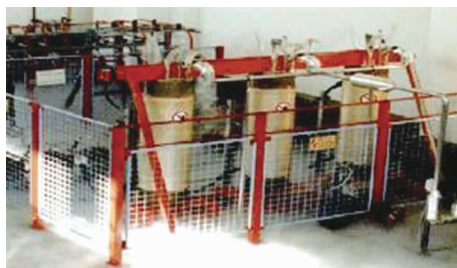


图2 瑞士 ABB 公司研制的世界第一台高温超导限流器^[18,19]

Fig. 2 First high - T_c superconducting fault current limiter fabricated by ABB company in Swiss^[18,19]

(1) 欧洲: 德国、英国、意大利、法国、瑞士
继瑞士制备了第一台高温超导限流器之后, 德国也

开始了 CURL10 项目。2004 年 4 月, 德国“ACCEL Instruments”公司^[20] 领导研发的 10 kV/10 MVA 的电阻型超导限流器在德国 Siegen 市郊的 Netphen 电网中安装测试并运行。这个限流器采用 Bi2212 块材组成 90 个超导线圈, 这在当时是电压级别最高的超导限流器。在 2015 年底, 德国创新项目 ASSiST, 西门子^[21] 与德国 Augsburg 市政府合作, 在其中级电网中完成安装了一个三相电阻型超导限流器。德国耐克森公司 (Nexans)^[22-24] 研制成第一个用二代 YBCO 超导带材制成的 560 A/1.2 kV 的超导限流器, 已经安装在德国 Boxberg 煤矿, 如图 3 所示。从此各国的研究者多用超导二代 YBCO 带材取代 Bi2212 带材, 在超导限流器的研发上进入了第三阶段。



图3 德国 Nexans 制造的 12 kV/800 A 的 SFCL, 安装在德国 Boxberg 配电站挂网运行^[24]

Fig. 3 12 kV/800 A HTSFCL fabricated by Nexans, which installed in Boxberg substation, Germany^[24]

2012 年开始, 英国在能源创新基金项目的支持下, 英国应用超导公司 (ASL)^[25,26] 领导研制并挂网运行了三台超导限流器。第一台为饱和芯型超导限流器, 安装在英国西北电气公司 (ENW) 的 Bamber Bridge 配电站挂网运行一年, 如图 4 所示。第二台 11 kV/400 A 电阻式高温超导限流器提供给苏格兰电力公司, 安装在英国西部电网的 Liverpool 的一个配电站。第三台是由美国的 Zenergy Power 公司提供, 级别为 11 kV/1250 A, 2012 年 7 月挂入英国北方电网 (这台限流器原来是 2011 年 3 月安装在美国宾西法尼亚州的 KEMA 电力测试站的)。接着英国应用超导公司又在英国 Low Carbon Network 的资助下研制了第四台饱和芯的超导限流器。相对于非超导限流器, 高温超导限流器的研究涉及超导材料制备、低温系统、电力控制等多方面的技术, 具有相当高的复杂性, 因此, 英国 ASL 与德国 Nexans 超导分公司、美国 Zenergy Power 公司在研制超导限流器方面都趋于相互合作, 这在其它国家的研究中也是普遍的。

欧洲的另一个国家意大利在高温超导限流器的研究方面也非常积极。2009 年意大利开始了 RTD 项目, 意大



图 4 英国第一台挂网运行的高温超导限流器, 由英国 ASL 与德国 Nexans 合作完成, 安装在英国 Lancashire, Bamber Bridge 配电站 [19,25]

Fig. 4 Pilot 1 HTSFCL in UK. It was supplied by ASL and Nexans, which installed in the substation at Bamber Bridge in ENW's network [19,25]

利能源和电力公司 (RSE S.p.A) [27] 开始研发超导限流器, 在 2012 年采用 Bi2212 带材成功研制 9 kV/3.4 MVA 的三相电阻式超导限流器样机, 它安装在米兰市区的电力用户 A2A 公司的 S. Dionigi 配电站, 运行了两年, 限制电流从 33 kA 限制到 18 kA。在此基础上, 2015 年 RSE 公司 [28] 又采用超导二代 YBCO 带材研制了 15.6 MVA 的超导限流器, 安装在同一变电站, 取代 9 kV/3.4 MVA 的限流器, 在 2016 年进行了磁场测试。

相比德国、英国、意大利在高温超导限流器的研究, 受限 Bi 带材和 YBCO 涂层导体的制备技术, 法国并未继续在此方面进行更多投入, 只是在实验室内进行了小型样机的研制。例如法国科学研究中心 CRETA 实验室采用 YBCO 块材研制了小型高温超导限流器样机等。而瑞士在 1996 年研发出第一台高温超导限流器之后, 在 2002 年, 瑞士 ABB 和德国 Siemens 公司联合采用直径 20 cm、长 8 cm 的 Bi-2212 环研制了 100 kW 的限流器, 在 480 V 运行时的故障电流为 8 kA。

(2) 美洲: 美国

从 1993 年开始, 美国 Lockheed Martin 公司就和 Los Alamos 国家实验室等合作研制桥式 2.4 kV/2.2 kA 超导限流器。1995 年, 该限流器在南加州爱迪生电站共进行了 6 周的试验运行, 它的开断时间为 8 ms, 将短路电流降低约 50% [29], 但没有进入实际的挂网运行。1999 年美国的 General Atomics 和美国超导公司 (ASC) [30] 用 Bi2223 超导线材研制出 15 kV/1.2 kA 桥型超导限流器, 短路试验的故障电流缩减率达 80%。2010 年, 由美国能源部支持, 美国超导公司 (AMSC) 与德国西门子、Nexans、加利福尼亚州爱迪生公司合作研制了 115 kV/900 A 电阻型超导限流器, 短路开端电流 63 kA, 采用 63 个 YBCO 涂层导体绕制的超导线圈组成, 为 115 kV 变压器提供限流保

护 [31,32], 如图 5 所示。同时美国 Zenery Power 公司研制了 12 kV/800 A 的高温超导限流器, Super Power 公司研制了 138 kV 的超导限流器等, 如图 6 所示。2014 年美国应用材料公司 (Applied Materials Company) [33] 宣布在纽约 Knapps Corner 变电站安装并在网测试了 15 kV/400 A 的超导限流器系统, 运行一年。实际上, 由于美国超导公司 (AMSC) 在超导二代 YBCO 涂层导体上的突破, 使其在超导限流器研究上占有绝对优势, 它先后与德国、意大利、韩国、俄罗斯等合作, 将 YBCO 带材出售给各国, 带动了高温超导限流器在世界范围内的应用研究。

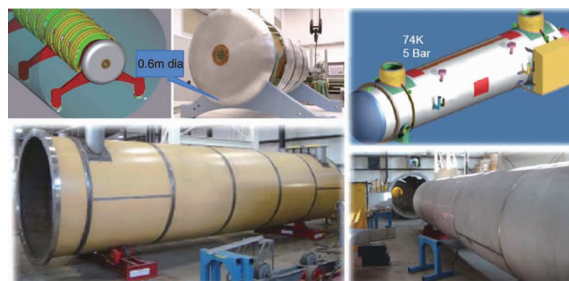


图 5 美国 AMSC 制造的 115 kV/900 A 电阻型 SFCL, 短路开端电流 63 kA [31]

Fig. 5 115 kV/900 A resistive HTSFCL fabricated by American Superconductor company, its prospective fault current is 63 kA [31]



图 6 美国 SuperPower 研制的 138 kV/1840 A 的 SFCL, 短路开端电流 40 ~ 90 kA [31]

Fig. 6 138 kV/1840 A resistive HTSFCL fabricated by SuperPower company, its prospective fault current is 40 ~ 90 kA [31]

(3) 亚洲: 中国、韩国、日本

在亚洲, 首先是中国在高温超导限流器的研究方面开始得很早, 2002 年中科院电工所就成功研制了我国第一台新型高温超导限流器 (400 V/25 A)。2005 年在湖南娄底高溪变电站成功安装并挂网运行 10.5 kV/1.5 kA 高温超导限流器, 它由 3 个相对独立的高温超导线圈系统组成, 线圈采用 Bi-2223 带材, 限制故障电流效率为 80% [34,35], 2011 年在进行了低温杜瓦改造后, 迁至甘肃

“白银超导变电站”再次运行^[36]。值得一提的是,“白银超导变电站”是世界上首个集超导电缆、超导储能、超导变压器、超导限流器于一体的超导变电站,如图7所示。实际上,超导限流器与电力电缆、断路器、变压器等功能融合,会具有更强的技术和经济竞争力。超导变压器作为变电站的主变压器,超导电缆传输电流,超导限流器限制变电站内的短路电流,超导储能系统解决变电站的电压稳定性和电能质量问题,而全部超导的低温系统都采用一个共享,就节省了30%的制冷量,有效地提高了低温系统的效率。在美国2000年的超导计划中就有超导变电站的规划,在其电网发展战略规划(GRID2030)中还提出了超导技术构建骨干电网的蓝图。

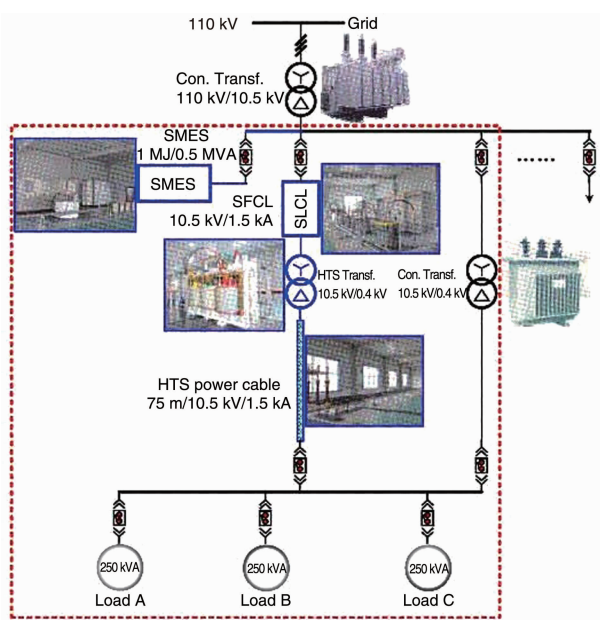


图7 中科院电工所研发安装完成的白银超导变电站拓扑图,包括超导电缆、超导限流器、超导储能、超导变压器^[36]

Fig. 7 Topology of the Baiyin superconducting power substation developed by IEE, CAS, including HTS power cable, SFCL, SMES and power transformer^[36]

2008年,北京云电英纳超导公司与云南电网公司合作,采用Bi系线圈研制了35 kV/90 MVA饱和铁心型超导限流器,在昆明供电局220 kV普吉变电站挂网试运行^[37-39],并且安装了超导电缆与限流器同时运行。2012年又在天津石各庄变电站安装并挂网运行了220 kV/800 A饱和铁芯式超导限流器^[40]。220 kV的高温超导限流器是目前电压级别最高的高温超导限流器,如图8所示,而且2014年英纳超导^[41]又开始了更高电压级别500 kV的饱和超导限流器的研制。

除了中国外,韩国和日本在超导限流器的研制上也一直紧紧抓住超导技术研究的这一领域。作为21世纪前

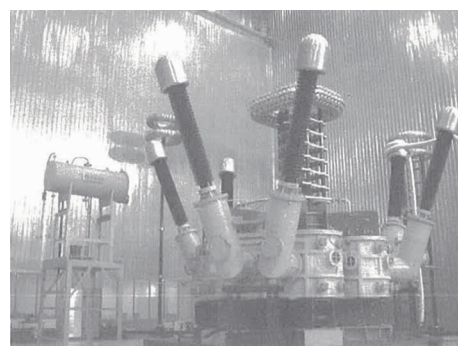


图8 云电英纳超导公司研制的220 kV/800 A超导限流器,安装在天津石各庄变电站挂网运行^[40]

Fig. 8 220 kV/800 A HTSFCL fabricated by Innopower company, which installed in Shigezhuang substation in Tianjin, China^[40]

沿科技研究与发展项目的一个方向,韩国从2001年就开始进行了超导限流器的研究。2002和2004年延世大学^[42]分别研制了1.2 kV/80 A和6.6 kV/200 A的超导限流器。2005年,韩国电力研究所(Korea Electric Power Research Institute)^[43]采用YBCO薄膜研制了6.6 kV的三相电阻型超导限流器,将10 kA故障电流限制在900 A以下,这些前期工作为韩国154 kV的超导限流器研制打下了基础。韩国电力研究所(KEPCO)^[44,45]在2007年研发了22.9 kV混合型高温超导限流器,并在韩国电力研究所古昌电力测试中心进行了安装测试,2009年开始在KEPCO的内网上正式运行。同时在利川的超导电力网的绿色项目(GENI)下^[46,47],KEPCO公司^[48]采用超导二类带材YBCO涂层导体(2G),研发了22.9 kV/630 A混合型超导限流器,安装在利川(Icheon)变电站挂网运行,如图9所示,而且从2011年7月又开始研发154 kV的SFCL,准备在345 kV/154 kV变压器的母线网中挂网。

而日本在政府的支持下,由MITI和NEDO(日本新能源与工业技术发展组织)资助,日本的东北电力公司(TEPCO)、东京电力公司(KEPCO)、CRIEPT、住友(Sumitomo)、三菱(Mitsubishi)、东芝(Toshiba)公司等相继从2000年开始承担超导限流器的研究^[49]。自2000年到2004年,日本东芝电力公司^[50,51]采用Bi2223带材研发了66 kV/1 kA的高温超导限流器。这个限流器的感应磁体电流为750 A,绝缘电压为66 kV。2007年名古屋大学(Nagoya University)^[52]采用一代Bi2212带材研制了三相275 V/6.25 kVA的超导限流器,并且采用二代YBCO涂层导体研制了三相6.6 kV/100 kVA超导限流器。因为YBCO带材的最大磁场的载流性能是Bi2212带材的100倍,因此,在此之后高温超导限流器的线圈多采用二代YBCO涂层导体。而作为日本经济贸易工业部的一个项目(FY2006-07),日本东芝公司又研发了6.6 kV/600 A的三相超导限流器^[53]。

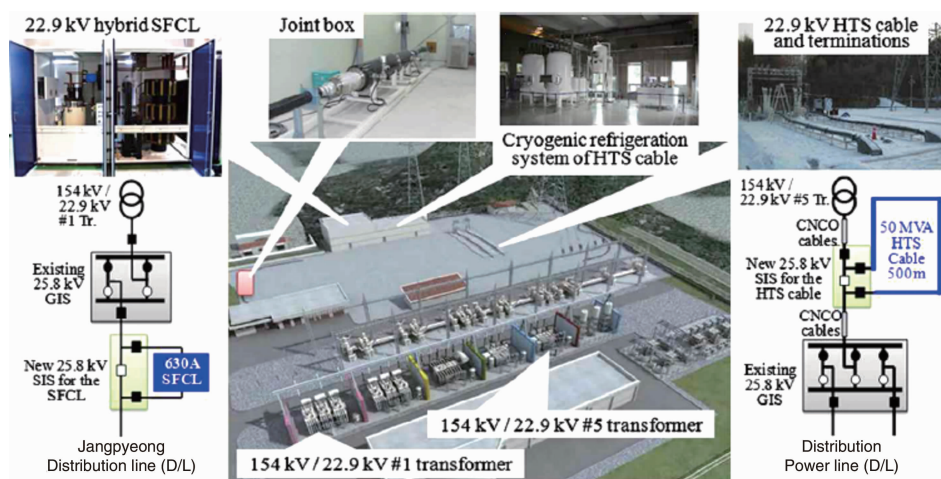


图9 韩国 KEPCO 公司研发的 22.9 kV/630 A 超导限流器, 在利川变电站挂网运行^[47]

Fig. 9 22.9 kV/630 A HTSFCL fabricated by KEPCO, which installed in Icheon substation, Korea^[47]

(4) 其它国家

除了上述介绍的中国、美国、德国、英国等国家进行的实际挂网应用, 俄罗斯、巴西^[54]、匈牙利^[55]、印度^[56]、波兰^[57,58]、澳大利亚、以色列等国家, 也在实验室进行了高温超导限流器的研究。例如, 俄罗斯库尔恰托夫研究所^[59]在 2012 年采用美国 SupePower 公司生产的 SF12100 的 Bi2223/Ag 带材, 研制了 3.5 kV/250 A/1 MVA 单相交流电阻型高温超导限流器, 用电容器电池放电测试, 短路后恢复时间 75 ms。同年, 俄罗斯电子工程研究所^[60]采用超导二代 YBCO 带材, 研制出 3 kV/300 A 直流电阻型高温超导限流器, 短路时间 9 ms, 等等。

1982 年以来先后有 18 个国家进行了超导限流器的研究, 本文对世界各国的研究进行了汇总。至目前为止, 各类不同容量类型的超导限流器样机 119 台, 而其中超过 10 kV 大容量的有 38 台, 实现挂网运行的高温超导限流器 19 台, 分布在 7 个国家: 瑞士、中国、美国、德国、英国、意大利和韩国等。下面将主要挂网运行的超导限流器列在下表中, 如表 1 所示。从中可以看出, 目前主要挂网试运行的超导限流器多以电阻式、饱和铁芯式、桥路式为主。最高级别的是北京英纳超导公司研制的在天津石各庄运行的

220 kV/800 A 的高温超导限流器。

从各个国家超导限流器的挂网运行状况来分析, 超导限流器的技术基本上是成熟的, 但是它并没有在商业上形成大规模的应用。究其原因, 主要在造价和运营费用上。比较常规限流器和超导限流器, 常规限流器不需要维持一个低温环境, 运营电网公司不需要掌握低温技术, 因此常规限流器运营成本很低, 如果超导与非超导限流器的短路电流限制效果相同, 那么, 采用常规限流器就更经济。所以, 美国 Zenergy Power 公司在 2011 年宣布退出超导限流器的研制, 转而向非超导限流器进行研发。2014 年 6 月美国 Bruker 能源与超导技术公司 (BEST) 也宣布将停止在 SFCL 上的投资。在中国, 研发常规限流器一直是限流器研究的重点, 2004 年国家电网公司^[61]就开展了“故障限流器关机技术”研究项目, 其研究成果“串联谐振型限流器”成为超高压电网中最为实用的故障限制器。2009 年在华东电网的 500 kV 瓶窑变电站投运, 在测试故障后的 1.0 ms 进入限流状态。所以, 相比超导限流器, 使用非超导限流器不需要苛刻的低温环境维持运行, 成本低, 实用性强, 这一点凸显出目前超导限流器在商业应用上的局限性。

表 1 目前世界上 7 个国家已挂网或正在挂网运行的超导限流器汇总表

Table 1 High - T_c superconducting fault current limiters have been operated or on operation installed in seven countries at present

Year	Country	Developer	Voltage class, Type	Superconducting materials	Site, Statements	References
1996	Switzerland	ABB	10.5 kV/70 A/1.2 MVA, three-phase inductive	Bi2212 ring	Swiss hydropower plant, one year. first HTSFCL in the world	[17] [18]
2005	China	IEE/CAS	10.5 kV/1.5 kA, three-phase bridge, current limited from 3.5 kA to 635 A	BSCCO type	Gaoxi substation, Loudi, Hunan. third HTSFCL in the world, first HTSFCL in China	[34]

续表

Year	Country	Developer	Voltage class, Type	Superconducting materials	Site, Statements	References
2008	China	Innower	35 kV/1.2 kA/90 MVA, three-phase saturated iron core reactive, current limited from 41 kA to 20 kA	Bi-2223 type	Puji substation, Yunnan	[37] [38] [39]
2011	China	IEE/CAS	10.5 kV/1.5 kA, three-phase bridge,	BSCCO type	Baiyin superconducting substation, Gansu, (HTSFCL from Gaoxi substation and developed)	[36]
2012	China	Innower	220 kV/800 A, three-phase saturated iron core, limiting time 8 ms	Bi-2223 type	Shigezhuang substation, Tianjin. the highest voltage class HTSFCL in the world	[40]
2012	United kingdom	Nexans, ASL, ENW, scottish power	11 kV/400 A, resistive	Bi-2212 tube	Liverpool substation, Second HTSFCL in UK	[25]
2012	United kingdom	Zenergy power, ASL	11 kV/1250 A, pre-saturated core	Bi-2212 tube	Northern Power grid. Third HTSFCL in UK	[25]
2004	Germany	Nexans	10 kV/10 MVA, three-phase resistive, current limited from 18 kA to 7.2 kA	Bi-2212 tube, YBCO bulk	Siegen Netphen, RWE grid, Curl 10 plan	[20] [23]
2009 ~ 2010	Germany	Nexans, ASL, vattenfall	12 kV/100 A, 50 kA, three-phase resistive. First peak limiting 6kA, limiting time 120 ms, operating T = 73 K	Bi-2212 tube	Bamber Bridge substation, Lancashire, UK. operating 9 months. first HTSFCL in UK	[16] [19] [23] [25] [26]
2009 ~ 2010	Germany	Nexans, ASL, vattenfall	12 kV/800 A, 63 kA, three-phase resistive. First peak limiting 30 kA, limiting time 120 ms, operating T = 65 K	Bi-2212 tube	Vattenfall, Saxony Boxberg substation, Germany	[16] [22] [23] [26]
2012	Germany	Nexans, KIT, CDUT	12 kV/560 A	YBCO type	Saxony Boxberg substation, Germany.	[22]
2015	Germany	Siemens, stadtmerke augsburg	817 A/15 MWt, three-phase resistive, middle voltage	YBCO type (AMSC)	Middle grid in Stadtmerke Augsburg, Germany. ASSIST project	[21]
2009 ~ 2010	United states	Zenergy power	13 kV/1200 A, three-phase saturated iron core	Bi-2212 type	Shandin, Avanti substation, Los Angeles, 2 years operation, Southern California Edison operating	[16]
2011 ~ 2012	United states	Zenergy power	three-phase saturated iron core	Bi-2212 type YBCO type	TIDD substation, Ohio	[16]
2014	United states	Applied materials, Inc, three-CE, super power	110 kV/400 A	YBCO type	Knapps Corner substation, New York	[33]
2011	Korea	KEPRI	154 kV/2 kA, three-phase hybrid resistive	YBCO type	Gochang Power Testing Center, Junbuk province	[16]
2012	Korea	KEPRI	22.9 kV	YBCO type	Icheon substation	[46] [47]
2010	Italy	RSE SpA	9 kV/3.4 MVA, resistive	Bi-2212 type	San Dionigi substation, Italy	[16]
2012	Italy	RSE SpA	15.6 MVA, resistive, middle voltage	YBCO type	Milano middle voltage distribution network	[27] [28]

3 高温超导限流器研究的复杂性和制约因素

超导限流器的研究具有一定的复杂性,它涉及了超导材料、电力电子、低温制冷、控制优化等诸多专业领域的技术,是多个学科与技术的交叉综合的结果。从 40 年各国的超导限流器的研究进程中看,高性能、易成材、低成本的超导材料的制备是推进超导限流器研制的关键。目前在高温超导限流器的研制中,所使用的高温超导材料主要有一代 Bi2223/Ag、Bi2212/Ag 超导带材,和二代 YBCO 涂层导体,以及少部分 YBCO 薄膜、块材和 MgB₂ 带材等。目前具备生产 YBCO 涂层导体千米长带的公司主要有:美国 IGC SuperPower 公司、美国超导公司 AMSC、日本 ISTECH/Fujikura 公司、韩国 SuNAM 公司等。美国在制备 YBCO 涂层导体千米长带上占有一定的技术优势,使其在超导限流器的研究上处于领先地位。然而高温超导带材的制造成本高昂,其价格目前大约是 \$ 200 ~ 500/km,是铜线的 20 ~ 50 倍^[62,63],这样就迫使超导限流器的制造费用提高,远高于非超导限流器的成本。所以,高温超导限流器的广泛应用也就受到了限制。

另外,超导限流器的运行需要在低温下进行。在云南普济电网的运行中,因为低温系统故障、直流系统故障、非电量保护动作等原因,造成在运行期间出现多次断路器跳闸,使高温超导限流器运行不稳定。因此,维持低温制冷让超导限流器的运行成本也大幅增涨。同时超导限流器商业化需要制定相应的技术标准。超导限流器综合了超导、低温、电力电子、开关、变压器等多方面的技术,在制定其技术标准上比一般电气设备要复杂,而且还要顾及其标准与各专业的标准相协调,因此,超导限流器的国际标准至今还难以制定。而当前的超导限流器的设计、开发、试验还是套用现有的变压器、电抗器等相关设备的技术标准。

所以,在大规模应用和商业化方面,超导限流器还不能够替代现有的限流器,其商业化应用的制约因素主要有:①超导材料的成本高;②低温运行成本高;③技术标准未制定;④还需要积累运行经验等。总之,降低超导材料的制造成本、研发更经济的超导新材料、开发高效低成本的低温技术是推动超导限流器商业化应用的必然途径。

虽然面临这样一些制约因素,但因为对高温超导限流器的应用前景看好,Nexans 和 AMSC 公司仍然决定继续投资研发 SFCL 技术。实际上正如美国应用材料公司的发言人邓肯所言:“为保证在公共基础设施和电网上高度的可靠性和安全性,选择超导限流器在网测试本身就是为了满足用户的需求。过去几年里积极研发 SFCL、固态

限流器和快速限流器等,是电网稳定技术需求的一种趋势。如果对新的高质量水平的公共电力设施需求增大,并且超导限流器的研发可持续进行,超导限流器的研究就会加速”。

4 结 语

高温超导限流器具有响应时间快、高效限流、损耗低、可靠性高等优点,是一种理想的故障限流器,它的广泛应用会带来巨大的经济效益。当前中国、美国、德国、英国、韩国等国家都实现了超导限流器的挂网试运行,高温超导限流器的技术也逐渐趋于成熟。但是,因为 YBCO 超导带材的制备技术所限,超导带材的价格高昂,对超导限流器的大规模应用造成了阻碍。所以,为了加快超导限流器的商业化应用,世界各国加紧超导限流器的研发,其竞争的焦点主要集中在低成本制造超导带材技术、新超导材料的研发和低温运行低成本技术上。一旦突破超导带材的低成本制造技术的瓶颈,所期待的高温超导限流器的商业化应用就会到来。

参考文献 References

- [1] Zheng Jianchao (郑建超). *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报) [J], 2014, 34 (29): 5140–5148.
- [2] China Electricity Council (中国电力企业联合会). 2015 年 1–11 月全国电力工业统计数据一览表 [EB/OL]. (2015–12–17) [2017–05–22]. [Http://www.cec.org.cn/guohuayutongji/tongjixinx/yuedushuju/2015-12-17/146910.html](http://www.cec.org.cn/guohuayutongji/tongjixinx/yuedushuju/2015-12-17/146910.html)
- [3] 中国能源网. 回眸“十二五”我国电力装机或超 14 亿千瓦 [EB/OL]. (2015–10–27) [2017–05–22]. [Http://www.china5e.com/news/news-921764-1.html](http://www.china5e.com/news/news-921764-1.html)
- [4] 中国能源网. 2015 年我国电力装机突破 14 亿千瓦 [EB/OL]. (2015–12–31) [2017–05–22]. [Http://www.cec.org.cn/xinwenpingxi/2015-12-31/147461.html](http://www.cec.org.cn/xinwenpingxi/2015-12-31/147461.html)
- [5] 中国产业信息网. 2015 年中国电力行业发展现状回顾分析 [EB/OL]. (2016–01–18) [2017–05–22]. [Http://www.chinapower.com.cn/informationhyfx/20160118/16317.html](http://www.chinapower.com.cn/informationhyfx/20160118/16317.html)
- [6] Yan Luguang (严陆光). *Diangong Wenzhai* (电工文摘) [J], 2015, 1 (1): 2.
- [7] Yang Zhengang (杨振刚), Li li (李力). *Southern Power System Technology* (南方电网技术) [J], 2011, 5 (5): 90–93.
- [8] Li Qingmin (李庆民), Lou Jie (娄杰). 电力系统经济型故障限流技术 [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 8.
- [9] Zhang Zhifeng (张志丰). *Post-Doctor Dissertation* (博士后论文) [D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2006: 2.
- [10] Zhu Ninghui (朱宁辉), Zhao Bo (赵波). *Smart Grid* (智能电网) [J], 2015, 3 (9): 833–838.
- [11] Sun Ting (孙婷), Han Song (韩松). *Smart Grid* (智能电网) [J], 2015, 3 (5): 394–399.

- [12] Tang Yuejin (唐跃进), Ren Li (任 丽), Shi Jing (石 晶). 超导电力基础 [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [13] Raju B P, Parton K C. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* [J], 1982, 101 (9): 3173–3177.
- [14] Zhou Lian (周 廉), Gan Zizhao (甘子钊). 中国高温超导材料及应用发展战略研究 [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 10.
- [15] Noe M, Steurer M. *Supercond Sci Technol* [J], 2007, 20: R15–R29.
- [16] Rogalla H, Kes P H. *100 Years of Superconductivity* [M]. New York: Taylor & Francis Group, LLC., 2011: 772.
- [17] Paul W, Lakner M. *Superconductor Science and Technology* [J], 1996, 10 (12): 2.
- [18] Paul W, Chen M. *IEEE Spectrum* [J], 1998, 5: 49–54.
- [19] Klaus D, Wilson A. *CIREN 2009, 20th International Conference on Electricity Distribution* [C]. London: Iron and Steel Institute of Prague, 2009: 8–11.
- [20] Kreutz R, Joachim C. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2005, 15 (2): 1961–1964.
- [21] Tixador P. *Superconductor Week* [J], 2015, 29 (1): 1–11.
- [22] *News Europe & CIS* [N]. Coal International, 2012–03–05.
- [23] Tixador P. *Physica C* [J], 2010, 470: 971–979.
- [24] Novak G, Bock J. *Nexans – First Friday Club* [J], 2011, 4 (1): 2.
- [25] Klaus D. *CIREN 2013 Session 1, 22nd International Conference on Electricity Distribution* [C]. Stockholm: Iron and Steel Institute of London, 2013, 479–482.
- [26] Dommerque R. *Supercond Sci Technol* [J], 2010, 23 (6): 034020.
- [27] Martini L, Bocchi M, *Journal of Physics: Conference Series* [J], 2014, 507: 032003.
- [28] *Superconductor Week* [N]. Coal International, 2015, 29 (10): 1, 12–13.
- [29] Leung E M, Rodriguez A. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 1997, 7 (2): 985–988.
- [30] Leung B, Burley B. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2000, 10 (1): 832–835.
- [31] Juan C, Llambes H. *23rd International Superconductivity Symposium* [C]. Tsukuba: Iron and Steel Institute of Japan, 2010: 1–3.
- [32] Kraemer H P, Schmidt W. *Physics Procedia* [J], 2012, 36: 921–926.
- [33] *Superconductor Week* [N]. Coal International, 2004–05–28.
- [34] Hui D, Wang Z K. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2006, 16 (2): 687–690.
- [35] Zhang Z F, Sun Q. *Cryogenics* [J], 2014, 63: 199–203.
- [36] Xiao L Y, Dai S T. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2012, 22 (3): 5000104.
- [37] Xin Y, Gong W Z. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2007, 17 (2): 1760–1763.
- [38] Gong W Z, Zhang J Y. *Physica C* [J], 2008, 468: 2050–2053.
- [39] Zou Lifeng (邹立峰), Zhou Hai (周 海). *Southern Power System Technology* (南方电网技术) [J], 2010, 1 (Supplement 1): 46–49.
- [40] Xin Y, Gong W Z. *Supercond Sci Technol* [J], 2012, 25: 105011.
- [41] He Jian (何 健). *Southern Energy Construction* (南方能源建设) [J], 2015, 2 (Sup. 1): 30–34.
- [42] Min C A, Hyoungku K. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2005, 15 (2): 2102–2105.
- [43] Hyum O B, Kim H R. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2005, 15 (2): 2027–2030.
- [44] Kim W S, Hyun O B. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2012, 22 (3): 5601404.
- [45] Yim S W, Yu S D. *Physica C* [J], 2010, 470: 1611–1614.
- [46] Kim H R, Yang S E. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2012, 22 (3): 5602704.
- [47] Lee S R, Yoon J Y. *Physica C* [J], 2013, 494: 286–291.
- [48] Lee S, Yoon J. *Physica C* [J], 2014, 504: 148–152.
- [49] Kenji Y, Ichinose A. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2005, 15 (2): 1978–1981.
- [50] Yazawa T, Ootani Y. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2005, 15 (2): 2059–2062.
- [51] Yazawa T, Ootani Y. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2004, 14 (2): 786–789.
- [52] Okubo H, Kurupakorn C. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [J], 2007, 17 (2): 1768–1771.
- [53] Yazawa T, Koyanagi K. *Physica C* [J], 2009, 469: 1740–1744.
- [54] Carlos A B, Carlos Y S. *J Supercond Nov Magn* [J], 2015, 28: 691–695.
- [55] Janos K. *Physics Procedia* [J], 2012, 36: 1258–1263.
- [56] Manglesh D, Sunil K. *CIREN 2013 Session 1, 22nd International Conference on Electricity Distribution* [C]. Stockholm: Iron and Steel Institute of London, 2013, 10–13.
- [57] Janusz K, Michal M. *Physics Procedia* [J], 2012, 36: 845–848.
- [58] Majka M, Kozak J. *Przegląd Elektrotechniczny* [J], 2016, 7 (6): 38–41.
- [59] Keilin V E, Lobytsev V V. *Physics Procedia* [J], 2012, 36: 1215–1218.
- [60] Alferov D F, Akhmetgareev M R. *Physics Procedia* [J], 2012, 36: 1264–1267.
- [61] Wang Huaxin (王华昕). 超高压电网串联谐振型限流器技术 [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [62] Xin Ying (信 赢), Ren Anlin (任安林), Hong Hui (洪 辉), et al. 超导电缆 [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [63] Xiao Liye (肖立业). *Chinese Science Bulletin* (科学通报) [J], 2015, 60 (25): 2367–2375.