

# 10 kV磁偏置超导限流器限流阻抗特性实验研究

韦德福<sup>1</sup>,王飞鸣<sup>1</sup>,诸嘉慧<sup>2</sup>,刘一涛<sup>1</sup>,刘超群<sup>2</sup>,刘钧迪<sup>1</sup>

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

**摘要:**结合系统运行工况,建立10 kV电网短路限流暂态过程数学模型,分析不同阶段的限流机理,给出磁偏置超导限流器阻抗特性变化趋势。搭建10 kV系统磁偏置超导限流器阻抗特性试验电路,测量不同限流工况下的电流波形,获得磁偏置超导限流器阻抗特性的等效方程和变化规律曲线。研究表明:稳定运行阶段,磁偏置超导限流器的等效阻抗为0.13  $\Omega$ ;初始限流阶段,在设置的工况1、2下磁偏置超导限流器的电流峰值限流率分别为13.18%和8.98%;稳态限流阶段,磁偏置超导限流器的等效阻抗为1.667  $\Omega$ ,在设置的工况1、2下其电流峰值限流率分别为16.23%和14.13%。给出限流器初始限流阶段阻抗特性数学方程。

**关键词:**磁偏置;超导限流器;阻抗特性;限流率;数学模型

**中图分类号:**TM 471

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202205031

## 0 引言

电力系统送电容量大,发生短路故障时,几十千安培的短路电流开断不仅会严重降低断路器的电气寿命,而且会降低线路及临近设备绝缘水平,极大地影响电网稳定运行。短路电流越大,对断路器开断熄弧能力和弧后介质恢复能力的要求越高,断路器的设计难度越大,导致开断电气寿命以及可靠性低<sup>[1-5]</sup>。因此,如何有效地降低系统短路电流以及提高开关开断可靠性是保证电网稳定运行的关键问题。近年来,各种电网故障限流技术相继出现,超导限流器因具有对环境友好、自动触发、响应快速、限流可靠、自我恢复等优点,成为了研究的热点<sup>[6-8]</sup>。超导限流器通常可分为电阻型和电感型2类。电阻型超导限流器在线路正常输电时,稳态阻抗非常小,限流速度快,但是电阻型超导限流器存在超导带材用量较大、失超恢复较难控制等问题;电感型超导限流器超导元件在限流过程中并不失超,无需较长的失超恢复时间,但在限流过程中存在超导绕组高电压冲击、交流绕组匝数较多等问题<sup>[9-10]</sup>。因此,需要在现有超导限流器拓扑结构的基础上进行限流原理创新和技术突破,探索一种能兼具电阻型和电感型限流器优点的新型超导限流器技术,实现超导限流器的高效经济运行。当前,10 kV磁偏置超导限流器技术已受到业界的关注,该超导限流器在短路故障初期基于无感超导线圈自触发实现限流,随后转移

到双分裂电抗器绕组继续限流,因此提高了限流的可靠性,避免了失超恢复等待时间较长的问题。自触发磁偏置超导限流器巧妙地运用超导限流单元的无感失超特性与双分裂电抗器形成了有效的分级限流方式,为解决我国电网短路故障问题提供了一种新方法<sup>[11-12]</sup>。

电力系统短路电流是由暂态直流分量和稳态工频分量叠加而成,短路电流峰值、冲击系数、直流分量百分比等关键参数取决于电网时间常数和阻抗特性。超导限流器利用短路电流引发超导材料阻抗变化的特性,改变系统固有的阻抗比例,降低系统时间常数和电流峰值,加快短路电流衰减,从而达到限流目的<sup>[13-17]</sup>。磁偏置超导限流器通过串联的方式接入线路,在系统稳态运行的情况下,限流器处于无阻抗运行状态,当系统因短路电流发生故障时,超导部分发生阻抗突变,使得限流器的阻抗产生限流效果;当短路电流消失后,超导线圈能够快速恢复到超导状态,整个超导限流器又恢复至无阻抗状态<sup>[18-20]</sup>。可以看出,磁偏置超导限流器的阻抗特性变化复杂,准确地掌握磁偏置超导限流器的阻抗特性是限流器结构设计、能力评估、挂网运行的前提。

本文建立10 kV电网短路限流暂态过程数学模型,对磁偏置超导限流器不同阶段限流过程的阻抗特性进行计算分析,给出磁偏置超导限流器阻抗特性的变化规律。搭建10 kV磁偏置超导限流器阻抗特性试验电路,对超导限流器的阻抗特性变化规律进行试验分析,验证数学模型及理论分析的准确性。研究结果为磁偏置超导限流器设计、研发、应用提供理论基础及试验数据支持。

## 1 磁偏置超导限流器结构及运行机理

10 kV自触发磁偏置超导限流器结构如图1所示,其主要包括双分裂电抗器、无感超导限流组件、

收稿日期:2021-07-13;修回日期:2022-03-29

在线出版日期:2022-04-08

基金项目:国家电网有限公司科技项目(磁偏置超导故障限流器电网运行技术研究)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (Research on Operation Technology of Magnetic Biased Superconducting Fault Current Limiter in Power Grid)

快速开关和监控系统 4 个部分,这 4 个部分的实物图如附录 A 图 A1—A4 所示。图 1 中: $L_1$ 、 $L_2$  为双分裂电抗器 T 的自感; $K_1$ 、 $K_2$  为快速开关; $R(t)$  为无感超导限流组件电阻, $t$  为短路时刻起始后的时间; $U_{sc}$  为  $R(t)$  两端电压; $I_1$ 、 $I_2$  为双分裂电抗器的支路电流, $I_1+I_2=I$ 。将双分裂电抗器同名端反向相连,将双分裂电抗器其中一条支路与无感超导限流组件和快速开关串联后与另一条支路并联,组成自触发磁偏置超导限流器。监控系统分别记录双分裂电抗器的支路电流  $I_1$ 、 $I_2$  和  $R(t)$  两端的电压  $U_{sc}$ 。

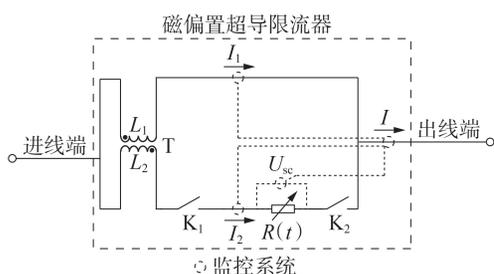


图 1 磁偏置超导限流器结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of magnetic biased superconducting current limiter

正常运行状态下,由于无感超导限流组件的阻抗一般是  $\mu\Omega$  级,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,因此整个超导限流器阻抗极小,不会对线路正常运行产生影响。当线路发生短路故障后,支路电流  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I$  迅速增大,导致无感超导限流组件逐渐开始失超,电阻  $R(t)$  快速上升,无感超导限流组件在第 1 个半波实现限流。无感超导限流组件在失超状态下会产生大量热量,为了保护无感超导限流组件,快速开关  $K_1$  在前半个周期完成限流后(一般是 10 ms 后)断开。在切断  $L_2$  所在支路后, $I_2=0$ ,超导限流器的阻抗为  $L_1$  的自然阻抗。切除  $L_2$  所在支路后超导带材会迅速再次恢复到超导态,实现了超导限流器快速恢复的功能。因此,磁偏置超导限流器的等效阻抗  $Z(t)$  的变化可以总结为 3 个阶段。

1) 稳定运行阶段,  $Z(t)=0.13 \Omega$ 。

2) 初始限流阶段,从短路电流产生到  $R(t)$  快速增大, $L_1$  和  $L_2$  的互感电动势不再相互抵消,互感值为  $M$ ,磁偏置超导限流器去耦等效电路如图 2 所示,等效阻抗如式(1)所示。

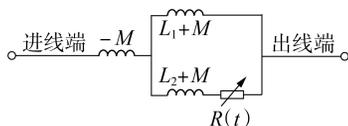


图 2 磁偏置超导限流器去耦等效电路

Fig.2 Decoupling equivalent circuit of magnetic biased superconducting current limiter

$$Z(t) = \frac{j\omega(L_1+M) [j\omega(L_2+M)+R(t)]}{j\omega(L_1+M)+j\omega(L_2+M)+R(t)} - j\omega M \quad (1)$$

式中: $L_1=L_2=5.31 \text{ mH}$ ; $M=4.48 \text{ mH}$ ; $\omega$  为角频率。

3) 稳定限流阶段,无感超导限流组件被切除,等效阻抗  $Z(t)=j\omega L_1$ 。

## 2 系统短路电流限流过程数学模型

以中性点接地系统短路电流限流过程为例,中性点接地系统短路故障示意图和单相等效电路分别如图 3、4 所示。图中: $Z(t)=R_z(t)+j\omega L_z(t)$ ,  $R_z(t)$  为实时等效电阻,  $L_z(t)$  为实时等效电抗。系统稳定运行时,断路器  $K_3$  闭合、 $K_4$  断开;系统发生短路故障时,断路器  $K_3$ 、 $K_4$  闭合,  $Z(t)$  接入系统。此时系统短路电流  $I(t)$  为<sup>[1,7]</sup>:

$$I(t) = I_{DC} e^{-t/\tau} + I_{sym}(t) \quad (2)$$

$$\begin{cases} \tau = \frac{L_0 + L_z(t)}{R_0 + R_z(t)} \\ I_{sym}(t) = \frac{U(t)}{Z_0(t)} \\ Z_0(t) = R_0 + R_z(t) + j\omega(L_0 + L_z(t)) \\ U(t) = A \sin(\omega t + \phi) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\tau$  为系统时间常数; $U(t)$  为系统电压; $A$  为交流电压最大幅值; $\phi$  为电压初始相位角; $I_{DC}$  为直流分量初始值; $I_{sym}(t)$  为短路电流稳态交流分量; $R_0$ 、 $L_0$ 、 $C_0$  分别为系统等效电阻、电感和电容; $Z_0(t)$  为系统等效阻抗。

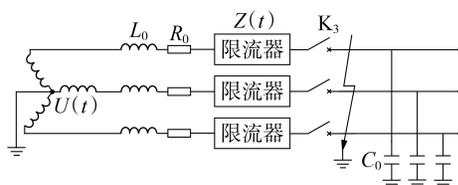


图 3 中性点接地系统短路故障示意图

Fig.3 Schematic diagram of short circuit fault in grounded neutral system

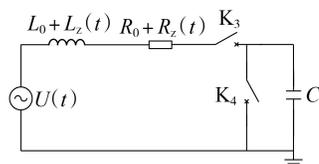


图 4 中性点接地系统短路故障单相等效电路

Fig.4 Single-phase equivalent circuit of short circuit fault in grounded neutral system

在系统发生短路时刻,由于电感磁通不会发生突变,磁通值保持在短路时刻前的稳定状态。因此,短路电流中会出现直流分量  $I_{DC} e^{-t/\tau}$ ,直流分量初始值为短路时刻电流对称分量的瞬时值,且极性相反。

暂态过程结束后,系统短路电流会达到稳态对称值<sup>[16-18]</sup>。根据磁偏置超导限流器不同阶段的阻抗特性变化,可得到不同阶段的系统短路电流,具体如下。

1) 稳定运行阶段。 $K_3$  闭合,  $K_4$  断开,  $L_1=L_2=L$ ,  $R(t)=0$ 。该阶段有:

$$I(t) = \frac{U(t)}{R_0 + j\left(\omega \frac{L-M}{2} - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (4)$$

$$L_z(t) = \omega \frac{L-M}{2}, \quad R_z(t) = 0 \quad (5)$$

2) 初始限流阶段。 $K_3$ 、 $K_4$  闭合,  $0 \leq t \leq 10$  ms, 此时  $K_4$  将  $C_0$  短接,  $L_1=L_2=L$ ,  $R(t) \neq 0$ 。

$$Z(t) = \frac{j\omega(L_1+M) [j\omega(L_2+M)+R(t)]}{j\omega(L_1+M)+j\omega(L_2+M)+R(t)} - j\omega M = \frac{R(t)\omega^2(L+M)^2}{R^2(t)+4\omega^2(L+M)^2} + j\omega \frac{2R^2(t)L+2\omega^2(L+M)^2(L-M)}{R^2(t)+4\omega^2(L+M)^2} \quad (6)$$

$$R_z(t) = \frac{R(t)\omega^2(L+M)^2}{R^2(t)+4\omega^2(L+M)^2} \quad (7)$$

$$L_z(t) = \frac{2R^2(t)L+2\omega^2(L+M)^2(L-M)}{R^2(t)+4\omega^2(L+M)^2} \quad (8)$$

$$Z_0(t) = R_0 + R_z(t) + j\omega(L_0 + L_z(t)) \quad (9)$$

$$I_{\text{sym}}(t) = \frac{U(t)}{Z_0(t)}, \quad I_{\text{DC}} = -I_{\text{sym}}(0) \quad (10)$$

$$\tau = \frac{L+L_z(t)}{R_0+R_z(t)} \quad (11)$$

$$I(t) = -\frac{U(0)}{Z_0(0)} e^{-\frac{t(R_0+R_z(t))}{L_0+L_z(t)}} + \frac{U(t)}{Z_0(t)} \quad (12)$$

3) 稳定限流阶段。 $K_3$ 、 $K_4$  闭合, 限流器开关  $K_1$  和  $K_2$  断开,  $t > 10$  ms,  $R(t)=0$ ,  $Z(t)=j\omega L_1$ 。

$$Z_0(t) = R_0 + j\omega(L_0 + L_1) \quad (13)$$

$$\tau = \frac{L_0 + L_1}{R_0} \quad (14)$$

$$I(t) = -\frac{U(0)}{Z_0(0)} e^{-\frac{tR_0}{L_0+L_1}} + \frac{U(t)}{R_0 + j\omega(L_0 + L_1)} \quad (15)$$

通过分析可以看出,在系统稳定运行和稳定限流阶段,系统阻抗值与无感超导限流组件电阻  $R(t)$  无关,系统电流取决于系统固有阻抗和双分裂电抗器电抗值。无感超导限流组件电阻  $R(t)$  直接影响初始限流阶段限流效果。

### 3 磁偏置超导限流器试验验证

磁偏置超导限流器的通流试验测试包括稳态运行测试、故障初始限流测试和故障稳定限流测试,依据磁偏置超导限流器运行特性,设置试验条件如表

1所示。预期试验为无磁偏置超导限流器,是试验电路实际工况运行试验,用于对比分析磁偏置超导限流器的限流效果。工况1、2的初始限流时间不同,用于对比分析初始限流阶段的限流效果。

表1 试验条件设置

Table 1 Setting of test conditions

试验方式	运行电流/A	运行时间/s	故障电流/A	初始限流时间/ms	故障时间/ms
预期试验	100	60	1000	—	500
工况1	100	20	1000	10	500
工况2	100	60	1000	60	100

依据试验工况要求,模拟10 kV中性点接地系统空载线路接地故障,如图3所示,选择电容器负载电路,采用接地断路器模拟接地故障,试验电路图和试验现场布置图分别见附录A图A5和图A6。图中: $U_{a0}$ 为电源侧电压测量值; $U_a$ 为限流器电压测量值; $I_a$ 为接地电流测量值; $I_b$ 为主电路电流测量值。设置  $U(t)=10.5$  kV; $L_0$ 采用系统可调电抗器进行模拟,  $L_0=32.54$  mH; $C_0$ 采用系统集中电容器进行模拟,  $C_0=28$   $\mu$ F; $R_0$ 采用系统集中电阻进行模拟,同时  $R_0$ 作为放电电阻,  $R_0=2.1$   $\Omega$ 。电路初始状态为:保护断路器  $K_b$ 、合闸断路器  $K_h$ 、接地断路器  $K_d$  断开,导闸断路器  $K_c$  闭合。

预期试验流程如下:

- 1) 闭合保护断路器  $K_b$ ;
- 2) 100 ms后闭合合闸断路器  $K_h$ , 电路导通;
- 3) 2 s后闭合接地断路器  $K_d$ , 将负载电容器短接, 电路电流上升至1000 A;
- 4) 500 ms后断开保护断路器  $K_b$  和合闸断路器  $K_h$ , 试验结束。

工况1、2试验流程如下。

- 1) 闭合保护断路器  $K_b$ 。
- 2) 100 ms后闭合合闸断路器  $K_h$ , 电路导通。
- 3) 1 s后断开导闸断路器  $K_c$ , 将限流器接入电路, 避免电容器涌流对限流器的影响。
- 4) 对于工况1, 在20 s后闭合接地断路器  $K_d$ , 将负载电容器短接, 电路电流升至1000 A; 对于工况2, 试验时将20 s修改为60 ms即可。

5) 对于工况1, 在10 ms后断开限流器无感超导限流组件支路开关, 限流器由初始限流阶段进入稳定限流阶段; 对于工况2, 试验时将10 ms修改为60 ms即可。

6) 500 ms后断开保护断路器  $K_b$  和合闸断路器  $K_h$ , 试验结束。

预期试验波形见附录A图A7, 工况1、2的试验波形见附录A图A8和图A9, 各试验方式下测得的参数值见表2。表中: $U_{a1}$ 为磁偏置超导限流器前端

电压。限流率 $k$ 的计算公式为:

$$k = (i_{\text{fault}} - i_{\text{limit}}) / i_{\text{fault}} \quad (16)$$

式中: $i_{\text{fault}}$ 为预期故障电流暂态最大值; $i_{\text{limit}}$ 为超导限流后的电流暂态最大值。

表 2 不同试验方式下的参数

Table 2 Parameters under different test modes

参数	参数值		
	预期试验	工况 1	工况 2
$U_{a1}$ 稳态值 / kV	10.5	10.5	10.5
$I_a$ 暂态有效值 / A	1011	846	869
$I_a$ 暂态最大值 / A	6876	7326	7150
$I_b$ 稳态有效值 / A	109.4	109.3	109.4
$I_b$ 暂态有效值 / A	998	836	857
$I_b$ 暂态峰值 / A	1715	1489	1561
$I_b$ 涌流最大值 / A	316	331	439
稳态过程时间 / s	2	18	60
初始限流时间 / ms	0	10	60
稳定限流时间 / ms	430	420	70

由试验结果可知:稳定运行阶段,工况 1、2 的  $I_b$  有效值与预期试验的结果保持一致,证明磁偏置超导限流器稳态阻抗近似为 0;在初始限流阶段, $R(t)$  快速增加导致系统阻抗增大,工况 1、2 的  $I_b$  暂态峰值相比预期试验结果明显降低,工况 1、2 的  $I_b$  暂态峰值限流率分别为 13.18% 和 8.98%;工况 1、2 下,  $U_{a1}$  分别在短路时刻后的 10 ms 和 60 ms 发生突变,这是由超导限流组件支路被快速切除,系统阻抗值及功率因数突变导致的;系统由初始限流阶段进入稳定限流阶段后,  $I_b$  暂态有效值相比预期试验结果下降明显,工况 1、2 的稳态限流率分别为 16.23% 和 14.13%。

#### 4 磁偏置超导限流器阻抗特性分析

3 种试验方式下的  $I(t)$  波形见附录 A 图 A10。由图可见,由于稳定运行阶段限流器阻抗很小,通过式(5)计算得到  $L_z(t)=0.415$  mH,  $Z(t)=0.13$   $\Omega$ 。则可知磁偏置超导限流器稳定运行时的阻抗值仅为系统阻抗的 0.13%,可以忽略,所以 3 种试验条件下稳定运行波形相同。

对预期试验得到的  $I(t)$  波形进行傅里叶分解得到短路电流的暂态直流分量和稳态交流分量见附录 A 图 A11。通过预期电流波形求得暂态直流分量初始值  $I_{DC}=590$  A,  $\tau=15.5$  ms。由磁偏置超导限流器初始限流阶段数学模型,即式(6)—(12)可以看出:通过电流波形反推  $R(t)$  十分复杂,计算难度大。由于无感超导限流组件的阻抗特性是关于电流和时间的复杂函数,很难用简单的线性函数表征。为了简化计算程序,根据超导材料特性,假设无感超导限流组件电阻在电流为 1000 A、通流时长为 60 ms 的条件下是关于时间的线性函数,即  $R(t)=Nt$ 。通过  $R(t)$  迭代计算系统短路电流值,并比较计算电流与试验

电流,得出  $N$  值。计算初始条件如下:系统电压为  $U(t)=10.5$  kV;  $\omega=2\pi f=314$  rad/s;  $L_1=L_2=L=5.31$  mH,  $M=4.48$  mH;  $L_0=32.54$  mH;  $C_0=28$   $\mu$ F;  $R_0=2.1$   $\Omega$ ;  $I_{DC}=590$  A;工况 1 的初始限流阶段持续时间  $t_1=10$  ms;工况 2 的初始限流阶段持续时间  $t_2=60$  ms。工况 1、2 下的短路电流计算结果和试验结果如图 5 所示。

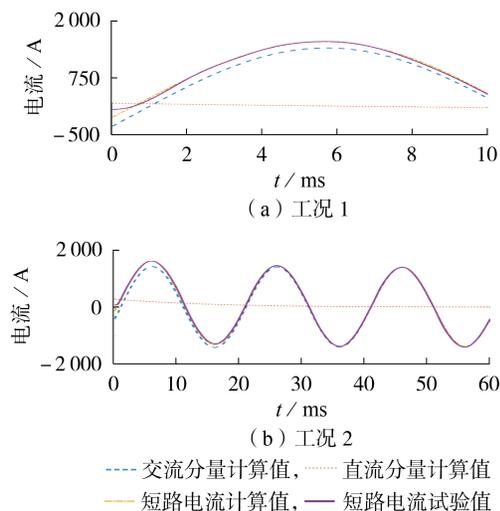


图 5 工况 1、2 下的短路电流计算结果和试验结果  
Fig.5 Calculated and test results of Condition 1 and Condition 2

工况 1、2 下的短路电流计算结果和试验结果可知,当  $N=0.0305$  时,计算结果和试验结果基本一致。由此可以得出磁偏置超导限流器初始限流阶段阻抗特性曲线,如图 6 所示。图中: $\cos(\phi(t))$  为功率因数。

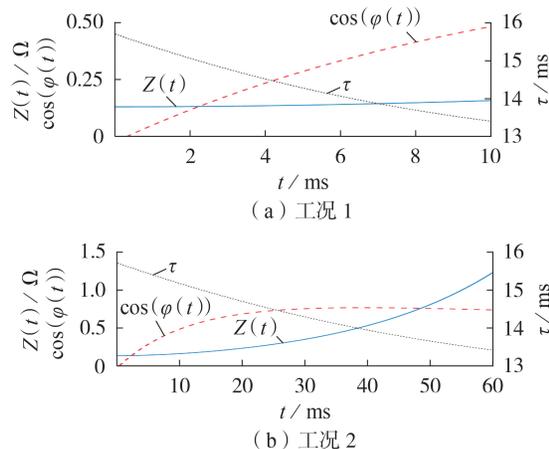


图 6 磁偏置超导限流器初始限流阶段等效阻抗特性曲线  
Fig.6 Equivalent impedance characteristic curve of magnetic biased superconducting current limiter in initial current limiting stage

对初始限流阶段阻抗特性曲线进行函数拟合,得出磁偏置超导限流器不同阶段阻抗变化的分段函数,具体如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} R(t)=0.0305t \quad I(t)=1000\text{ A}, 0 \leq t \leq 60\text{ ms} \\ Z(t)=\begin{cases} 0.13 & \text{稳定运行阶段} \\ 0.13e^{-0.1282t}+0.09741e^{0.04226t} & \text{初始限流阶段} \\ 1.667 & \text{稳定限流阶段} \end{cases} \\ \cos(\phi(t))=0.917e^{-0.003653t}- \\ \quad 0.9394e^{-0.08477t} \quad \text{初始限流阶段} \end{array} \right. \quad (17)$$

## 5 结论

本文建立了10 kV电网短路限流暂态过程数学模型,分析磁偏置超导限流器不同阶段的限流过程机理;搭建10 kV磁偏置超导限流器阻抗特性试验电路,通过不同试验方式下的试验波形推导磁偏置超导限流器的阻抗特性数学方程,确定无感超导限流组件电阻变化对限流器初始限流阶段的影响。具体得出以下结论。

1) 试验结果表明:稳定运行阶段, $L_z(t)=0.415\text{ mH}$ , $Z(t)=0.13\ \Omega$ ;初始限流阶段,工况1、2下的限流率分别为13.18%和8.98%;稳态限流阶段,工况1、2下的限流率分别为16.23%和14.13%, $L_z(t)=5.31\text{ mH}$ , $Z(t)=1.667\ \Omega$ 。稳定限流阶段限流效果要优于初始限流阶段。

2) 结合磁偏置超导限流器限流数学模型,应用10 kV并网试验波形计算推导可知,发生短路故障后,无感超导限流组件全部失超,在短路电流为1000 A时失超电阻表达式为 $R(t)=0.0305t$  ( $0 \leq t \leq 60\text{ ms}$ ), $R(t)$ 随着时间的增长呈现线性增加趋势。

3) 通过试验分析可以看出,初始限流阶段持续时间越长,限流器阻抗增加越快,电流暂态直流分量时间常数越小,电流衰减越快。合理设计初始限流阶段持续时间,是影响限流效果的关键因素。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2006:323-334.
- [2] CHEN Lei, LI Zhe, DENG Changhong, et al. Effects of a flux-coupling type superconducting fault current limiter on the surge current caused by closed-loop operation in a 10 kV distribution network[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 69: 160-166.
- [3] 林莘, 王飞鸣, 冯凯, 等. 高压SF<sub>6</sub>断路器介质绝缘强度恢复机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 6118-6125.  
LIN Xin, WANG Feiming, FENG Kai, et al. Study on dielectric strength recovery mechanism of high voltage SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 6118-6125.
- [4] 王飞鸣, 赵义松, 史可鉴, 等. 高压SF<sub>6</sub>断路器开断零区电弧特性仿真分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1420-1428.  
WANG Feiming, ZHAO Yisong, SHI Kejian, et al. Simulation analysis of arc characteristics on breaking zero zone in high voltage SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1420-1428.
- [5] 王飞鸣, 林莘, 徐建源. 高压SF<sub>6</sub>断路器非平衡态等离子体电弧的熄弧特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3073-3084.  
WANG Feiming, LIN Xin, XU Jianyuan. Extinction characteristics of non-equilibrium plasma arc in high-voltage SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3073-3084.
- [6] LIN Xin, WANG Feiming, XU Jianyuan, et al. Study on the mathematical model of dielectric recovery characteristics in high voltage SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. Plasma Science and Technology, 2016, 18(3): 223-229.
- [7] 张志丰, 邱清泉, 张国民, 等. 220 kV分裂电抗型超导限流器的仿真与优化设计[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1129-1136.  
ZHANG Zhifeng, QIU Qingquan, ZHANG Guomin, et al. Modeling and optimal design of 220 kV split reactance type superconducting fault current limiter[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1129-1136.
- [8] 王常骥, 李斌, 信赢, 等. 高温超导直流限流器的研究与应用综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 179-191.  
WANG Changqi, LI Bin, XIN Ying, et al. Review on research and application of high-temperature superconducting DC fault current limiter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 179-191.
- [9] 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): 5140-5148.  
ZHENG Jianchao. Current status and application prospect of fault current limiters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5140-5148.
- [10] 彭咏泉, 林湘宁, 陈乐, 等. 计及全寿命周期效益的超导故障限流器全局协同配置方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6275-6288.  
PENG Yongquan, LIN Xiangning, CHEN Le, et al. Research on global cooperative configuration of superconducting fault current limiter considering life cycle cost[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6275-6288.
- [11] 诸嘉慧, 韦德福, 王帅, 等. 磁偏置超导故障限流器限流响应模型与并网运行研究[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 167-173.  
ZHU Jiahui, WEI Defu, WANG Shuai, et al. Fault current limiting modeling and grid-connected operation analysis for magneto-biased superconducting fault current limiter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 167-173.
- [12] 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): 1-5.
- [13] BOCK J, HOBL A, SCHRAMM J, et al. Resistive superconducting fault current limiters are becoming a mature technology[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 1-4.
- [14] 林莘, 王飞鸣, 刘卫东, 等. 高压SF<sub>6</sub>断路器关合预击穿特性计算与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1445-1452.  
LIN Xin, WANG Feiming, LIU Weidong, et al. Research on calculations and experiments of closing pre-strike characteristics in high voltage SF<sub>6</sub> circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1445-1452.
- [15] 诸嘉慧, 陈盼盼, 戴银明, 等. 适用于电阻型超导限流器的超导带材选取与实验研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(12): 52-56.  
ZHU Jiahui, CHEN Panpan, DAI Yinming, et al. HTS tape selection and test for resistive type superconducting fault current limiter[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019, 47(12): 52-56.

- [16] 林莘,王飞鸣,刘卫东,等. 高压SF<sub>6</sub>断路器冷态介质恢复特性试验研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(14):3973-3981.  
LIN Xin,WANG Feiming,LIU Weidong,et al. Experiment researches on cold state dielectric recovery characteristics in high voltage SF<sub>6</sub> circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(14):3973-3981.
- [17] 龚珺,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.
- [18] 诸嘉慧,栗会峰,陈晓宇,等. 高温超导电缆交直流伏安特性测试与分析[J]. 电工技术学报,2016,31(24):120-125.  
ZHU Jiahui,LI Huifeng,CHEN Xiaoyu,et al. Test and analysis on the DC and AC I-V characteristics of high temperature superconducting cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(24):120-125.
- [19] 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 a novel saturated core high temperature superconducting fault current limiter[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(2):494-501.
- [20] 张晚英,周有庆,赵伟明,等. 改进桥路型高温超导故障限流器的实验研究[J]. 电工技术学报,2010,25(1):70-76.  
ZHANG Wanying,ZHOU Youqing,ZHAO Weiming,et al. Experimental research on an improved rectifier type high temperature superconducting fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(1):70-76.

#### 作者简介:



韦德福(1982—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统超导试验技术、电力系统接地技术、高电压绝缘技术等(E-mail:wdf\_dky@163.com)。

(编辑 任思思)

## Experimental study on impedance characteristics of 10 kV magnetic biased superconducting current limiter

WEI Defu<sup>1</sup>,WANG Feiming<sup>1</sup>,ZHU Jiahui<sup>2</sup>,LIU Yitao<sup>1</sup>,LIU Chaoqun<sup>2</sup>,LIU Jundi<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Supply Co.,Ltd.,Shenyang 110006,China;  
2. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

**Abstract:** The mathematical model of current limiting process for 10 kV grid is established in combination with the system operating conditions. The current limiting mechanism in different stages is analyzed and the changing trend of impedance characteristics of magnetic biased superconducting current limiter is obtained. The impedance characteristics operation test circuit of 10 kV magnetic biased superconducting current limiter is constructed, based on which, the current waveforms under different current limiting conditions are measured, and the equivalent equation and the variation curve of impedance characteristics of magnetic biased superconducting current limiter are obtained. The study results show that, in stable operation stage, the equivalent impedance of the current limiter is 0.13 Ω, the limiting rate of the current peak under the setting Condition 1 and 2 are 13.1% and 8.98% respectively in initial current limiting stage; in steady current limiting stage, the equivalent impedance of the current limiter is 1.667 Ω, and the limiting rate of the current peak under the setting Condition 1 and 2 are 16.23% and 14.13% respectively. The mathematical equation of the impedance characteristics of the current limiter in initial current limiting stage is given.

**Key words:** magnetic biased; superconducting current limiter; impedance characteristics; current limiting rate; mathematical model

附录 A



图 A1 双分裂电抗器实物图

Fig.A1 Physical diagram of double split reactor



图 A2 无感超导限流组件实物图

Fig.A2 Physical diagram of superconducting current limiting assembly



图 A3 快速开关实物图

Fig.A3 Physical diagram of quick switch

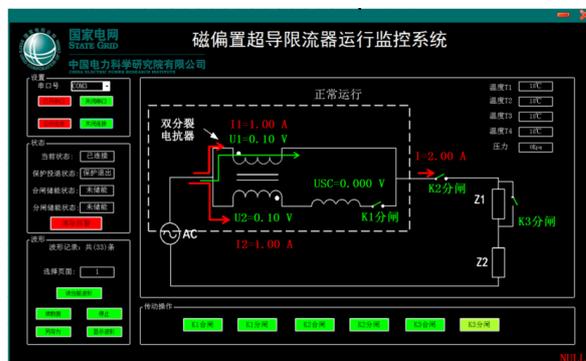


图 A4 监控系统

Fig.A4 Physical diagram of monitoring system

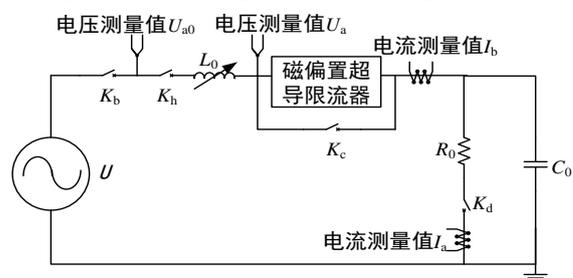


图 A5 磁偏置超导限流器试验电路

Fig.A5 Test circuit of magnetic bias superconducting current limiter



图 A6 磁偏置超导限流器试验布置图

Fig.A6 Test Layout of magnetic-biased superconducting

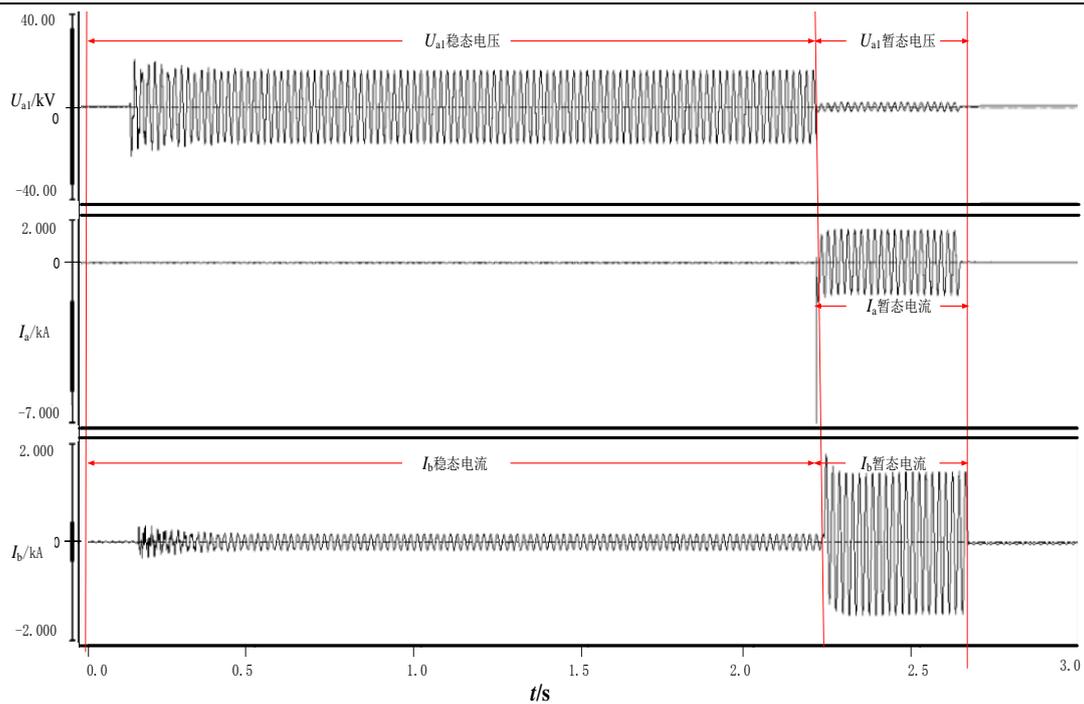


图 A7 预期试验波形

Fig.A7 Waveforms of expected test

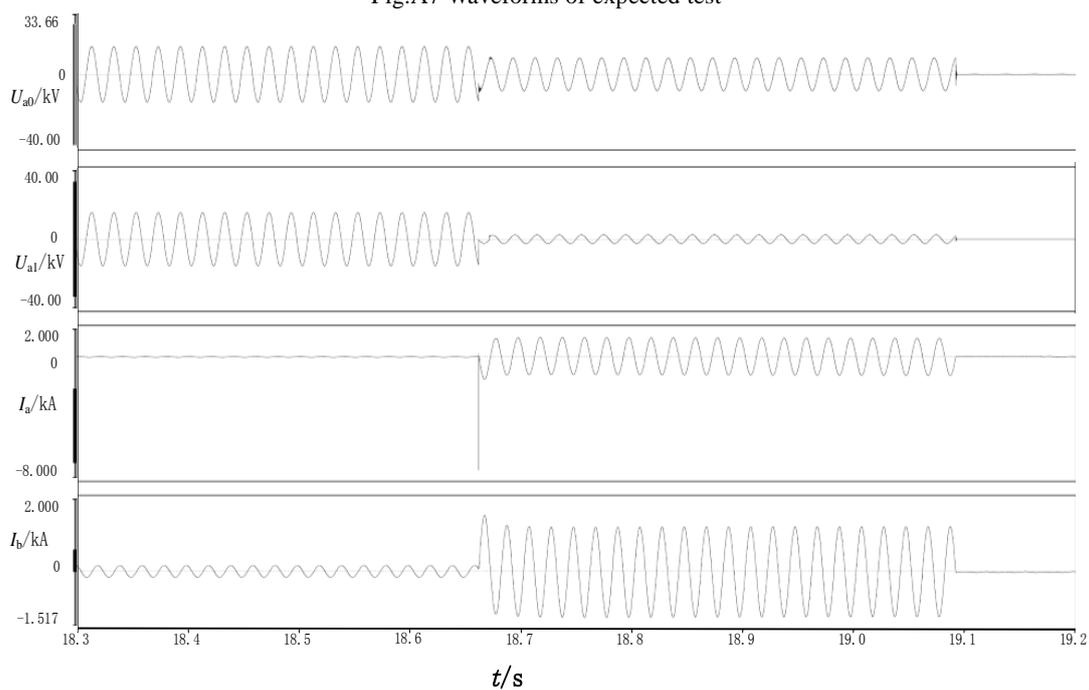


图 A8 工况 1 的试验波形

Fig.A8 Test waveform of Condition 1

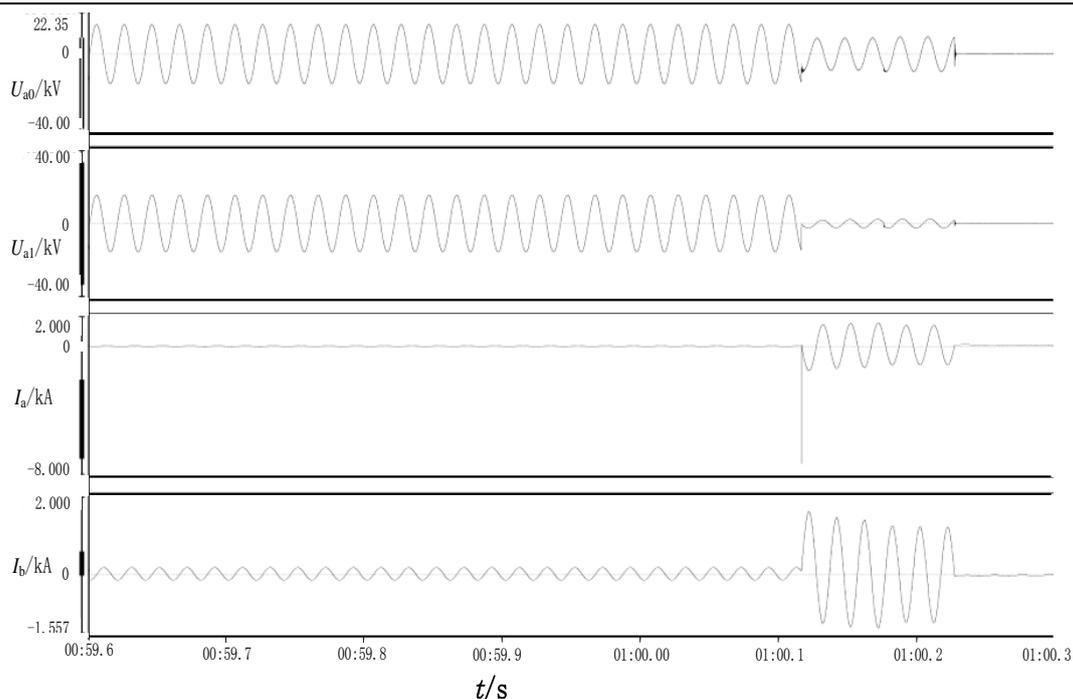


图 A9 工况 2 的试验波形

Fig.A9 Test waveform of Condition 2

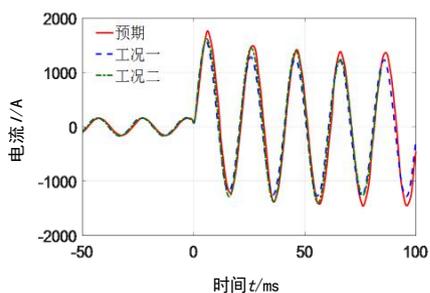


图 A10 不同工况试验电流波形

Fig.A10 Test current waveform under different working conditions

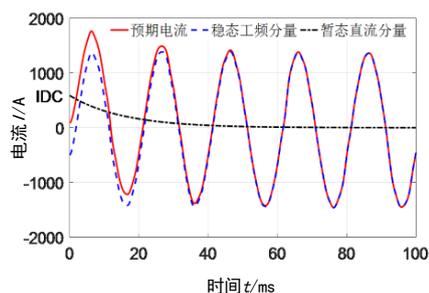


图 A11 预期电流波形

Fig.A11 Expected current waveform