

超导限流器——超导技术产业化的领头产品

Superconductivity FCL——A Leading Product of Industrialization of Superconductivity Technology

肖立业 林良真

(中国科学院电工研究所 北京 100080)

一、现实对限流器的迫切需要

电力系统发生短路故障时将会产生很大的短路电流(一般情况下,短路电流约为额定电流的20倍),因此电气设备须按短路电流水平来设计,这就使得电气设备的经济性大大降低。短路电流对电气设备的危害很大,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 Lorentz 力;同时,巨大的短路电流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。因此短路故障将对系统的安全与稳定运行产生严重的影响。尽管如此,电力系统中的短路电流水平却在不断地增长,这是因为短路电流水平随电网容量的扩大而急剧增长。一方面,人类对电能需求的日益增长使得电网的容量越来越大;另一方面,用户对电能的安全性、可靠性和质量提出了更高的要求,而为了安全可靠地输送高质量的电能,要求电网电气紧密连接,使电网向超大规模方向发展,从而使电网的容量越来越大。短路电流水平的增加不仅对电网的稳定运行带来更大的威胁,而且将使运行中的电气设备逐渐与短路容量失配并对新投入电网的断路器和其它电气设备提出了更高的要求。特别是对于配电系统来说,可靠性和安全性的要求越来越高,负荷的容量越来越大,而负荷中心人口密集,要求配电设备紧凑化,因而短路电流的增加使得其对配电系统的电气设备提出了更为苛刻的要求,对运行中的设备构成了更大的威胁。

目前,世界上广泛采用断路器对短路电流全额开断以保护系统的安全运行。由于短路电流的水平与系统的容量直接相关,在断路器的额定开断电流水平一定的情况下,采用全额开断短路电流将会限制电力系统的容量的增长,而且断路器价格昂贵且其价格将随其额定开断电流的增加而迅速上升。目前,在电压等级较低的配电系统中也考虑使用 GTO 或 IGBT 代替断路器开断故障线路,即在电流过零时切断故障线路,但是该方法可靠性不高,特别是

对于电压等级较高和运行电流较大的线路,技术上仍有许多困难。

为了尽可能将短路电流限制在可开断的水平下,现在流行的方法是:从电网结构上考虑适当提高电压等级、分割母线和分割系统以及对具有大容量机组的电厂采用单元接线等方法;从运行方式上考虑采用变压器中性点不接地或中性点小阻抗接地运行、在负荷允许条件下将双回线路按单回路运行以及对环形网络在穿越功率最小处开环运行等方式;在电气设备方面考虑采用电抗器和高阻抗变压器等方法。然而,改造电网结构来限制短路电流的费用非常高;改变运行方式将容易导致电力系统运行的不稳定性;采用高阻抗变压器将使电压调节变得困难,而采用电抗器将降低电网的稳定性并增加网络损耗。

综上所述,如果能开发一种串入电力线路的限流装置,使其在电网正常运行时表现为一个低阻抗甚至零阻抗,而在电网中出现短路故障时又迅速表现为一个高阻抗,那么电网的短路电流将会被有效地限制,这时采用较低容量的断路器就可以开断故障线路以保护电网其它部分的正常运行。这无论是对输电系统还是对配电系统来说,都将大大提高其可靠性和安全性、增加输送容量以及提高系统的稳定性,同时大大地降低电网的建设和改造成本,并通过显著降低短路电流延长电气设备的寿命。目前,电力技术新的发展方向之一是发展柔性交流输电系统(FACTS),故障电流限制器(FCL,简称限流器)的研究就包含在 FACTS 的研究中。

根据以往电网运行的经验,一个性能优越的限流器除了应满足运行安全、符合电力设备制造标准、基准冲击电压绝缘水平符合要求以及能与现行的电网保护措施兼容等基本要求外,还应尽量满足以下重要的技术要求:反应速度快,最好在一个周期之内作出反应(即反应时间应小于20ms);可触发,最好是在出现故障时自动触发;至少能将短路电流降低约50%;当故障线路被断路器开断后,能自动快速复位并能在几秒之内多次动作(至少两

次)以配合重新合闸;正常运行时具有低的能耗(小于穿越功率的0.25%);可靠性高(至少要高于与之协同运行的断路器的可靠性)。

超导限流器无与伦比的 优点及其工作原理

目前在配电系统中广泛使用超快速熔丝来切断故障电流,即在短路电流达到最大之前迅速切断故障线路,从而达到限流的目的;也有采用熔丝配以电抗器联合使用。其工作原理是:当出现短路故障时,过流使熔丝熔断,这时与熔丝并联的电抗器投入线路,从而达到限流的目的。此外,也有人考虑以下几种方案:利用热敏电阻材料,在回路电流增大时,材料温度升高,电阻增大,达到限流的目的;利用水银的相变,正常运行时,使水银处于液态,短路时,水银将由于焦耳热功率的增大而汽化,使回路电阻增大,从而达到限流的作用。但显然,一次故障过后,熔丝无法重复工作,须重新安装新的熔丝,因而无法配合断路器重合闸。利用热敏材料或水银制作的限流器反应速度较慢,复位速度慢。以上几种方案都无法完全满足相应的技术要求。

超导限流器(SFCL)则是利用超导体的超导态——正常态转变以实现限流功能。它能在高压下运行,在正常运行时可通过大电流而只呈现很小的阻抗甚至零阻抗;反应速度快(能在毫秒甚至亚毫秒级的时间内作出反应);可根据需要将短路电流限制到额定电流两倍左右的水平,因而其限流效果非常明显;能自动触发、自动复位且复位速度快;同时集检测、触发和限流于一身,因此超导限流器能最漂亮地符合前述技术要求。不仅如此,通过SFCL,发电站能把电能从过剩的配电系统调节到电力不足的另一系统,同时保护本系统不受其它系统故障的影响;将来在超导电力系统中装备SFCL以后,电气设备可以按额定电流水平而无需按故障电流水平设计。正因为如此,SFCL的研制及应用将具有重大的意义,已引起了国际上的广泛重视。

目前,大多数原型SFCL都是利用超导体的超导态—正常态(S—N)转变的物理特性和一些辅助部件在线路出现故障时产生一个适当的阻抗来实现其限流功能的。当故障线路被开断或故障消失后,SFCL自动复位。根据SFCL的限流方式,可将SFCL分为电阻型和电抗型两种。电阻型SFCL的原理最简单。在电网正常运行时,流过SFCL的交流电流的最大值小于超导体的临界电流 I_c 。当出现短路故障时,短路电流将迅速超过 I_c ,使触发元件失超,从而使SFCL在线路中表现为一个电阻,起到限流作用。电抗型SFCL主要是通过超导体的S—N转变改变各个线圈电流的分布来实现其限流功能。正常

运行时,限流线圈的磁通被与其耦合良好的其它线圈所产生的磁通所抵消,因而呈现一个低阻抗。发生故障时,超导部件失超,从而改变各线圈电流的分布情况,使限流线圈呈现一个较大的阻抗以达到限流的目的。根据目前已有的SFCL的结构形式,可将电抗型SFCL分为以下几种:变压器型、混合型、磁屏蔽型、无感电抗器型、饱和铁芯电抗器型、三相电抗器型、桥路型、磁通锁定型、可变电感型等。

此外,也有人提出了适合直流输电系统的超导直流限流器(SDCFCL),其工作原理是:铁芯上的两个超导线圈通过反方向的正、负方向电流,正常运行时,两个线圈产生的磁通相互抵消,发生单侧接地(正负两极短路的几率很低)短路故障时,正负向的电流失去平衡,短路侧的电流增大,短路电流被超导线圈限制。

超导限流器的研究发展现状

SFCL并不是一个新的概念,最早有关SFCL的设想在70多年以前就提出来了。70年代中期,实用NbTi超导材料的出现引起了对SFCL的研究兴趣,O.K.Maward和L.D.McConnell分别申请了有关SFCL的专利。美国阿贡实验室和能源部电力研究所率先对SFCL进行了研究,K.E.Gray和D.E.Fowler对电阻型SFCL进行了详细的研究。英国的B.P.Raju等提出了饱和铁芯电抗器型SFCL的原理设计并对一台单相3KV/556A的SFCL进行了试验研究。当时,由于无法生产低交流损耗的NbTi导线且因其价格昂贵而使得SFCL的实用变得非常困难。

1983年,低损耗极细丝NbTi多芯复合导线的问世使得超导体在SFCL方面的应用研究又活跃起来,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。1983年,美国西屋公司和洛斯阿拉莫斯实验室提出了桥路型SFCL的概念。1986年,法国人M.Bekhaled等提出了变压器型SFCL的设想,日本也于1993年开发出一台10KVA的变压器型原型SFCL。1989年,日本的Kado等提出了三相电抗器型SFCL的原理设计和试验研究,后来日本人对这种结构的SFCL进行了一些其它方面的研究。1989年,D.Ito等开发了无感电抗器型SFCL。1992年,法国的P.Tixador等提出了混合型SFCL的概念,在这以后,他们对这种结构的原型SFCL进行了试验。近年来,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交流复合导体成功研制成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。GEC Alsthom、法国电力公司和Alcatel Al-

Alstom 研究所合作对电阻型 LTSFCL 进行了综合研究。1993 年他们成功地研制成一台 7.2KV/1 KA 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。

1986 年高温超导体 (HTS) 的发现为 SFCL 的实用化带来了希望, 因为高温超导限流器 (HTSFCL) 可以运行于 77K, 使得运行成本大大降低; 且因其具有比 LTSFCL 高得多的磁热稳定性, 使得其运行的稳定性和安全性大大提高。因此, 近年来 HTSFCL 一直是高温超导体在强电方面应用的热点, 美国、德国、法国、瑞士、日本、澳大利亚、加拿大、以色列、英国、意大利和西班牙等国家都开展了高温超导限流器的研究。加拿大 Hydro - Quebec 从 1993 年以来一直开展屏蔽型 HTSFCL 的研制和开发工作, 他们采用高温超导体块材烧结成的中空圆筒作为次级屏蔽筒。ABB 设在瑞士的研究中心利用高温超导体烧结成的圆环作为屏蔽部件, 1994 年, 他们成功地试验了 480V/250A 的原型 HTSFCL; 1996 年, 他们研制成的 1.2MVA 三相 HTSFCL 至今已在一个电厂成功地试验运行了近两年。1993 年以来, 美国 Lockheed Martin 公司 (LMC) 与美国超导公司 (ASC)、洛斯阿拉莫斯实验室 (LANL) 等合作开发桥路型 HTSFCL; 1995 年, 他们研制成一台 2.4KV/2.2KA 的 SFCL, 该限流器在加州成功地通过了 6 周的试验运行, 它能在 8ms 内作出反应, 能将故障电流的第一个峰值限制到不接该限流器时的 52%, 第一峰值过后, 故障电流被限制到 42%, 该限流器对相隔 0.8 秒的两个连续短路故障 (每一故障维持 0.4 秒) 成功地作出了反应。值得一提的工作还有: 日本电力工业公司中央研究所近几年开展了 6.6KV 屏蔽型 HTSFCL 的研究, 他们采用高温超导薄膜作为屏蔽部件; 德国西门子公司也开展了电阻型 HTSFCL 的研制工作, 他们采用 YBCO 薄膜作为限流器的主要部件; 澳大利亚 Wollongong 大学开展了饱和电感器型 HTSFCL 的研究, 他们采用 Bi - 2212 线圈提供使铁芯饱和的背场。还有许多研究机构和公司也对电阻型和屏蔽型的 HTSFCL 进行了研究。

超导限流器的应用前景

SFCL 的功能比普通限流器更强, 除了提高电力系统的稳定性、安全性、可靠性和电能质量外, 它还具有以下功能:

用于保护整个母线 对于这种情形, 当负荷增大导致采用容量更大的变压器时, 可以不用更换断路器和隔离开关等电气设备; 在新的功率水平上, 可采用大功率低阻抗变压器维持电压调节水平, 并

可使短路电流对变压器的破坏得到限制; 当连接变压器的高压线路上的故障电流得以限制后, 在中等电压等级的母线发生短路故障时, 可使高压母线的电压降减少到最低程度。

用于联络两段母线 对于这种情形, 具有较小额定电流容量的 SFCL 即可满足要求。分离的母线联接后, 短路电流对母线的影并不明显加剧; 当某一母线发生短路故障时, SFCL 中的电压降可保证未发生故障的另一母线的电压水平, 使其维持正常运行; 联络多段母线后, 可使多台变压器并联运行, 从而降低系统阻抗, 增强变压器的调压能力, 并可避免使用变压比可调节的变压器; 一段母线上的过剩的电能可供另一段母线上的负载使用, 从而使变压器额定容量的利用率提高。

用于保护母线上的单个负荷 可用于保护难以更换的设备 (例如: 地下电缆或安装在地下室的变压器等), 从而降低设备和线路的改造费用; 此外, 也可保护其它情形的单个负荷。

其它应用 用于两系统的联络母线以保护一系统不受另一系统故障的影响; 与静态电容、电感等电气设备配合使用可调节电力系统的潮流分布; 采用 SFCL, 短路电流的水平可按要求限制到任意水平, 例如可将短路电流限制到线路容许的过载水平, 从而可使断路器对瞬态故障不作出反应; 在发电机端配备 SFCL, 可以减少故障对发电机组的冲击; 在变压器端配备了 SFCL, 可以减少合闸时的冲击电流。

SFCL 的所有可能的应用可能并不止于以上所列。

经过多年的研究开发, 面向配电系统的 SFCL 已接近实用的水平, 适应于供电系统和输电系统的 SFCL 研究也在计划中。目前, 国际上普遍认为高温超导限流器将是高温超导体大规模应用的领头产品。美国 LMC 已将 HTSFCL 的商业化作为近期目标提上日程, 他们已着手研制 69KV 级的 HTSFCL。法国 Alcatel Alsthom 研究所的研究人员认为高压限流器即将产业化是毫无疑问的, 他们计划研制适用于法国 225KV 电网联络母线的 1 000MVA 级的三相 LTSFCL, 他们认为 145KV 级的 SFCL 将拥有全球范围内的市场。日本东京电力公司目前每年 SFCL 研究开发费用达 100 万美元, 他们预期 2010 年在 500KV 的输电系统中配备高温超导限流器, 东芝公司和日立公司等也有类似的计划。美国能源部 (DOE) 制定的 1998 年至 2010 年的国家能源战略计划中把超导电力设备 (HTSFCL 和 SMES 等) 的应用作为实现其目标的有效途径。专家们预计, 2000 年以后几年高温超导电力设备的销售额可达 40 亿到 60 亿美元, 其中 HTSFCL 将占主要的部分。

综上所述, SFCL 的应用前景将是十分诱人的。

现代冶金的发展与创造性思维

Development of Modern Metallurgy and Creative Thinking

张 建¹ 王 皖² 王新华¹

(北京科技大学冶金学院¹ 北京 100083; 安徽马鞍山钢铁股份有限公司设计研究院²)

“钢铁大国”=“钢铁强国”?

1996年我国的粗钢产量第一次超过1亿吨,达到1.011亿吨,占世界总产钢量的13.5%,跃居世界第一,几代人的“钢铁大国”梦变成现实。然而,欣喜之余我们却不能不冷静地面对我国冶金企业总体意义上长达数年之久的经济滑坡,许多钢铁企业包括一些重点大型联合企业出现了亏损现象或濒临亏损。从作为经济“晴雨表”的股市中反馈的信息看,我国沪、深两地股市的钢铁板块中的数十支股票在“牛市”中仍几乎无一例外地成为低价股,其主要原因是这些上市的钢铁企业经营业绩不佳,微利或在亏损边缘挣扎。考虑到被批准上市的钢铁企业

在整个冶金行业中尚属佼佼者,则整个冶金行业的形势就相当严峻了。

近20年来,世界粗钢产量一直稳定在7.0~7.8亿吨之间,各主要先进的产钢国家,不再强调钢产品数量的增长,而是着力提高产品质量,降低产品成本,发展高技术含量、高附加值产品,进行产品结构的优化。而这几方面也正是中国钢铁工业的薄弱点。其具体表现是,尽管钢产量每年已达亿吨,但近年来我国平均每年仍需进口钢材800万吨以上;我国目前还有一些高技术含量、高附加值的钢产品不能生产或生产能力远远不能满足国内需求,如1998年冷轧硅钢片满足率为33%、石油油井管为44%、镀锡板为29%、不锈钢板仅仅20%^[1]。与此相应,我国的钢材产品在国际市场上缺乏竞争力、产

高温超导限流器的研究建议

1986年高温超导体被发现以后,工业发达国家都对超导体在电力方面的应用研究给予了高度的重视,所以才有如今展现在我们眼前的一幅美妙的超导限流器的前景图。与此同时,高温超导变压器、电缆、电机和超导储能系统(SMES)的研究也取得了长足的进展以致超导电力系统的研究都开始启动了。目前,超导电力系统被普遍认为是21世纪电力系统的发展方向。

我国是一个拥有13亿人口的大国,经济发展刚刚起步,电能需求的增长速度比发达国家快得多,因此SFCL的研究和开发对我国的经济意义和紧迫性都将远远超过其它国家。当今,全球的经济越来越以知识经济为主导,一个国家的强大及其经济的可持续发展与否将越来越取决于其高技术产业在全球所占的比重。我国开展超导体在电工方面的应用研究已有30多年的历史。通过30多年的不懈努力,已积累了十分良好的实验条件并拥有一批优秀的世界级水平的研究开发人员。面对一个新的潜在的超导限流器的国际大市场,我们强烈建议我国有

关部门排除一切障碍,积极地、高强度地支持在我国开展超导限流器的研究和开发工作,使超导限流器尽快在我国形成规模产业以带动下世纪我国超导产业的发展,从而确立我国在具有经济战略意义的超导产业中的国际地位!

我们建议首先开展面向配电系统的高温超导限流器的研究与开发工作,因为高温超导限流器运行成本低、稳定性高。目前,高温超导材料的性能已越来越接近实用化的水平,它以后在很多方面必将取代低温超导体。因此,开展HTSFCL的研究还可以为以后从事其它超导电力设备和超导电力系统的研究和开发打下基础,并通过高温超导限流器的研究开发和试验运行,使我国在高温超导的电力应用方面有重大技术突破并达到国际一流水平。总体而言,我们眼下不应急于研制更高电压等级的超导限流器,我们应尽快使面向配电系统的HTSFCL产业化并最终为在下个世纪的国际超导产业中占有一席之地打下基础。

(感谢林玉宝副研究员、韩燕生副研究员和博士生叶林在调研和本文成稿过程中给予的有益帮助和建议)

(责任编辑 王宏章)