

电阻型超导限流器仿真模型及其 对 10 kV 配电网的影响

陈妍君^{1,2}, 顾洁^{1,2}, 金之俭^{1,2}, 洪智勇^{1,2}, 盛杰^{1,2}

(1. 上海交通大学 电力传输与功率交换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 在对电阻型超导限流器失超机理及失超过程进行深入分析的基础上, 利用 PSCAD 仿真软件搭建了电阻型超导限流器的自定义模型, 并通过仿真该模型的电阻、电流和温度曲线验证自定义超导限流器模型的正确性。对超导限流器与继电保护装置的配合问题进行了初探。理论分析及该模型的实例验证表明, 模型较全面地呈现了限流器真实的工作状态。将其投入 10 kV 配电网中的仿真结果表明, 超导限流器不仅对系统短路电流有显著的限制作用, 同时还有利于改善非故障馈线的供电电压质量。为了与继保装置配合, 选择最优的超导限流器参数将对限流器的挂网运行有重要参考价值。

关键词: 超导限流器; 模型; PSCAD; 短路电流; 馈线电压; 继电保护; 超导材料

中图分类号: TM 26; TM 71; TM 743

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.02.015

0 引言

随着电力系统规模的日渐增大, 近年来我国不少电网短路电流水平也快速上升。短路电流超过一定水平后会给电力系统的建设和运行带来一系列的问题。超导故障限流器 SFCL (Superconducting Fault Current Limiter) 集检测、触发、限流于一身, 响应时间快, 可自动恢复, 具备了其他限流装置没有的优越性, 成为目前最理想的限流装置之一。

SFCL 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^[1]。其中新型电阻型 SFCL 的原理和结构简单; 体积小, 重量轻; 由于失超后电阻大, 限流能力较强; 整体规模又可以通过带材的串并联来线性扩大。第二代高温超导材料的应用很大程度提高了电阻型 SFCL 的失超速度, 从而缓解了基于第一代高温超导材料建造的电阻型 SFCL 响应速度慢的局限性。目前, 国内外许多科研机构均将电阻型 SFCL 作为第二代高温超导材料在电网中的应用突破口着力研发。Nexans 公司已于 2003 年启动基于 BSCCO 2212 超导材料的电阻型 SFCL 项目, 并于 2009 年完成 2 台不同容量的样机, 且在英国电网挂网运行^[2]; 美国 2 个 138 kV 电压等级的电阻型 SFCL 项目分别在美国超导公司和 SuperPower 公司的主导下正在进行^[3-4]。在我国, 上海交通大学于 2010 年开始电阻型高温 SFCL 的研发, 采用自主生产的第二代高温超导带材, 并于 2012 年完成了 10 kV 样机。

电阻型 SFCL 不仅可以保证线路的安全稳定运行, 还能够提高电网运行的可靠性, 因此具有广阔的

应用前景。本文针对基于第二代超导带材的电阻型 SFCL 模型及其应用进行了初步研究。根据超导体的基本特性和电阻型 SFCL 的工作原理, 在 PSCAD 仿真平台上搭建了 SFCL 自定义模型, 利用此模型分析了 SFCL 在 10 kV 电网中对故障电流的限制作用和对非故障支路电压质量的改善作用, 并初步研究了 SFCL 与现有继电保护装置的配合问题, 为后续进一步开展 SFCL 在电力系统中的应用奠定基础。

1 超导基本特性和超导材料的发展

超导态的零电阻现象^[5]和迈斯纳效应^[6]是超导体的 2 个相互联系的基本特性。迈斯纳效应也被称为完全抗磁性, 指的是第一类超导体在临界磁场下将导体内部磁力线排斥在外的特性。迈斯纳效应的应用范例不多, 大多数超导电力设备都是利用了超导体的零电阻特性。

超导体有 3 个重要的临界参量, 即临界温度 (T_c)^[7-8]、临界磁场 (H_c)^[9] 和临界电流 (I_c)^[10]。这 3 个物理量中任何一个超过了其临界值, 超导体就会立即失超, 即超导体只有在图 1 所示的曲面内才是超导态, 曲面外则为正常态。电阻型 SFCL 正是利用超导体承载电流超过临界值时会失超变成常态 (高阻) 的特性而构建的新型电力设备。

超导材料于 1911 年问世, 经过 100 多年的科学研究和探索, 已经在国民经济的许多领域如医疗电子、高能物理、电力传输等方面得到应用。尤其是 1986 年高温超导材料^[11]的问世, 其凭借在液氮环境中相对廉价的制冷成本, 为超导电力设备的大规模应用创造了可能性。高温超导电力设备经过近 20 年的示范工程探索和各国政府的产业化扶持, 目前已

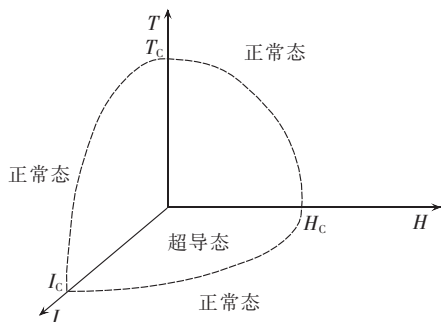


图 1 超导体的临界特性

Fig.1 Critical characteristics of superconductor

经逐步走向实用化,高温超导带材已经被应用于电缆、电机、限流器、变压器、储能等众多电力设备中,高温超导块材也在磁悬浮轨道交通中发挥着重要作用。这些高温超导应用领域与技术已比较成熟的低温超导应用如 MRI 磁共振成像、粒子加速器等共同构成了当前极具发展前景的超导应用产业。超导技术被称为 21 世纪最具发展潜力的电工技术,许多国家已将发展超导产业上升到战略高度,美国将其 2030 智能电网的目标定为超导电力,据预测其形成的超导产业规模将会超过数十万亿美元。而近年来随着超导带材制备技术的不断提高,其成本正在快速下降,超导技术正在逐步进入实用阶段。

2 电阻型 SFCL 仿真模型的研究

电阻型 SFCL 以其工作原理和结构优势^[12],成为当前学术界和工业界普遍认为的 SFCL 发展趋势。本文将利用 PSCAD/EMTDC 电力系统仿真软件^[13-14]针对电阻型 SFCL 的模型及其应用进行研究。

由于电阻型 SFCL 对外电路表现为非线性电阻,变化过程较复杂,在 PSCAD 的 main library 中并无可以直接使用的元件,因此需要搭建自定义模型。建立电阻型 SFCL 的电磁模型需要用到 PSCAD/EMTDC 标准元件库中的“Variable RLC Components”元件,其元件类型可以是电阻、电感或者电容,元件值既可以是一个给定的数值,也可以是由外部信号控制的变量。由于电阻型 SFCL 为非线性电阻,所以将“Variable RLC Components”定义为电阻元件,且电阻值由时变信号 R_s 控制^[15],如图 2 所示。

根据 2007 年 Mathias Noe 的综述^[16]中提到的电阻型 SFCL 模型可知,它主要由两部分组成,如图 2 所示: R_s 代表超导体的电阻,即超导态为 0,失超后

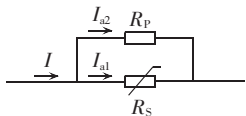


图 2 电阻型 SFCL 的结构示意图

Fig.2 Structure of resistor-type SFCL

为常温电阻,阻值与超导带材长度有关;并联在超导电阻两端的 R_p 代表分流电阻,用来防止超导因为失超而烧毁。 I_{a1} 、 I_{a2} 分别为流过 R_s 、 R_p 的电流, I 为流过 SFCL 模块的总电流。

图 2 中纯超导电阻 R_s 的电阻值是由图 3 所示的模块所控制的。图 3 中, I_{a1} 为 R_s 上的实时电流; E_a 为超导模块两端的电压; R_s 为超导体的电阻值; J_{CT} 为超导体的临界电流密度; T 为超导体的温度; E_{a0} 为超导带材的单位承压值。

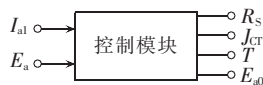


图 3 SFCL 的控制模块

Fig.3 Control module of SFCL

该模型主要将 SFCL 整体作为一个电气元件,根据流过 R_s 的实时电流,控制超导模块的阻值和温度。当系统正常运行时, R_s 阻值为 0,流过的电流为线路电流,超导层温度和临界电流密度均为初始值不变;当 R_s 上流过的实时电流大于其临界值或超导模块的温度高于临界温度时,超导体瞬间失超, R_s 阻值按照指数形式上升,其 E - J 关系式为:

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_{CT}} \right)^\alpha \quad (1)$$

其中,临界电压 $E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$, J 为电流密度, J_{CT} 为临界电流密度。

由于失超过程中,电流增大使得超导带材升温,同时又存在超导与液氮的热传导过程,因此超导上的温度变化为:

$$T_{i2} = T_{i1} + \int_{t_1}^{t_2} \frac{Q_{Rs} - Q_c}{Cm} dt \quad (2)$$

其中, T_i 为 t 时刻的温度; Q_{Rs} 为 R_s 在 $t_1 \sim t_2$ 时间步长内产生的热量; Q_c 为超导带材在 $t_1 \sim t_2$ 时间步长内与周围的传导热量; C 为带材铜层的比热容; m 为带材的质量。

超导带材的研究表明,其临界电流密度与超导温度有关,随着超导体温度的上升,其临界电流密度会逐渐下降,最后逼近于 0。由于超导体的实时电流密度始终大于临界电流密度,因此维持了超导体的失超过程。临界电流密度与温度的关系式为:

$$J_{CT}(T) = \begin{cases} J_{CT}(0) \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_C - T_0} \right)^2 \right] & T < T_C \\ 10^{-7} & T > T_C \end{cases} \quad (3)$$

其中, $J_{CT}(0)$ 为 $T=0 \text{ K}$ 时超导体的临界电流密度, T_0 为超导体的初始温度 77 K , T_C 为临界温度。

随着失超过程中电阻的增大,电流开始缓慢下降,经过 $2 \sim 3 \text{ ms}$ 后,超导体进入正常态, R_s 为常温电阻,线路电流被限制在一个相对较小的值,这既保护了电气设备,又能使断路器有效切断故障电路。

本文根据电阻型 SFCL 的工作原理和理论模型,借助 PSCAD/EMTDC 的自定义建模功能制作了控制模块“Control Module”,其作用是在每一个时间步长内计算一次超导体的电阻,并将计算结果输出给元件 R_s 作为电阻值的控制信号。首先,在 PSCAD 图形界面上创建控制模块的图形标识,并定义端子的数目、位置、名称和类型;其次,在参数编辑界面中制作模块的参数卡片,定义各项输入参数;最后,在程序编辑界面中利用 Fortran 语言写入执行程序,即完成控制模块的编程。SFCL 控制模块的编程逻辑流程图如图 4 所示。图中, T_0 为超导体的初始温度, T_c 为临界温度, E_c 为临界电压, J_{c0} 为初始电流密度, J 为线路的电流密度, E 为 SFCL 两端的电压。

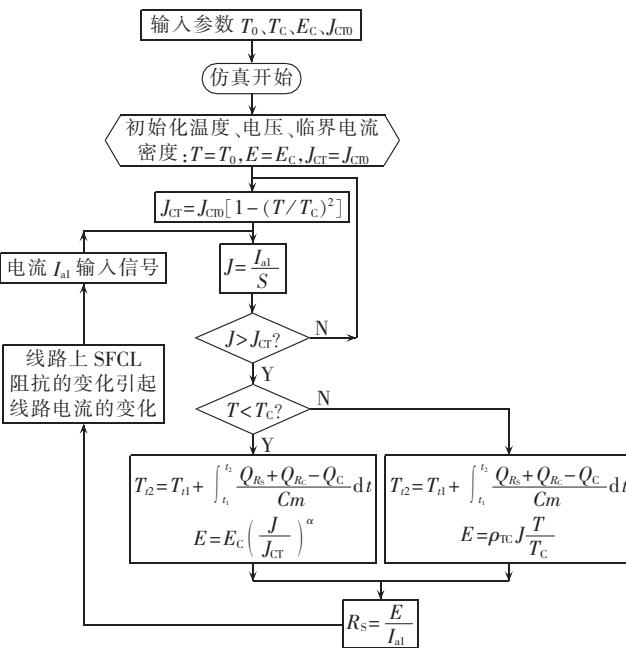


图 4 电阻型 SFCL 的控制逻辑流程图
Fig.4 Control logic of resistor-type SFCL

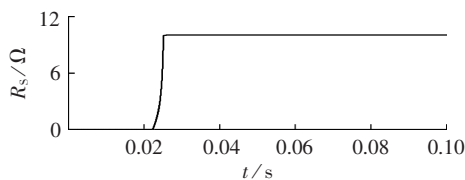
3 SFCL 基本参数的仿真实验验证

将所建立的 SFCL 模型放入在 PSCAD 平台上搭建的一个简单的 10 kV 电网模型中,对 SFCL 模型的正确性进行仿真实验验证。根据 SFCL 的实验参数,设置仿真模型中设备参数如下:临界电流 $I_c=400$ A; $T_0=77$ K; $T_c=92$ K; 2 根超导带材并联,超导带材长度为 200 m,是根据带材运行的耐压值保守估计设置的;并联的分流电阻 $R_p=1$ Ω。

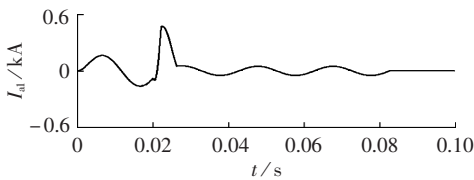
通过仿真,得到电阻型 SFCL 的电阻、电流和超导层温度的变化曲线如图 5 所示。

由图中曲线可以看出:

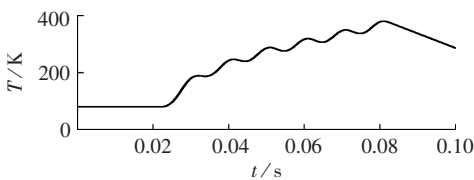
a. 当系统正常运行时,超导层电阻为 0,电流为线路电流,临界电流密度和超导层温度都为初始值,稳定不变;



(a) 超导层总电阻变化曲线图



(b) 超导层电流变化曲线图



(c) 超导层温度变化曲线图

图 5 SFCL 仿真曲线图

Fig.5 Simulation curves of SFCL

b. 当线路上某点 0.02 s 发生短路故障后,超导层电流开始增大,当超过临界电流时 SFCL 失超,此后电阻开始增大,随着超导阻值的增大,超导层的电流开始下降,超导层温度上升;

c. 经过 2~3 ms 后,限流器进入正常态,超导层电阻为常温电阻,分流电阻的存在使得超导层的电流被限制到一个较小的值,超导层的温度继续缓慢上升,直到断路器切断线路后,超导体与外界的热传导使得超导层的温度下降。

仿真得到的曲线与实际相符,从而验证了 SFCL 模型的正确性。

4 电阻型 SFCL 对 10 kV 电网的影响

SFCL 的作用是在故障发生时快速接入等效限流阻抗以限制短路电流,从而有效降低断路器开断短路电流的条件,保证其可靠切断故障电流;同时等效阻抗的引入可以缓解短路故障对电网的冲击,改善非故障支路的供电质量^[17]。但是,电阻型 SFCL 的接入会改变线路固有的参数,从而影响继电保护的動作。本文通过仿真分析了 SFCL 对短路电流、非故障支路电压和继电保护的影响。

图 6 为 10 kV 单侧电源配电系统模型示意图。仿真时将 SFCL 安装在其中的某条馈电线路上,以限制该馈线支路的短路电流。

以一个 10 kV 配电系统(系统的频率为 50 Hz)为研究对象,图示系统共有 4 条馈线支路,其中故障发生在馈线的 BC 段间。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;电源电压 $E_s=10$ kV;

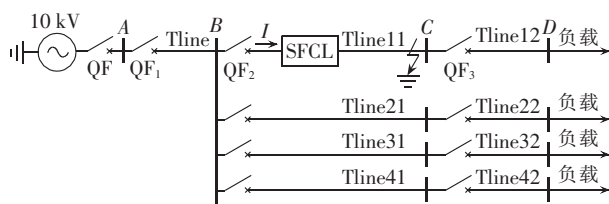


图 6 10 kV 单侧电源配电系统模型示意图

Fig.6 Model of 10 kV mono-source distribution network

频率 $f=50\text{ Hz}$; 电源内阻抗 $R=0.1585\ \Omega$, $L=2.0231\text{ mH}$; 架空线阻抗 $R_T=0.132\ \Omega/\text{km}$, $X_{LT}=0.357\ \Omega/\text{km}$, $X_{CT}=50.215\text{ M}\Omega\cdot\text{km}$; 负载阻抗 $R_{\text{load}}=38.75\ \Omega$, $L_{\text{load}}=28.9065\text{ mH}$; 开关电阻 $R_{\text{brk}}=0.1\ \Omega$; 架空线长度 $l_{AB}=5\text{ km}$, $l_{BC}=5\text{ km}$, $l_{CD}=10\text{ km}$ 。

按照图 6 的模型示意图及上述参数,在 PSCAD 平台上搭建了 10 kV 单侧电源配电系统模型。

4.1 SFCL 对短路电流的限制作用

由于 SFCL 的主要作用是限制故障支路的短路电流,因此首先对比 SFCL 安装前后的故障支路短路电流,以验证 SFCL 的限流作用。故障支路电流的对比情况如图 7 所示。

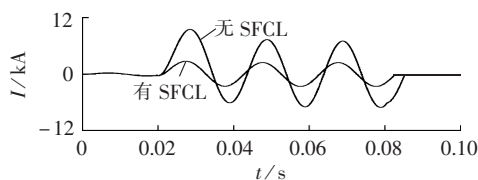


图 7 安装 SFCL 前后的故障支路短路电流对比

Fig.7 Short circuit currents of faulty branch with and without SFCL

由图 7 可知:

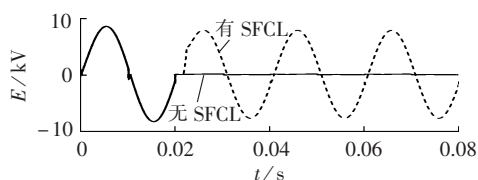
a. 电网正常运行时,加装 SFCL 前后流经 SFCL 的电流是相同的,即正常运行时 SFCL 呈超导态,阻抗极小, SFCL 的加装不会对系统运行造成影响;

b. 当线路上某处发生三相短路后,加装 SFCL 情况下的短路电流幅值要明显小于未加装 SFCL 的短路电流幅值,反映了电阻型 SFCL 对于故障支路的短路电流有明显的限制作用;

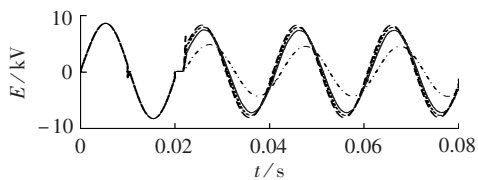
c. 基于第二代超导带材的电阻型 SFCL 克服了第一代带材响应和恢复速度较慢的问题,可以在 $1\sim 2\text{ ms}$ 内限制住短路电流,因此在图 7 中加装 SFCL 后短路电流的变化周期等没有明显的滞后。

4.2 SFCL 对非故障馈线电压的影响

图 8 给出了 SFCL 对非故障馈线电压的影响。可见,未发生短路故障时,馈线的端电压接近 10 kV,发生短路故障后,若故障线路上未装设 SFCL,馈线的端电压降低非常明显;若故障线路上装设了 SFCL,短路时 SFCL 作为电阻接入电路,缓解了故障馈线电阻的降低,同时也相对稳定了非故障馈线的电压。



(a) 安装 SFCL 对非故障馈线电压的影响



(b) 分流电阻对非故障馈线电压的影响

图 8 SFCL 对非故障馈线电压的影响

Fig.8 Influence of SFCL on voltage of healthy feeders

图中电压曲线的幅值显示, SFCL 并联的分流电阻越大,短路后的非故障馈线电压越高,越接近于正常运行时的电压。显然,引入 SFCL 有利于维持非故障馈线的电压,且非故障馈线电压随分流电阻的增加而增加,即较大的分流电阻有助于改善短路后非故障馈线的供电质量,但是过大的分流电阻可能会引起超导带材上的短路电流过大,从而导致带材被烧毁。因此在实际应用中,可以通过对分流电阻与短路电流及非故障馈线电压关系的量化分析,优化选取合适的分流电阻阻值范围,在确保安全运行的情况下最大限度地改善供电质量。

4.3 SFCL 与继电保护装置的配合

当电力系统发生短路故障时, SFCL 自动串入故障回路,改变了线路参数,可能造成保护拒动,导致无法及时准确地切除故障。一般而言,解决 SFCL 与配电网电流保护的配合问题有 2 个途径:一是调整原有保护的动作值以适应被限制的短路电流;二是调整电阻型 SFCL 的参数,使之不会对保护的灵敏度产生太大的影响^[15-18]。调整保护动作值的方法不但工作量大,而且可能造成三段式电流保护间的无法协调,不宜采用。因此笔者曾利用第 2 种方法通过改变电阻型 SFCL 的参数进行了一系列仿真,初步研究了 SFCL 与继电保护装置的配合问题,目前正在开展对具体的调整方法和两者之间的量化分析建模的研究,在此不再赘述。

5 结论

本文在 PSCAD/EMTDC 软件平台上搭建了电阻型 SFCL 自定义模型,并以一个简单的 10 kV 配电系统模型为例,初步研究了 SFCL 对电网的影响。

仿真图形对比和量化分析表明:

a. 电网正常运行时, SFCL 的阻抗为 0,对系统

无影响,并且不会产生损耗;

b. 系统发生短路故障后,SFCL迅速失超,阻抗瞬时增大,从而明显地限制了短路电流;

c. 加装了SFCL后,非故障馈线的供电质量得到了改善,并且与SFCL并联的分流电阻越大,非故障馈线的电压就越稳定;

d. 加装了SFCL后,现有的继电保护装置受到了一定影响,调整SFCL参数以配合继保装置,此时SFCL的限流效果会受到一定限制。

我国大中城市的电网短路电流超标问题急需科学的解决方案,而SFCL不仅可以保证线路的安全稳定运行,还能够较好地解决高电压等级电网环网运行所带来的短路电流超标问题,对于提高电网运行的可靠性具有极高的价值。

本文的研究团队将在研制电阻型SFCL硬件装置的同时,继续对SFCL装入电网后对电网规划运行各方面的影响进行深入研究,以期SFCL在电力系统中的应用提供参考。

参考文献:

- [1] 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.
XIAO Liye,LIN Liangzhen. Superconducting fault current limiters-leading products in superconducting technology industry[J]. Science & Technology Review,1999(7):37-40.
- [2] DOMMERQUE R,KRÄMER S,HOB L A,et al. First commercial medium voltage superconducting fault-current limiters:production, test and installation[J]. Supercond Sci Technol,2010,23(3):34020-34025.
- [3] MARCHIONINI B,FALL N,STEURER M. An assessment of fault current limiter testing requirements[R]. Tallahassee,USA:Florida State University,2009.
- [4] LLAMBES J C,WEBER C,HAZELTON D. Recovery under load performance of 2nd generation HTS superconducting fault current limiter for electric power transmission lines[J]. IEEE Trans Appl Supercond,2009,19(3):1968-1971.
- [5] ONNES H K. The resistance of puremercury at helium temperature[J]. Comm Phys Lab Univ Leiden,1911,12:120-122.
- [6] 金建勋. 高温超导体及其强电应用技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2009:172-186.
- [7] ZHU J W,HOR P H,MENG R L,et al. Superconductivity at 52.5 K in the lanthanum-barium-copper-oxide system[J]. Science,1987,235(4788):567-569.
- [8] ZHAO Z X,CHEN L Q,CUI C G,et al. Superconductivity above liquid nitrogen temperature in new oxide systems[J]. Science Bulletin,1987,32(16):1098-1102.
- [9] MASARU T,MASATO M. High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K[J]. Nature,2003,421(6922):517-520.
- [10] JAN E,ARCHIE C. Critical currents in superconductors[M]. London,UK:Taylor & Francis Ltd,1972:408-409.
- [11] 金建勋,郑陆海. 高温超导材料与技术的发展及应用[J]. 电子科技大学学报,2006,35(4):612-627.

- JIN Jianxun,ZHENG Luhai. Development and applications of high temperature superconducting material[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China,2006,35(4):612-627.
- [12] 马幼捷,王辉,周雪松,等. 超导故障限流器的研究现状及其应用[J]. 低温与超导,2007,35(4):304-311.
MA Youjie,WANG Hui,ZHOU Xuesong,et al. The research situation and application of superconducting fault current limiters[J]. Cryogenics and Superconductivity,2007,35(4):304-311.
- [13] 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.
LIN Liangzhen,YE Lin. Electromagnetic transient analysis software PSCAD/EMTDC[J]. Power System Technology,2000,24(1):65-66.
- [14] 袁欣,孙元博,张承学. PSCAD/EMTDC自定义元件在电力系统仿真中的运用[J]. 电力科学与工程,2010,26(7):12-15.
YUAN Xin,SUN Yuanbo,ZHANG Chengxue. Application on use-defined model of PSCAD/EMTDC in power system simulation[J]. Electric Power Science and Engineering,2010,26(7):12-15.
- [15] 祁爱玲,叶林. 电阻型超导故障限流器与配电网电流保护配合问题的研究[C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会论文集. 北京:中国农业大学出版社,2008:1888-1892.
QI Ailing,YE Lin. Research of the co-ordination between resistive type superconducting fault current limiter and relay protections in distribution network[C]//Proceedings of CUS-EPSCA. Beijing,China:China Agricultural University Press,2008:1888-1892.
- [16] MATHIAS N,MICHAEL S. High-temperature superconductor fault current limiters:concepts,applications and development status[J]. Supercond Sci Technol,2007,20(3):15-29.
- [17] 王晓君. 超导限流器引入配电系统后的短路行为仿真[J]. 高压电器,2006,42(2):131-133.
WANG Xiaojun. Simulation of short circuit process of superconducting fault current limiter in power distribution system[J]. High Voltage Apparatus,2006,42(2):131-133.
- [18] 林霞,陆于平,吴新佳. 分布式发电系统对继电保护灵敏度影响规律[J]. 电力自动化设备,2009,29(1):54-59.
LIN Xia,LU Yuping,WU Xinjia. Influence law of distributed generation on relay protection sensitivity[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(1):54-59.

作者简介:

陈妍君(1988-),女,河南新乡人,硕士研究生,研究方向为高温超导应用技术(E-mail:merrycy@163.com);

顾洁(1971-),女,江苏南通人,副教授,博士,研究方向为电力市场及电力系统规划(E-mail:gujie@sjtu.edu.cn);

金之俭(1965-),男,上海人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为智能电网技术、电力设备在线监测技术、超导应用技术(E-mail:zjjin@sjtu.edu.cn);

洪智勇(1981-),男,辽宁鞍山人,副教授,博士,研究方向为高温超导应用技术(E-mail:zhiyong.hong@sjtu.edu.cn);

盛杰(1988-),男,江苏大丰人,博士研究生,研究方向为基于第二代超导带材的超导限流器模型仿真及模块设计(E-mail:sjl@sjtu.edu.cn)。

(下转第108页 continued on page 108)

decision under risk[J]. *Econometrica*,1979,47(2):263-291.

[14] 魏新江,余银,张世民. 基于模糊灰关联投影法的深基坑支护方案优选[J]. *岩土力学*,2011,32(增刊 1):438-444.
WEI Xinjiang,YU Yin,ZHANG Shimin. Optimization of supporting schemes for deep foundation pit based on fuzzy grey relation projection method[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2011,32(Supplement 1):438-444.

作者简介:

李如琦(1959-),女,广西贺州人,教授,研究方向为电力系统最优运行与规划、电力系统分析与计算;
唐林权(1987-),男,湖南永州人,硕士研究生,研究方向为电力系统最优运行与规划、电力设备在线监测与故障诊断
(E-mail:tls8521@sina.com)。

Risk decision-making based on cloud theory and prospect theory for conditional maintenance of power transformer

LI Ruqi,TANG Linqun,LING Wuneng,LI Zhirong,WANG Weizhi
(School of Electrical Engineering,Guangxi University,Nanning 530004,China)

Abstract: As there is linguistic evaluation information in the decision-making of conditional maintenance for power transformer,a comprehensive evaluation model based on the cloud theory and prospect theory is proposed for it. Its comprehensive evaluation system includes the technological index,economic index and safety index. The cloud theory is used to represent the linguistic evaluation information,which realizes the reasonable transformation from qualitative concept to quantitative indication. TOPSIS is used to obtain the positive(negative) ideal scheme as its reference and the gray relation analysis is used to establish the positive(negative) correlation coefficient matrix. The positive(negative) ideal prospect value matrix and the model with the maximum comprehensive prospect value are built based on the prospect theory and its positive(negative) prospect value function,and its optimal weight vector is solved. The calculated maximum comprehensive prospect value is analyzed and the conditional maintenance policy of power transformer is determined. Case study verifies its feasibility and effectiveness and shows its higher sensitivity.

Key words: power transformers; conditional maintenance; cloud theory; prospect theory; sensitivity analysis; risks; decision making

(上接第 91 页 continued from page 91)

Simulation model of resistor-type superconducting fault current limiter and its impact on 10 kV distribution network

CHEN Yanjun^{1,2},GU Jie^{1,2},JIN Zhijian^{1,2},HONG Zhiyong^{1,2},SHENG Jie^{1,2}
(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Transformation,Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;2. School of Electronic Information and Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China)

Abstract: Based on the study of resistor-type SFCL(Superconducting Fault Current Limiter),a SFCL model is established by PSCAD,which is verified by simulating the curves of resistance,current and temperature. The coordination of SFCL and relay protection is preliminarily investigated. Theoretical analysis and case study show that,the established model fully represents the real working states of SFCL prototype. The simulation of its application in a 10 kV distribution network shows that,SFCL limits the short circuit current significantly and improves the power supply quality of healthy feeders. The selection of optimal SFCL parameters for its coordination with relay protection is helpful to its practical operation.

Key words: superconducting current limiter; models; PSCAD; short circuit currents; feeder voltage; relay protection; superconducting materials