

## 基于动态阻抗模型的磁控式持续电流开关

林静波, 吴蔚, 王龙彪, 金之俭

上海交通大学, 电子信息与电气工程学院 HTS 实验室, 上海 200240

收稿日期: 2019-06-13; 接收日期: 2019-12-02

**【摘要】** 本文研究了高温超导闭合线圈的重要励磁方式——持续电流开关(persistent current switch). 高温超导闭合线圈在各种场合中被广泛地应用和研究. 为了使高温超导线圈能够工作在持续电流模式(persistent current mode)下, 需要持续电流开关利用超导体在超导状态和电阻状态之间的转换来实现开关状态的切换, 而磁控式持续电流开关具有响应速度快、励磁效率较高等优点, 因而在闭合超导线圈的励磁中具有广阔应用前景. 本文提出一种基于动态阻抗模型的磁控式持续电流开关, 将动态阻抗以及磁控式持续电流开关的理论研究与探究实验相结合, 深入分析磁控式持续电流开关应用于线圈励磁的影响因素, 从而实现动态阻抗的灵活设计以及闭合线圈励磁性能的改善.

**关键词:** 高温超导闭合线圈; 磁控式持续电流开关; 动态阻抗; 改善励磁

**PACS:** 85.25.-j

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2019.04.004

## Magnetic-Controlled Persistent Current Switch Based on the Model of Dynamic Resistance

Lin Jingbo, Wu We, Wang Longbiao, Jin Zhijian

*Shanghai Jiao Tong University, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai 200240, China*

Received date: 2019-06-13; accepted date: 2019-12-02

**【Abstract】** This paper studies the important excitation mode of high temperature superconducting closed coils - the persistent current switch. High temperature superconducting closed coils are widely used and studied in various applications. In order for a high-temperature superconducting coil to operate in persistent current mode, a persistent current switch is required to switch between a superconducting state and a resistance state. Due to the advantages of fast response speed and high excitation efficiency, the persistent current switch controlled by magnetic field has broad application prospects in the excitation of closed superconducting coils. In this paper, a model of magnetic-controlled persistent current switch based on dynamic resistance is proposed. The theoretical research and exploration experiments of dynamic resistance and magnetic-controlled persistent current switch are combined to deeply analyze the influencing factors of magnetic-controlled persistent current switch applied to coil excitation, in order to achieve a flexible design of dynamic resistance and improve excitation performance of the closed coil.

**Keywords:** High temperature superconducting closed coil; magnetic-controlled persistent current switch; dynamic resistance; improve excitation

**PACS:** 85.25.-j

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2019.04.004

**Reference method:** Lin Jingbo, Wu We, Wang Longbiao, Jin Zhijian, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0272 (2019)

# 1 引言

高温超导技术在近 20 年得到了飞速发展,其高电流、高磁场的特性已经应用到国民经济的许多领域,如医学核磁共振成像(MRI)、核磁共振(NMR)、超导磁悬浮列车<sup>[1]</sup>等. MRI 和 NMR 的关键设备之一为超导核磁共振仪,其主要由铌-钛合金导线绕成的螺线管线圈制成的超导磁体构成,在超导线圈中通入一定强度的电流产生一定强度的磁场,此电流会持续不断地在线圈中循环流动,从而形成稳定的永久磁场.

在上述超导应用中,闭合超导线圈是最重要的部分<sup>[2,3]</sup>. 闭合超导线圈往往需要工作在持续电流模式(PCM)下<sup>[4,5]</sup>. 持续电流模式是指:对超导体输入初始电流,根据超导体的零电阻特性,在断开电源后其仍然能维持该电流以及所产生的磁场. 目前实现持续电流模式的主流方法之一为持续电流开关(PCS)<sup>[6]</sup>,持续电流开关利用超导体在超导状态(零电阻状态)和电阻状态之间的转换来实现开关状态的切换,通常先使持续电流开关变为阻性,通过电源对磁体充电,在线圈完全通电后,持续电流开关变回超导状态,从而长时间保持磁体的稳定电流即工作在持续电流模式下.

根据用来触发状态转换的方法持续电流开关主要可分为三种类型:热控制型 PCS, 电流控制型 PCS 以及磁场控制型 PCS. 热控式 PCS 通过将超导体加热到其临界温度以上来使其变为阻性,具有关断阻抗大的优点,但是变为阻态的切换时间过长,通常为几秒甚至更长,不适用于需要快速开关的磁体,且会给整个系统增加额外的制冷负担. 流控式 PCS 通常通过施加电流脉冲使开关超导体达到临界电流以上来关断,然而在电流脉冲之后超导体中会出现退化并且开关恢复时间太长. 磁控式 PCS 通过施加磁场使超导带材失超并形成可控的开关状态,在耿健昭<sup>[7]</sup>等人的研究中,通过对承载电流的第二代高温超导带材施加垂直方向的交流磁场,示意图如图 1 所示,可以产生响应速度快、电阻值高的所谓的“动态阻抗”<sup>[8-10]</sup>. 磁控式 PCS 的励磁效率较高且不会像热控式 PCS 给磁体系统增加热负荷,因而在闭合超导线圈磁体的励磁中具有广阔应用前景.

本文提出一种基于动态阻抗模型的磁控式持续电流开关,它可以在正常频率下呈现电阻状态并且

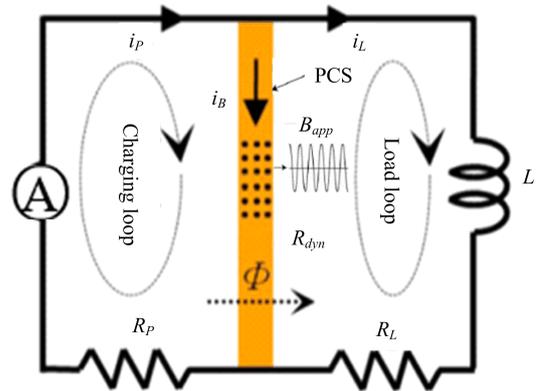


图 1 磁控式 PCS 示意图<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of PCS controlled by magnetic field

具有非常短的响应时间<sup>[11,12]</sup>,将动态阻抗以及磁控式持续电流开关的理论研究与探究实验相结合,深入分析磁控式 PCS 应用于线圈励磁的影响因素,从而实现动态阻抗的灵活设计以及闭合线圈励磁性能的改善.

## 2 动态阻抗模型与测量

### 2.1 动态阻抗模型

磁控式 PCS 主要利用动态阻抗或磁通蠕动阻抗,当在经受垂直交变磁场的 II 型超导体中传输直流电时,会出现上述两种类型的电阻. 在整个过程中,超导带中没有发生失超. 因此,当施加的交变磁场被移除时,电阻几乎立即消失<sup>[13,14]</sup>.

从微观角度来看,当给承载直流电流的二代高温超导体垂直施加交流磁场时,可以通过重新分配带材内的涡流引起磁通蠕动,导致磁通净通量从超导体的一侧流到另一侧. 相应地,涡流的重新分布会对超导体中的直流传输电流产生影响,这影响在宏观视角就等价于动态阻抗. 动态阻抗可以用作 PCS 的断态阻抗,是 PCS 系统中非常关键的一环.

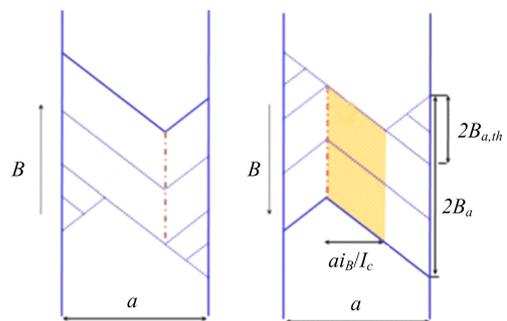


图 2 磁通蠕动过程<sup>[15]</sup>

Fig. 2 Process of flux flow

图 2 显示了在 Bean 模型<sup>[15]</sup>下,在交流场下承载直流的无限厚超导体的磁通蠕动过程. 假设宽度为  $a$  的超导体承载在垂直于纸张的方向上流动的传输电流  $i_B$ , 则垂直于电流方向施加交流磁场. 在磁场上升过程中, 大部分磁通从其左边缘进入超导体, 而在磁场下降过程中, 大部分磁通从右边缘离开超导体. 因此, 存在滞后现象, 净磁通量从左向右流过超导体. 图 2 中的阴影区域表示每个循环的每单位长度的净磁通量流量, 磁通蠕动方向仅由传输电流的方向确定. 因此, 磁通蠕动效应可以描述为动态阻抗. Oomen 提出了一种类似超导体的厚板动态阻抗的数学计算方法, 如下:

$$R_{\text{dyn}} = \frac{2alf}{I_c}(B_a - B_{a,th})$$

其中  $I_c$  是超导体的临界电流,  $a$  是超导体板在施加的交流磁场下的宽度,  $l$  是超导体板的长度,  $f$  是施加的交流磁场的频率,  $B_a$  是施加磁场的峰峰值的一半,  $B_{a,th}$  是可以完全穿透超导体的磁场强度.

在本文中, 采用 150 匝铜线圈绕在回字型硅钢片堆成的铁芯上制成的电磁铁, 铁芯的尺寸为 340 mm \* 80 mm \* 30 mm, 电磁铁的电感测得为 26.9 mH. 该电磁铁由 NAPUI PW1200 交流电源供电, 通过给电磁铁输入交流电流产生交流磁场. 将超导带材的一部分置于电磁铁的 2 mm 气隙内, 使其承受垂直方向的交流磁场. 已经有研究表明气隙中不同位置的磁场大小(通过霍尔探针测量的  $B_a$ ) 差异小于 5%. 因此, 可以假设间隙空间中的磁场分布是均匀的, 在实验过程中带材的位置偏差可以忽略不计.

### 2.2 磁控式 PCS 等效电路

PCS 系统的运行原理基于磁通守恒定律, 如下所述

$$L_s I + AB_a = \text{constant}$$

$A$  是闭环的面积,  $B_a$  是闭环内部施加的磁通密度,  $L_s$  是闭环自感. 在等式中, 左侧表示超导电路的总磁通, 左侧的第一项是由电路中的电流引起的磁通, 左侧的第二项是由外部磁场引起的总磁通. 磁通守恒定律表明超导电路中的总磁通不会改变. 由于持续电流在超导电路中流动, 所以初始磁通的数量不会改变.

基于动态阻抗模型的磁控式持续电流开关的等

效电路模型如图 3 所示.

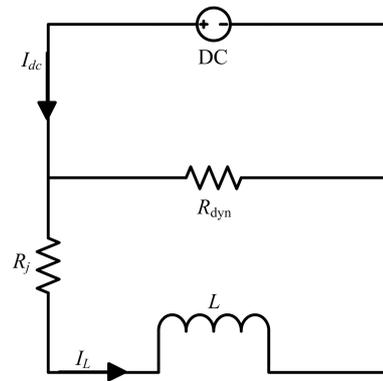


图 3 持续电流开关等效电路图  
Fig. 3 Equivalent circuit diagram of PCS

当闭合线圈工作在持续电流模式下时, 整个电路可以被认为是标准的  $LR$  电路. 其中  $R_j$  是接头电阻,  $L$  是闭合线圈的电感,  $I_{dc}$  和  $I_L$  分别是直流电源的工作电流和线圈中的电流. 根据等效电路模型可以得到微分方程如下所示:

$$L \frac{di_L}{dt} + R_j \cdot I_L = R_{\text{dyn}} \cdot (i_{dc} - i_L)$$

解为:

$$i_L = A(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), A = \frac{i_{dc} R_{\text{dyn}}}{R_j + R_{\text{dyn}}}, \tau = \frac{L}{R_j + R_{\text{dyn}}}$$

### 2.3 动态阻抗测量方法

动态阻抗  $R_{\text{dyn}}$  可以通过四探针法和场衰减法测量<sup>[16,17]</sup>. 对于四探针方法, 单个 YBCO 带材的  $V-I$  曲线可以通过 Agilent 6680A 直流电源产生 0.5 A/s 斜率的电流, 采用 Keithley 2182A 数字纳伏表来测量暴露区域的电压降来获得,  $R_{\text{dyn}}$  等于  $V-I$  曲线线性拟合的电压比电流的斜率.

场衰减法通过测量在 PCM 下的闭合线圈的时间常数来计算动态阻抗. 对于场衰减法, 电磁铁在励磁和电流衰减过程一直开启, 通过由交流磁场控制的 PCS 在闭合线圈中励磁产生线圈电流  $I_L$ .  $R_{\text{dyn}}$  由励磁后的中心磁场衰减曲线 ( $B-t$  曲线) 的时间常数  $\tau$  计算,  $B-t$  曲线由位于 NI 线圈中心的霍尔探头测量. 其磁场  $B(t)$  的衰减遵循如下公式:

$$B(t) = B_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = B_0 \cdot e^{-\frac{R_{\text{all}}}{L}t}$$

其中  $B_0$  是初始场, 其与初始操作电流  $I_{dc0}$  成正比.  $R_{\text{all}}$  是 PCM 电路中的总电阻, 可以通过以下公式确定 ( $t_{\text{end}}$  是停止场衰减的时间, 即中心场衰减到小于 4 mT):

$$R_{all} = -\frac{L}{t} [\ln(B(t_{end})) - \ln(B_0)]$$

因为场衰减方法具有比四探针法更大的测量范围以及更高的精确度,因此本文采用的测量方法为场衰减法。

在下面的部分中测量计算了基于动态阻抗模型的持续电流开关为小型超导线圈充电时的动态阻抗. 负载采用上海超导公司生产的 10 mm 宽的聚酰亚胺绝缘的 YBCO 带材绕成的双饼线圈,线圈的两端采用超导接头技术通过低温焊锡焊接在一起. 持续电流开关是形成线圈的 YBCO 带材的一部分. 外部的交流磁场  $B_{app}$  用于控制持续电流开关. 当垂直于持续电流开关表面施加磁场时,这段带材将由于磁通蠕动而变为阻态,从而关断持续电流开关. 当移除交流磁场时,这段带材回到超导状态,从而使负载线圈短路. 交流磁场由一个电磁铁产生,该电磁铁由一个气隙为 2 mm 的铁芯以及绕在铁芯上的铜线组成. 线圈磁场由预先校准的霍尔传感器测量,霍尔传感器固定在线圈中心,整个实验在液氮(77 K)的环境下进行. 实验设备、超导带材以及闭合线圈的规格如表 1 所示.

表 1 实验设备、超导带材以及闭合线圈参数  
Tab 1 specifications of experimental equipment, HTS tape and closed coils

规格	值
直流电源	Agilent 6680A
电磁铁电源	NAPUI PW1200
电磁铁电感/mH	26.9
霍尔传感器采样装置	NI-6002 DAQ
带材宽度/mm	10
带材厚度/ $\mu\text{m}$	80
$I_c$ @77K, self-field 带材临界电流/A	280
线圈临界电流/A	70
匝数	正面 27,背面 20
磁通密度常数@ coil center/(mT/A)	4.1
接头长度/mm	150
接头电阻/n $\Omega$	7

在液氮环境下不包含电源的实验装置实物图如图 4 所示。

### 2.4 动态阻抗测量结果

与热控式 PCS 或高磁场控制式 PCS 不同,交流磁场控制型 PCS 通过动态阻抗进行阻态与超导

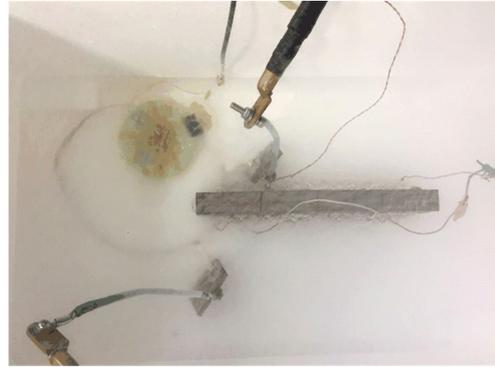


图 4 不包含电源的实验装置图

Fig. 4 Photo of experimental devices without power supply

态之间的切换,结合式(1)因此可以通过改变交流磁场的强度或频率来改变动态阻抗. 在实验中,应用的磁场峰值从 87.9 mT 变化到 402 mT,频率从 50 Hz 变化到 200 Hz.

通过场衰减法得到的动态阻抗  $R_{dyn}$  值如图 5 和图 6 所示:

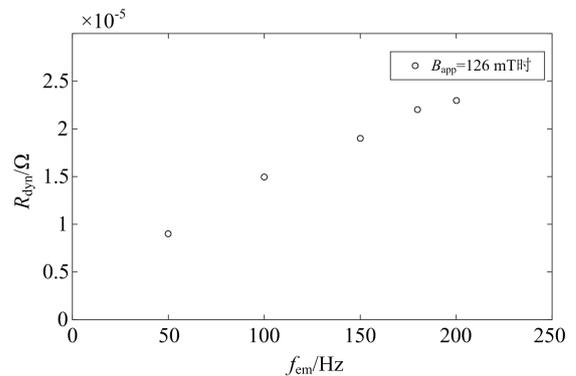


图 5 动态阻抗随频率变化关系

Fig. 5 Curve of dynamic resistance versus frequency

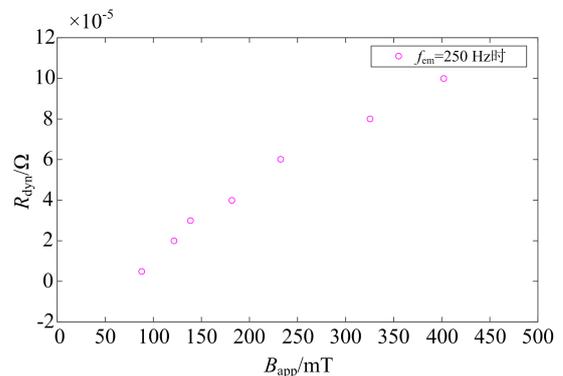


图 6 动态阻抗随电磁铁磁场变化关系

Fig. 6 Curve of dynamic resistance versus magnetic field strength

对动态阻抗随电磁铁磁场变化曲线进行线性拟合,以及结合前文 Oomen 提到的数学模型式(1),我们可以得到:

$$B_{a,th} \approx 49.1 \text{ mT},$$

$$R_{dyn} = 1.17 \times 10^{-6} \times f(B_a - 0.0491)$$

### 3 磁控式持续电流开关的实验结果与分析

#### 3.1 探究励磁影响因素

从磁控式持续电流开关的等效电路方程的解即式(4)中可以看出,直流电源电流  $I_{dc}$ 、动态阻抗  $R_{dyn}$ 、接头电阻  $R_j$ 、闭合线圈电感  $L$  是影响超导线圈励磁的主要因素.而对于给定的超导闭合线圈而言,接头电阻  $R_j$  和闭合线圈电感  $L$  是固定的,而根据式(7)动态阻抗  $R_{dyn}$  主要取决于电磁铁交流磁场频率  $f$  以及幅值  $B_{app}$ ,因此,在磁控式持续电流开关实验中,我们主要探究了直流电源电流  $I_{dc}$ ,电磁铁交流磁场频率  $f$  以及幅值  $B_{app}$  对于超导线圈励磁的影响.

#### 3.2 实验结果与分析

当电磁铁电流  $I_{em}$  设置为 5 A,即  $B_{app} = 420 \text{ mT}$ ,  $f = 100 \text{ Hz}$  时,探究直流电流  $I_{dc}$  对于励磁(即线圈最终达到磁场  $B$ )的影响,结果如图 7 所示:

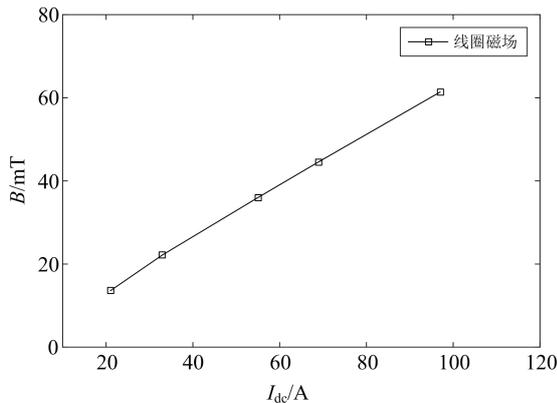


图 7 直流电流对励磁的影响  
Fig. 7 Curve of excitation effect versus DC current

从实验结果可以看出,当输入整个系统的直流电流  $I_{dc}$  越大时,超导线圈最后达到的励磁电流饱和值越大,近似呈线性关系,这是因为在电磁铁交流磁场频率  $f$  和幅值  $B_{app}$  一定时,动态阻抗  $R_{dyn}$  也为定值,其与超导线圈以及接头电阻等等电阻的比例为定值,整个电路模型恒定,超导线圈电流  $I_L$  只取决于输入电流  $I_{dc}$ ,因此  $I_L$  随  $I_{dc}$  线性增大.

当电磁铁电流  $I_{em}$  设置为 1 A,即  $B_{app} = 87.9 \text{ mT}$ ,  $I_{dc} = 97 \text{ A}$  时,探究电磁铁磁场频率  $f$  对于励磁(即

线圈最终达到磁场  $B$ )的影响,结果如图 8 所示:

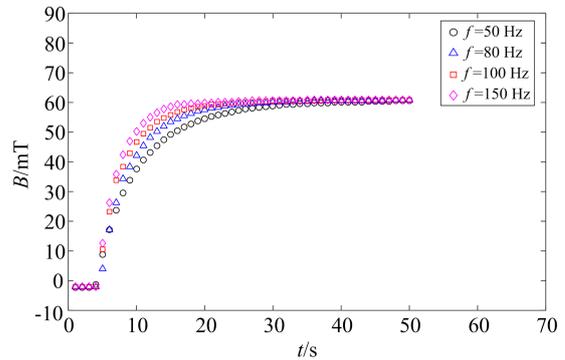


图 8 电磁铁磁场频率对励磁的影响  
Fig. 8 Curve of excitation effect versus frequency of magnetic field

从图 8 中可以看出,在负载电流饱和之前,所有曲线大致遵循一阶电路的充电曲线,且电磁铁磁场频率越大闭合线圈的励磁速度越快,虽然励磁速度不同但是励磁饱和值基本不随频率变化而变化.

这是因为当  $I_{dc}$  与  $B_{app}$  一定时,  $R_{dyn}$  随频率  $f$  线性增大,因此当频率增大时  $R_{dyn}$  显著增大,导致超导线圈分流更快,励磁速度更快.而励磁饱和值基本不随频率变化而变化,从图 3 电路模型中我们可以找到原因:

$$I_{L,t \rightarrow \infty} \approx \frac{R_{dyn}}{R_{dyn} + R_j + \omega L} I_{dc} = \frac{kf}{kf + R_j + 2\pi fL} I_{dc},$$

$$\because R_j \ll 2\pi fL,$$

$$\therefore I_{L,t \rightarrow \infty} \approx \frac{kf}{kf + 2\pi fL} I_{dc} = \frac{k}{k + 2\pi L} I_{dc} = c I_{dc} \quad (8)$$

当电磁铁频率设置为  $f = 100 \text{ Hz}$ ,直流电流  $I_{dc} = 97 \text{ A}$  时,探究电磁铁磁场幅值  $B_{app}$  对于励磁(即线圈最终达到磁场  $B$ )的影响,结果如图 9 所示:

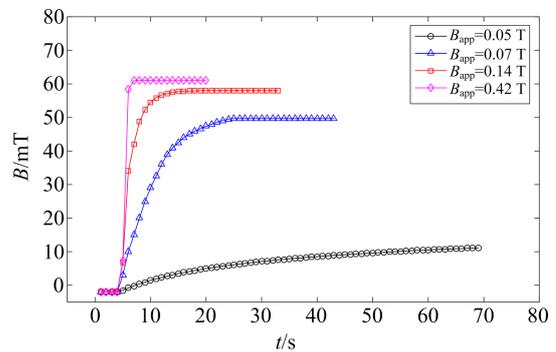


图 9 电磁铁磁场幅值对励磁的影响  
Fig. 9 Curve of excitation effect versus magnetic field strength

从图 9 可以明显看出当  $B_{\text{app}} = 50\text{mT}$  接近于  $B_{a,th}$  时,线圈励磁速度非常缓慢,且最后达到的励磁饱和值也很小,远低于其他情况,似乎 50 mT 的磁场无法完全关断 PCS. 而且随着电磁铁磁场幅值的增大,闭合线圈励磁速度增大且最后达到的励磁饱和值也增大.

这是因为 Oomen 的等式(1)仅在施加的磁场强度大于超导体的完全渗透磁场时有效. 为了产生动态阻抗,交流磁场幅值必须大于一定的阈值,这样磁场才可以与传输电流相互作用. 因此,当磁场强度太低时,它无法克服阈值场,动态阻抗  $R_{\text{dyn}}$  非常小,磁控式持续电流开关在开启与关闭状态下呈现的电阻较为接近,超导线圈近似短路,励磁效果最差.

当  $I_{\text{dc}}$  与  $f$  一定时,  $R_{\text{dyn}}$  随磁场幅值  $B_{\text{app}}$  增大而增大,因此当  $B_{\text{app}}$  增大时  $R_{\text{dyn}}$  显著增大,导致超导线圈分流更快,励磁速度更快. 而且可以看出当  $B_{\text{app}}$  不同时最后达到的励磁饱和值也不同,同样可以用电路模型来解释,根据式(4)可以知道当  $R_{\text{dyn}}$  显著增大时,

$$I_{L,t \rightarrow \infty} \approx A = \frac{i_{\text{dc}} R_{\text{dyn}}}{R_j + R_{\text{dyn}}} = i_{\text{dc}} \left( 1 - \frac{R_j}{R_j + R_{\text{dyn}}} \right)$$

因此  $I_L$  随着  $B_{\text{app}}$  增大而增大.

总而言之,超导线圈最终达到的励磁饱和值随直流电流  $I_{\text{dc}}$  与电磁铁磁场幅值  $B_{\text{app}}$  增大而增大,励磁速度则随电磁铁磁场频率  $f$  和磁场幅值  $B_{\text{app}}$  增大而增大.

## 4 结论

本文研究了动态阻抗  $R_{\text{dyn}}$  的物理本质,采用了场衰减法进行了  $R_{\text{dyn}}$  的测量计算,得到  $R_{\text{dyn}}$  的影响因素以及近似拟合公式,后续可以根据系统要求灵活地控制  $R_{\text{dyn}}$ . 然后进一步研究基于动态阻抗模型的磁控式持续电流开关的工作原理和等效电路,根据理论研究确定励磁影响因素,从而通过实验探究采用磁控式 PCS 对超导线圈励磁的影响因素,发现了一定的规律,为后续的磁通泵的研究提供了理论支持<sup>[18]</sup>.

## 参 考 文 献

- [1] D. Larbalestier, A. Gurevich, D. M. Feldmann, A. Polyanski, *Nature*, **414** (2001), 368.
- [2] D. W. Hazelton, M. T. Gardner, J. A. Rice, M. S. Walker, C. M. Trautwein, P. Haldar, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **7** (1997), 664.
- [3] B. S. Go, H. J. Sung, J. Choi, M. Park, I. K. Yu, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26**, (2016), 3.
- [4] W. Kim *et al.*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **25** (2015), 1.
- [5] S. Lee *et al.*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **26** (2016), 4.
- [6] T. Tosaka *et al.*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **14** (2004), 1218.
- [7] J. Geng *et al.*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **26** (2016), 3.
- [8] G. P. Mikitik, E. H. Brandt, *Physical Review B*, **64** (2001), 9.
- [9] M. Ciszek, O. Tsukamoto, J. Ogawa, M. Shiokawa, *Physica C*, **387** (2003), 230–233.
- [10] R. C. Duckworth, Y. F. Zhang, T. Ha, M. J. Gouge, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **21** (2011), 3251.
- [11] Z. Jiang, R. Toyomoto, N. Amemiya, X. Zhang, C. W. Bumby, *Supercond. Sci. Technol.*, **30** (2017), 3.
- [12] Z. Jiang, W. Zhou, Q. Li, M. Yao, J. Fang, N. Amemiya, C. W. Bumby, *Supercond. Sci. Technol.*, **31** (2018), 3.
- [13] Y. B. Kim, C. F. Hempstead, A. R. Strnad, *Solid State Communications*, **65** (1965), 1171.
- [14] M. V. Feigel'man, V. B. Geshkenbein, V. M. Vinoku, *Phys. Rev. B*, **43** (1991), 6263.
- [15] M. P. Oomen, J. Rieger, M. Leghissa, B. T. Haken, H. H. J. T. Kate, *Supercond. Sci. Technol.*, **12** (1999), 382.
- [16] Z. Jiang, R. Toyomoto, N. Amemiya, C. W. Bumby, R. A. Badcock, N. J. Long, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **27** (2017), 4.
- [17] S. Yamamoto, T. Yamada, *IEEE Transactions on Magnetism*, **24** (1988), 1292.
- [18] Z. Jiang, K. Hamilton, N. Amemiya, R. A. Badcock, C. W. Bumby, *Appl. Phys. Lett.*, **105** (2014), 11.