

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210517

一种新型超导直流故障限流器

熊佳玲, 李文鑫, 杨超, 杨天慧, 信赢

(天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 与用于交流系统或双极直流系统的限流器不同, 用于多端柔性直流系统的故障限流装置应能够在短路故障发生初期有效抑制故障电流的快速上升, 避免在线路断路器动作之前换流器桥臂闭锁。针对这一性能要求提出了一种专门用于多端柔性直流电网中的新型超导故障限流器的基本结构和工作原理, 并制作了原理验证样机。通过对原理验证样机开展的一系列实验, 证明了设计结构与原理的可行性。实验结果也充分展示了这类限流器的功能特性, 如其能充分利用铁芯的最大磁导率在短路故障发生的几个毫秒内实现最大限流感抗, 从而有效抑制故障早期的短路电流上升率。此外, 可以通过对超导隔离环组数量的调整, 设定限流器的限流阈值, 灵活适应不同直流系统的限流需求。

关键词: 超导; 限流器; 直流电网; 限流阈值; 短路故障

A new type of superconducting DC fault current limiter

XIONG Jialing, LI Wenxin, YANG Chao, YANG Tianhui, XIN Ying

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Different from the fault current limiters used for an AC transmission system or a bipolar DC transmission system, a fault current limiting device for a multi-terminal flexible DC system should be able to effectively curb the rapid rise of fault current to avoid the lock of the bridge arm of current converter before the action of the line breaker. To satisfy this requirement, a basic structure and working principle of a new type of superconducting fault current limiter for a multi-terminal flexible DC power grid are proposed and a lab prototype for proof-of-principle is built. Through a series of experiments carried out on the prototype, the feasibility of the working principle and the designed structure has been confirmed. The test results have adequately demonstrated the functional characteristics of this kind of fault current limiter, such as that the current limiter can make full use of the maximum permeability of the iron core to achieve the maximum inductive impedance, and suppress the rising rate of the fault current within a few milliseconds after a short-circuit fault takes place. In addition, the current limiting threshold of the current limiter can be set by adjusting the number of superconducting isolation rings, so it can be flexibly adapted to different DC systems.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51677131).

Key words: superconductivity; current limiter; DC power grid; current limiting threshold; short circuit fault

0 引言

随着人们对电网输送能力和系统供电可靠性要求的不断提高, 高压直流输电在远距离、大容量输电和区域互联中得到了广泛应用^[1-5]。然而, 一旦直流输电系统发生短路故障, 由于系统阻尼小, 故障电流将急剧升高, 对线路、设备造成严重威胁^[6-8]。直流不存在电流过零点, 使得研发高电压等级、大

容量直流断路器的技术困难较大^[9], 故目前可行的解决方案之一是利用有效的限流设备将短路故障电流限制到后续断路器可开断的程度^[10]。基于传统材料和技术制作的限流设备无法同时满足电网正常输电时的低阻抗和短路故障时的高阻抗要求, 而超导材料制作的超导限流器可以做到^[11-20], 所以研究适合于直流电网的超导限流器是十分有必要的。

超导直流限流器根据限流阻抗特性可分为电阻型和电感型, 其中电阻型主要是利用超导元件在故障期间产生的失超电阻限制故障电流, 而电感型则

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51677131)

是利用超导元件与限流元件的磁通耦合特性在故障期间产生的大电感限制故障电流。2018年,华中科技大学研制出一台220 V/10 A的电感型超导直流限流器小型实验样机,并通过了原理验证实验^[21]。2020年,江苏电力公司研制了一台20 kV/400 A的电阻型超导直流限流器,并在苏州电器科学研究院进行了性能测试^[22]。同年,中科院电工所提出了40 kV/2 kA的电阻型超导直流限流器,并进行了相关测试^[23]。2020年,我国南澳柔直输电示范工程挂网运行了一台±160 kV/1 kA的电阻型超导直流限流器,其是目前世界上电压等级最高的高温超导直流限流器实体样机^[24]。2020年,韩国昌原国立大学提出了15 kV/3 kA饱和铁芯型超导直流限流器的详细设计流程和相应配置^[25]。2021年,该大学研制了一台饱和铁芯型超导直流限流器小型实验样机,并对其在500 V/50 A直流电源系统上的运行进行了测试^[26]。

对于多端柔性直流输电系统而言,电阻型超导限流器虽然可以有效地限制持续故障电流的幅值,但其对于短路故障初期电流上升率的抑制作用十分有限^[27],这将导致换流器因故障电流的快速上升而提早闭锁,进而可能引发多端直流系统更大范围内的故障^[28]。因此,为了配合直流断路器快速高效地切断故障线路,实际多端柔性直流输电系统中,需要利用电感在故障最初的几毫秒内抑制故障电流上升率,然后利用一定的电阻抑制短路电流的幅值^[29-31]。

本文提出了一种全新的电感型超导限流器原理,其性能特性是保证直流电网合闸时不会立即投入一个较大的电感而引起电网的电压和电流振荡^[29],在正常输电时阻抗很小,在线路发生短路故障时能提供较大的感抗,有效限制故障电流的上升速率。这种限流器特别适合于柔性多端直流系统,用来防止换流器桥臂过早闭锁,保证故障支路上的断路器在换流器桥臂闭锁之前完成开断动作,从而将故障支路隔离。

根据新的电感型超导限流器原理,完成了样机设计、制作和实验。实验结果验证了所提原理的正确性和可行性,并展示了这种限流器的功能特点。

1 新型超导直流限流器结构及工作原理

1.1 基本结构

本文提出的新型超导直流限流器主要由通流/限流电感线圈、超导隔离环组和磁性芯柱(铁芯)构成,通流/限流电感线圈和超导隔离环组由外到内依次同轴嵌套在磁性芯柱上,其基本结构如图1所示。

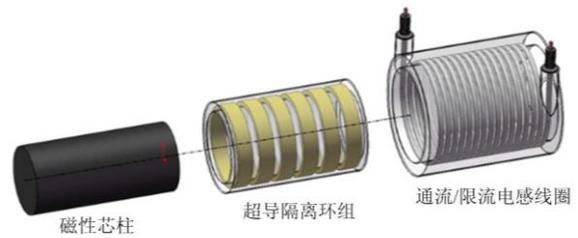


图1 新型超导直流限流器结构

Fig. 1 Structure of new type of superconducting DC current limiter

磁性芯柱由软磁合金压制或由硅钢片组合而成。其相对磁导率越大、截面积越大、有效磁路长度越短,通流/限流电感线圈与磁性芯柱耦合后的电感值越大。使用磁性芯柱是为了提高通流/限流电感线圈限流时的电感值,在同样尺寸和匝数的条件下,可以数十倍甚至上百倍地提高限流器的限流阻抗。故铁芯的使用可以显著减小制作电感线圈的导线数量需求,降低限流器制作成本,同时大大减小限流器的体积,便于运输和安装。

通流/限流电感线圈由超导导线绕制而成,在工作时作为电感元件串联接入被保护的直流线路中。当磁性芯柱参数确定后,线圈电感值一方面受线圈尺寸和匝数的影响,另一方面受线圈与磁性芯柱耦合程度的影响,耦合程度越高,电感值越大。而当其与磁性芯柱完全脱离耦合时,就等于一个空心线圈,电感值达到最小。

超导隔离环组由若干个匝数相等的闭合超导体环并列组成,其用来控制通流/限流电感线圈与磁性芯柱的耦合程度以及决定限流阈值。

这种限流器的限流阈值是由超导隔离环组总的超导临界电流决定的。在每个超导环的临界电流基本相同时,超导环的个数就决定了限流阈值。

1.2 工作原理

新型超导直流限流器的二维示意图如图2所示,其中, l_1 、 N_1 和 r_1 分别为通流/限流电感线圈的长度、匝数和半径, l_2 、 N_2 和 r_2 分别为单个超导环的长度、匝数和半径, n 为超导隔离环组中超导环的数量, r_3 和 μ 分别为铁芯的半径和磁导率。

1.2.1 正常输电状态

在上述结构中将限流器的通流/限流电感线圈和超导隔离环组置于低温容器内,采用液氮浸泡使线圈和超导隔离环组在线路合闸前处于超导态。

工作时限流器的通流/限流电感线圈串联接入被保护的直流线路中。输电线路合闸时,通流/限流电感线圈中流过输电电流 i_1 , i_1 在线圈包围空间产生的磁感应强度 B_a 可由式(1)计算^[32]。根据法拉第

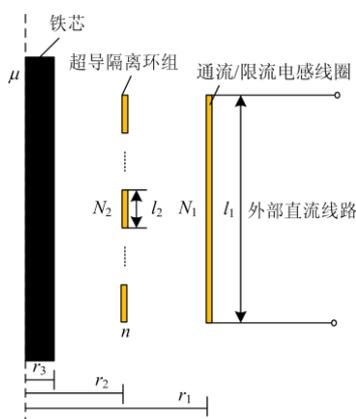


图2 新型超导直流限流器的二维示意图

Fig. 2 Two-dimensional schematic of new type of superconducting DC current limiter

电磁感应定律, 超导隔离环组上会产生感应电流 i_2 , i_2 在超导隔离环组包围空间产生的磁感应强度 B_b 可由式(2)计算。感应电流能抵消输电电流产生的磁场, 避免通流/限流电感线圈和铁芯发生磁通耦合。因超导隔离环组处于超导态, 正常输电电流小于限流器的限流阈值, 所以超导隔离环组对磁通的屏蔽是彻底的, 超导隔离环组内部的磁感应强度为 0, 铁芯可以保持线路合闸通电前其内部磁通密度为零的状态。而通流/限流电感线圈与超导隔离环组间隙间 ($r_2 < r < r_1$) 的磁感应强度仍为 B_a 。

$$B_a = \frac{\mu_0 N_1 i_1}{l_1} \quad (1)$$

$$B_b = n \frac{\mu_0 N_2 i_2}{l_2} \quad (2)$$

式中, μ_0 为空气磁导率。

限流器在正常输电状态下的磁链 ψ_N 可由式(3)计算, 电感 L_N 可由式(4)计算。

$$\psi_N = N \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = N_1 \int_0^{2\pi} \int_{r_2}^{r_1} \left(\frac{\mu_0 N_1 i_1}{l_1} \right) r dr d\varphi = \frac{\mu_0 N_1^2 \pi i_1 (r_1^2 - r_2^2)}{l_1} \quad (3)$$

$$L_N = \frac{d\psi_N}{di_1} = \frac{\mu_0 N_1^2 \pi (r_1^2 - r_2^2)}{l_1} \quad (4)$$

在这种状态下, 通流/限流电感线圈的电感值最小, 合闸后线路可以迅速进入稳定运行状态。

在正常直流输电过程中, 由于电流不会剧烈地波动, 所以通流/限流电感线圈的电感不会对电网产生不良影响, 磁性芯柱也将保持非磁化状态。

1.2.2 故障限流状态

如果线路中的电流超过了限流阈值, 超导隔离

环就会开始失超, 不再能够完全屏蔽通流/限流电感线圈产生的磁通, 线圈与铁芯之间出现磁通耦合。磁通耦合将急剧增大通流/限流电感线圈的电感值, 限流器遂进入限流状态。

在实际应用中, 限流器的限流阈值是要根据系统保护策略要求来确定的。短路电流小于限流阈值的短路故障一般是可以自愈的, 不需要线路断路器动作。这时限流器的工作状态与正常输电时一样, 处于低阻抗状态, 铁芯仍旧保持非磁化状态。

当短路电流大于设定的限流阈值时, 随着通流/限流电感线圈中的短路电流急剧增加, 超导隔离环组上的感应电流也随之增大。当感应电流超过了超导隔离环组的临界电流, 超导隔离环组失超。此时, 超导隔离环组上感应电流产生的磁通不再能够抵消短路电流产生的磁通变化, 线圈会与磁性芯柱发生磁通耦合。

由上述分析可知, 此时通流/限流电感线圈所包围空间的磁感应强度 B_F 可由式(5)计算, 限流器在故障限流状态下的磁链 ψ_F 可由式(6)计算, 电感 L_F 可由式(7)计算。

$$B_F = \begin{cases} \frac{\mu N_1 i_1}{l_1} - n \frac{\mu N_2 i_2}{l_2}, & 0 < r < r_3 \\ \frac{\mu_0 N_1 i_1}{l_1} - n \frac{\mu_0 N_2 i_2}{l_2}, & r_3 < r < r_2 \\ \frac{\mu_0 N_1 i_1}{l_1}, & r_2 < r < r_1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \psi_F &= N \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = N_1 \int_0^{2\pi} \int_{r_2}^{r_1} \left(\frac{\mu_0 N_1 i_1}{l_1} \right) r dr d\varphi + \\ &N_1 \int_0^{2\pi} \int_{r_3}^{r_2} \left(\frac{\mu_0 N_1 i_1}{l_1} - n \frac{\mu_0 N_2 i_2}{l_2} \right) r dr d\varphi + \\ &N_1 \int_0^{2\pi} \int_0^{r_3} \left(\frac{\mu N_1 i_1}{l_1} - n \frac{\mu N_2 i_2}{l_2} \right) r dr d\varphi = \\ &\frac{N_1^2 \pi i_1 (\mu_0 r_1^2 - \mu_0 r_3^2 + \mu r_3^2)}{l_1} + \\ &\frac{n N_1 N_2 \pi i_2 (\mu_0 r_3^2 - \mu_0 r_2^2 - \mu r_3^2)}{l_2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$L_F = \frac{d\psi_F}{di_1} = \frac{N_1^2 \pi (\mu_0 r_1^2 - \mu_0 r_3^2 + \mu r_3^2)}{l_1} \quad (7)$$

由式(7)可知, 故障限流状态下限流器的电感主要由磁性芯柱的磁导率 μ 决定。而当线圈与磁性芯柱发生磁通耦合时, 磁性芯柱被磁化后的磁导率以图3所示的规律急剧增加, 使磁性芯柱进入高磁导率状态, 线圈电感值 L_F 随之增大, 限流器呈现出很

高的感抗，有效地限制线路中短路电流的继续增大。

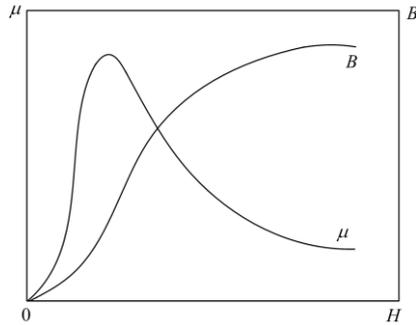


图3 铁芯磁感应强度和磁导率与磁化强度的关系

Fig. 3 Relationship between magnetic induction or permeability and magnetization intensity of iron core

2 新型超导直流限流器原理验证样机

原理验证样机主要由4个部分组成，如图4所示，依次为通流/限流电感线圈、超导隔离环组、磁性芯柱和低温容器，各个部分的详细描述如下。

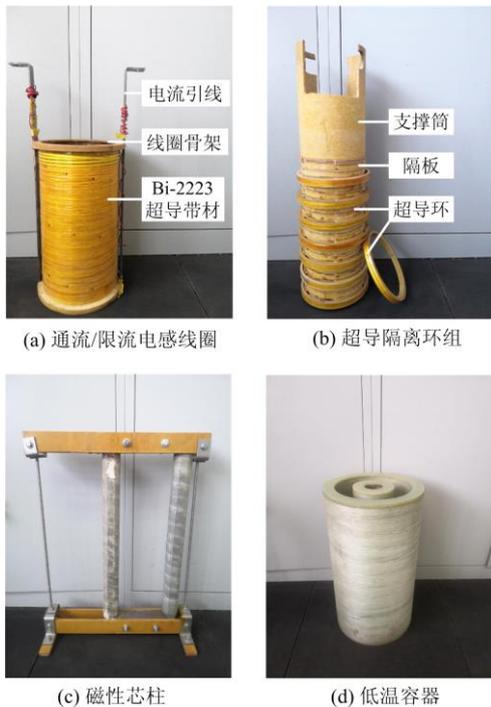


图4 样机4个部分照片

Fig. 4 Photographs of four parts of prototype

(a) 通流/限流电感线圈

通流/限流电感线圈由 Bi-2223 超导带材绕制而成，线圈总匝数为 60，线圈内径 156 mm、外径 166 mm、高 292 mm，匝间缠绕低温胶带用于电气绝缘。线圈骨架为内径 156 mm、外径 190 mm、高 295 mm 的玻璃钢骨架筒。电流引线由长 450 mm、厚 3 mm、

宽 25 mm 的纯铜条制作。

(b) 超导隔离环组

超导隔离环组最多可设置 20 个超导环，每个超导环内径 138 mm、外径 150 mm、高 13 mm，为 Bi-2223 超导带材绕成的 2 匝双饼型线圈。超导环固定在内径 121 mm、外径 130 mm 的玻璃钢隔板上，然后均匀放置在内径 118 mm、外径 130 mm、高 315 mm 的玻璃钢支撑筒上。

本样机所使用的 Bi-2223 超导带材均是由日本住友电工生产的厚 0.22 mm、宽 4 mm 的高温超导线材，出厂给定 77 K 自场下临界电流为 130 A。

(c) 磁性芯柱

样机选用方形可拆卸式闭合铁芯，铁芯采用高磁导率的 30Q120 硅钢片叠压而成，硅钢片铁芯的相对磁导率可达 7 000~10 000。铁芯直径为 45 mm，铁芯窗口宽度为 129 mm，窗口高度为 474 mm。

(d) 低温容器

低温容器由环氧树脂加工而成，分为两部分。第一部分内径 41 mm、外径 101 mm、高 470 mm，用于放置磁性芯柱；第二部分内径 196 mm、外径 255 mm、高 470 mm，用于放置通流/限流电感线圈和超导隔离环组。第二部分中装满液氮使线圈和超导隔离环组处于超导态。

由上述 4 部分组装完成后的原理验证样机照片如图 5 所示。组装过程如下：先将铁芯的一条腿穿过低温容器，再将超导隔离环组和通流/限流电感线圈由内到外同轴放置在低温容器中，最后将铁芯闭合，这样就形成了一个完整原理验证样机。

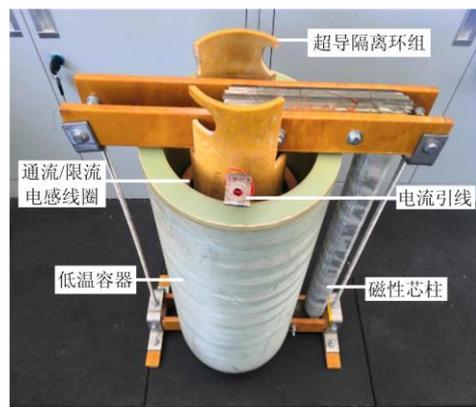


图5 组装完成后的原理验证样机照片

Fig. 5 Photo of the assembled prototype

3 原理验证样机实验研究

基于所搭建的样机，设计并实施了铁芯功能验证、超导隔离环组功能验证、样机限流功能测试实验。铁芯功能验证实验通过比较有、无铁芯的限流

器对同一短路电流的限制效果, 探究了铁芯对限流器限流能力的影响。超导隔离环组功能验证实验通过对 0、5、9、11、13 个超导环的限流器进行短路实验, 验证了超导隔离环组的三个功能。样机限流功能测试实验比较了直流线路中有、无限流器对短路电流的限制效果, 验证了所提出的新型超导直流限流器限流效果的显著性。

实验电路如图 6 所示。实验选用 3 块额定电压 12 V、容量 200 AH 的铅酸蓄电池并联供电, 开关 K_1 与 K_2 均使用通断容量 600 A 的直流固态继电器。实验过程中使用横河 DL850 录波仪对电压、电流波形进行监视记录, 其中的电流信号采用与录波仪配套的电流钳表进行测量与采集。实验平台照片如图 7 所示。

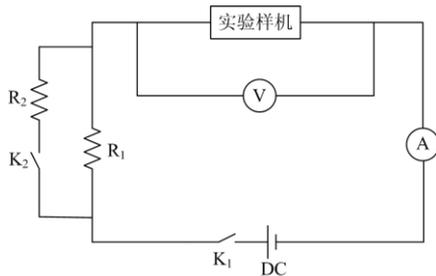


图 6 实验电路图

Fig. 6 Circuit of experiment

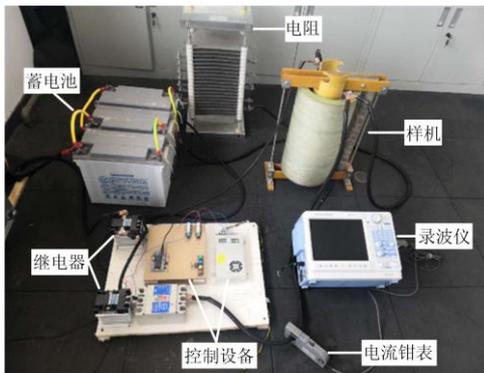


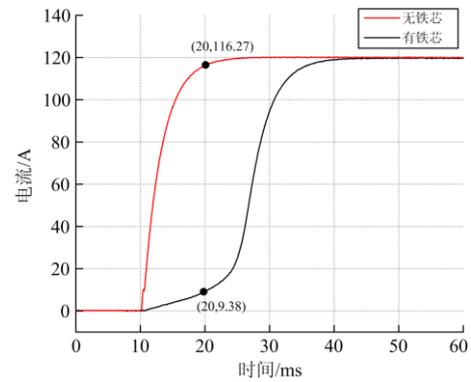
图 7 实验平台照片

Fig. 7 Platform photo of experiment

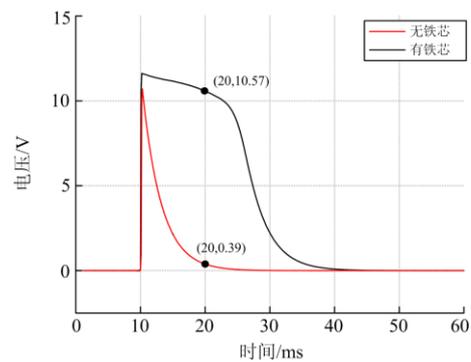
3.1 铁芯功能验证实验与结果分析

本实验控制唯一变量为限流器中有、无铁芯, 限流器中不设置超导隔离环组。实验过程如下: 按实验电路图 6 连接电路, 其中 R_2 支路不接入电路中, 闭合 K_1 , 使线路发生短路故障。调节 R_1 阻值使最大短路故障电流为 120 A。实验结果如图 8 所示, 电感计算公式为

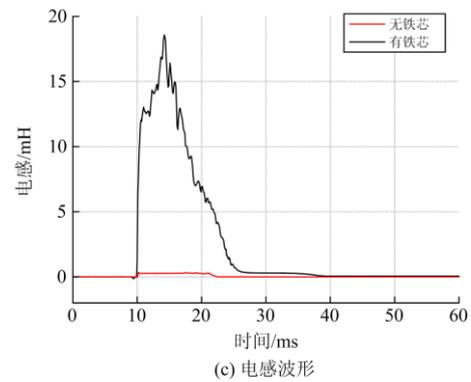
$$L = \frac{U}{(di/dt)} \quad (8)$$



(a) 电流波形



(b) 电压波形



(c) 电感波形

图 8 有、无铁芯限流对比

Fig. 8 Comparison of current limiting with and without core

式中: L 为限流器电感; U 为限流器两端电压; i 为流过限流器的电流。

由图 8 可以看出: 10 ms 时, K_1 合闸通电, 线路发生短路故障; 短路发生 10 ms 后, 无铁芯限流器中短路电流为 116.27 A, 限流器两端电压为 0.39 V, 限流器电感为 0.27 mH; 有铁芯限流器中短路电流为 9.38 A, 限流器两端电压为 10.57 V, 限流器电感为 6.92 mH。这证明了铁芯可显著提高限流器的限流电感。

3.2 超导隔离环组功能验证实验与结果分析

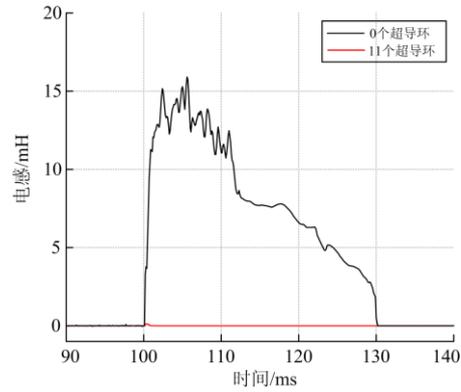
超导隔离环组具有三个功能: 一是在线路合闸

时保证铁芯不被磁化，从而避免限流器的大电感影响正常直流输电的稳定启动；二是在故障限流时充分利用铁芯最大磁导率限流；三是可以根据需要设计限流器的限流阈值大小。因此，设计三组实验分别验证超导隔离环组的三个功能。由于已经证明铁芯可显著提高限流效果，所以在后续实验中均采用有铁芯的限流器。

3.2.1 功能一的验证实验

本实验分别对安装 0 个、11 个超导环的限流器进行短路实验。实验过程如下：按实验电路图 6 连接电路，先合闸 K_1 ，使线路工作在正常运行状态，再合闸 K_2 ，使线路发生短路故障。通过调节 R_1 和 R_2 的阻值，设置正常运行电流为 11 A，最大短路故障电流为 110 A。实验结果如图 9 所示。

由图 9(a)可以看出：100 ms 时， K_1 合闸通电，安装 0 个超导环的限流器电流上升受到抑制，电流上升到稳定运行值 11 A 需要 30 ms；而安装 11 个超导环的限流器对应的电流迅速达到 11 A。由图 9(b)可以看出：安装 11 个超导环的限流器两端电压明显低于 0 个超导环的限流器，其值为 0。由图 9(c)可以看出：在线路合闸时，安装 0 个超导环的限流器具有大电感，而安装 11 个超导环的限流器最大电感值仅为 0.12 mH。这表明安装 0 个超导环(无超导隔离环组)的限流器在线路合闸时，铁芯会被磁化，与



(c) 电感波形

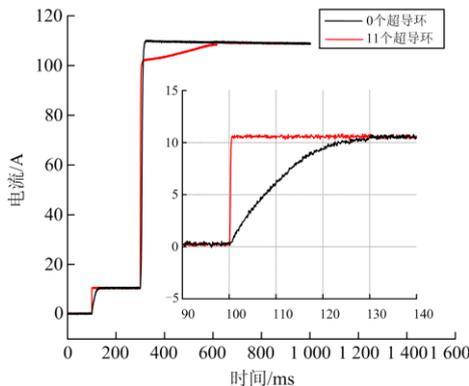
图 9 超导隔离环组功能一验证的实验结果

Fig. 9 Experimental result of function I of superconducting isolation ring set

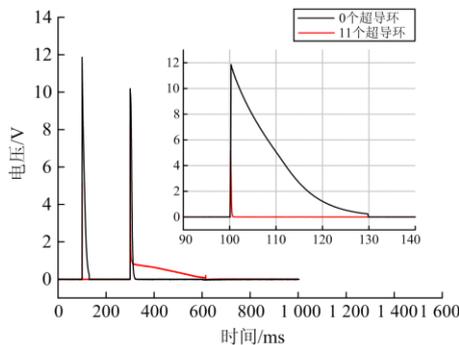
线圈耦合产生大电感，从而抑制电流的上升率，并在限流器两端产生电压降落。然而，安装 11 个超导环的限流器在线路合闸时，超导隔离环起隔离作用，避免了铁芯被磁化和大电感对合闸通流的影响。

3.2.2 功能二的验证实验

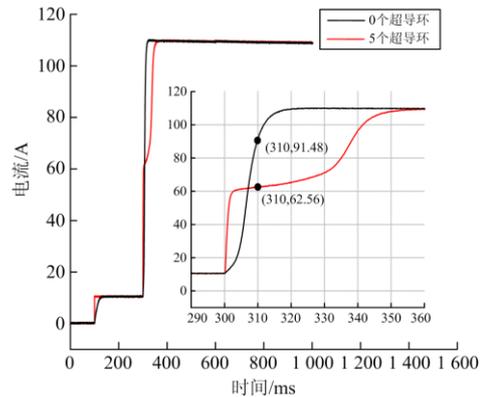
本实验分别对安装 0 个、5 个超导环的限流器进行短路实验，实验过程与 3.2.1 节一致。实验结果如图 10 所示。



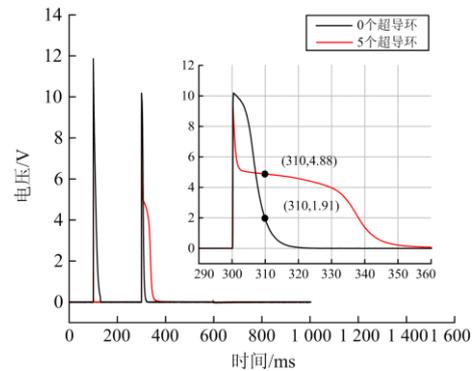
(a) 电流波形



(b) 电压波形



(a) 电流波形



(b) 电压波形

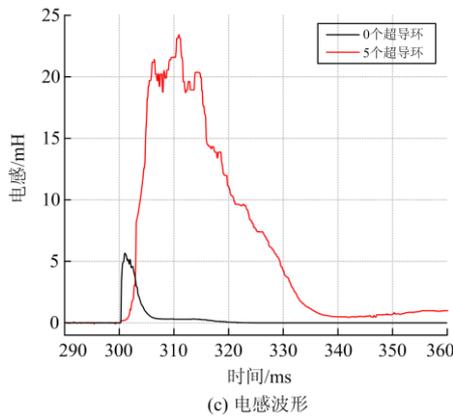


图 10 超导隔离环组功能二验证的实验结果

Fig. 10 Experimental result of function II of superconducting isolation ring set

由图 10(a)可以看出: 300 ms 时, K_2 合闸, 线路发生短路故障, 短路发生 10 ms 后, 安装 0 个、5 个超导环的限流器对应的短路电流分别为 91.48 A、62.56 A, 5 个超导环的限流器在短路发生后产生了显著的限流效果。由图 10(b)可以看出: 短路发生 10 ms 后, 安装 0 个、5 个超导环的限流器两端电压分别为 1.91 V、4.88 V。由图 10(c)可以看出: 短路发生 10 ms 后, 安装 0 个、5 个超导环的限流器电感分别为 0.29 mH、21.59 mH。结合功能一的验证实验, 从上述结果可以得出, 安装 0 个超导环(无超导隔离环组)的限流器在合闸时铁芯已被磁化, 铁芯磁导率已越过最大值进入逐步减小的区段(参考图 3)。当发生短路故障后, 铁芯磁导率继续减小并进入饱和状态, 短路电流迅速达到稳定值。因此, 无超导隔离环组的限流器在合闸阶段铁芯的磁化很大程度上削弱了其对应线路短路电流的限制能力。然而, 安装 5 个超导环的限流器在合闸时铁芯未被磁化, 铁芯磁导率处于快速上升的区段。当发生短路故障后, 超导隔离环组失去隔离作用, 线圈与铁芯完全耦合, 且铁芯磁导率迅速上升经过最大值, 限流器产生大电感抑制电流上升率。综上所述, 超导隔离环组起到了保证利用铁芯最大磁导率限流的作用。

3.2.3 功能三的验证实验

本实验分别对安装 5 个、9 个和 13 个超导环的限流器进行短路实验, 实验过程与 3.2.1 节一致。实验结果如图 11 所示。

由图 11(a)可以看出: 300 ms 时, K_2 合闸, 线路发生短路故障, 安装 5 个、9 个、13 个超导环的限流器分别在短路发生 3 ms、6 ms、10 ms 后开始限流, 开始限流时短路电流分别为 60.52 A、91.70 A、107 A。由图 11(b)可以看出: 开始限流时限流器两

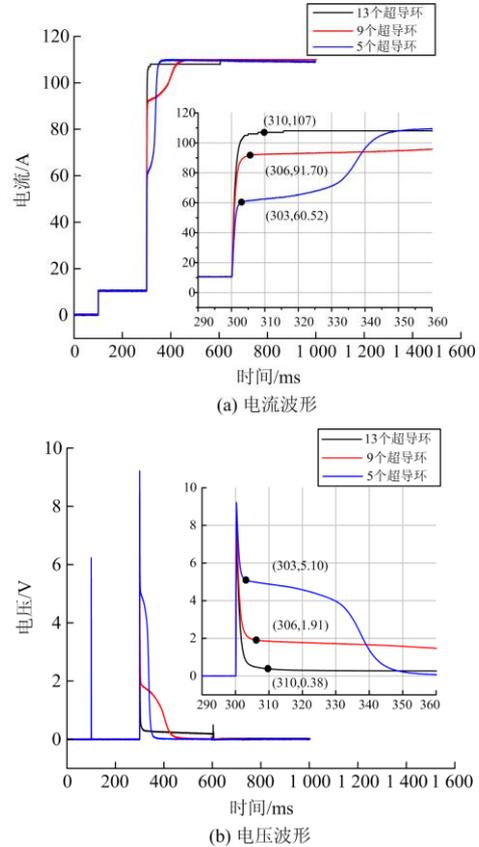


图 11 超导隔离环组功能三验证的实验结果

Fig. 11 Experimental result of function III of superconducting isolation ring set

端电压分别为 5.10 V、1.91 V、0.38 V。以上结果可表明, 不同超导环数对应不同的限流阈值, 限流阈值随超导环数的增加而增大。此外, 还可以看出, 数量过多的超导环会严重影响限流效果。因此, 根据需要来调整超导环的数量, 从而设计合适的限流阈值。

3.3 样机限流功能测试实验与结果分析

本实验控制唯一变量为直流线路中有、无限流器, 限流器中加入铁芯并安装 5 个超导环。实验过程与 3.2.1 节一致。实验结果如图 12 所示。

由图 12(a)可以看出: 300 ms 时, K_2 合闸, 线路发生短路故障, 无限流器线路中的短路电流迅速达到最大值 110 A, 而有限流器的线路需要 50~60 ms 达到最大值。短路发生 5 ms 之后, 无限流器线路中的短路电流为 109.81 A, 已达到最大短路电流。有限流器线路中的短路电流为 61.63 A, 短路电流被抑制了 43.97%。由图 12(c)可以看出: 短路发生 5 ms 之后, 有、无限流器线路上电感分别为 16.56 mH、0 mH。这表示所提出的新型超导直流限流器可在发生短路故障时提供大感抗, 有效抑制短路电流

的上升率。

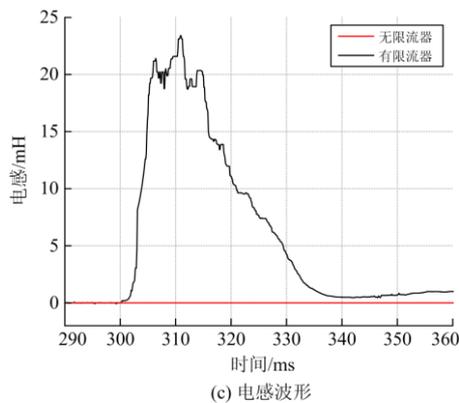
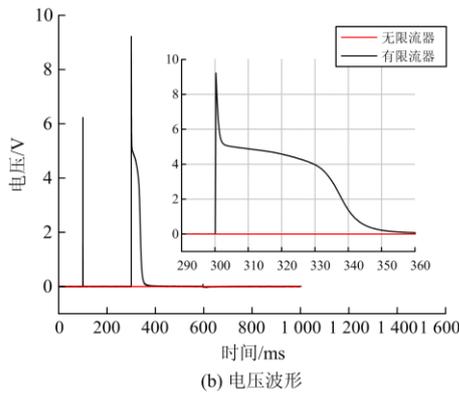
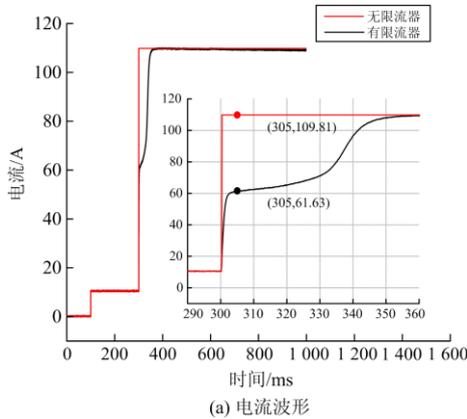


图 12 样机限流功能测试实验结果

Fig. 12 Experimental results of current limiting function test of prototype

3.4 新型超导直流限流器在多端柔性直流系统中的应用价值

除了上面实验所验证的功能特点，超导环组还可以在故障后快速恢复到超导态，使整个限流器快速恢复到低电抗状态。这是因为超导环组中的所有超导环都是独立且不相连的，彼此之间有较大的空隙，这有助于承受更大的电压冲击和更迅速的冷却。而且在直流系统故障期间，由于超导环组两端的电

压与超导线圈匝数成反比，因此超导环组两端的电压远低于超导线圈两端的电压，即所提出的超导限流器特别适于高压直流系统的应用。此外，在故障清除之后，超导环组的结构特点也有利于其与液氮进行热量交换，加速其恢复到超导态。

当安装了所提出的超导限流器后，多端柔性直流系统可以快速高效地清除短路故障，避免换流器闭锁而可能引发的更大范围的故障，这有利于提升多端柔性直流系统应对短路故障的生存能力。通过快速隔离故障线路，可以有效地减少多端柔性直流系统的经济损失。由于所提出的超导限流器主要利用电感限制故障电流，因此超导线圈不必失超，并可以采用较为低廉的铜线圈替换。

超导环组的结构简单，需要的超导材料较少，便于大规模制作。相比于利用失超进行限流的电阻型超导限流器，本文所提的超导限流器需要的超导材料相对较少，也不需要额外的制冷容量在故障期间移除大量的焦耳热，因此成本可以远低于电阻型超导限流器。此外，为了增强限流效果，可以通过适当的方式设置大功率电阻器配合限制持续故障电流，这也有助于降低限流器的成本。

4 结论

本文阐述了一种新的电感型超导直流限流器的结构和工作原理，介绍了原理验证样机的制作和实验。通过对实验结果的分析，可以得出如下结论。

- 1) 所提出的超导直流限流器在原理上是正确的，可以有效地抑制直流电网短路故障电流的初始上升率。
- 2) 这种电感型限流器在故障限流时可以提供足够大的限流电感，但在电路正常运行合闸时可以避免因投入一个大电感对直流电网稳定性产生的不利影响。
- 3) 可以通过调整超导隔离环的数量来设计限流器的限流阈值，满足不同电网的需要。

本文提出了一种应用于多端柔性直流输电电网的新型超导直流限流器，该限流器能在故障发生初期几毫秒内有效限制短路电流上升率，防止换流器桥臂过早闭锁。所提出的超导直流限流器与限流电阻和快速开关相结合，可以构成对多端柔性直流输电电网的可靠保护。

参考文献

[1] 安婷, ANDERSEN B, MACLEOD N, 等. 中欧高压直流电网技术论坛综述[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2407-2416.

- AN Ting, ANDERSEN B, MACLEOD N, et al. Overview of Sino-European HVDC grid technical forum[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2407-2416.
- [2] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
- ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [3] 宋金钊, 李永丽, 曾亮, 等. 高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 1-13.
- SONG Jinzhao, LI Yongli, ZENG Liang, et al. Review on commutation failure of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 1-13.
- [4] 索之闻, 李晖, 蒋维勇, 等. 考虑离散调压设备动作频次的高压直流输电系统控制优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 211-219.
- SUO Zhiwen, LI Hui, JIANG Weiyong, et al. Control optimization of HVDC system considering action frequency of discrete voltage regulation equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 211-219.
- [5] 陈佳浩, 王琦, 朱鑫要, 等. 谐波电压造成直流输电换相失败风险评估[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 196-202.
- CHEN Jiahao, WANG Qi, ZHU Xinyao, et al. Risk assessment of commutation failure for HVDC transmission due to harmonic voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 196-202.
- [6] 黄强, 邹贵彬, 高磊, 等. 基于 HB-MMC 的直流电网直流线路保护技术研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2830-2840.
- HUANG Qiang, ZOU Guibin, GAO Lei, et al. Review on DC transmission line protection technologies of HB-MMC based DC grids[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2830-2840.
- [7] 徐政, 肖晃庆, 张哲任, 等. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [8] HE J H, CHEN K A, LI M, et al. Review of protection and fault handling for a flexible DC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 151-165.
- [9] 魏晓光, 高冲, 罗湘, 等. 柔性直流输电网用新型高压直流断路器设计方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 95-102.
- WEI Xiaoguang, GAO Chong, LUO Xiang, et al. A novel design of high-voltage DC circuit breaker in HVDC flexible transmission grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 95-102.
- [10] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.
- CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.
- [11] 信赢, 田波, 魏子镗. 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.
- [12] 信赢. 饱和铁心型超导限流器实用性技术研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(4): 364-372.
- XIN Ying. Research and progress in developing key technologies for practical saturated iron-core superconducting fault current limiters[J]. Scientia Sinica Technologica, 2017, 47(4): 364-372.
- [13] 王通, 姚磊, 奚培锋, 等. 基于 PSCAD 的饱和铁心型超导限流器性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 72-80.
- WANG Tong, YAO Lei, XI Peifeng, et al. Performance analysis of saturated core-type superconducting current limiter based on PSCAD[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 72-80.
- [14] NOE M, STEURER M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status[J]. Superconductor Science & Technology, 2007, 20(3): 15-29.
- [15] FOROUD A A, NIASATI M, BARZEGAR-BAFROOEI, et al. On the advance of SFCL: a comprehensive review[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(17): 3745-3759.
- [16] 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.
- [17] NOE M, OSWALD B R. Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1999, 9(2): 1347-1350.
- [18] RAJU B P, PARTON K C, BARTRAM T C. A current

limiting device using superconducting D.C. bias applications and prospects[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(9): 3173-3177.

[19] XIN Y, GONG W Z, HONG H, et al. Development of a 220 kV/300 MVA superconductive fault current limiter[J]. Superconductor Science & Technology, 2012, 25(10).

[20] 金晶, 殷勤. 含电阻型超导限流器的南澳柔性直流系统故障特性分析[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 286-291. JIN Jing, YIN Qin. Fault characteristics analysis of Nan'ao flexible DC system with resistance superconducting current limiter[J]. High Voltage Apparatus, 56(12): 286-291.

[21] LIANG S Y, TANG Y J, REN L, et al. Tests and analysis of a small-scale hybrid-type DC SFCL prototype[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4): 1-6.

[22] SUN J L, DU J, LI Y, et al. Design and performance test of a 20 kV DC superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(2): 1-5.

[23] QIU Q Q, XIAO L Y, ZHANG J Y, et al. Design and test of 40 kV/2 kA DC superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(6): 1-5.

[24] SONG M, DAI S T, SHENG C, et al. Design and tests of a 160-kV/1-kA DC superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(6): 1-7.

[25] DAO V Q, LEE J, KIM C, et al. Conceptual design of a saturated iron-core superconducting fault current limiter for a DC power system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1-5.

[26] DAO V Q, LEE J, KIM C, et al. Experimental study on the current limiting characteristics of a saturated iron-core superconducting fault current limiter in DC power systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(5): 1-5.

[27] LI B, WANG C Q, WEI Z Q, et al. Technical requirements of the DC superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4): 1-5.

[28] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8. LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.

[29] WANG C Q, LI B, HE J W, et al. Design and application of the SFCL in the modular multilevel converter based DC system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4): 1-4.

[30] LI B, WANG C Q, HONG W, et al. Modeling of the DC inductive superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1-5.

[31] CHEN L, CHEN H K, SHU Z Y, et al. Comparison of inductive and resistive SFCL to robustness improvement of a VSC-HVDC system with wind plants against DC fault[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-8.

[32] HEKMATI A, VAKILIAN M, FARDMANESH M. Flux-based modeling of inductive shield-type high-temperature superconducting fault current limiter for power networks[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(4): 3458-3464.

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-11-10

作者简介:

熊佳玲(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为超导限流器、柔性直流输电技术; E-mail: 2368594061@qq.com

李文鑫(1995—), 男, 博士, 研究方向为超导限流器、超导储能; E-mail: wenxinli@tju.edu.cn

杨超(1990—), 男, 博士, 研究方向为超导限流器、柔性直流输电技术。E-mail: xinqijiayu@163.com

(编辑 许威)