

磁偏置超导故障限流器限流响应模型与并网运行研究

诸嘉慧¹, 韦德福², 王 帅², 秦汉阳³, 朱义东², 严植泳¹, 陈盼盼¹, 张宏杰¹, 杨艳芳¹, 邹 军⁴

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006;

3. 北方工业大学 电气与控制工程学院, 北京 100144; 4. 清华大学 电机工程与应用电子技术系

电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:针对电网短路故障限流问题,提出一种新型磁偏置超导故障限流器(SFCL),采用超导无感组件、双分裂电抗器支路两级限流的运行方式,具有自触发、分级故障限流、快速自我恢复等优点。应用MATLAB/Simulink软件,搭建了含磁偏置SFCL的10 kV电网线路仿真模型,提出超导限流组件磁热耦合特性的物理建模方法,并对0°和90°短路故障角下的SFCL并网限流效果进行瞬态仿真和比较。仿真结果表明,在电网0°和90°不同故障短路角电流冲击下,SFCL在首半波中的限流率分别为36.45%和45.89%,随后第2个半波的最大限流率达到78.58%,限流电阻在90°短路故障角下的变化率是0°短路故障角下的1.75倍,实现了较快的限流动作响应和显著的分级限流效果。最后实验验证了磁偏置超导限流技术的可行性。

关键词:磁偏置超导故障限流器;磁热耦合;双分裂电抗器;限流率;失超电阻;温度

中图分类号:TM 471

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202108023

0 引言

随着我国电网规模的逐渐扩大,电网中的线路阻抗越来越小,一旦发生短路故障,将会对电力系统的安全性带来极大的影响。目前,在广州、上海等大型城市负荷中心已经出现断路器开断容量难以满足短路需求、采用高压等级的断路器又会增加成本的难题^[1]。超导故障限流器SFCL(Superconducting Fault Current Limiter)集触发检测、快速限流和自我恢复功能于一身,是解决电网短路故障的一种有效方案^[2-4],目前成为各国关注的热点。

近年来,国内外研究人员基于不同的限流原理,发展了多种针对电网应用的SFCL。耐克森公司研制出了被称为CURL10的三相10 kV/10 MV·A的电阻型SFCL,并在德国奈特芬市的莱茵韦斯特伐伦电力公司进行了并网试验^[5]。2014年,美国应用材料公司在纽约Knapps Corner变电站安装并在网测试了15 kV/400 A的SFCL系统。日本、韩国也分别研制出了66 kV/0.75 kA的桥式SFCL^[6-7]和22.9 kV/0.63 kA的混合式单相SFCL^[8]。我国正在开展面向

实用化的超导故障限流技术研究。中国科学院电工所已研制出10.5 kV/1.5 kA的三相桥路型SFCL和40 kV/2 kA超导直流限流器原型样机^[9-11]。北京云电英纳超导公司在云南普吉电站测试了35 kV/1.2 kA饱和铁芯型SFCL^[12-13]。上海交通大学、华中科技大学也分别开展了纯电阻型和磁通约束型配电网级SFCL样机研究^[14]。

本文将断路器的并联技术与SFCL相结合,基于高耦合分裂电抗器提出一种新型自触发磁偏置超导限流技术^[15],可有效解决限流中断的问题。该SFCL由双分裂电抗器、无感型超导限流组件和快速开关组成,通过对开关进行控制,具有分级限流功能,可实现故障电流在首半波的限流响应和快速失超恢复。基于MATLAB/Simulink软件搭建包含超导限流组件和双分裂电抗器的磁偏置SFCL的10 kV线路运行等效模型,理论分析了磁偏置SFCL在稳态运行以及在不同短路故障角下的限流运行性能,获得SFCL限流过程中失超电阻和温度的变化规律,最后通过实验验证了限流特性。研究结果为磁偏置SFCL样机应用于电网的研究提供了重要的理论依据。

1 磁偏置SFCL运行系统设计

1.1 拓扑设计

磁偏置SFCL拓扑如图1所示^[15]。回路系统主要由电网电源、线路阻抗(R_{line} 和 L_{line})、磁偏置SFCL、负载阻抗(R_{load} 和 L_{load})、线路断路器 K_2 组成。其中,磁偏置SFCL由高耦合双分裂电抗器(2个绕组电感分别为 L_1 和 L_2 , $L_1=L_2=L$,互感 $M=\alpha L$, α 为耦合系数)、无感型钇钡铜氧(YBCO)超导限流组件 R_{sc} 和快速开关 K_1 三部分组成。双分裂电抗器同名端反向

收稿日期:2020-12-11;修回日期:2021-06-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11772025);国网辽宁省电力有限公司科技项目(2019YF-63,2021YF-30);清华大学电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室开放基金资助项目(SKLD20KM10)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(11772025),the Science and Technology Project of State Grid Liaoning Electric Power Co.,Ltd.(2019YF-63,2021YF-30) and the Open Project Fund of State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment of Tsinghua University(SKLD20KM10)

并联,超导限流组件 R_{sc} 分别与 L_2 和快速开关 K_1 串联,然后与 L_1 并联。图1中, I_a 为回路总电流, I_1 为支路1流经的电流, I_2 为超导限流组件支路(支路2)电流,且 $I_a = I_1 + I_2$ 。

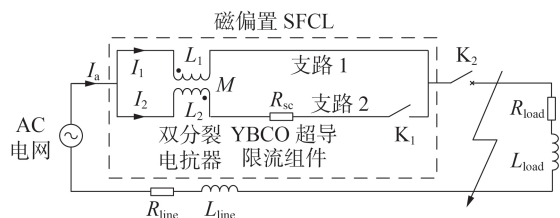


图1 SFCL系统拓扑

Fig.1 Topology of SFCL system

1.2 运行原理和特色

正常运行时,磁偏置SFCL中超导限流组件为超导态,因此电阻为0;双分裂电抗器的2个绕组由于反向相连,因此互感电压相互抵消,仅有漏抗接入回路中,对电网正常运行的影响不大。

当发生线路负载短路故障电流冲击时,磁偏置SFCL将呈现逐级限流的特性,其故障限流过程分为2个阶段。第1阶段:在故障电流冲击下, I_1 和 I_2 相应增大,当 I_2 超过超导组件的临界电流时,YBCO超导限流组件自动触发失超,迅速上升的失超电阻实现第1级限流。第2阶段:当YBCO超导限流组件的电阻达到失超电阻值后,快速开关 K_1 触发断开(通常在短路发生后10 ms)。此时,支路2被断开,只剩支路1接入回路,进行第2级限流,直到故障电流减小到线路断路器 K_2 的遮断容量,由 K_2 切断回路。在完成故障电流首半波限流后,伴随支路2被断开,YBCO超导限流组件开始迅速恢复到超导状态,等待断路器 K_1 的下一次闭合。

可见,该磁偏置SFCL具有如下特色:首先,在稳定运行时双分裂电抗器由于支路高度耦合使总压降较低,因此通流损耗比较小;其次,该SFCL具有支路分流能力,相比仅靠超导组件限流的方式,可以减小对YBCO超导限流组件的通流要求,从而减少超导材料用量;再次,超导触发限流和恢复过程实现条件要求较低,不需要电力电子元件的控制信号,失超恢复较快;最后,能在故障电流首半波实现一级限流,在第2个半波进行二级限流,具有数毫秒内限流响应速度,提高了SFCL的技术经济性。

1.3 运行状态方程

将双分裂电抗器进行支路解耦后,在正常运行状态下,由于YBCO超导限流组件的阻抗一般是微欧级,并且双分裂电抗器两支路上的电抗产生的互感磁动势已经相互抵消,因此SFCL接入后基本不会对线路正常运行产生影响。SFCL的稳态运行阻抗 Z_{SFCL} 见式(1),正常稳态运行时 Z_{SFCL} 随 α 的增加而线性减小,变化区间为 $[0, j\omega L/2]$,其中 ω 为角频率。

$$Z_{SFCL} = j\omega(1-\alpha)L/2 \quad (1)$$

当线路发生短路故障后,2条支路的电流 I_1 和 I_2 随之迅速增加,当 I_2 超过了YBCO超导限流组件的临界电流后,YBCO超导限流组件逐渐开始失超,电阻上升,此时2条支路的阻抗不再相等,导致 $I_1 > I_2$,互感磁动势不再相互抵消,这期间由双分裂电抗器和YBCO超导限流组件共同限流,限流阻抗 Z_{SFCL} 如式(2)所示,限流过程中 Z_{SFCL} 随 α 的变化呈现复杂的非线性关系,而且考虑到 R_{sc} 为指数函数模型^[16],所以限流过程中 Z_{SFCL} 是一个复杂的双变量函数。

$$Z_{SFCL} = \frac{j\omega L [1 + (1 - \alpha^2)j\omega L/R_{sc}]}{1 + 2(1 + \alpha)j\omega L/R_{sc}} \quad (2)$$

YBCO超导限流组件在失超状态下会产生大量热量,为了保护YBCO超导限流组件,快速开关 K_1 在首半波完成限流后就立即断开(一般是10 ms后)。故障电流将转移到双分裂电抗器的支路1继续进一步限流,此时限流阻抗 Z_{SFCL} 见式(3),直到回路电流达到线路断路器 K_2 的遮断容量, K_2 断开故障线路。此过程中, Z_{SFCL} 与 α 无关,为支路1电抗。

$$Z_{SFCL} = j\omega L \quad (3)$$

2 基于MATLAB/Simulink的磁偏置SFCL磁热特性模型设计

考虑到基于单个超导失超特征值(n -value)的超导特征模型不能全面体现过流冲击时超导带材的电阻变化行为,为准确拟合超导带材随时间变化的失超过程,本文根据YBCO超导带材的电流密度 J 与临界电流密度 J_c 的倍数关系,提出了一种超导失超特征值时间分段等效法,实现了对超导材料非线性失超转变过程的细化处理,完成了YBCO超导限流组件磁热耦合建模,获得失超电阻的变化规律。

根据不同的临界电流倍数将整个通流过程划分为多个区间,因此每个区间可用不同的失超特征值 n 来等效。例如,将YBCO超导带材的整个通流过程分为 F 个区间段,则对应的节点 $D=1, 2, \dots, F-1$,定义节点 D 处的电流密度 $J_D = [1 + 2(D-1)]J_c$,其中 J_c 为临界电流,如图2所示。图3为YBCO超导带材电阻率 ρ_{YBCO} 的等效计算模型示意图。本文将超导带材等效为YBCO超导层与金属稳定层的并联结构,采用失超特征值区间分段计算法,将YBCO超导层电阻率用多个区间电阻率函数 $\rho_1(J)$ 、 $\rho_2(J)$ 、 $\dots$ 、 $\rho_{F-1}(J)$ 进行叠加等效,然后与金属稳定层电阻率 ρ_{stab} 并联,实现对YBCO超导带材电阻率的等效建模。

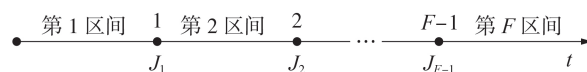


图2 通流区间分段模型

Fig.2 Current-carrying segmented model

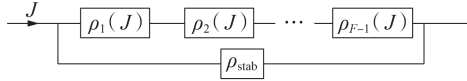


图3 YBCO 超导带材电阻率等效计算模型

Fig.3 Equivalent model of resistivity calculation of YBCO superconducting tape

所提出的超导通用等效电阻率分段函数见式(4)、(5),其中每个区间电阻率函数 $\rho_D(J)$ ($D=1, 2, \dots, F-1$)对应的失超特征值为 n_i ,由超导材料临界电流特性曲线测量获得。

$$\rho_D(J) = \begin{cases} 0 & |J| < J_D \\ \frac{E_0}{|J|} \left(\frac{|J|}{J_c} - D \right)^{n_D} & |J| \geq J_D \end{cases} \quad (4)$$

$$\rho_{YBCO} = \frac{(\rho_1(J) + \rho_2(J) + \dots + \rho_{F-1}(J)) \rho_{stab}}{\rho_1(J) + \rho_2(J) + \dots + \rho_{F-1}(J) + \rho_{stab}} \quad (5)$$

本文中,将磁偏置SFCL中YBCO超导带材的通流过程分为3个区间段和2个节点(即 $F=3$),经计算可得2个节点处的电流密度分别为 $J_1=J_c$ 和 $J_2=3J_c$,电阻率 $\rho_1(J)$ 、 $\rho_2(J)$ 分别见式(6)、(7),YBCO超导层电阻率为 $\rho_1(J)$ 和 $\rho_2(J)$ 的叠加。

$$\rho_1(J) = \begin{cases} 0 & |J| < J_c \\ \frac{E_0}{|J|} \left(\frac{|J|}{J_c} - 1 \right)^{n_1} & |J| \geq J_c \end{cases} \quad (6)$$

$$\rho_2(J) = \begin{cases} 0 & |J| < 3J_c \\ \frac{E_0}{|J|} \left(\frac{|J|}{J_c} - 3 \right)^{n_2} & |J| \geq 3J_c \end{cases} \quad (7)$$

式中: n_1 、 n_2 和 E_0 可以从文献[16]中得到;临界电流密度 J_c 由式(8)计算得到。

$$J_c = \begin{cases} J_c(T_{op}) \frac{(T_c - T)^\gamma}{(T_c - T_{op})^\gamma} & T_{op} < T < T_c \\ 0 & T \geq T_c \end{cases} \quad (8)$$

式中: T_{op} 为YBCO超导带材在正常工作下的参考温度; T_c 为超导带材的临界温度; γ 为温度变化系数。

由此可知:

1)第1区间, $0 < J < J_c$,将 $\rho_1(J)$ 和 $\rho_2(J)$ 叠加后,可见YBCO超导带材处于超导态,此时电阻率为0;

2)第2区间, $J_c \leq J < 3J_c$,将 $\rho_1(J)$ 和 $\rho_2(J)$ 叠加后,此阶段采用 n_1 值计算YBCO超导层电阻率;

3)第3区间, $J \geq 3J_c$,将 $\rho_1(J)$ 和 $\rho_2(J)$ 叠加后,此阶段采用 n_2 值计算YBCO超导层电阻率。考虑到此区间YBCO超导带材中稳定层的电阻率 ρ_{stab} 小于YBCO超导层电阻率,故将进行分流。

此时,YBCO超导带材的等效电阻率 ρ_{YBCO} 为:

$$\rho_{YBCO} = \frac{(\rho_1(J) + \rho_2(J)) \rho_{stab}}{\rho_1(J) + \rho_2(J) + \rho_{stab}} \quad (9)$$

由于瞬间增大的电流密度会令超导材料进入高失超传播状态^[17],因此在大电流冲击下,单位长度YBCO超导带材在时间 t 内产生的温度变化量 ΔT 见式(10)^[18],被冷却介质带走的传热功率 P 见式(11)。

$$\Delta T = \frac{I^2 R_{sc} t - h A_s (T - T_{op}) t}{m c_{heat}} \quad (10)$$

$$P = h A_s (T - T_{op}) \quad (11)$$

式中: I 为电力线路电流有效值; h 为对流换热系数; A_s 为换热面积; h 为对流换热系数; T_{op} 取77 K; t 为每次计算时间间隔,由采样率确定; $m=dA$,为单位长度YBCO超导带材的质量, d 、 A 分别为YBCO超导带材的密度和横截面积; c_{heat} 为YBCO超导带材的比热系数,取 $c_{heat}=241 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ^[19]。

在大电流冲击瞬间,由于液氮汽化后会在超导带材周围形成氮气隔离区,不发生液氮换热。因此,本文中在故障电流冲击10 ms期间,近似认为热平衡方程是绝热模型,即令式(11)中 $h=0$ 。

3 磁偏置SFCL运行仿真与结果分析

3.1 含磁偏置SFCL的10.5 kV并网系统模型

假设某10.5 kV负荷集中的电网结构可简化为图4所示线路图,磁偏置SFCL与线路阻抗 Z_{line} ,负载阻抗 Z_{load} 和线路断路器 K_2 串联共同接入10.5 kV母线,短路开关 K_3 与 Z_{load} 并联,通过触发 K_3 闭合,实现10.5 kV线路负载短路故障。

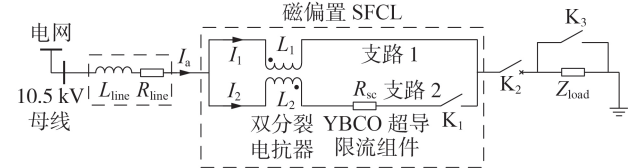


图4 磁偏置SFCL并网系统模型

Fig.4 Model of grid-connected system with magneto-biased SFCL

磁偏置SFCL采用YBCO涂层导体的材料参数见附录A表A1,系统运行仿真参数见附录A表A2。应用MATLAB/Simulink软件,建立的含磁偏置SFCL的10.5 kV并网运行系统的仿真模型见附录A图A1。其中通过改变变压器副边接线方向模拟双分裂电抗器同名端反接关系,YBCO超导限流组件使用S-Function模拟超导电阻暂态磁热耦合变化过程(见式(6)~(11)),从而实时控制YBCO超导限流组件失超电阻输出^[20-22]。

当短路开关 K_3 闭合,线路发生负荷短路故障10 ms后,快速开关 K_1 在检测到回路电流过零点时立即断开支路2,故障电流转移到双分裂电抗器支路1中,研究此过程中SFCL在不同短路故障角下的限流效果。设定YBCO超导限流组件临界电流为1 kA,仿真时长为0.16 s。分别在0.055 s和0.06 s

发生负荷短路,利用2个时刻的故障电流为0和最大值,来模拟 0° 和 90° 这2种极端故障角的限流运行情况,并评价限流效果。为简化模型,将负载阻抗 Z_{load} 设置为阻性负荷,产生的故障电流峰值为23.81 kA。

3.2 SFCL限流过程仿真与分析

3.2.1 SFCL最小故障角限流特性

在 $t=0.055$ s时,触发 0° 最小故障角短路。图5为故障限流过程中,SFCL中双分裂电抗器2条支路的电流波形。由图可知,系统发生短路故障后,支路1和2在故障初始时期继续进行均流,但在 $t=0.058$ s(即短路故障发生3 ms后),YBCO超导限流组件失超产生的电阻大于支路1的阻抗,故障电流便不再均匀地流过2条支路,而是偏移到了阻抗较小的支路1,当 $t=0.065$ s时,YBCO超导限流组件所在支路在故障触发10 ms被断开后,故障电流全部转移到支路1,此时支路2的电流降为0。

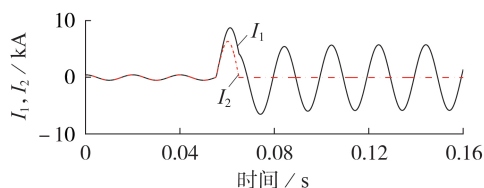


图5 SFCL中2条支路电流曲线(0° 故障角)

Fig.5 Current curves of two branches in SFCL when fault angle is 0°

图6为故障限流过程中,SFCL中双分裂电抗器2条支路的电压和YBCO超导限流组件的电压波形。由图可知,双分裂电抗器的2条支路电压互为反向,而在 $t=0.065$ s时切除支路2后, L_2 上仍然有感应电压存在,并且与 L_1 的电压大小相等、方向相反。YBCO超导限流组件的电压在故障限流的10 ms内,随失超电阻的产生而产生,当支路2的电流降为0后,其电压也降为0。

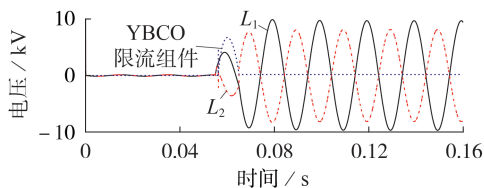


图6 SFCL各组件电压曲线(0° 故障角)

Fig.6 Voltage curves of components in SFCL when fault angle is 0°

YBCO超导限流组件在故障触发后的失超电阻波形如图7所示。在发生了近乎24倍故障电流冲击下,YBCO超导限流组件立刻进入高速失超传播状态,失超电阻在短路故障触发时刻(即 $t=0.055$ s)后的0.35 ms内,迅速增加到 1.06Ω 设计值,并保持稳定。而且,失超电阻的增长率随故障电流的增加而变大,失超电阻导致了双分裂电抗器的2条支路不再均匀分流。

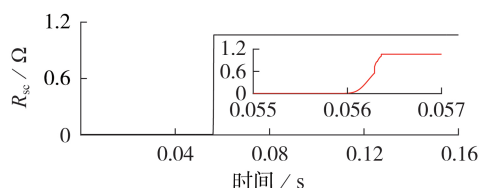


图7 YBCO超导限流组件失超电阻变化波形(0° 故障角)

Fig.7 Variation curve of quench resistance of YBCO superconducting unit when fault angle is 0°

图8为YBCO超导限流组件在 0° 故障角短路电流冲击下的温度变化过程。随着YBCO超导限流组件的失超电阻增加,温度从77 K逐渐增大,由于限流期间近似为绝热环境,所以在 $t=0.064$ s,即短路故障发生9 ms后,温度上升到146 K就一直保持不变。

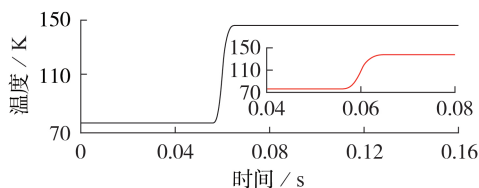


图8 YBCO超导限流组件温度变化波形(0° 故障角)

Fig.8 Variation curve of temperature of YBCO superconducting unit when fault angle is 0°

3.2.2 SFCL最大故障角限流特性

在 $t=0.06$ s时,触发 90° 最大故障角短路故障。图9为该故障限流过程中,SFCL中双分裂电抗器2条支路的电流波形。由图可知,短路时刻支路1和2的电流为最大值,伴随YBCO超导限流组件产生失超电阻,2条支路电流不再均流分布,在 $t=0.07$ s(即故障触发10 ms后),支路2被断开,故障电流全部转移到支路1,此时支路2的电流变为0。这些变化过程与 0° 故障角的变化规律一致,但发现首半波中支路1和2的电流峰值下降更明显。

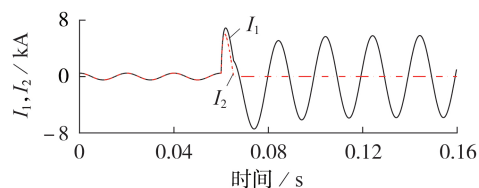


图9 SFCL的2条支路电流曲线(90° 故障角)

Fig.9 Current curves of two branches in SFCL when fault angle is 90°

图10为SFCL中双分裂电抗器的2条支路的电压和YBCO超导限流组件的电压波形,其变化规律与 0° 故障角的情况相似。但在 $t=0.06$ s,由于故障触发瞬间短路电流为最大值,电流突变导致双分裂电抗器的 L_1 和 L_2 上都产生了尖峰脉冲电压干扰,会对超导绕组绝缘带来影响。

YBCO超导限流组件在故障触发后的失超电阻

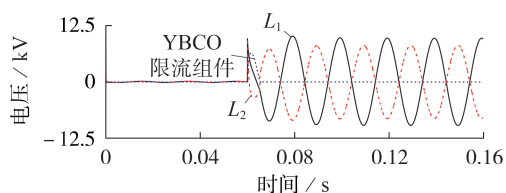


图 10 SFCL 各组件电压曲线 (90° 故障角)

Fig.10 Voltage curves of components in SFCL when fault angle is 90°

波形如图 11 所示。由图可知,尽管稳定后的超导失超电阻值仍为 1.06Ω ,但 90° 故障角下的失超过程更短,失超电阻在短路故障触发时刻(即 $t=0.06 \text{ s}$)后的 0.2 ms 内增加到 1.06Ω ,其增长速度是 0° 故障角时的 1.75 倍。可见短路故障角对失超电阻的变化过程具有较大的影响。

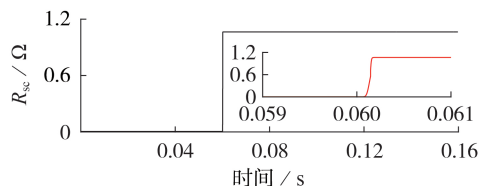


图 11 YBCO 超导限流组件失超电阻变化波形 (90° 故障角)

Fig.11 Variation curve of quench resistance of YBCO superconducting unit when fault angle is 90°

图 12 为 90° 故障角短路电流冲击下 YBCO 超导限流组件的温度变化波形。由图可知,相比于 0° 故障角的情况,由于失超电阻增加速度加快,使得故障电流限制效果更好,因此回路电流峰值更小,由失超电阻产生的热功率也相应变小,因此 YBCO 超导限流组件的温度反而变小。同理在绝热条件下,在 $t=0.066 \text{ s}$ (即短路故障发生 6 ms 后),温度上升到 120 K 保持不变,相比于 0° 故障角的最高温度 146 K ,温度降低了 17.8% 。

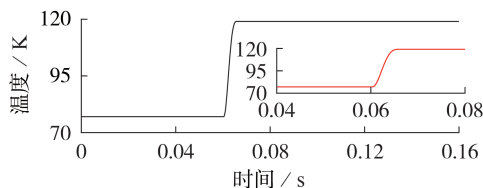


图 12 YBCO 超导限流组件温度变化波形 (90° 故障角)

Fig.12 Variation curve of temperature of YBCO superconducting unit when fault angle is 90°

3.3 SFCL 故障限流率比较

图 13 为有、无 SFCL 作用的回路总电流波形对比图。由图可知:在 0° 故障角下, SFCL 接入后,故障电流首半波的电流峰值从 23810 A 减小到 15107 A ,首半波之后(即 $t=0.065 \text{ s}$),电流峰值继续减小到 5511 A ;在 90° 故障角下, SFCL 接入后,首半波的电流峰值减

小到 12883 A ,在首半波后的电流峰值继续减小到 5099 A ,故障限流效果好于 0° 故障角的情况。

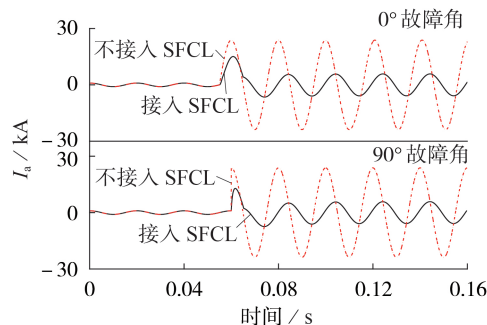


图 13 接入 SFCL 前、后回路总电流波形对比

Fig.13 Comparison of current curves between with and without SFCL

定义磁偏置 SFCL 的限流率 k 为:

$$k = \frac{i_{\text{fault}} - i_{\text{limit}}}{i_{\text{fault}}} \times 100\% \quad (12)$$

式中: i_{fault} 为故障电流波形峰值; i_{limit} 为 SFCL 接入后的电流波形峰值。

表 1 为磁偏置 SFCL 在 0° 和 90° 故障角下的限流率比较。SFCL 在首半波将故障电流限制下来之后,继续通过双分裂电抗器中 L_1 限流的效果也十分明显。在给定负载条件下, 90° 故障角下的首半波限流率为 45.89% ,第 2 个半波的限流率达到 78.58% ,比 0° 故障角下首半波的限流率 36.45% 大了 9.44% ,而且从图 13 中可知,由于 90° 故障角下线路短路电流波形中存在一些非周期分量,导致电流波形向下偏移,因此在支路 1 接入时,该时刻电流峰值比 0° 故障角下的值要小一些,但很快伴随非周分量衰减结束,二者电流波形峰值趋于相同。同时可见,快速开关 K_1 的分断电流不足故障电流的 $1/2$,在超导支路断开之后的电流值相比无 SFCL 时的电流下降明显,从而可以降低线路断路器 K_2 的遮断容量。从上述仿真结果可知, SFCL 在不同故障角下都产生了良好的限流效果,其中 90° 故障角的限流效果更加明显,较好地实现了逐级限流的设计目的。

表 1 不同故障角下限流率比较

Table 1 Comparison of current limiting rates under different fault angles

类型	故障角 / (°)	电流峰值 / A		限流率 / %	
		首半波	第 2 个半波	首半波	第 2 个半波
无 SFCL	0.90	23810	23810	—	—
有 SFCL	0	15107	5511	36.45	76.85
	90	12883	5099	45.89	78.58

4 实验与结果

为了验证磁偏置 SFCL 的限流性能,进行了工

频过电流冲击实验。限流实验平台如附录A图A2所示,主要包括试验电源、无感超导单元、双分裂电抗器、实时监控系統、低温液氮罐、负载电阻柜和快速开关。限流试验分为2个阶段:首先,在没有SFCL接入下测量发生负载短路故障时的回路总电流;然后,将SFCL接入电路,在相同的故障条件下测量限流情况。图14为触发 90° 故障角下的回路总电流实验波形,在没有SFCL接入的情况下,短路电流峰值为1 838 A,接入SFCL后,首半波限流率 $k=(1\,838-1\,040)/1\,838=43.4\%$,第2个半波限流率 $k=(1\,838-190)/1\,838=89.66\%$,两级限流效果显著,且与仿真规律非常相似,验证了所提磁偏置SFCL拓扑的有效性和故障响应模型的正确性。

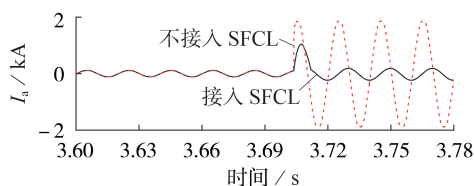


图14 回路总电流实验波形(90° 故障角)

Fig.14 Experimental waveforms of circuit current when fault angle is 90°

5 结论

针对电网短路故障限流问题,本文提出了一种自触发阻感混合式的磁偏置SFCL拓扑结构,建立了基于失超电阻率分段模型的含磁偏置SFCL的10.5 kV并网系统仿真模型,获得了电网不同短路故障角下SFCL的磁热特性和回路电流的变化规律。本文得到的主要结论如下。

1)磁偏置SFCL的拓扑结构能够实现逐级限流效果,快速开关 K_1 的分断电流不足故障电流的1/2,能有效降低线路断路器的遮断容量,具有较好的技术经济性。

2)磁偏置SFCL在 90° 故障角下的限流效果更加明显,首半波的限流率为45.89%,第2个半波的限流率达到78.58%。失超电阻变化率随故障电流的增加而增大, 90° 故障角下的失超限流电阻的变化率是 0° 故障角下的1.75倍;由于限流率较大, 90° 故障角下由热积累产生的温度最大值相比 0° 故障角时降低了17.8%。

3)当线路主要为阻性负载,额定工况下发生短路故障时,线路中的自由分量较小,SFCL可使线路很快趋于稳定。

4)工频过电流冲击实验结果验证了所提磁偏置SFCL的逐级限流性能和限流响应模型的正确性。

笔者后续将进一步研究传热条件下YBCO超导限流组件的失超恢复过程。

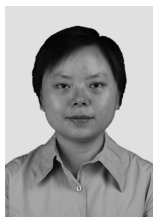
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] NOE M, STEURER M. High temperature superconducting fault current limiter: concepts, applications, and development status [J]. Superconductor Science and Technology, 2007, 20: 15-29.
- [2] ZHU J, ZHENG X, QIU M, et al. Application simulation of a resistive type Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) in a transmission and wind power system [J]. Energy Procedia, 2015, 75: 716-721.
- [3] HYUN O B. Brief review of the field test and application of a superconducting fault current limiter [J]. Progress in Superconductivity and Cryogenics, 2017, 19(4): 1-11.
- [4] 信赢, 田波, 魏子强. 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.
- [5] KREUTZ R, BOCK J, BREUER F, et al. System technology and test of CURL 10, a 10 kV, 10 MVA resistive high-Tc superconducting fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1961-1964.
- [6] NOE M, SCHACHERER C. Status and outlook on superconducting fault current limiter development in Europe [C] // Proceedings of International Symposium on Eco Topia Science. Nagoya, Japan: Nagoya University, 2007: 529-534.
- [7] YAZAWA T, OOTANI Y, SAKAI M, et al. Design and test results of 66 kV high-Tc superconducting fault current limiter magnet [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2006, 16(2): 683-686.
- [8] LEE S R, KO E Y, LEE J J, et al. Development and HIL testing of a protection system for the application of 154 kV SFCL in South Korea [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 5602104.
- [9] 邱清泉, 肖立业, 张志丰, 等. 应用于谐振型限流器的双分裂铁心电抗器研究 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 164-171.
QIU Qingquan, XIAO Liye, ZHANG Zhifeng, et al. Investigation of double-splitting iron reactor used in resonant type fault current limiter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 164-171.
- [10] ZHANG Jingye, TENG Yuping, QIU Qingquan, et al. Design and development of a 220 kV resistive-type fault current limiters based on 2G-coated conductors [J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2019(32): 3779-3787.
- [11] 中科院电工研究所. 40 kV / 2 kA 超导直流感流器样机研制成功 [EB / OL]. (2019-11-20) [2020-12-11]. <http://www.ybzh.cn/news/detail/79375.html>.
- [12] XIN Y, GONG W Z, NIU X Y, et al. Manufacturing and test of a 35 kV / 90 MVA saturated iron-core type superconductive fault current limiter for live-grid operation [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 1934-1937.
- [13] 袁佳歆, 张朝阳, 周航, 等. 交流饱和铁芯型故障限流器的现状与发展 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 209-221.
YUAN Jiaxin, ZHANG Zhaoyang, ZHOU Hang, et al. Present situation and development of AC SCFCL [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 209-221.
- [14] 李政, 任丽, 梁思源, 等. 磁通约束型超导限流器在舰船中压直流配电系统中的应用研究 [J]. 低温与超导, 2019, 47(12): 20-24.
LI Zheng, REN Li, LIANG Siyuan, et al. Research on application of flux-coupling-type superconducting fault current limiter

- in shipboard medium voltage DC power system[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019, 47(12): 20-24.
- [15] ZHU Jiahui, ZHAO Yongqing, CHEN Panpan, et al. Magneto-thermal coupling design and performance investigation of a novel hybrid Superconducting Fault Current Limiter(SFCL) with bias magnetic field based on MATLAB/Simulink[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 5601405.
- [16] 龚珩, 诸嘉慧, 方进, 等. 电阻型高温超导限流器暂态电阻特性分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(9): 2130-2138.
GONG Jun, ZHU Jiahui, FANG Jin, et al. Analysis of transient resistance characteristics for resistive type high temperature superconducting fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(9): 2130-2138.
- [17] 瞿青云, 马媛媛, 刘华军, 等. YBCO 高温超导带材失超传播特性研究[J]. 低温与超导, 2014, 42(9): 38-43.
QU Qingyun, MA Yuanyuan, LIU Huajun, et al. Study on the quench propagation properties of YBCO HTS tapes[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2014, 42(9): 38-43.
- [18] DURON J, GRILLI F, ANTOGNAZZA L, et al. Finite-element modelling of YBCO fault current limiter with temperature dependent parameters[J]. Superconductor Science and Technology, 2007, 20(4): 338-344.
- [19] WANG X, TROCIIEWITZ U P, SCHWARTZ J. Near-adiabatic quench experiments on short YBa₂Cu₃O₇-coated conductors [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(5): 053904.
- [20] ZHU Jiahui, ZHANG Huiming, CHEN Panpan, et al. Design and experimental investigation of current limiting characteristics for a hybrid Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) with biased magnetic field[C]//14th European Conference on Applied Superconductivity. Glasgow, Scotland, United Kingdom: Institute of Physics Publishing, 2019: 1-7.
- [21] KRAEMER H P, SCHMIDT W, CAI H, et al. Superconducting fault current limiter for transmission voltage[J]. Physics Procedia, 2012, 36: 921-926.
- [22] 陈妍君, 顾洁, 金之俭, 等. 电阻型超导限流器仿真模型及其对 10 kV 配电网的影响[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 87-91.
CHEN Yanjun, GU Jie, JIN Zhijian, et al. Simulation model of resistor-type superconducting fault current limiter and its impact on 10 kV distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 87-91.

作者简介:



诸嘉慧

诸嘉慧(1977—),女,江苏无锡人,教授级高级工程师,博士,通信作者,研究方向为超导电力应用技术(E-mail: zhujiahui@epri.sgcc.com.cn);

韦德福(1982—),男,辽宁沈阳人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统设备状态评价和超导限流技术(E-mail: weidf_ldk@ln.sgcc.com.cn);

王 帅(1989—),男,辽宁沈阳人,工程师,硕士,研究方向为电力系统过电压及绝缘配合(E-mail: ws1_ldk@ln.sgcc.com.cn)。

(编辑 李莉)

Fault current limiting modeling and grid-connected operation analysis for magneto-biased superconducting fault current limiter

ZHU Jiahui¹, WEI Defu², WANG Shuai², QIN Hanyang³, ZHU Yidong², YAN Zhiyong¹,
CHEN Panpan¹, ZHANG Hongjie¹, YANG Yanfang¹, ZOU Jun⁴

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China;

3. School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

4. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment,
Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Aiming at the problem of short circuit fault current limiting in power grids, a novel magneto-biased SFCL (Superconducting Fault Current Limiter) with the operation mode of two-stage fault current limiting through non-inductive superconducting unit and double-split reactor branch is proposed, which has the advantages of self-triggering, hierarchical fault current limiting and fast self-recovery. Using MATLAB/Simulink software, a 10 kV power grid simulation model including the magneto-biased SFCL is built. A physical modeling method of the magnetic and thermal coupling characteristics of superconducting current limiting units is proposed, and the transient simulation and comparison of fault current limiting effects are carried out under the conditions of the short circuit fault angles of 0° and 90°. Results show that, the fault current limiting rates of SFCL respectively reach to 36.45% and 45.89% when the short circuit fault angles are 0° and 90° in the first half cycle, and the maximum fault current limiting rate in the second half cycle is 78.58%. Moreover, the rate of change of the quench resistance under the condition of the short circuit fault angle of 90° is 1.75 times as large as that under the condition of the short circuit fault angle of 0°, which realizes the quick current limiting response and significant hierarchical current limiting effect. Experiment verifies the feasibility of the magneto-biased superconducting fault current limiting technology.

Key words: magneto-biased superconducting fault current limiter; magnetic and thermal coupling; double-split reactor; current limiting rate; quench resistance; temperature

附录 A

表 A1 超导材料的关键参数

Table A1 Parameters of superconducting material

参数	数值
HTS 带材制造商	AMSC
YBCO 带材宽度	4.8 mm
YBCO 层厚度	1 μm
铜稳定层厚度	75 μm
超导带材厚度	(0.36~0.44) mm
超导带材临界电流	>90 A@77 K

表 A2 超导限流器系统仿真参数

Table A2 Simulation parameters of SFCL in power grid

仿真参数	数值
线路电压 U	10.5 kV
线路电流 I	1 kA
等效线路阻抗 Z_{line}	0.4 Ω
等效负载阻抗 Z_{load}	10 Ω
频率 f	50 Hz
电抗器单支路电抗 L	5.3 mH
耦合系数 α	0.9
SFCL 稳态阻抗 Z_{SFCL}	0.083 Ω

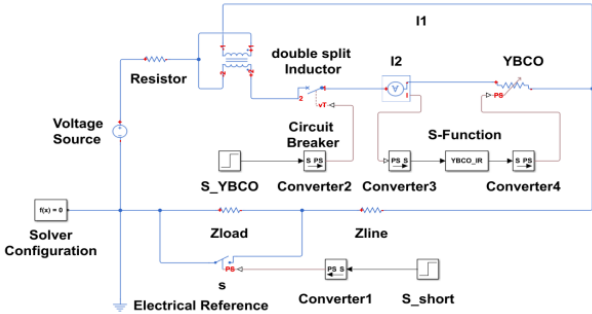


图 A1 超导限流器并网运行 MATLAB/Simulink 仿真模型

Fig.A1 Grid-connected simulation model of SFCL based on MATLAB/Simulink

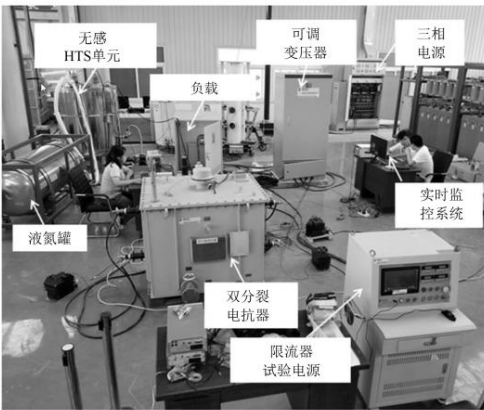


图 A2 工频电流冲击实验现场布局图

Fig.A2 Photo of experimental platform for current limiting test with SFCL