交流饱和铁芯型故障限流器的现状与发展

袁佳歆,张朝阳,周 航,陈 凡,蒋紫薇,倪 周 (武汉大学 电气与自动化学院,湖北 武汉 430072)

摘要:对交流饱和铁芯型故障限流器(SCFCL)的研究现状和发展历程进行了综述。首先介绍了直流偏置型、 永磁体偏置型、超导型和混合偏置型这4类SCFCL的工作原理、拓扑结构、等效电路和应用实例,比较并分析 了4类SCFCL的功能特点和技术优缺点。其次,针对4类SCFCL存在的直流损耗较大、永磁体励磁能力不 足、高温超导系统运行维护成本高、所需软磁材料较多和经济性较差等问题,介绍了SCFCL在拓扑结构、参数 设计、励磁损耗以及安全稳定性等方面的最新研究成果,并讨论了关于SCFCL的新技术与新方法。最后明确 了磁性材料与超导材料的优化问题和SCFCL的经济性与利用效率问题是SCFCL发展的核心问题,进而在拓 扑优化、材料优化和多功能化等方面对SCFCL未来发展方向进行了展望。

关键词:SCFCL;磁饱和;短路电流;永磁体;限流性能;综述

中图分类号:TM 471

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005008

0 引言

随着我国工业化水平的不断提高,电力需求也 随之急速增长。随着电力系统的不断发展以及装机 容量的不断增长,故障后电网中的短路电流显著增 大。在电力系统发生的各种故障中,短路故障是破 坏性最强的一种系统故障,所产生的短路电流可能 大于最大额定电流的20倍。因此短路电流超标问 题给系统带来极大的威胁^[1-4]。

当前阶段,限制短路电流的方法主要为电力系 统等级措施和设备等级措施^[5-9]。系统等级措施主 要包括实施电网分层分区运行、采用母线分段运行、 提高电压等级、采用高压直流输电技术、合理规划供 电接入方式等。这些措施主要针对电网结构的合理 规划,是控制系统短路电流增长的根本措施。但是, 在实际电网中很难对其进行优化。设备等级措施主 要包括采用高阻抗变压器和发电机、变压器中性点 连接小电抗、串联电抗器、串联限流熔断器、故障限 流器(FCL)等。前3个方法在正常和故障情况下都 会增加系统阻抗,影响了电力系统的稳定性。串联限 流熔断器的方法简单,成本低且限流效果好,但需与 快速开断载流设备、氧化锌避雷器等装置配套使用。 此外,限流熔断器中断能力有限,只适合低电压水平 的应用,目前将其应用于输电系统中的可行性不大。

近年来FCL逐渐成为备受关注的限制短路电流的有效方式^[9-12]。经过40多年的发展,FCL的研究、

收稿日期:2020-01-19;修回日期:2020-03-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902904);深圳 市科技创新计划项目(JCYJ20170306170937861)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2017YFB0902904) and Shenzhen City Science and Technology Innovation Plan(JCYJ20170306170937861)

设计和开发取得了巨大进展,一些FCL样机已经进入试验与测试阶段^[13-15]。随着分布式电源在电力系统中的大范围应用,研究人员逐渐开发了应用可靠且经济的商业化FCL设备。

文献[16-21] 描述了不同类型FCL的拓扑结构 和工作原理,并根据其限流原理和拓扑结构进行分 类。通常情况下,FCL可以分为超导FCL(SFCL)、固 态FCL(SSFCL)、饱和铁芯型FCL(SCFCL)以及混合 FCL。混合FCL结合了前3种限流器的限流技术或工 作原理,主要利用超导材料和其他励磁材料,如利用 高温超导HTS(High Temperature Superconducting) 线圈与电力电子设备相结合的SSFCL,以及直流绕 组使用超导材料的SCFCL。文献中描述了上述FCL 的不同特征,并且研究团队大多建立了大功率或等 比例尺寸的实体模型,对不同FCL的各种特性进行 了试验验证。

目前国内外学者对SSFCL和SFCL的研究较多, 而对SCFCL的研究较少。本文对电力系统SCFCL 的研究近况和最新进展进行了综述,并介绍了几种 SCFCL的新型拓扑和工作原理,探讨并对比了其特 点和优劣势。

1 FCL的发展现状

当电力系统正常状态时,理想的FCL阻抗很小, 不会影响电力系统的正常运行。当故障发生后,理 想的FCL阻抗在短时间内迅速增大,从而起到限制 短路电流的作用。当故障清除后,FCL阻抗快速恢 复到小阻抗状态。总而言之,理想的FCL具有常态 阻抗低、动作阻抗高的特点,其工作原理如图1所 示。图中, $Z_{\rm f}$ 为FCL阻抗最小值; $Z_{\rm f}$ 为FCL阻抗最大 值; τ 为响应时间,即阻抗由最小值变至最大值所需 时间; ρ 为恢复时间; $t_{\rm f}$ 为故障发生时刻; $t_{\rm f}$ 为故障清 除时刻。FCL最重要的2个参数为限流系数和响应 时间,限流系数为安装FCL前、后的故障电流之比。

210



图 1 理想 FCL 原理图 Fig.1 Principle diagram of ideal FCL

本节对4种FCL类型的工作原理与发展现状进行简单的介绍,并分析其优劣势。

SFCL利用了超导材料的超导特性,即在某一温度下导体电阻为0^[22-30],超导材料的应用可以大幅减小FCL中的功率损耗。当前的SFCL主要分为电阻式SFCL、电感式SFCL、混合式SFCL和桥路式SFCL。然而,由于超导材料造价昂贵,SFCL和桥路式SFCL。然而,由于超导材料造价昂贵,SFCL的一次生产成本大幅增加;SFCL需要相应的制冷配套系统,进一步提高了SFCL生产成本。因此当前SFCL无法实现大范围的推广和应用。

SSFCL的发展受益于电力电子技术的成熟和电力电子器件的应用。其限流原理为利用电力电子器件的开通与关断限制短路电流,因此SSFCL继承了电力电子器件响应速度快、限流能力强的优点。然而,在研究的过程中出现如下问题:①SSFCL中各电力电子器件的均压、均流问题难以解决;②信号隔离也是当前SSFCL面临的主要问题;③SSFCL中由于功率损耗导致的电力电子器件发热问题亟需解决。当前SSFCL仅适用于配电网^[31-37]。

SCFCL是磁控电抗器的继承与发展,其限流原 理为利用软磁材料的非线性磁化特性,通过改变软 磁材料的饱和程度来调节 SCFCL的阻抗值,从而限 制系统的短路电流。SCFCL的动作速度快、恢复时 间短,且自动触发、响应灵敏。然而,SCFCL的体积、 重量、磁性材料的消耗量等问题限制了其大规模推 广与应用。特别在高压大容量领域,由于 SCFCL需 要通过直流偏置电源对铁芯进行预饱和,大功率直 流偏置励磁电源的能量消耗是当前面临的重要 问题^[38-40]。

SCFCL的典型结构见图2。图中,*i*_{ac}为系统中的 交流电流;*i*_{dc}为直流偏置电流。SCFCL一般有2柱铁 芯,分别为铁芯 I 和铁芯 II,每柱铁芯上分别缠绕交 流线圈和直流线圈,且2个交流线圈相互串联。一 般而言,直流线圈的绕制方向相同,而交流线圈的绕 制方向相反。因此,在任意半个周期里,其中一个铁 芯的直流磁通方向与交流磁通方向相同,而另一个 铁芯中的直流磁通方向与交流磁通方向相反。由直 流线圈产生的直流偏置磁动势使2个铁芯处于深度 饱和状态。



Fig.2 Typical topology of SCFCL

正常状态下,SCFCL交流线圈中的工作电流远 小于直流电流,因此不会使铁芯退饱和,故此时 SCFCL的阻抗很小,对电力系统的正常运行几乎不 产生任何影响。当故障发生后,由于故障电流迅速 增大,交流磁动势迅速增大,在一个周期内,2个铁 芯柱中的交流磁通交替与直流磁通相抵消,导致2 个铁芯在正负半个周期内交替退饱和。在这种状态 下,退饱和铁芯柱中的磁导率μ。迅速增大,导致该铁 芯柱上的交流绕组电感增大,起到限制短路电流的 作用。

SCFCL的响应速度快,恢复时间短,适用于高压 大容量领域。因此 SCFCL受到了国内外许多专家 的关注。同时,为了提升 SCFCL 的性能,近年来国 内外的很多学者和专家对 SCFCL 进行了一系列理 论分析与拓扑结构的优化。

2 SCFCL的分类与简介

当前SCFCL的拓扑主要可以分为常规型SCFCL 和超导型SCFCL,其中,超导型SCFCL利用超导材料 减小直流损耗、提高效率;常规型SCFCL可以根据 其励磁方式的不同分为直流偏置型、永磁体偏置型 和混合偏置型。

如前文所述,解决铁芯预饱和所需的直流偏置 励磁电源的能量消耗问题是当前SCFCL的发展趋 势。与直流偏置型SCFCL相比,超导型SCFCL的电 阻更小,因此其载流能力更强、损耗更低;永磁体偏 置型SCFCL不需要直流励磁,因此其直流偏磁励磁 电源的能量消耗更低。然而,在当前阶段,超导材料 的维护费用很高,而永磁体偏置型SCFCL的直流偏 置能力较弱,也不适用于大范围推广与商业化应用。 在这种情况下,混合偏置型SCFCL应运而生,其采 用多种励磁方式并用的方法,不仅提高了直流偏置 能力,而且减少了直流损耗,降低了维护成本。

2.1 超导型 SCFCL

超导型SCFCL利用超导材料作为直流线圈,大幅减小了直流损耗,可以产生较大的直流偏置磁动势。超导型SCFCL的发展与HTS材料的发展密切

相关,基于HTS材料的超导型SCFCL是近20年来FCL领域的研究热点。

图 3 为典型的超导型 SCFCL 拓扑结构,其由 2 个铁芯、2个超导材料直流线圈、2个常规材料交流 线圈和1个直流偏置电源构成^[41-44]。在额定工作状 态下,常规材料交流线圈中流通的电流为较小的额 定电流,此时铁芯的饱和度较高,相对磁导率低,可 视为阻抗较小的空心电抗器。当交流系统发生故障 后,交流线圈产生的交流磁动势随故障电流的增大 线性增加,迫使铁芯脱离饱和状态,从而在每半个周 期内产生逐渐增大的线圈阻抗以限制短路电流,大 幅减小了故障电流的峰值。超导型 SCFCL本质上 可视为利用铁磁材料的非线性磁化特性来改变电感 的电抗器。



--→ 直流磁通, -→ 交流磁通

图 3 超导型 SCFCL 典型拓扑

Fig.3 Typical topology of superconducting SCFCL

三相超导型 SCFCL 的实体装置由 6个环形铁芯、6个超导线圈、6个常规线圈和 3个偏置电源构成,见附录中图 A1。其中,该装置的三相内铁芯柱布置在包含 HTS 直流偏置线圈的低温恒温器内。铜线圈缠绕在三相外铁芯柱上,且对称放置^[45-46]。图 A1 所示的三相超导型 SCFCL 结构的限流系数约为1.67。由于直流线圈采用了超导材料,直流功率损耗大幅降低,但其维护和运行成本大幅提高。

由于超导型SCFCL无需检测故障是否发生,故 障后自动快速响应、损耗低,因此逐渐成为世界各国 的研究热点,许多样机已进入了试验研究阶段。

德国 Zenergy 公司开发了 13.8 kV / 0.8 kA 和 138 kV / 1.8 kA 的超导型 SCFCL。中国南方电网于 2007年在普吉变电站开发并安装了 35 kV / 90 MV·A 的超导型 SCFCL^[47-48]。InnoPower公司已成功开发了 220 kV / 300 MV·A 的超导型 SCFCL样机,现安装于 我国天津市史各庄变电站,并于 2012 年 6 月正式投 入运行^[49-50],如附录中图 A2 所示。2017年,中国南 方电网公司成功研制了 500 kV 的超导型 SCFCL。

一般而言,超导型SCFCL已经在高压和大容量领域得到了广泛的探讨和研究。然而,由于超导材料价格昂贵,低温制冷系统损耗和维护成本高,超导元件的过电压问题也亟待解决^[51-52],超导型SCFCL

的发展和大范围推广受到限制。优化超导材料、提高超导型 SCFCL 的经济性是目前超导型 SCFCL 的 发展方向之一。

目前,对于超导型SCFCL的研究主要集中于结构优化、线圈设计、系统仿真等方面。文献[53]提出 了一种新型超导型SCFCL参数优化方法,并对超导 型SCFCL重新进行了建模和优化。考虑超导型 SCFCL备组成元件的特性,同时为满足电力需求和 电网特性,其求解速度更快且求解精度更高。文献 [54]深入探究了超导型SCFCL中线圈和铁芯设计 参数之间的关系及其对限流特性的影响,分析结果 显示在保证限流性能的同时可以减小铁芯尺寸,这 种优化设计可以显著提高SCFCL的经济性,推动了 SCFCL的商业化应用。文献[55]分析了超导型SCFCL 与重合闸配合的条件与关系,考虑了设备在运行中 的安全性和稳定性问题。文献[56]分析了超导型 SCFCL的功率损耗,在实际操作中超导型SCFCL中 HTS线圈的功率损耗不可忽略。

2.2 直流偏置型SCFCL

除了根据所用材料和励磁偏置方式进行分类以外,还可以根据SCFCL的拓扑结构进行分类,一般可分为开环SCFCL和闭环SCFCL。

开环 SCFCL 是最典型的 SCFCL 拓扑之一。开 环 SCFCL 的基本结构主要由 2 个铁芯柱组成,每个 铁芯柱上分别缠绕着 1 组反向绕制的交流绕组。交 流绕组外围缠绕着直流线圈,用于使 2 个铁芯柱预 饱和,具体结构见附录中图 A3^[57-59]。

在正常工作状态下,交流电流产生的磁动势很 小,无法抵消直流磁动势,无法使铁芯退饱和。此时 2个交流绕组可视为空心电抗器,对电力系统正常 运行几乎不产生影响。当系统发生故障后,由故障 电流产生的交流磁动势迅速增大,导致铁芯退饱和, 铁芯磁导率增大,交流线圈阻抗随之增大,从而限制 了短路电流。由于每半个周期只有一个交流绕组会 产生与直流磁动势相反的交流磁动势,每个铁芯上 的交流绕组分别在正负半个周期交替限制单相短路 电流。以文献[57]中的一台额定电压约为415 V的 开环 SCFCL 样机(铁芯材料为各向异性的硅钢片, 横截面积为225 cm²,高度约为90 cm)为例。其限流 系数高达1.8,反应时间约为8ms。为了使铁芯预饱 和,样机所需的直流磁动势约为60kA·匝。由于开 环SCFCL中铁芯材料要与空气形成闭环磁路,开环 SCFCL的漏磁较大,导致了其需要较大容量的直流 电源,且直流损耗较大。

与开环SCFCL相比,闭环SCFCL在正常状态下的 直流损耗更低^[60-67]。文献[68]提出了一种闭环SCFCL 拓扑,由4个相互闭合的铁芯柱、2组交流线圈和1组 直流线圈组成,见附录中图A4。 与文献[57-59]中的开环SCFCL类似,闭环SCF-CL将开环SCFCL的拓扑变为四柱型,外侧2个铁芯 柱为直流磁通提供磁阻更低的铁芯回路。这一改进 措施降低了直流损耗,减小了所需的直流磁动势和 直流电源容量。但为直流回路提供额外的铁芯这一 举措增加了铁磁材料的用量,提高了生产成本。

为了降低生产成本,减少闭环 SCFCL 所需的铁 磁材料,文献[63-64]对闭环 SCFCL 进行了改进,提 出了新型闭环磁控 SCFCL。新型闭环磁控 SCFCL 由 相互闭合的 3 个磁性铁芯柱、1 个限流电感和1 个直 流励磁电源组成。交流线圈 Ⅰ、Ⅱ 相互串联,并在 2 个铁芯柱中产生一个闭环的交流磁路,直流绕组 Ⅲ 和限流电感串联在直流电路中,其拓扑结构见附录 中图 A5。新型闭环磁控 SCFCL 中的直流电源由三 相桥式全控整流电路提供。

在文献[63-64]所述的拓扑结构中,三相铁芯和 线圈共同起到了磁控开关的作用。在正常工作状态 下,增大直流励磁电流,使两侧铁芯柱处于深度饱和 状态,此时FCL的阻抗很小,而且直流侧的限流电感 对交流电流不产生任何影响。此时可以认为限流器 的等效电路中限流电感与交流线圈之间的开关 断开。

当系统发生故障后,由于故障电流不断增大,由 故障电流产生的交流磁动势与直流磁动势相互抵 消,从而使铁芯柱退饱和。此时铁芯柱的磁导率增 大,交流绕组与直流绕组之间可视为一台单相变压 器,此时限流电感自动被串联到了交流回路中,限制 了短路电流。在一个周期内两侧铁芯柱分别退饱 和,则两侧交流绕组分别在正负半个周期内与限流 电感串联,即在一个完整周期内限制短路电流。故 障发生后,可将限流电感与交流线圈之间的开关视 为自动闭合。

在新型闭环磁控 SCFCL结构中,限流器的上下 磁轭和中柱铁芯的横截面积之和大于两侧边柱铁芯 的横截面积,该设计有2个优点:①可以保证中柱铁 芯内流通足够的磁通量使两侧铁芯饱和而中柱铁芯 不饱和;②当两侧某柱铁芯退饱和后,交流绕组和直 流绕组能瞬间建立电磁强耦合关系,保证了限流电 感能瞬间串入交流回路以限制短路电流,响应时 间短。

当上述拓扑结构的限流器的额定工作电压为 400 V时,其限流系数为2,响应时间约为10 ms,限 流电感大小约为22.86 mH^[63-64]。为使两侧铁芯深度 饱和,直流偏置励磁电源需要提供超过7.5 kA·匝的 直流磁动势。与开环SCFCL相比,由于上下两端磁 轭的存在,改进型的闭环SCFCL需要更多的铁磁材 料,但大幅降低了所需的直流电源容量,减小了直流 损耗。除此之外,改进型的闭环SCFCL需要额外的 限流电感限制短路电流。

武汉大学的陈柏超研究团队在文献[63-64]所 提拓扑结构的基础上进行了发展和优化,提出了桥 式SCFCL(BSCFCL)^[69]。BSCFCL的典型结构包含3 个铁芯柱、4个绕组、1个限流电感和1个直流偏置励 磁电源。铁芯 I和铁芯 II各有2个线圈,且2组线圈 完全相同。直流回路和交流回路共用相同的线圈, 且2组线圈以桥式结构相互连接。直流偏置励磁电 源和交流电感作为直流回路的一部分,相互串联在 *d*、*f*两点之间,见附录中图A6。

图4为BSCFCL原理图。图中, L_0 为限流电感; E_k 为直流偏置电源;i为系统中的交流电流; i_{k1} 、 i_{k2} 为 直流电流路径; i_1 和 i_2 为交流电流路径。当系统发生 故障后,在故障电流的正半周期内,铁芯 I 上2个绕 组中的交流电流和直流电流的流向是相同的,所以 铁芯 I 仍然处于深度饱和状态,而铁芯 II 上绕组中 的故障电流与直流电流方向相反,故障电流产生的 交流磁动势与直流磁动势相互抵消,铁芯 II 退饱和, 因此铁芯 II 上2个绕组的电感会变大,故障电流将 流经 $a-c-f-L_0-d-e-g$ 回路。同理,在故障电流的负 半周期内,铁芯 I 将退饱和,此时,故障电流将流经 $b-d-L_0-f-h$ 回路。因此,在短路故障发生后,铁芯 I 、II 交替退饱和,限流电感 L_0 不断串入交流回路 中,起到了限制短路电流的作用。



文献[69]中所提到的BSCFCL结构大幅降低了 SCFCL的尺寸和成本。除此之外,限流电感的存在 也提高了其限流能力。因此,相比于传统结构的 SCFCL, BSCFCL具有良好的限流效果和经济性。 BSFCL的限流系数约为2.5,响应时间约为8 ms,拓 扑中额外的限流电感约为4.5 mH。为了使两侧边 柱铁芯深度饱和,该拓扑所需的直流磁动势约为 5.5 kA·匝^[69],与传统的拓扑相比,其所需的磁动势 强度大幅减小。

除了上述单相结构以外,一些文献也研究了三相SCFCL的拓扑结构。文献[70]提出了三相交流绕组缠绕于同一铁芯的SCFCL结构,大幅减小了重量和体积,减少了所需的铁磁材料,节约了成本。但这种结构的缺陷在于,当电力系统发生三相对称短路故障时,三相交流磁通之和为0,铁芯依旧处于深度饱和状态。因此,这种三相拓扑结构无法限制三相对称短路电流。其限流系数高达4.04,但所需的直流磁动势超过10kA·匝。

2.3 永磁体偏置型SCFCL

早在2000年,文献[71]提出了利用永磁体为 SCFCL提供直流励磁的方法,并验证了永磁体偏置 型SCFCL的限流效果。文献[72-73]介绍了几种新 型永磁体偏置型SCFCL的拓扑,并验证了其限流 效果。

文献[74]提出了4种新型的不同结构的永磁体 偏置型 SCFCL, 包括并联、串联(拓扑Ⅰ、Ⅱ) 和混合 永磁体偏置型 SCFCL,4种拓扑结构图见附录中图 A7。并联永磁体偏置型SCFCL由2个C型铁芯、1个 永磁体和2个交流线圈组成。在正常状态下,中间 的永磁体产生直流偏置磁通,使2个C型铁芯进入 磁饱和状态。2个交流绕组分别在C型铁芯上反向 绕制,因此故障后2个交流绕组分别在正负半个周 期内限制短路电流。在拓扑结构上,串联永磁体偏 置型 SCFCL 比并联永磁体偏置型 SCFCL 更经济。 串联永磁体偏置型SCFCL包括2种典型拓扑。拓扑 I中包含2个永磁体,分别与铁磁材料串联连接。 由于2个铁芯中的直流磁通方向相反,要求2个交流 绕组产生的交流磁通方向相同。拓扑Ⅱ与拓扑Ⅰ的 结构框架相同,但是拓扑Ⅱ中只包含1个交流绕组, 可在一个完整周期内起到限制短路电流的作用。混 合永磁体偏置型 SCFCL 是并联和串联拓扑 Ⅱ型的 结合,其磁路中包含3个永磁体,其中,中间部分永 磁体的体积为两侧边柱永磁体的2倍。

与传统的 SCFCL 相比,永磁体偏置型 SCFCL 更加经济实用。为了更好地推广应用,文献[75]提出了一种基于永磁体的 SCFCL,拓扑结构如图 5 所示。为了更好地在正负半个周期内分别限制短路电流,2 个交流绕组反向串联,分别提供方向相反的交流磁动势。

文献[76]基于上述的拓扑结构对永磁体的漏磁 效应进行重新考虑,优化了永磁体偏置型SCFCL模



型。文献[77]探讨了其高压大容量化的可行性,提 出了永磁体偏置型SCFCL高压大容量化的方法与 手段,为永磁体偏置型SCFCL的商业推广应用提供 了可能。除此之外,文献[78-79]还分别分析了这种 永磁体偏置型SCFCL的永磁体稳定性和经济性,提 出了对永磁体偏置型SCFCL参数的优化方法。文 献[80]分析了该限流器对电力系统暂态稳定性的影 响。上述工作与研究成果都推动了高压大容量永磁 体偏置型SCFCL商业化推广和应用的进程。

图 5 为永磁体偏置型 SCFCL 的经典拓扑结构 图。其中,永磁体偏置型 SCFCL 的限流系数约为 2.04,无需额外的直流偏置电源。但是,由于在制造 过程中需要大量的永磁体,增加了制造成本。除此 之外,永磁体偏置型 SCFCL 还面临着永磁体直流励 磁能力不足、潜在的永磁体退磁风险以及永磁体内 涡流效应导致发热进而影响稳定性等问题。

2.4 混合偏置型SCFCL

为了降低直流偏置型SCFCL的直流电源输出 功率和减少额外的功率损耗,并克服永磁体励磁能 力不足的问题,文献[81-82]提出了一种混合励磁偏 置的方法,即采用NdFeB永磁体和传统的直流线圈 共同励磁,使铁磁材料处于饱和状态。其工作原理 与典型SCFCL相似,其结构是由4个永磁体、2个交 流绕组、2个直流绕组和2组铁芯组成,其结构图 见附录中图A8。然而,混合偏置型SCFCL在满足相 同的限流性能的情况下,功率损耗相较于直流偏 置型SCFCL降低50%。与文献[57-59]中的直流偏 置型开环SCFCL相比,文献[81-82]中的拓扑只需 15 kA·匝的直流磁动势,节省了75%的直流励磁 电流。

由于开环铁芯的混合偏置型 SCFCL 漏磁依旧 较大、损耗较高,直流偏置能力和限流能力差强人 意,文献[83-87]对混合偏置型 SCFCL 进行了一系列 改进与优化。文献[83]提出了一种桥式混合偏置型 闭环 SCFCL。桥型混合偏置型闭环 SCFCL的基本结 构主要由 2条闭合的磁性回路和1个桥式电路构成。 每条磁性回路中都包含 2 个永磁体、2 组铁磁材料和 2个绕组线圈,具体结构见附录中图A9。这种拓扑 结构的主要优势在于利用永磁体减小了直流偏置电 源的功率损耗,并利用限流电感提高了限流能力。

由于桥型混合偏置型闭环 SCFCL 的拓扑结构 中存在2个闭合铁芯环,所需的铁磁材料较多。文 献[84]在上述拓扑的基础上进行改进,提出了一种 新型混合偏置式 SCFCL,将2个闭合铁芯环进行融 合,整个结构只需要3个铁芯柱,两侧的铁芯柱为直 流磁通提供磁路,中柱为交流磁通提供磁路。这种 拓扑结构降低了成本,减少了所需的铁磁材料,其结 构图见附录中图A10。直流电路中的限流电感提高 了限流能力,其限流系数为1.54,直流偏置电源所需 提供的直流磁动势小于4.8 kA·匝。

然而,永磁体偏置型 SCFCL 和上述混合偏置型 SCFCL都存在永磁体的稳定性和潜在的退磁风险问题。当交流磁通通过永磁体时,永磁体中的涡流损 耗增大,导致永磁体发热,进而会影响永磁体的稳定 性。当流过永磁体的交流磁通与永磁体固有的直流 磁通方向相反时,若交流磁通过大,永磁体面临退磁 风险。基于上述考虑,文献[85]提出了一种用于计 算 SCFCL 中永磁体涡流损耗的方法。为了解决由 涡流效应产生的永磁体发热问题,并降低永磁体潜 在的退磁可能性,文献[86]提出了改进型混合偏置 式SCFCL,如图6所示。







这种结构利用气隙支路为交流磁通提供了旁路,这使得通过永磁体的交流磁通大幅减小,可以降低永磁体的涡流损耗和退磁风险。此外,扩大了永磁体的工作范围,即永磁体可以承担更大的短路电流,为混合偏置型SCFCL在高压和大容量领域的应用提供了理论可能。

为了验证上述拓扑结构的有效性,相关研究团 队制作了220 V / 50 Hz模型机并对其进行了测试, 实验结果表明,该混合偏置型SCFCL具有良好的限 流性能和可靠性^[86]。限流系数约为1.83,直流偏置 电源所需提供的直流磁动势约为3.1 kA·匝。相较 于没有永磁体的拓扑结构,其励磁偏置电流降低了 33.3%,即降低了大约45% 的能源损耗。

由于 SCFCL 的商业化推广受到了体积和磁性 材料消耗量的制约,如何提高 SCFCL 的经济性成为 了当前 SCFCL 领域最棘手的问题。基于图6所示的 拓扑结构,文献[38]提出了一种三相紧凑型混合偏 置式 SCFCL。这种拓扑结构的磁路与图6类似,三 相交流绕组与用于励磁的直流绕组共同绕制在两侧 边柱上,见附录中图 A11。由于三相绕组共用1个铁 芯柱,大幅减少了所需的铁磁材料的用量,从而降低 了成本。此外,文献[85]还探讨了该限流器的设计 参数,气隙长度、永磁体长度都会影响限流器的限流 效果和永磁体稳定性。这些参数均需要合理的设 计,此外,参数优化还需要考虑在电力系统实际应用 中的影响。

然而,文献[38]中的三相紧凑型混合偏置式 SCFCL存在无法限制三相对称短路故障电流的极大 缺陷。由图A11可知,当发生三相对称短路故障时, 三相短路电流矢量和为0,因此由三相故障电流产 生的三相磁通矢量和也为0,此时的交流磁通无法 使该限流器的铁芯柱退饱和,阻抗很小,无法限制三 相对称短路电流。

为了解决上述问题,文献[87]提出了一种经济型三相SCFCL,其拓扑结构见附录中图A12。该结构采用三相共用铁轭方式,不仅解决了无法限制三相对称短路电流的问题,而且兼顾了经济性和永磁体稳定性问题,其限流系数为1.67。

2.5 各类型SCFCL的性能比较

上文介绍了4种SCFCL的拓扑结构和限流原 理。本节将从结构参数、运行参数、运行和维护成本 等方面比较其优缺点,如表1所示。

表1 不同类型 SCFCL 性能比较

Table 1	Performance	comparison	of	different	SCFCLs
I uoie I	1 errormunee	comparison	O1	uniterent	DOI OLD

	数值				
参数	超导型	直流偏置型	永磁体偏置型	混合偏置型	
	SCFCL	SCFCL	SCFCL	SCFCL	
额定电压 / V	380	400	380	380	
额定电流 / A	30	15~25	10	30	
限流系数	1.67	1.8~2.5	2.04	1.54~1.83	
直流磁动势 / (kA・匝)	10	5.5~10	0	3.1~5	
维护成本	极高	较高	较低	较低	

由表1可知,SCFCL的限流系数基本在2左右。 其中,闭环直流偏置型SCFCL的限流效果最好,但 该类型SCFCL需要较多的铁磁材料且直流电源容 量较大,提高了其成本,增加了推广难度。在功率损 耗方面,永磁体偏置型SCFCL没有额外的直流功率 损耗,但是永磁体的直流偏置能力较差,且具有潜在 的退磁风险。超导型SCFCL由于超导材料的存在, 直流损耗显著降低,但是由于材料和技术原因,超导型 SCFCL 的维护成本很高。混合偏置型 SCFCL 利 用永磁体降低了直流损耗,缓和了永磁体的发热和 退磁问题,相较于永磁体偏置型 SCFCL 更具稳定 性。在响应速度方面,各种类型的 SCFCL 几乎没有 差距,这是因为铁磁材料的磁化性质决定了限流器 的响应时间和恢复时间。

3 SCFCL的前景展望

随着大规模智能电网的发展,复杂电网中断路器的分断能力不足问题越来越普遍,为未来FCL的大范围商业推广提供了可能。由于SCFCL的可靠性高、响应速度快,SCFCL将变得越来越实用。但SCFCL装置的体积较大,且制造SCFCL时需要大量的磁性材料,限制了SCFCL大规模的商业化应用。为了提升SCFCL限流性能,并促进SCFCL的大规模商业化推广,SCFCL需要在以下3个方面进行进一步的改进。

3.1 本体参数优化

对于混合偏置型SCFCL,永磁体与直流电源的 混合励磁配比优化问题、考虑涡流效应时永磁体在 SCFCL中的电磁热耦合问题、考虑铁磁材料的磁滞 效应时对永磁体稳定性和对FCL性能的影响问题以 及SCFCL本体与直流侧整流电源的配合问题等细 节问题仍需仔细研究。在今后的研究工作中,关于 混合偏置型SCFCL的参数优化问题仍需要进一步 改进。

3.2 材料优化

(1)研发新型软磁材料。

由于铁芯所用的铁磁材料的磁化曲线和饱和点 均有所不同,不同材料制成的SCFCL的限流能力、 响应速度、饱和所需的磁动势、铁磁损耗等性能都有 所差异,研制合适的铁磁材料是当前SCFCL领域的 一个发展方向。当前SCFCL所用的铁芯材料主要 是叠层硅钢片。铁氧体、坡莫合金以及纳米非晶体 材料也是当前SCFCL所用的主流磁性材料。一些 磁导率较大(如纳米非晶)且磁饱和点较高(如硅钢 片)的软磁材料制成的SCFCL将具有较快的响应速 度和良好的限流性能,在未来的SCFCL发展中具有 较大优势。

(2)优化超导材料。

导线材料的优化主要针对超导型SCFCL。利用 常规材料制成的线圈(如铜线圈)的电阻率较大,会 造成额外的铜耗。而当前的超导材料的工作温度较 低,必须要有相应的制冷系统搭配工作,导致了超导 型SCFCL的生产成本较高。大力发展和研制工作 温度更高的超导材料也是目前推动超导型SCFCL 发展的重要途径。超导材料的发展可以大幅降低生 产成本,推动超导型SCFCL的商业化推广和应用。 除此之外,探究和研制电阻率更低、额定功率更高的 常规材料导线也是SCFCL的重要发展方向。

3.3 SCFCL的多功能化

由于SCFCL体积较大,制造SCFCL时需要大量 的软磁材料,生产成本较高,而且SCFCL只在电力 系统故障状态下工作,工作时间短、利用效率较低, 限制了SCFCL的大规模商业化推广使用,SCFCL面 临严峻的使用概率低且成本高的问题。如何在成本 不变的情况下提高SCFCL的利用价值,也成为了当 前该领域的研究热点。发展SCFCL的其他功能是 解决这个问题的途径之一,多功能SCFCL的研制逐 渐成为SCFCL研究领域一个重要方向。

4 结论

本文从以下几个方面对 SCFCL 在交流电力系统中的应用与发展进行了综述。

(1)在电力系统不断扩大完善、短路故障电流不断增大的背景下,FCL具有广阔的应用前景。根据不同的拓扑结构和限流工作原理,FCL可分为SFCL、SSFCL、SCFCL和混合型FCL。

(2)本文详细介绍了 SCFCL 的各种拓扑结构和 工作原理,并与其他类型 FCL 的优缺点进行了比较。 SCFCL 的优势在于其技术相对成熟,对电力电子器 件的要求较低,其动作迅速、恢复时间短,且耐压等 级较高,瞬时暂态过电流裕度较大,具有高压大容量 领域应用可行性。

(3)根据导线所用材料和直流磁动势的产生方 式的不同,SCFCL可分为直流偏置型、永磁体偏置 型、混合偏置型与超导型。本文详细介绍了这4种 SCFCL的不同拓扑结构和工作原理。除了一些传统 的拓扑结构以外,还发掘了新型SCFCL拓扑。此 外,本文还比较了这些拓扑结构在铁芯尺寸、限流性 能、响应速度和所需的直流磁动势等方面的差异,并 列举了一些已被试验并应用的实体样机。通过比较 和分析可知,当前SCFCL领域遇到的最主要问题是 用于偏置的直流线圈的直流功率损耗问题以及 SCFCL所需的磁性材料较多而导致的经济性问题, 这些问题制约了SCFCL的大规模商业化应用。如 何降低直流损耗、减少SCFCL磁性材料的消耗量, 进而提高其经济性,是促进SCFCL商业化应用的 关键。

针对上述问题,本文明确了优化超导材料和磁性材料以及提高SCFCL的经济性与利用效率是未来SCFCL发展的核心问题,并从SCFCL的参数优化、材料优化、多功能化这3个方面,对SCFCL的未来发展方向进行了展望。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

 [1]郑健超.故障电流限制器发展现状与应用前景[J].中国电机 工程学报,2014,34(29):178-185.
 ZHENG Jianchao. Current status and application prospect of

fault current limiters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (29):178-185.

- [2] 李应闯,李宏仲,邱文平,等. 安徽电网"十二五"期间短路电流限制措施研究[J]. 电网与清洁能源,2016,32(10):83-87.
 LI Yingchuang, LI Hongzhong, QIU Wenping, et al. Research on limiting measures of short-circuit current in Anhui Power Grid in the twelfth five-year[J]. Power System and Clean Energy,2016,32(10):83-87.
- [3] MOURSI M, HEGAZY R. Novel technique for reducing the high fault currents and enhancing the security of ADWEA power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1):140-148.
- [4] NIKKHAJOEI H,LASSETER R H. Distributed generation interface to the CERTS microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3):1598-1608.
- [5] 江道灼, 敖志香, 卢旭日,等. 短路限流技术的研究与发展[J].
 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(3): 8-19, 87.
 JIANG Daozhuo, AO Zhixiang, LU Xuri, et al. Research and development of short-circuit current limiting technology[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(3): 8-19, 87.
- [6]韩戈,韩柳,吴琳. 各种限制电网短路电流措施的应用与发展
 [J]. 电力系统保护与控制,2010,38(1):141-144,151.
 HAN Ge,HAN Liu,WU Lin. Application and development of methods on limiting power grid's short-circuit current[J]. Power System Protection and Control,2010,38(1):141-144,151.
- [7] 袁娟,刘文颖,董明齐,等.西北电网短路电流的限制措施[J]. 电网技术,2007,31(10):42-45.
 YUAN Juan, LIU Wenying, DONG Mingqi, et al. Application of measures limiting short circuit currents in Northwest China power grid[J]. Power System Technology,2007,31(10):42-45.
- [8] 石征,谷丽娜,程伦. 电网短路电流限制措施分析[J]. 河北电 力技术,2017,36(2):24-26.
 SHI Zheng, GU Lina, CHENG Lun. Analysis on short-circuit current limitation measures of power network[J]. Hebei Electric Power,2017,36(2):24-26.
- [9]武守远,荆平,戴朝波,等.故障电流限制技术及其新进展[J]. 电网技术,2008,32(24):23-32.
 WU Shouyuan, JING Ping, DAI Chaobo, et al. Fault current limiting measures and their recent progress[J]. Power System Technology,2008,32(24):23-32.
- [10] 王文廷. 电网短路电流限制措施的探讨[D]. 杭州:浙江大学, 2005.

WANG Wenting. Discussion on measures to limit short circuit current in power grid[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2005.

- [11] SLADE P,VOSHALL R,WU J, et al. The utility requirements for a distribution fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992,7(2):507-515.
- YE L, LIN L, JUENGST K. Application studies of superconducting fault current limiters in electric power systems[J].
 IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2002, 12(1): 900-903.
- [13] KRAUSE J. Short-circuit current limiters:literature survey-1973-1979[M]. Eindhoven, the Netherlands:Eindhoven University of Technology, 1980:19-63.
- [14] POWER A J. An overview of transmission fault current

limiter[C]//IEE Colloquium on Fault Current Limiters-a Look on Tomorrow. London, UK: IET, 1995:1-5.

- [15] 喻劲松, 荆平, 戴朝波, 等. 华东 500 kV 电网串联谐振型故障 电流限制器的保护配置[J]. 电网技术,2009,33(18):191-197.
 YU Jinsong, JING Ping, DAI Chaobo, et al. Protection configuration of series resonant type fault current limiter in Eastern China 500 kV power grid[J]. Power System Technology,2009, 33(18):191-197.
- [16] LEUNG E. Superconducting fault current limiters[J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(8):15-18.
- [17] MEYER C, SCHRÖDER S, DEDONCKER W. Solid-state circuit breakers and current limiters for medium-voltage systems having distributed power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 19(5):1333-1340.
- [18] 孙树敏,刘洪顺,李庆民,等. 电力系统故障限流器研究综述
 [J]. 电网技术,2008,32(21):75-79.
 SUN Shumin,LIU Hongshun,LI Qingmin, et al. A summarization of research on fault current limiter of power system[J].
 Power System Technology,2008,32(21):75-79.
- [19] 刘凯,陈红坤,林军,等.故障限流器在电力系统中应用研究现状[J].电力系统保护与控制,2010,38(7):147-151.
 LIU Kai,CHEN Hongkun,LIN Jun, et al. Study situation of applications of fault current limiter in power system[J]. Power System Protection and Control,2010,38(7),147-151.
- [20] 周雪松,向龙瑞,马幼捷,等.故障限流装置的发展和应用[J]. 电工技术学报,2004,19(11):1-7.
 ZHOU Xuesong,XIANG Longrui, MA Youjie, et al. Development and application of fault current limiting device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(11):1-7.
- [21] NOE M, STEURER M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status [J]. Superconductor Science and Technology,2007,20(3):15-29.
- [22] 叶莺,肖立业. 超导故障限流器的应用研究新进展[J]. 电力系统自动化,2005,29(13):92-96.
 YE Ying, XIAO Liye. New development of high temperature superconducting fault current limiter system[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(13):92-96.
- [23] 信赢. 超导限流器综述[J]. 南方电网技术,2015,9(3):1-9.
 XIN Ying. Review on superconducting fault current limiters
 [J]. Southern Power System Technology,2015,9(3):1-9.
- [24] 信贏,田波,魏子镪.超导限流器基本概念和发展趋势[J].电工电能新技术,2017,36(10):1-7.
 XIN Ying,TIAN Bo,WEI Ziqiang. Fundamentals and prospective of superconducting fault current limiters[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2017,36(10): 1-7.
- [25] 梁飞,宋萌.电阻型超导限流器的研究综述[J]. 云南电力技术,2018,46(6):127-133.
 LIANG Fei,SONG Meng. Review of resistive superconducting fault current limiter[J]. Yunnan Electric Power,2018,46(6): 127-133.
- [26] ABRAMOVITZ A, MA S, DE L, et al. Prototyping and testing of a 15 kV / 1.2 kA saturable core HTS fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3):1271-1279.
- [27] 赵坚鹏,赵成勇,许建中,等. 直流电网中超导限流器与高压直 流断路器的协调配合方法[J]. 电力自动化设备,2018,38 (11):121-128.

ZHAO Jianpeng, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong, et al. Coordination between superconducting current limiter and high voltage DC circuit breaker in DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 121-128.

- [28] NA J B, KIM Y J, JANG J Y, et al. Design and tests of prototype hybrid superconducting fault current limiter with fast switch[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012,22(3):5602604.
- [29] 舒彬,陈志莉,任安林,等.超导限流器在解决电网短路电流中的应用分析[J].电网与清洁能源,2012,28(5):19-23.
 SHU Bin, CHEN Zhili, REN Anlin, et al. Application of super-conducting fault current limiters in resolving short-circuit currents in power grids[J]. Power System and Clean Energy, 2012,28(5):19-23.
- [30] ROZENSHTEIN V, FRIEDMAN A, WOLFUS Y, et al. Saturated cores FCL-a new approach[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2):1756-1759.
- [31] 卫元朋,韩松,许逵,等. 串联谐振型高压故障限流器研究及应 用进展述评[J]. 高压电器,2013,49(7):104-109.
 WEI Yuanpeng, HAN Song, XU Kui, et al. Critical review on high-voltage series resonance type fault current limiter[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(7),104-109.
- [32] 江道灼,毛航银,敖志香,等. 串联谐振式限流器的仿真研究
 [J]. 电力系统保护与控制,2010,38(23):153-158.
 JIANG Daozhuo, MAO Hangyin, AO Zhixiang, et al. Simulation study of series resonance type fault current limiter[J]. Power System Protection and Control,2010,38(23):153-158.
- [33] 王晨,徐建霖. 混合型限流及开断技术发展综述[J]. 电网技术,2017,41(5):1644-1653.
 WANG Chen, XU Jianlin. Review of hybrid current limiting and breaking technology development[J]. Power System Technology,2017,41(5):1644-1653.
- [34] 涂春鸣,姜飞,郭成,等. 多功能固态限流器的现状及展望[J].
 电工技术学报,2015,30(16):146-153.
 TU Chunming, JIANG Fei, GUO Cheng, et al. Present state and perspectives of multi-function solid-state fault current limi
 - ter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16):146-153.
- [35] ABRAMOVITZ A, MA S. Survey of solid-state fault current limiters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (6):2770-2782.
- [36] 杨尚瑾,戴朝波,朱宁辉,等. 新型固态故障电流限制器拓扑及 仿真[J]. 高电压技术,2020,46(2):690-697.
 YANG Shangjin, DAI Chaobo, ZHU Ninghui, et al. Topology and simulation of novel solid state fault current limiter[J].
 High Voltage Engineering,2020,46(2):690-697.
- [37] 涂春鸣,邓树,郭成,等.新型多功能固态限流器及其限流滤波器选型分析[J]. 电网技术,2014,38(6):1634-1638.
 TU Chunming, DENG Shu, GUO Cheng, et al. A novel multifunction solid-state fault current limiter and its analysis of current-limiting filter selection[J]. Power System Technology, 2014,38(6):1634-1638.
- [38] YUAN J,ZHONG Y,LIAO S,et al. A novel three-phase compact saturated-core fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(6):1-4.
- [39] AHMADVAND M, KHANABDAL S, TARAFDAR H, et al. A novel three phase saturable-core fault current limiter structure [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2):410-419.
- [40] ELADAWY M, METWALLY I. A novel five-leg design for performance improvement of three-phase presaturated core faultcurrent limiter[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54 (7):1-10.
- [41]金涛,徐颖,周世平,等. 饱和铁芯型超导限流器研究进展综述
 [J].低温与超导,2013,41(1):13-18.
 JIN Tao,XU Ying,ZHOU Shiping, et al. Summarization of R&D on DC biased iron core type superconductive fault current

limiter[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2013, 41(1):13-18.

- [42] 张晚英,胡雪峰,周辉,等.改进型饱和铁心高温超导限流器的 实验研究[J].电工技术学报,2014,29(11):169-176.
 ZHANG Wanying, HU Xuefeng, ZHOU Hui, et al. Experimental research on an improved saturated core high temperature superconducting fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11):169-176.
- [43] 张晚英,周辉,胡雪峰,等.新型饱和铁心高温超导限流器的实验研究[J].中国电机工程学报,2015,35(2):494-501.
 ZHANG Wanying,ZHOU Hui,HU Xuefeng, et al. Experimental research on an improved rectifier type high temperature superconducting fault current limiter[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(2):494-501.
- [44] 庞骁刚,龚伟志,洪辉,等. 饱和铁心型超导限流器[J]. 低温 与超导,2012,40(6):34-39.
 PANG Xiaogang, GONG Weizhi, HONG Hui, et al. Saturated iron-core superconducting fault current limiter[J]. Cryogenics and Superconductivity,2012,40(6):34-39.
- [45] MORICONI F, FRANCISCO D, DARMANN F, et al. Development and deployment of saturated-core fault current limiters in distribution and transmission substations[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 1288-1293.
- [46] MORICONI F,KOSHNICK N, DE LA ROSA F, et al. Modeling and test validation of a 15 kV 24 MVA superconducting fault current limiter[C]//IEEE PES T&D. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2010:1-4.
- [47] 洪辉,牛国俊,王建中,等. 35 kV / 90 MVA 高温超导限流器低温系统[J]. 低温与超导,2011,39(12):5-9.
 HONG Hui, NIU Guojun, WANG Jianzhong, et al. Cryogenic system for a 35 kV / 90 MVA saturated iron-core superconducting fault current limiter[J]. Cryogenics and Superconductivity,2011,39(12):5-9.
- [48] 邹立峰,周海,熊志全,等. 35 kV超导限流器的电网三相短路 试验及其限流效果分析[J].南方电网技术,2010,4(增刊1): 46-49.

ZOU Lifeng, ZHOU Hai, XIONG Zhiquan, et al. 3-phase short circuit tests of 35 kV SFCL in network and its limitation effect analysis [J]. Southern Power System Technology, 2010, 4 (Supplement 1):46-49.

- [49] HONG H,SU B,NIU G,et al. Design,fabrication, and operation of the cryogenic system for a 220 kV / 300 MVA saturated iron-core superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(5):1-4.
- [50] XIN Y, GONG W, SUN Y, et al. Factory and field tests of a 220 kV / 300 MVA statured iron-core superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(3):5602305.
- [51] 李斌,欧逸哲. 饱和铁心型超导限流器对电力系统保护的影响
 [J]. 南方电网技术,2015,9(12):98-102.
 LI Bin,OU Yizhe. Effects of saturated iron-core SFCL on power system protections[J]. Southern Power System Technology,2015,9(12):98-102.
- [52] LI B,GUO F,WANG J,et al. Electromagnetic transient analysis of the saturated iron-core superconductor fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3):1-5.
- [53] VILHENA N, MURTA P, PRONTO A, et al. A design methodology for the optimization of three-phase SFCL of saturated cores type [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4):1-5.
- [54] WEI Z, XIN Y, JIN J, et al. Optimized design of coils and iron cores for a saturated iron core superconducting fault

current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-4.

- [55] 孙燏伟,龚伟志,张敬因,等. 饱和铁心型超导限流器满足电网 重合闸条件分析[J]. 电网技术,2012,36(5):156-160. SUN Yuwei, GONG Zhiwei, ZHANG Jingyin, et al. Analysis on conditions for saturated iron-core fault current limiter to match with reclosure of circuit breakers[J]. Power System Technology,2012,36(5):156-160.
- [56] SHEN B, LI C, GENG J, et al. Investigation on power dissipation in the saturated iron-core superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2):1-5.
- [57] MOSCROP J W. Experimental analysis of the magnetic flux characteristics of saturated core fault current limiters[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(2):874-882.
- [58] COMMINS P A, MOSCROP J W. Analytical nonlinear reluctance model of a single-phase saturated core fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 28(1): 450-457.
- [59] MUDALIGE S G, COMMINS P A, MOSCROP J W, et al. Transient modeling of saturated core fault current limiters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5):2008-2017.
- [60] WOLFUS S, NIKULSHIN Y, FRIEDMAN A, et al. Dynamic inductance in saturated cores fault current limiters [J]. Journal of Superconductivity & Novel Magnetism, 2014, 28(2):1-5.
- [61] NIKULSHIN Y, WOLFUS Y, FRIEDMAN A, et al. Improving the performance of saturated cores fault current limiters by varying winding density in the AC coils[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3):1-5.
- [62] NIKULSHIN Y, WOLFUS Y, FRIEDMAN A, et al. Saturated core fault current limiters in a live grid[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(3): 1-4.
- [63] 潘艳霞,凌志斌,蔡旭,等.新型磁控开关型故障限流器拓扑及 试验研究[J]. 电网技术,2008,32(15):16-21.
 PAN Yanxia,LING Zhibin,CAI Xu,et al. Topology and experimental study on a novel magnetic-controlled switcher type fault current limiter[J]. Power System Technology, 2008, 32 (15):16-21.
- [64] 潘艳霞,凌志斌,蔡旭,等.新型磁控开关型故障限流器参数设 计及模型机研究[J]. 电工技术学报,2008,23(11):59-64.
 PAN Yanxia,LING Zhibin,CAI Xu,et al. Study on parameter design and test model of a novel magnetic-controlled switcher type fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008,23(11):59-64.
- [65] ELADAWY M E K, METWALLY I A. Design and performance analysis of single-phase pre-saturated core fault current limiters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33 (6):2603-2611.
- [66] 李晓明,梁军,王葵,等.新型磁控式故障限流器[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):42-46.
 LI Xiaoming,LIANG Jun,WANG Kui,et al. Magnetic-control-type fault current limiter[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):42-46.
- [67] 姚磊,钱滢锋,梅军,等.基于铁芯控制的串联补偿型故障限流器[J].电力自动化设备,2014,34(10):169-173.
 YAO Lei,QIAN Yingfeng,MEI Jun, et al. Series-compensation-type FCL based on core control[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):169-173.
- [68] 周兴梅,杨明昆,黑颖顿,等. 紧耦合饱和铁芯型限流器特性研 究[J]. 云南电力技术,2017,45(3):59-62.

ZHOU Xingmei, YANG Mingkun, HEI Yingdun, et al. Study on characteristics of strong coupling saturating iron fault current

limiter[J]. Yunnan Electric Power, 2017, 45(3): 59-62.

- [69] 陈柏超,魏亮亮,雷洋,等. 饱和铁心型桥式故障限流器的性能参数设计与实验[J]. 电工技术学报,2017,32(13):185-193.
 CHEN Baichao, WEI Liangliang, LEI Yang, et al. Performance parameter design and experiment of the bridge-type saturated core fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(13):185-193.
- [70] MUKHOPADHYAY S C, DAWSON F P, IWAHARA M, et al. A novel compact magnetic current limiter for three phase applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5): 3568-3570.
- [71] MUKHOPADHYAY S C, DAWSON F P, IWAHARA M, et al. Analysis, design and experimental results for a passive current limiting device[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1999, 146(3): 309-316.
- [72] 韩彬,徐国政,关永刚,等. 一种新型永磁磁饱和式故障限流器的研究[J]. 高压电器,2009,45(5):61-66.
 HAN Bin,XU Guozheng,GUAN Yonggang, et al. Research of a new type permanent magnet magnetic saturation fault current limiter[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(5):61-66.
- [73] ZOU L, LIU H, LI Q, et al. Analysis and simulation of the PMFCL based on coupled field-circuit modelling methodology [C]//High Voltage Engineering and Application International Conference. Chongqing, China: IEEE, 2008:498-502.
- [74] LIU H, LI Q, ZOU L, et al. Comparative study on the static and dynamic characteristics of four types of PMFCLs for large capacity applications[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 34(1):47-56.
- [75] 邹亮,李庆民,刘洪顺,等.大容量永磁饱和型故障限流器参数 设计与优化[J].中国电机工程学报,2011,31(9):105-112.
 ZOU Liang, LI Qingmin, LIU Hongshun, et al. Parameter design and optimization methodology for large capacity applications of permanent-magnet-biased saturation based fault current limiter[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(9):105-112.
- [76] 邹亮,李庆民,许家响,等.考虑漏磁效应的永磁饱和型故障限 流器磁路建模与实验研究[J].中国电机工程学报,2012,32 (21):137-145.

ZOU Liang, LI Qingmin, XU Jiaxiang, et al. Magnetic topology modeling and experimental study of permanent-magnet-biased saturation based fault current limiter with leakage flux effect [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(21):137-145.

- [77] 邹亮,李庆民,刘洪顺,等. 永磁饱和型故障限流器的高压大容量化分析[J]. 高电压技术,2009,35(10):2568-2574.
 ZOU Liang,LI Qingmin,LIU Hongshun, et al. Feasibility analysis on developing high voltage and large capacity permanent-magnet-biased fault current limiter[J]. High Voltage Engineering,2009,35(10):2568-2574.
- [78] 邹亮,许家响,李庆民. 永磁饱和型故障限流器的永磁体稳定 性实验研究[J]. 高电压技术,2012,38(8):1901-1908.
 ZOU Liang,XU Jiaxiang,LI Qingmin. Experimental research on permanent magnet stability of the permanent-magnet biased saturation based fault current limiter[J]. High Voltage Engineering,2012,38(8):1901-1908.
- [79] 邹亮,伍珈乐,刘涛,等.大容量永磁偏置型故障限流器的经济 性分析与优化[J].电力自动化设备,2016,36(12):75-82.
 ZOU Liang, WU Jiale, LIU Tao, et al. Economic analysis and optimization of large-capacity permanent-magnet-biased fault current limiter[J]. Electric Power Automation Equipment,2016, 36(12):75-82.
- [80] 邹亮,张秀群,赵彤,等. 永磁偏置型故障限流器对系统暂态稳定性的影响[J]. 高电压技术,2017,43(2):594-601.
 ZOU Liang, ZHANG Xiuqun, ZHAO Tong, et al. Influence of



permanent-magnet-biased saturation based fault current limiter on transient stability of power system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2):594-601.

- [81] 李磊,李琳.改进永磁饱和铁心型故障电流限制器及其等效电路模型[J]. 电网技术,2017,41(11):3685-3690.
 LI Lei, LI Lin. A novel saturated-core fault current limiter with permanent magnet modules and its nonlinear equivalent circuit[J]. Power System Technology,2017,41(11):3685-3690.
- [82] 李琳,王川陵. 一种开路形式的永磁饱和型故障电流限制器的 温度场稳态分析[J]. 高压电器,2018,54(9):19-24,31.
 LI Lin,WANG Chuanling. Steady analysis of the temperature field of an open circuit permanent magnets saturated fault current limiter[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(9):19-24,31.
- [83] YUAN J, LEI Y, WEI L, et al. A novel bridge-type hybrid saturated-core fault current limiter based on permanent magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1-4.
- [84] 钟永恒,谢耀恒,刘赟,等. 混合励磁型饱和铁芯故障限流器[J/OL]. 高电压技术. (2019-01-19)[2019-04-13]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20190410003.
- [85] TIAN C,ZHONG Y,WEI L, et al. A coupled method for evaluating eddy current loss of NdFeB permanent magnets in a saturated core fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(6):1-4.

[86] 田翠华,钟永恒,雷洋,等. 基于钕铁硼永磁材料的饱和铁心故 障限流器研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(23):6536-6543,6621.

TIAN Cuihua, ZHONG Yongheng, LEI Yang, et al. Research on saturated core fault current limiters based on NeFeB magnets[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23):6536-6543, 6621.

[87] 甘鹏程,袁佳歆,张朝阳,等. 经济型三相饱和铁芯故障限流器 [J/OL]. 电网技术. (2019-01-19)[2019-09-18]. https:// doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1017.

作者简介:



表佳歆(1981—),男,江苏金坛人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为 逆变器控制、交直流高压限流器等(E-mail: yjx98571@163.com);

张朝阳(1995—),男,山东滨州人,硕 士研究生,主要研究方向为交流高压限流器 (E-mail:hnuzzy@163.com);

周 航(1994—),男,北京人,博士研 究生,主要研究方向为直流高压限流器

(E-mail:leochou_whu@163.com).

(编辑 王欣竹)

Present situation and development of AC SCFCL

YUAN Jiaxin, ZHANG Zhaoyang, ZHOU Hang, CHEN Fan, JIANG Ziwei, NI Zhou

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The research situation and development of SCFCL(Saturated Core Fault Current Limiter) are reviewed. Firstly, the working principle, topology structure, equivalent circuit and application examples of DC biased-, permanent magnet biased-, superconducting and hybrid biased-SCFCL are introduced. The functional characteristics and technical advantages and disadvantages of four kinds of SCFCL are compared and analyzed. Secondly, in view of the problems of four kinds of SCFCL, such as large DC loss, insufficient excitation capacity of permanent magnet, high cost of operation and maintenance for high temperature superconducting system, more softed magnetic materials needed and poor economy, the latest research results of SCFCL in topology structure, parameter design, excitation loss, safety and stability are introduced, and the new technologies and methods of SCFCL are discussed. Finally, it is clear that the optimization of magnetic materials and superconducting materials, and the economy and utilization efficiency of SCFCL is prospected in aspects of topology optimization, material optimization and multi-function.

Key words:SCFCL;magnetic saturation;short circuit currents;permanent magnet;current-limiting performance; review



图 A1 三相超导型 SCFCL 样机 Fig.A1 Three-phase superconducting SCFCL prototype



图 A2 天津市史各庄变电站 220 kV/300MV A 的超导型 SCFCL

Fig.A2 Photo picture of the installation of the 220 kV/300 MV A SFCL at Shigezhuang substation of Tianjin, China







Fig.A5 Modified magnetically controlled FCL





图 A9 桥型混合偏置型闭环 SCFCL Fig.A9 Bridge-type hybrid closed-core SCFCL



Fig.A11 Novel three-phase compact hybrid-biased SCFCL



图 A12 经济型三相饱和 SCECL Fig.A12 Economical three-phase SCFCL