

# 电阻型超导限流器和 10 kV 配电网 继电保护相配合的仿真分析

陈妍君

(国网上海市电力公司 市南供电公司,上海 200233)

**摘要:**短路电流的增大已经成为高电压等级电网建设和运行中的一个突出问题.超导限流器是目前最为理想的限流装置,而其与现有继电保护装置的配合是超导限流器挂网运行的关键技术之一.利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建了电阻型超导限流器和继电保护装置的自定义模型,在此基础上分析了引入电阻型超导限流器对 10 kV 配电网电流保护的影响,并对两者的配合问题进行了仿真研究,进一步提出通过改变超导体参数来调整电阻型 SF-CL 的限流电阻和限流水平,以实现与继电保护协调配合,为超导限流器应用于实际电网参数配置提出了重要的量化依据.

**关键词:**电阻型超导限流器;二代高温超导带材;继电保护装置;PSCAD;10 kV 配电网;配合

**中图分类号:**TM26;TM71;TM743

**文献标志码:**A

随着世界经济快速增长,电力需求急剧增加,短路故障电流也日益增大.过大的短路电流会降低电网的安全稳定性,给电力系统的建设及运行带来许多问题<sup>[1]</sup>.为了限制短路电流,电网系统要引入限流器设备<sup>[2-4]</sup>.超导故障限流器(Superconductor Fault Current Limiters,简称 SFCL)具有正常运行时阻抗几乎为零,电网故障时阻抗瞬间增大的特性,出现故障时可以迅速将短路电流限制到可接受的水平,具有响应速度快和自动限流的特点,是目前最理想的限流装置之一.引入超导限流器,电网的建设可以更加合理有效,这不仅提高了电网的安全性和可靠性<sup>[5-6]</sup>,同时对节能减排做出了突出的贡献(据估算,如果超导限流器广泛使用于欧洲电网,则每年可减少排放二氧化碳 20 万~30 万 t)<sup>[7]</sup>.

超导限流器包括了电阻型、电抗型、变压器型、磁屏蔽型、三相电抗器型、磁通锁型和桥路型等<sup>[8-9]</sup>.其中基于二代超导带材的电阻型超导限流器完全依靠超导材料的物理特性实现限流,其结构简单且可靠性高<sup>[10]</sup>,因此近年来新近展开的限流器示范项目大多采取了此方案<sup>[11-14]</sup>.2012年,世界上首台 220 kV 超导限流器在中国并网运行<sup>[15]</sup>,标志着中国超导产业在电网应用中的重大突破.

当电力系统发生短路故障时,电阻型超导限流器快速失超进入高阻态以限制短路电流,达到保护系统中相关设备的目的;然而电阻型超导限流器的接入会改变线路固有的参数,从而影响 10 kV 配电系统现有继电保护的動作.因此协调电阻型超导限流器与继电保护系统的動作是将超导限流器实用化的重要研究内容之一.目前国内针对这两者的配合主要关注于超导限流器对距离保护的影响<sup>[16-17]</sup>,国外有些文献涉及到超导限流器对电流保护的影响<sup>[18-19]</sup>,但都只是作了初步的探讨介绍.本文首先在仿真软件 PSCAD/EMT-DC<sup>[20]</sup>平台上建立了超导限流器和继电保护装置模型,在此基础上分析了引入电阻型超导限流器对 10 kV 配电网中广泛使用的继电保护的影响,并对两者的配合问题进行仿真研究,在分析数据的基础上,提出通过改变超导限流器参数来调整其限流电阻和限流水平的解决方法.

收稿日期:2016-03-06;修回日期:2016-05-25.

基金项目:国家自然科学基金(51107083)

作者简介(通信作者):陈妍君(1988-),女,河南新乡人,助理工程师,研究方向为电力系统调度,高温超导应用技术, E-mail: merrycyj@163.com.

## 1 电阻型超导限流器和电流保护仿真模型的研究

为了研究电阻型超导限流器与三段式电流保护装置之间的配合问题,本文利用仿真软件 PSCAD 分别搭建了电阻型超导限流器和电流保护这两个自定义模型.

### 1.1 电阻型超导限流器仿真模型的研究

电阻型超导限流器对外电路表现为非线性电阻,超导态/正常态转变时的曲线变化较为复杂,因此需要利用仿真软件 EMTDC/PSCAD 搭建自定义模型.

电阻型超导限流器中的限流模块采用的是超导带材的串并联结构,第二代高温超导带材的结构一般分为基带层、隔离层、超导层与稳定层,如图 1 所示.

根据超导带材的结构以及电阻型超导限流器的工作原理和理论模型研究<sup>[21]</sup>,首先搭建了超导限流器的结构示意图,其中  $R_s$  代表超导带材超导层的电

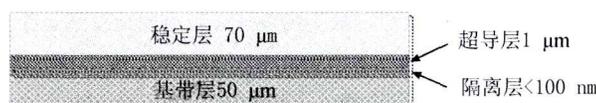


图1 超导带材结构示意图

阻,即超导态为 0,正常态为高阻态; $R_c$  代表超导带材稳定层的电阻,即带材的常温电阻; $R_p$  代表超导模块上并联的分流电阻。 $I_{a1}, I_{a2}, I_{a3}$  分别为流过  $R_s, R_c, R_p$  的实时电流, $I$  为流过超导限流器模块的总电流.然后借助 PSCAD/EMTDC 的自定义建模功能制作了控制模块“失超控制模块”,作用是计算超导体的实时电阻值,并将计算结果输出给元件  $R_s$  和  $R_c$ ,作为超导层和稳定层电阻值的控制信号,其中  $U_a$  为超导限流器模块两端的电压; $T$  为超导体的温度.图 2 所示为电阻型超导限流器的完整自定义模型.

### 1.2 三段式电流保护仿真模型的研究

10 kV 的配电网中继电保护一般采用的是电流保护<sup>[22]</sup>.电流速断、限时电流速断和过电流保护都是反应于电流增大而动作的保护装置.它们的区别主要在于起动电流和跳闸时间具有不同的设定值.为了保证选择性和速动性,一般将电流 I 段、II 段和 III 段保护联合构成阶段式电流保护,这样就可以在较短时间内切断全线路范围内的所有故障.电流保护是一种过量保护,当流过保护安装处的电流超过整定值时,向断路器发出跳闸信号,将线路切断,消除故障.由于 PSCAD 中没有完整的三段式电流保护元件,因此需要搭建自定义模型.

根据三段式电流保护的工作原理,利用 Fortran 语言在 PSCAD 平台上分别建立了三段电流保护的电磁模型,输入信号为线路上的实时电流  $I$ ,输出信号分别为  $S_{br1}, S_{br2}, S_{br3}$ ,它们的取值为“0”或“1”,代表电流保护是否动作.为了构成阶段式电流保护,将  $S_{br1}, S_{br2}, S_{br3}$  三个输出信号叠加求和得到  $S_{br}$ ,若  $S_{br}$  等于零,表明三段保护均没有动作,则断路器不动作;若  $S_{br}$  大于零,表明三段保护中有一个发生动作,则断路器要断开.这个判断过程的输出信号为 BRK,同时它也是开关元件的动作控制信号.电流保护模块如图 3 所示.

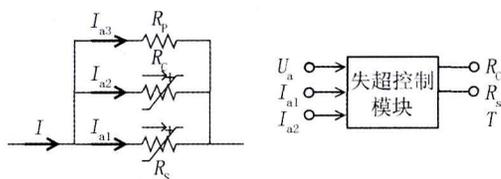


图2 电阻型超导限流器模型

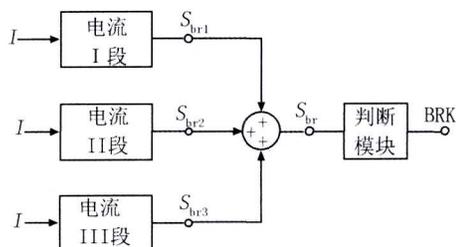


图3 阶段式电流保护模型

电流保护的逻辑流程图如图 4 所示.其中  $S_{br}$  为开关动作信号,初始状态为闭合,值为“0”; $S_{rdz}$  为电流继电器动作状态,初始为未动作,值为“0”.

该模块只需修改电流整定值和动作时限就能分别实现电流的 I, II, III 段保护.根据故障发生的地点选

择所要启动的保护,这样构成的阶段性电流保护简单、可靠,在一般情况下能够满足快速切断故障的要求。

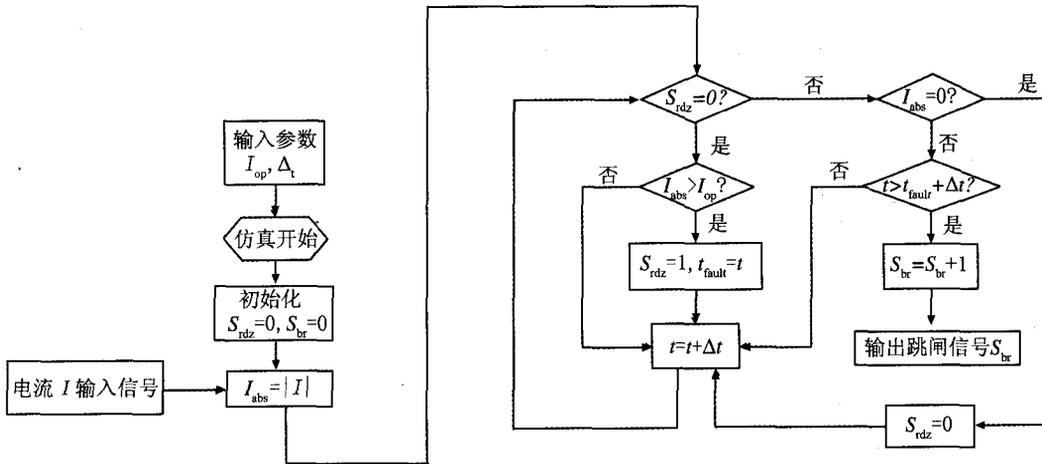


图4 电流保护的逻辑流程图

## 2 电阻型超导限流器对 10 kV 配电系统电流保护的影响

### 2.1 超导限流器对电流保护影响的原理

安装 SFCL 前后,线路电流的波形和幅值会有很大的变化。在未安装 SFCL 的情况下,当电源电势一定时,三相短路电流  $I_d = \frac{E_\phi}{Z_\Sigma}$ , 其中,  $E_\phi$  为系统等效相电势,  $Z_\Sigma$  为保护点到系统等效电源之间的阻抗。安装 SFCL 后,短路电流  $I_d = \frac{E_\phi}{Z_\Sigma + Z_{SFCL}}$ , 其中,  $Z_{SFCL}$  为超导限流器的等效阻抗。

当电力系统发生短路故障时,超导限流器瞬时失超,以高阻抗的形式串入故障回路,从而增大了短路等效阻抗,降低了故障电流,因此可能造成保护拒动或给保护之间的配合带来困难,导致无法准确切除故障,进而影响系统的稳定运行,损坏电网设备<sup>[23]</sup>。

### 2.2 超导限流器对电流保护影响的仿真

图 5 是某地区电网中 10 kV 单侧电源配电系统模型示意图。系统共有 4 条馈线支路,其中故障馈线为 1 条。配电系统模型中的具体参数参考了南方某地区的实际参数(见表 1)。在 10 kV 配电系统中,不改变电流保护装置动作值的情况下,当加装了规格为“200 m 超导带材+1 Ω 分流电阻”的超导限流器模块时,电流保护的

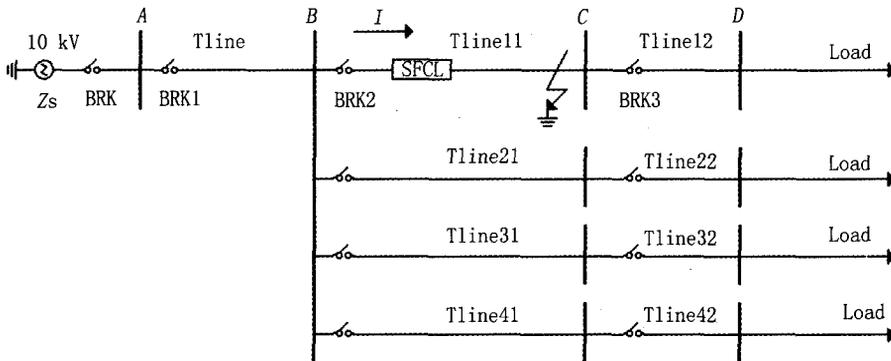


图5 10 kV单侧电源配电系统模型示意图

由表2可见,当电阻型SFCL接入系统后,由于其对短路电流的限制作用,当所加装的超导限流器配置为“200 m 超导带材+1  $\Omega$  分流电阻”时,保护系统检测到的故障电流要低于电流速断的动作值,造成I段保护全线拒动,而II段保护的灵敏度也大幅度下降,保护范围缩小到线路全长的54%,剩余范围的线路故障只能由III段保护延时动作切除,从而延长了故障持续时间,增加了故障对电网的影响。

为了保障系统的安全稳定运行,必须对超导限流器与保护装置的配合进行研究。

### 3 调整电阻型超导限流器参数以解决两者的配合问题

在电力系统中引入电阻型超导限流器,需要解决电阻型超导限流器与电网现有继电保护装置的配合问题,一般有两种途径:1)调整继电保护的设定值以适应被限制的短路电流;2)调整超导限流器的限流水平,使其不会降低保护的灵敏度而引起保护的拒动<sup>[24]</sup>。调整保护整定值的方法工作量大,并且可能造成阶段式电流保护间的无法配合,不宜采用。而二代超导带材的电阻型超导限流器的参数相对容易调整,可以较方便地达到两者配合的目的。因此,本文针对第二种方法,对电阻型SFCL与阶段式电流保护装置的配合问题进行了大量仿真研究,在分析实验结果的基础上,确定了配合现有电流保护的电阻型SFCL参数范围。

影响现有电流保护动作的电阻型SFCL的参数主要是:超导带材的长度和分流电阻的大小。本文前面分析时所讨论的初始超导带材长度为200 m,分流电阻大小为1  $\Omega$ 。

#### 3.1 SFCL中超导长度对各点短路电流影响的分析

为了找出合适的超导长度的范围,控制分流电阻为1  $\Omega$  不变,改变超导长度,仿真导出线路不同点短路时,计算继保安装处的最大电流值,利用SigmaPlot画出图6。图6中横坐标为超导带材的长度,纵坐标为继保安装处的短路电流值。0~15的编号从上到下依次排列,对应短路点距继电保护装置的距离0~15 km。不同曲线代表不同地点发生短路故障时,继保安装处所检测到的短路电流值。同时,图6中标出了3段电流保护的整定值曲线,以便作为参考来确定在不改变三段电流保护范围的基础上,适用于此电网的SFCL的超导长度范围。不加装SFCL时,电流保护I段的保护范围为图6中本线路BC段的80%;电流保护II段的保护范围为BD段的73.3%;电流保护的III段保护线路全长。为了不改变保护范围,重点关注电流保护I段和II段的保护最大范围处短路时是否能引起电流保护的動作。由于III段保护的動作不受影响,因此以下将暂时不进行讨论。

电流保护I段的保护末端是距继保安装地点(即图6中B点)4 km处,此处发生短路时继保检测到的短路电流曲线如图6中曲线4所示,与电流保护I段的整定值曲线交于A点。当检测到的短路电流值大于电流保护I段整定值时,保护动作,反之保护拒动。因此由交点A可知,在分流电阻为1  $\Omega$  的情况下,若要保持电流I段保护范围不改变,即I段保护范围末端短路时保护不拒动,超导带材的长度不可超过20 m。电流保护II段的保护末端是距继保安装地点(即图6中B点)11 km处,此处发生短路时继保检测到的短路电流曲线如图6中曲线11所示,与电流保护II段的整定值曲线交于B点。由交点B可知,若要电流II段保护范围不变,则超导带材长度不可超过60 m。

因此综合考虑,若要配合在线的继电保护,1  $\Omega$  的分流电阻所加的超导长度不可大于20 m。

表1 10 kV 电网参数表

电源电压	$E_s=10 \text{ kV}$
频率	$f=50 \text{ Hz}$
电源内	$R=0.1585 \ \Omega$
	$L=2.0231 \text{ mH}$
架空线	$R_T=0.132 \ \Omega/\text{km}$
	$X_{LT}=0.357 \ \Omega/\text{km}$
负载	$X_{CT}=50.215 \text{ M}\Omega \times \text{km}$
	$R_{Load}=38.75 \ \Omega$
开关电阻	$L_{Load}=28.9065 \text{ mH}$
	$R_{brk}=0.1 \ \Omega$
架空线长度	$l_{AB}=5 \text{ km}$
	$l_{BC}=5 \text{ km}$
	$l_{CD}=10 \text{ km}$

表2 接入SFCL前后电流保护动作范围

继保的動作段	保护范围(无SFCL)	保护范围(有SFCL)
I段	BC段的80%	全线拒动
II段	BD段的73.3%	BD段的54%
III段	线路全长	线路全长

### 3.2 SFCL 并联的分流电阻对各点短路电流影响的分析

为了确定合适的分流电阻范围,假定超导长度为 200 m,改变分流电阻的阻值大小,仿真线路不同点短路时,保护安装处的最大电流值,并绘制保护安装处检测到的短路电流随分流电阻的变化规律如图 7 所示.图 7 中横坐标为分流电阻(即图 2 中的  $R_p$ )的大小,纵坐标为继保安装处的短路电流值.各曲线的意义同图 6.分析后得出,若要配合在线的继电保护,200 m 的超导长度所加的分流电阻要小于 0.8  $\Omega$ .

### 3.3 与继电保护相配合的 SFCL 参数的确定

综合以上仿真分析得出的与继电保护装置相配合的分流电阻及超导长度的范围可知:1) 分流电阻不可大于 1  $\Omega$ ,在此情况下,超导长度不可超过 20 m;2) 当分流电阻再减小时,超导长度的范围可以适当增加.并且从图 6 与图 7 的比较可知,调整分流电阻的大小会引起短路电流的大幅改变,减少 SFCL 与电流保护配合的仿真次数,因此从调整分流电阻入手更容易确定与继保相配合的 SFCL 参数.

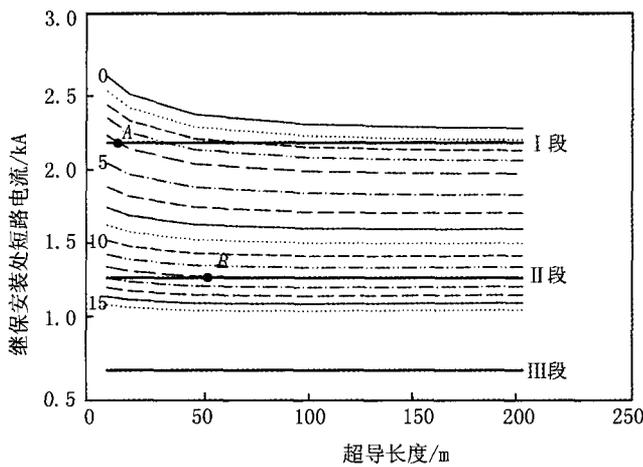


图6 不同超导长度下各点短路电流值

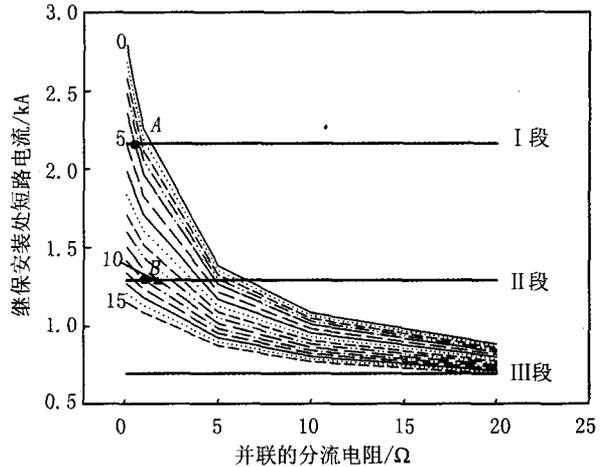


图7 不同分流电阻下短路电流值

从图 6 与图 7 可以看出,在某特定的 SFCL 参数下,若电流 I 段保护不拒动,则 II 段保护一定可以正常动作.因此只需关注能够与电流 I 段保护相配合的 SFCL 参数,此参数一定满足与继保配合的条件.

当分流电阻调整到满足电流保护范围的阻值时,再进行超导长度的调整.超导长度增大,可能会引起电流保护的拒动;而超导长度减小,可能会引起带材单位承压过大,不能保证限流器的安全运行.因此,可以利用断路器动作信号的跳变时间来确定超导长度的上限,通过观察承压值是否超出安全电压来确定超导长度的下限.

确定 SFCL 参数的步骤:

- 1) 将分流电阻的阻值从 1  $\Omega$ . 开始减小,每调整一次分流电阻,就要相应调整超导带材的长度,试图寻找原先电流 I 段保护末端短路时,让电流 I 段保护动作的最大超导带材长度;
- 2) 若参数“分流电阻+超导长度”可以使 I 段保护动作,就要观察此参数下 0 km 处短路时(即最恶劣短路情况)超导带材上的承压,利用承压值是否在安全范围内进行再次筛选,确定超导带材的最小长度;
- 3) 寻找到可以保证继电保护不拒动的分流电阻参数后,调整超导长度,找出此分流电阻下超导长度的范围,同时计算出限流比(即短路电流减小的比例)的范围;
- 4) 总结可以与文中搭建的电力系统模型的继电保护装置相配合的超导限流器参数.

经过大量的仿真与分析,满足要求的参数范围.表 3 列出了能与现有继电保护装置相配合的超导限流器的参数,并且计算出了这些规格的超导限流器的限流比范围.表 3 中无 SFCL 时短路支路的电流最大值为 3.889 565 kA,此数值用于计算限流比.

由表 3 可得:

- 1) 当并联的分流电阻小于等于 0.4  $\Omega$  时,超导的长度可以无限加长,而最高的限流比可以达到 23.22%.

2) 分流电阻越小,合适的超导长度的选择范围越广,从而可以尽量缩短超导带材长度以降低成本。

3) 分流电阻越小,超导限流器的限流比越小,即限流能力就越差;但是带材的承压值会越来越小,即限流器能在更加安全的条件下运行。

4) 同样的分流电阻,超导长度越长,运行越安全,但是限流效果会较差。

在挂网试验中,为了降低 10 kV 电阻型 SFCL 的成本,SFCL 的限流比不必过大,能够将短路电流限制到小于断路器的遮断电流即可,因此表 3 中仿真得到的 SFCL 参数可以用于实际电网。目前 10 kV 电阻型 SFCL 的成本略高,出于经济性考虑,不适合广泛应用于配电网系统,但是其在挂网测试中得到的技术参数以及可靠性评估,将为高电压等级的超导限流器实用化奠定基础。

表 3 与继保装置相配合的所有 SFCL 的参数

分流电阻/ $\Omega$	超导长度范围/m	超导承压最大值/ $(V \cdot m^{-1})$	短路支路电流最大值范/kA	限流百分比范围/%
0.6	18~29	48.87	2.983 968~3.053 578	23.28~21.49
0.5	15~74	49.68	2.977 936~3.124 499	23.44~19.67
0.4	>13	48.02	2.986 461~3.188 597	23.22~18.02
0.3	>10	48.07	3.106 458~3.265 420	20.13~16.05
0.2	>7	47.42	3.235 695~3.345 636	16.81~13.98
0.1	>4	44.23	3.375 880~3.439 020	13.21~11.58

## 4 结 论

本文在 PSCAD/EMTDC 软件平台上建立了电阻型超导限流器和阶段式电流保护的电磁暂态模型,并结合 10 kV 配电系统对电阻型超导限流器与电流保护的配合问题进行了仿真研究。针对超导限流器影响电流保护灵敏性的问题提出了调整超导模块各项参数的解决方法。仿真结果证明,通过改变超导带材的长度和分流电阻的大小可以得到既能满足断路器开断能力限制,又能满足电流保护灵敏度要求的限流器,利用本文的方法可以有效地解决电阻型超导限流器与电流保护的配合问题,这将对超导限流器的挂网运行具有重要的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 78-83.
- [2] 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.
- [3] 石 晶, 邹积岩. 故障电流限制技术及研究进展[J]. 电网技术, 1999, 23(12): 63-66.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] AHMED S, KHALIQ A, NOMAN U D S, et al. Stability enhancement in smart grid by using superconducting fault current limiter[J]. Symposium on Recent Advances in Electrical and Electronics Engineering, 2015(10): 1-7.
- [7] 韩征和. 高温超导与节能减排[J]. 新材料产业, 2007(12): 38-41.
- [8] 肖立业, 林良真. 超导限流器——超导技术产业化的领头产品[J]. 科技导报, 1999(7): 37-40.
- [9] 肖 霞, 李敬东, 叶妙元, 等. 超导限流器研究与开发的最新进展[J]. 电力系统自动化, 2001(10): 64-68.
- [10] RUIZ H S, ZHANG X, COOMBS T A. Resistive-Type Superconducting Fault Current Limiters: Concepts, Materials, and Numerical Modeling[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 1-5.
- [11] DOMMERQUE R, KRÄMER S, HOBL A, et al. First commercial medium voltage superconducting fault-current limiters: production, test and installation[J]. Supercond Sci Technol, 2010, 23(3): 34020-34025.
- [12] MARCHIONINI B, FALL N, STEURER M. An Assessment of Fault Current Limiter Testing Requirements[R]. Prepared for Dept of Energy, 2009.
- [13] LLAMBES J C, WEBER C, HAZELTON D. Testing and demonstration results for the transmission-level (138 kV) 2G superconducting fault current limiter at SuperPower[J]. IEEE Trans Appl Supercond, 2009, 19: 1968-1971.
- [14] 胡 毅, 唐跃进, 任 丽, 等. 超导电力技术的发展与超导电力装置的性能检测[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 1-8.
- [15] 世界首台 220 kV 超导限流器成功挂网运行[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013(4): 45.
- [16] 夏 毅, 刘建明. 超导限流器对电力系统继电保护和暂态稳定的影响[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(2): 45-48.
- [17] 陈 刚. 新型固态限流器及其对电力系统影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

- [18] KIM J S, LIM S H, KIM J C. Study on application method of superconducting fault current limiter for protection coordination of protective devices in a power distribution system[J]. IEEE Trans Appl Supercond, 2011, 99: 1-4.
- [19] LIM S H, KIM J S, KIM J C. Analysis on protection coordination of hybrid SFCL with protective devices in a power distribution system [J]. IEEE Trans Appl Supercond, 2011, 21(3): 2170-2173.
- [20] 林良真, 叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC[J]. 电网技术, 2000, 24(1): 65-66.
- [21] 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.
- [22] 龙杰. 城市电网 10 kV 配电系统继电保护的探讨[J]. 科技创新导报, 2011, 27: 125.
- [23] 何妍, 陈轩恕, 唐跃进, 等. 超导故障限流器对自动重合闸和继保的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2190-2194.
- [24] 高强, 叶莺, 张志峰, 等. 桥式超导限流器与电力系统距离保护配合问题研究及算法改进[J]. 继电器, 2006, 34(14): 7-10.

## Simulation of Co-ordination of Resistive-type Superconducting Fault Current Limiter and Relay Protection in 10 kV Distribution Network

CHEN Yanjun

(Shinan Power Supply Company, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** The increase of short-circuit current has become an important issue in high-voltage power grid construction and operation. Superconducting fault current limiter (SFCL) is one of the most ideal current limiting devices in modern power network. However, the co-ordination between SFCL and relay protection is an important technologies and is crucial for SFCL to be successfully applied to real power network. In this paper, a combined numerical model with both resistive type SFCL module and current-relay protection module is developed using simulation software PSCAD/EMTDC. This model is used to study the effect of SFCL on relay protections and the co-ordination between SFCL and relay protections in 10 kV distribution gird. The solution of limiting the current level is further presented in this paper by adjusting the parameters of SFCL model to achieve the co-ordination between SFCL and relay protections. The final result in this paper could provide important quantitative basis of parameters for SFCL to be applied in real power system.

**Keywords:** resistive type superconducting fault current limiter; second generation high-temperature superconducting tapes; relay protection device; PSCAD; 10 kV distribution gird; co-ordination

(上接第 52 页)

- [8] LI M Z, YAN Z J, CHEN J C, et al. Thermodynamic properties of an ideal Fermi gas in an external potential with  $U=br^l$  in any dimensional space [J]. Phys Rev A, 1998, 58: 1445.
- [9] SCHNEIDER J, WALLIS H. Mesoscopic Fermi gas in a harmonic trap[J]. Phys Rev A, 1998, 57(2): 1253-1259.
- [10] BRUUN G M, BUMETT K. Interacting Fermi gas in a harmonic trap[J]. Phys Rev A, 1998, 58: 2427.
- [11] BAGNATO V, PRITCHHARD D E, KLEPPNER D. Bose-Einstein condensation in an external potential [J]. Phys Rev A, 1987, 35: 4354.
- [12] YAN Z J. Bose-Einstein condensation of a trapped gas in n dimensions[J]. Phys Rev A, 1999, 59: 4657.
- [13] 张楠, 许珊, 王凤桐, 等. 势阱中旋转费米气体的磁性[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 68-70.
- [14] PETHICK C J, SMITH H. Bose-Einstein Condensation in Dilute Gases [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 18-59.

## Thermodynamics of Ideal Fermi Gases under a Harmonic Trap

WANG Lei

(Department of Physics and Electronic Engineering, Heze University, Heze 274015, China)

**Abstract:** Thermodynamic properties of ideal Fermi gases in all kinds of dimensional harmonic traps have been studied by using Thomas-Fermi approximation. The general expressions for the chemical potential, Fermi energy and specific heat were derived. We discussed the influence of space dimension and harmonic trap on thermodynamics. The characteristic thermodynamics of two and three dimensional Fermi systems are numerically calculated, and yield a well agreement with the corresponding limits for classical ones.

**Keywords:** harmonic trap; Fermi gases; thermodynamics