电力故障运行下磁偏置超导限流器超导限流单元的 电-热特性分析与验证*

管广域1,2,丁开忠2+,董育军2,诸嘉慧3,陈盼盼3,瞿体明4,

韦德福5,王帅5,王飞鸣5,杜庆庆2,朱义东5

1. 安徽大学物质科学与信息技术研究院,合肥 230601;

2. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所,合肥 230031;

3. 中国电力科学研究院,北京 100192;

4.清华大学机械工程系,北京 100084;

5. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院,沈阳 110006

收稿日期:2020-01-23;接收日期:2021-01-22

【摘要】本文的磁偏置高温超导故障限流器(SFCL)是一种新型超导限流器,在系统出现短路故障时,发生失超现象,产生高阻抗限制短路电流,达到一定时间后断开超导单元,再由双分裂电抗器二次限流.当短路电流消失后,自动快速恢复到无阻特性,然后重新合闸投入系统运行.在 SFCL并网运行前,要对并网运行中出现相间短路等故障的暂态运行特性进行分析,了解并网运行时的状况.本文利用 Matlab/Simulink 构建了 SFCL 的仿真分析模型,包含超导限流单元的等效电路模型和热模型.该模型被接入一个由 Matlab/Simulink 构建的 10 kV 电力系统模型中,用来仿真 SFCL 的并网运行特性.仿真结果表明了 SFCL 在并网运行中的效果,以及相间短路故障下失超电阻、通过电流和超导限流单元温度的变化.同时,在中国国网辽宁电力虎石台对 SFCL 进行了并网运行试验,得到了相间短路故障下的暂态运行特性和失超恢复时间.本文的仿真分析和试验结果,证明了该 SFCL 样机具备 10 kV 并网能力,以及快速响应、逐级限流和快速恢复能力

关键词:SFCL,相间短路,等效电路模型,失超传热模型,暂态运行特性 PACS: 74.20.-z,74.25.Sv DOI: 10.13380/j.ltpl.2020.04.002

Analysis and Verification of Electro-thermal Characteristics of Magnetic Bias Superconducting Current Limiter Superconducting Current Limit Unit Under Power Failure Operation

GUAN Guangyu^{1,2}, DING Kaizhong^{2†}, DONG Yujun², ZHU Jiahui³, CHEN Panpan³, QU Timing⁴, WEI Defu⁵, WANG Shuai⁵, WANG Feiming⁴, DU Qingqing², ZHU Yidong⁵

1. Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601;

2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192;

4. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

5. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., LTD., Shenyang, 100142

[†] kzding@ipp. ac. cn

^{*}国网辽宁省电力有限公司科技项目《高温超导限流器在城市电网并网仿真及应用研究》(2019YF-63)资助的课题.

Received date: 2020-01-23; accepted date: 2021-01-22

(Abstract) In this paper, the magnet biased high-temperature superconducting fault current limiter (SFCL) is a new type of superconducting current limiter. When a short-circuit fault occurs in the system, the quench phenomenon will occur, creat high impedance to limit short-circuit current, and double split reactor can also limit current. When the short-circuit current disappears, it automatically recovers to the non-resistance characteristic quickly. Before the SFCL is connected to the power grid, it is necessary to analyze the transient operating characteristics of faults such as phase- to-phase short circuits in the operation of the power grid, and understand the conditions when it is connected to the grid. This paper built a simulation analysis model of SFCL based on Matlab/Simulink, including the equivalent circuit model and quenchheat transfer model of the superconducting current limiting unit. This model was connected to a model of the 10 kV power system based on Matlab/Simulink. The simulation results of the model show the operation effect of SFCL in power grid, and the changes of quench resistance, flow current and the temperature of the superconducting current-limiting unit. At the same time, the SFCL was installed to the power grid at China State Grid Liaoning Electric Power Hushitai, and get the transient operating characteristics and quench recovery time under short-circuit faults between two phases. The simulation analysis and test results prove that the SFCL can operate in 10 kV power grid. And SFCL fast response, step-by-step limite current and fast recovery capabilities are proved.

Keywords: SFCL, short circuit between phases, equivalent circuit model, heat transfer model of quench, transient operating characteristics

PACS: 74.20.-z, 74.25.Sv

DOI: 10.13380/j.ltpl.2020.04.002

Reference method: GUAN Guangyu, DING Kaizhong, DONG Yujun, ZHU Jiahui, CHEN Panpan, QU Timing, WEI Defu, WANG Shuai, WANG Feiming, DU Qingqing, ZHU Yidong, Low. Temp. Phys. Lett. 41, 0185 (2020)

1 引 言

随着电力负荷的增长,输配电网规模逐渐扩大, 电网互联不断加强,但这也使得电网的短路阻抗越 来越小,短路电流水平急剧增大.特别在城市电力负 荷中心,电网出现的短路电流水平甚至超过系统一 次设备最大允许遮断容量^[1-3].近年来,多种类型的 SFCL 被设计出来解决电网中的短路大电流,其中 部分类型已经被接入实际的电网中运行^[4-9].本文中 的 SFCL 具有自动响应故障、超导限流单元与电抗 器共同限流和减少超导带材用量的优点.在并网运 行前,需要使用仿真工具对该 SFCL 在实际电网运 行中的效果进行分析.尽管,其他类型高温超导故障 限流器的运行特性已经被做了分析研究,但该新型 SFCL 运行特性还没有被仿真分析.

使用 Matlab/Simulink 软件对 SFCL 进行建模,该模型能显示出超导限流单元的温度、失超电阻和通过电流的变化.超导限流单元电阻的改变依据超导带材的超导特性进行计算.超导带材温度的改变通过故障电流产生的焦耳热公式和液氮与超导带材热交换的公式进行计算.所构建的 SFCL 运行特性仿真模型适用于 10 kV 电压等级的电力系统.该仿真分析结果表明了 SFCL 的并网运行特性,可用于对超导限流器的并网运行特性的评估.同时,对SFCL 进行了并网运行试验,反映了其并网运行特性.试验结果证明了该 SFCL 样机具备 10 kV 并网能力,以及快速响应、逐级限流和快速恢复能力.

2 高温超导限流器原理

本文 SFCL 是一种新型超导限流器,由双分裂 电抗器、超导限流单元和 K1 断路器组成,如图 1 所 示.超导限流单元由无感超导线圈构成.



在电网稳态运行时,断路器 K1 和 K2 闭合,超 导限流单元呈现零电阻特性,双分裂电抗器的两个 绕组 L1 和 L2 平分线路电流.当电网发生负载短路 等故障时,电流增加,超导限流单元失超并产生限流 电阻,形成超导限流单元和双分裂电抗器共同限流; 当检测系统检测到电网过流(或超导线圈过流),迅 速断开断路器 K1,形成双分裂电抗器的绕组 L1 单 独限流;同时,电网的保护装置检测到故障后,将断 路器 K2 断开,切除故障.当短路电流消失后,超导 限流单元会自动恢复无阻特性.该超导限流器可在 极短时间内逐级限制电网故障电流,降低断路器配 置容量,提高供电安全性和可靠性.

3 超导限流单元建模

SFCL 在系统出现短路故障时,发生失超现象, 产生非线性高阻抗限制短路电流.该阻抗的产生与 超导线圈的电流和温度有关^[10-11].本文基于超导带 的电路模型和失超传热模型,对超导限流单元相间 短路故障下的电-热特性进行分析^[12].

3.1 电路模型

该高温超导限流器使用二代 YBCO 高温超导 带材.瑞士联邦理工学院对高温超导材料的数学模 型进行了深入的研究,并给出了 YBCO 带材电阻率 与电流密度等参数之间的关系^[13-14].



超导带材的电阻率与通过电流密度的大小有 关. *J* 为流过带材的电流密度, *J*_c 为带材的临界电 流密度. 在式(1)和(2)中, *E*₀ 为超导带在通过临界 电流 *I*_c 条件下的电场强度, *E*₀ = 1 μ V·cm⁻¹;根据 典型的高温超导带的临界电流特性的分析, *n*₁ = 2.8, *n*₂ = 30. 图 2 的等效电路中 $\rho_1(J)$ 和 $\rho_2(J)$ 分 别由公式(1)和公式(2)构建. 当 0 < *J* < *J*_c 时,带 材处于超导态,设此范围内超导层的电阻率为零. 当 *J*_c ≤ *J* < 3*J*_c 时,该带材超导层的电阻率为 $\rho_1(J)$. 当电流达到 *J* ≥ 3*J*_c 时,带材将迅速失去超 导性能,进入正常态. 这个急剧的变化过程中,超导 层的电阻率为 $\rho_1(J)$ 和 $\rho_2(J)$ 两个电阻率之和. 公 式(3)中 ρ 为超导带材的总电阻率, ρ_{sat} 为稳定层电 阻率.本文设计的 SFCL 样机所用超导带材的稳定 层材料为铜.在故障情况下稳定层为铜层的 YBCO 带材相对于稳定层为不锈钢层的 YBCO 带材稳定 性好,超导带材的选择是在稳定性和经济性之间的 折中选择.

$$\rho_{1} = \begin{cases}
0, & |J| < J_{c} \\
\frac{E_{0}}{|J|} \left(\frac{|J|}{J_{c}} - 1 \right)^{n_{1}}, & |J| \ge J_{c} \\
0, & |J| < 3J_{c}
\end{cases}$$
(1)

$$\rho_{2} = \begin{cases} \frac{|J|}{|J|} + \frac{|J|}{|J|} \\ \frac{|J|}{|J|} + \frac{|J|}{|J|} \\ \frac{|J|}{|J|} + \frac{|J|}{|J|} \end{cases} (2)$$

图 2 中等效电路的总电阻率如公式(3)所示:

$$\rho = \frac{(\rho_1 + \rho_2) \cdot \rho_{\text{sat}}}{\rho_1 + \rho_2 + \rho_{\text{sat}}} \tag{3}$$

3.2 热模型

YBCO 带材的临界电流受到带材温度变化的 影响,数学模型如公式(4)所示.式中,T 为带材的 温度;参考温度 $T_{ref} = 77$ K; $J_c(T_{ref})$ 为参考温度 T_{ref} 下的临界电流密度;临界温度 $T_c = 92$ K.带材 的失超状态根据临界温度可以分为两个阶段,当 $T_{ref} < T < T_c$ 时,带材的临界电流会随着带材温度 变化而改变.当 $T \ge T_c$,带材变为正常态,超导层 不再具有导电性能,此时 $J_c = 0$.

$$J_{c} = \begin{cases} J_{c} (T_{ref}) \frac{(T_{c} - T)^{a}}{(T_{c} - T_{ref})^{a}}, \ T_{ref} < T < T_{c} \\ 0, \ T \ge T_{c} \end{cases}$$

(4)

并网运行中出现短路故障时,带材发生失超.电流从超导层转移至 Cu 稳定层,流过带材的电流产 生焦耳热.根据热平衡的关系,电路中带材产生的焦 耳热转化为带材的温升^[15].同时,YBCO 带材与液 氮环境进行对流换热,热交换的数学模型为公式 (5). h 为热交换的效率; S 为带材液氮的接触面 积, P_{cool} 为液氮带走的散热量.

$$P_{\rm cool} = hS(T - T_{\rm ref}) \tag{5}$$

$$\Delta T = \frac{I^2 R_{sc} - P_{cool}}{dALc} \tag{6}$$

公式(6)为 YBCO 带材温度变化的数学模型, c 为超导带材的比热容; I 为通过带材的电流; R_{sc} 为 YBCO 带材的等效电阻; d 为超导带材的密度; A 为超导带材的横截面积, L 为超导带材的长度.

3.3 构建超导限流单元的模型

图 3 为构建超导限流单元模型的程序流程图. 该模型包含了等效电路模型和热模型.当电网系统 发生短路故障时,通过 YBCO 带材的电流将会增 加.利用热模型中温度与临界电流关系的数学模型 计算出此时的临界电流.超导限流单元的模型接收 到采集系统送入的电路电流.将临界电流与电路电 流送入到等效电路模型,计算出带材的等效电阻.将 等效电组和通过超导限流单元的电流输入到热模型 中计算出带材的温度的变化.将此次计算得到的等 效电阻、变化后的温度和采集到的电流值输出,并在 虚拟示波器上显示.判断设定时间是否到达,如果时 间到达,结束流程,否则返回到采集工作电流处继续 运行.



图 3 超导限流单元程序流程图

4 并网运行系统的建模与仿真分析

4.1 并网运行系统的建模

使用 Matlab/Simulink 软件构建 SFCL 的并网运行仿真模型,如图 4 所示,用来评估 SFCL 的并网运行特性.该仿真模型包含 10 kV 等级的三相交流电网系统模型和超导限流器模型.

4.2 运行特性仿真分析

仿真系统开始运行时,将保护断路器合闸,开关 K1闭合.运行过程中,保持开关 K2断开,将电容 Cf 接入电路,充当两相间的负载.运行 100 ms 后,将合 闸断路器闭合,接通电路.运行 500 ms 将开关 K3 闭合,将 SFCL 接入到运行电路.在系统运行 1.015 s 后将开关 K2 闭合,模拟并网运行中的相间短路故 障.在 K2 闭合 10 ms 内将支路 2(超导支路)断开, 即断开 K1.系统进入电抗器二次限流阶段,运行 400 ms 后将保护断路器和合闸断路器断开结束



图 4 SFCL 的并网运行仿真模型



图 5 有 SFCL 和无 SFCL 的电路电流



如图 5 所示,在仿真电路稳态运行时,含有 SFCL和不含有 SFCL的电流是一样的.发生相间 短路故障后,带材失超产生的电阻和电抗器会使得 含有 SFCL的电流小于不含有 SFCL的电流.在出 现故障 10 ms 后由于支路 2 断开,图 6 中支路 2 的 电流变为 0.如图 7 为超导限流单元的温度变化曲 线,液氮环境下温度为 77 K,在大电流通过超导带 材的 10 ms 内产生焦耳热,带材的温度迅速上升,最 高达到 97.2 K,未达到超导带材的损坏温度值.支路 2 被切断后,液氮和带材对流换热,带材的温度开始逐渐下降.如图 8 所示,在出现故障后,超导限流单元失超产生电阻.在支路 2 切断后,阻值在温度降到 92 K 以下时开始下降.综合上述结果,该模型在 10 kV 电网运行中出现相间短路故障时,能够产生 阻抗限制短路电流.切断支路 2 后,双分裂电抗器能够进行二次限流.该模型反映的带材温度和电阻的变化显示出 SFCL 未遭到损坏.



5 并网运行试验

在中国国网辽宁电力公司虎石台试验站对 SFCL进行了10kV并网运行试验,如图9为SFCL 的并网试验的现场图.

试验时,先让 SFCL 通过 100 A 的稳态电流.通 • 0189 •



图 9 SFCL 并网测试现场图

过快速开关将两相间短路,产生大电流.如图 9 所示,故障发生 10 ms内,支路 2 被切断,支路 2 电流 变为 0.支路 2 切断后,由于双分裂电抗器的二次限 流,系统电流为 884 A,小于不接入 SFCL 的电路电 流.如图 10 所示,10 ms 故障下 SFCL 的试验电流 和仿真电流波形相近,说明仿真模型可以近似的模 拟出 SFCL 的运行特性.故障发生后超导限流单元 的电阻值逐渐增加,最大为 1.21 ohm,满足设计 要求.



图 10 ns 故障下 SFCL 支路电流的试验波形



图 11 10 ms 故障下 SFCL 试验和仿真电流对比

太 I 试验结果表	
工况条件	试验结果
电路中不含 SFCL 时	稳态运行电流 100 A
	故障下的电流 998 A
电路中含 SFCL 时,对超导 线圈故障下冲击 10 ms	稳态运行电流 100 A
	故障下的电流为 884 A
	失超阻值最大达到 1.21 ohm
失超恢复时间	720 ms
失超响应时间	小于 10 ms

.

重复上述试验步骤,在相间短路故障发生 60 ms后切断超导支路.然后,将超导线圈与电网系统 分离,并将其接入失超恢复测量系统.为超导线圈供 1 A 的直流电.采集超导线圈两端电压从 2.03 V 逐 渐降低,当电压降到最高电压的 1%时认为完成失 超恢复.最终判定 SFCL 的失超恢复时间为 720 ms.此次试验的结果见表 1,SFCL 样机承受住了近 10 倍相间短路故障电流冲击,失超响应时间小于 10 毫秒.试验结果表明,SFCL 样机具备 10kV 并网 能力.

5 结 论

在本文中,使用 Matlab/Simulink 构建了 SFCL 并网运行的仿真分析模型,以及对其仿真分析结果 和试验结果进行了分析,为 SFCL 的实际并网运行 提供了理论依据和试验依据.构建的 SFCL 仿真模 型被放入了 10 kV 的三相交流电网系统模型中.该 仿真是在相间短路的故障条件下,研究 SFCL 在实 际系统中的运行效果.仿真分析的结果显示了 SFCL 的故障电流、带材阻值和温度的变化.对 SFCL 进行的 10kV 并网运行试验表明了 SFCL 的 故障电流和带材阻值的变化,以及超导限流单元的 失超恢复时间.仿真分析和试验的结果表明,本文中 的 SFCL 承受住了近 10 倍相间短路故障电流冲击, 失超响应时间小于 10 毫秒,具备 10 kV 并网运行 能力.

参考文献

- [1] M. Noe and M. Steurer. Superconductor Science and Technology. 20(2007), 15.
- [2] 刘路昕,张京业,戴少涛,等. 低温与超导,2016,44(7):1.
- [3] Jian Xun Jin, Yue Jin Tang, Xian Yong Xiao, et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 26 (2016), 3800526.
- [4] Li B, Wang C, Wei Z, et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 28(2018): 1.
- [5] 褚建峰, 孟向军. 直流 SMC 铁心高温超导故障限流器的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, **42**(13): 59.
- [6]张志丰,肖立业,邱清泉,等.电工技术学报,2015,30 (6):169.
- [7]涂春鸣,姜飞,郭成,等. 电工技术学报,2015,30(16):146.
- [8] Zhu Jiahui, Zheng Xiaodong, Qiu Ming, et al. Energy Proce-

dia,75(2015),716.

- [9] 刘凯,陈红坤,林军,等. 电力系统保护与控制,2010,38 (7):147.
- [10] Shizhuo L, Dong X, Qingquan Q, et al. Physica C: Superconductivity and its Applications, 2018.
- [11] Yasuda M, Guan Y, Kawahara T, et al. *IEEE Transactions on* Applied Superconductivity, 2011, **21**(03):1319.
- [12] 龚珺,诸嘉慧,方进,陈盼盼,丘明.电工技术学报,2018, 33 (9):2130.
- [13] J. Duron, B. Dutoit, F. Grilli, et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2), 1839.
- [14] J. Duron, F. Grilli, L. Antognazza, M. Decroux, et al. Superconductor Science and Technology, 2007, 20(4): 338.
- [15] 柯其琛,徐国顺,庄劲武,等. 低温与超导,2019,47(12):25.