

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190577

基于 PSCAD 的饱和铁心型超导限流器性能分析

王通¹, 姚磊¹, 奚培锋², 常路宇¹, 李之豪¹, 耿延¹

(1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093; 2. 上海市智能电网需求响应重点实验室, 上海 200063)

摘要: 为了准确分析饱和铁心型超导故障限流器性能, 根据参数设计要求建立了限流器三段式数学模型。研究了其不同工作区间的静态特性以及在短路限流过程中的阻抗变化。在单机系统无穷大系统中, 针对限流器阻抗变化将故障过程细分为不同阶段分析其对暂态稳定造成的影响。通过 PSCAD 仿真发现, 串入固定感抗模型与限流器模型后极限切除时间分别为 0.31 s 和 0.21 s。结果表明限流器具有较好的限流作用, 提高了系统的暂态稳定性, 且该模型能得到更准确的极限切除时间。

关键词: 超导; 饱和铁心; 阻抗变化; 暂态稳定; 极限切除时间

Performance analysis of saturated core-type superconducting current limiter based on PSCAD

WANG Tong¹, YAO Lei¹, XI Peifeng², CHANG Luyu¹, LI Zhihao¹, GENG Yan¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Smart Grid Demand Response, Shanghai 200063, China)

Abstract: In order to accurately analyze the performance of the saturated iron core type superconducting fault current limiter, a three-stage mathematical model of the current limiter is established according to the requirements of parameter design. The static characteristics in different working areas and the impedance changes during short-circuit current limiting are studied. In the single machine infinite bus system, the fault process is subdivided into different stages for the change of the current limiter impedance to analyze its impact on transient stability. Through PSCAD simulation, it is found that the critical clearing time of the fixed inductance model and the current limiter model are 0.31s and 0.21s respectively. The results show that the current limiter has better current limiting effect and improves the transient stability of the system, and the model can obtain more accurate critical clearing time.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707121) and Shanghai Science and Technology Commission Project (No. 18DZ1203502).

Key words: superconducting; saturated core; impedance change; transient stability; critical clearing time

0 引言

随着国民经济快速发展, 人类对电能的需求也不断提高。电网规模日益增加, 短路电流水平和容量也在不断提高, 对电网的安全稳定运行以及现有电气设备带来严重威胁^[1-3]。超导故障限流器(Superconducting Fault Current Limiter, SFCL)作为目前最为理想的短路故障电流限制装置, 在电力行业中的应用日益增加。SFCL 主要利用超导体在一定条件下的状态改变来限制故障电流^[4-5]。其中饱和

铁心型 SFCL 利用超导材料的零电阻以及载流密度大的特性对铁心进行励磁, 通过改变铁心磁化状态实现阻抗的变化^[6]。

国内外针对饱和铁心型限流器已进行大量研究, 美国 Zenergy 公司在 2009 年研制出 15 kV/24 MVA 的饱和铁心型 SFCL 并通过测试^[7], 北京云电英纳已在 2012 年研制出 220 kV 饱和铁心型 SFCL 并在天津石各庄成功挂网运行^[8]。饱和铁心型 SFCL 能显著减少系统的暂态电流, 并且能够在一定程度上提高电能质量^[9-10]。文献[11]基于基本饱和铁心型 SFCL 提出结构改进, 在故障期间快速切断直流电流并及时在交流绕组中投入电阻使得限流性能得到进一步提升。文献[12]基于基本饱和铁心型 SFCL

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51707121); 上海市科委计划项目资助(18DZ1203502)

提出结构改进, 将串联补偿与饱和铁心型限流器结合实现多功能的限流效果。饱和铁心型 SFCL 除了在限流方面具有优势, 接入系统后在其限流过程中产生变化的阻抗, 改变了系统结构参数, 从而也将影响系统的暂态稳定^[13-16]。文献[17]采用直接法建立瞬态能量函数判断电阻型 SFCL 接入三机系统, 故障处于不同位置时对电力系统暂态稳定的影响。文献[18]考虑运行损耗的故障限流器布置点优化和容量选择实现多目标函数的优化。文献[19-20]分析了高温超导限流器和超导储能装置共同配合下, 对系统的暂态稳定性所产生的积极影响。以上文献都具体分析了限流器接入对电力系统的影响, 都在短路故障期间将限流器等效为固定电阻或电抗来进行分析。在实际应用中其阻抗随着短路过程中流经的电流变化而变化, 故对 SFCL 进行进一步的精确建模有着重要的意义。

本文利用 PSCAD/EMTDC 软件进行仿真^[21], 通过饱和铁心型 SFCL 的精确建模, 对限流器静态特性进行研究并考虑短路期间限流器的阻抗变化。最后将饱和铁心型 SFCL 接入单机无穷大系统, 分析其对系统暂态稳定造成的影响, 为限流器的研发与应用提供一定参考。

1 饱和铁心型 SFCL 工作原理及参数设计

饱和铁心型 SFCL 由一对铁心电抗器组成, 如图 1 所示, 每个铁心由一个交流限流铜绕组和一个直流超导绕组采用松耦合方式进行耦合, 其中一个铁心内的直流磁场与交流磁场同向, 另一个反向, 分别在故障电流正半周以及负半周起到限制作用。

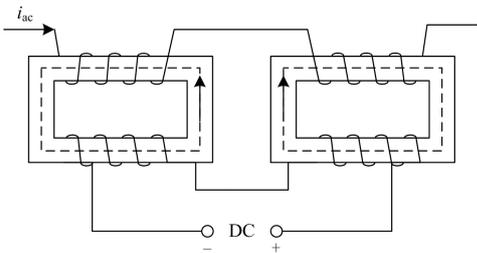


图 1 饱和铁心型超导限流器结构图

Fig. 1 Structure of saturated core type superconducting current limiter

正常情况下, 直流偏置电源为超导绕组提供远大于交流励磁的直流励磁电流, 此时铁心内磁通几乎保持不变, 根据法拉第电磁感应定律, 感应电动势几乎为零, 交流绕组便处于低感抗状态。当系统发生短路故障时, 瞬间突然增大的短路电流使其中一个铁心脱离饱和状态, 铁心磁导率增大, 随之在

交流线圈中引起磁通量的变化, 交流绕组上产生感应电动势, 具有电压降, 产生高感抗, 从而限制了短路电流。

为使限流器满足限流、尺寸等要求, 需要对限流器进行合理的参数设计。

(1) 电网发生故障时, 假设限流器铁心中磁通按正弦规律发生变化。

$$\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t = B_m S \sin \omega t \quad (1)$$

根据法拉第电磁感应定律。

$$\sqrt{2}U = 2\pi f N_{ac} B_m S \quad (2)$$

式中, B_m 、 S 、 U 、 N_{ac} 分别为磁通密度最大值、铁心截面积、限流器所在电网额定相电压以及交流铜绕组线圈匝数。

(2) 短路时需要将短路电流限制在一定范围内, 以避免设备受过电流损坏。在这里引入限制系数 $k(0 < k < 1)$, k 越大, 故障期间感抗越大, 限制电流的能力越强。设计限流器时感抗值应满足以下要求, 其中 I 为额定相电流。

$$2\pi f N_{ac}^2 \frac{\mu S}{l} \geq k \frac{U}{I} \quad (3)$$

(3) 铁心将限流器交直流绕组耦合, 正常工作时, 交流绕组流过电流峰值为 $\sqrt{2}I$, 两铁心需始终处于饱和状态, 对其中一铁心应用安培环路定理, 式(4)为使铁心始终处于饱和的临界条件。

$$N_{dc} I_{dc} - N_{ac} \sqrt{2}I = H_s l \quad (4)$$

式中, N_{dc} 、 H_s 、 l 分别为直流超导绕组线圈匝数、铁心的饱和磁场强度以及铁心磁路长度, 将式(4)改为不等式即得计算限流器参数的第三个公式。

$$N_{dc} I_{dc} - N_{ac} \sqrt{2}I \geq H_s l \quad (5)$$

(4) 确定铁心截面积 S 和磁路长度 l 后, 铁心所围成窗口为正方形时面积最大, 应保证交流绕组和直流超导绕组都能从中穿过。当铁心截面为圆形时, 限流器参数应满足式(6), 其中 $J_{铜}$ 为铜导线允许的电流密度, I_{dc} 为超导绕组电流。

$$(l/4 - 2\sqrt{S/\pi})^2 \geq \frac{N_{ac} I + N_{dc} I_{dc}}{J_{铜}} \quad (6)$$

同时满足上述条件的任意一组 S 、 l 、 N_{ac} 、 N_{dc} 参数都能用来构成限流器。为便于分析, 可将满足条件的限流器磁化曲线看成由三段不同斜率的直线构成, 理想化后饱和铁心型 SFCL 的磁化曲线如图 2 所示。

图 2 中, 曲线 1 表示无直流偏置时单个铁心的磁化曲线, 由两段斜率不同的线段构成, i_1 和 ψ_1 分别为铁心的饱和电流与饱和磁链^[22]。曲线 2、3 为加入直流偏置后两铁心的磁化曲线, 将两者叠加得

到限流器整体的磁化曲线 4，在 I 阶段，限流器工作在正常状态，两铁心均处在饱和状态；在 II 阶段，限流器工作在限流状态，两铁心交替起到限流作用；随着短路电流持续增加，限流器进入 III 阶段，两铁心分别处于正、反向饱和阶段，失去限流作用。

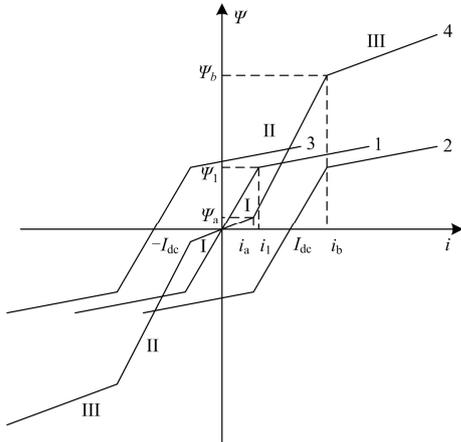


图 2 饱和铁心型超导限流器 $\psi-i$ 特征曲线

Fig. 2 Characteristic curve of $\psi-i$ in saturated core type superconducting current limiter

2 SFCL 静态特性分析

在 PSCAD 软件中自定义组件，构造一个由 3 段不同斜率的直线构成的 $\psi-i$ 曲线。研究不同工作区段内磁链以及电压降变化情况，限流器在 600~2 000 A 时起限流作用，限流期间电感为 0.4 H。

(1) 正常运行时，铁心始终处于饱和状态，限流器具有较小电感，对系统无影响，如图 3。

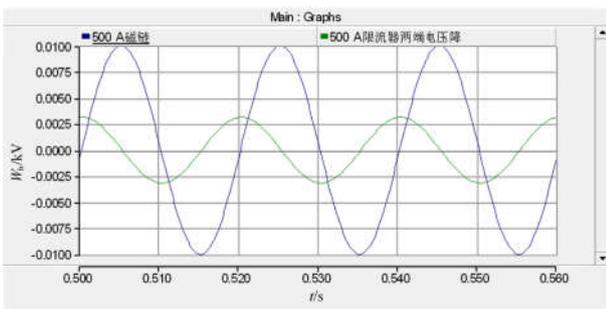


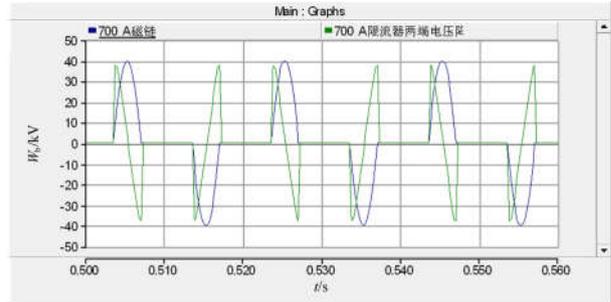
图 3 500 A 时限流器两端电压降及磁链变化

Fig. 3 Voltage drop and flux change of the current limiter in case of 500 A

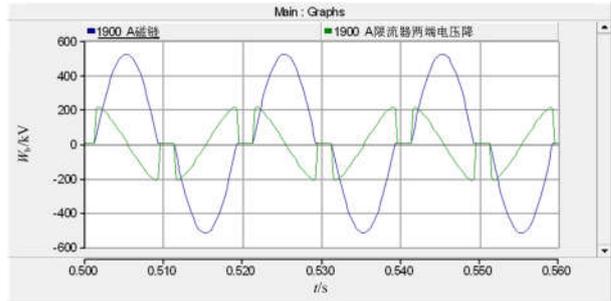
(2) 电流幅值处于 $i_a - i_b$ 时，SFCL 两端电压降及磁链变化如图 4 所示。

由图 4 可知，在电流正半周期，当电流小于 i_a 时与情况(1)一致，限流器两端电压降对系统不产生影响。图 4(a)中，随电流逐渐增加，磁链急剧增加，感应电动势所产生电压降达到最大值。电流达到最

大值时，此时对磁链做差分所得电压降为零。电流正半周期下降阶段，磁链也随之下降，感应电动势在限流器两端所产生电压降为负值，电压绝对值随电流下降逐渐增大，当电流继续下降使得铁心再次进入饱和区时，磁链变化立刻趋于平缓，限流器两端电压降骤降，对系统无影响，电流负半与正半周期同理。图 4(b)中交流电流幅值越接近 i_b ，限流器两端电压降越大，在一个周期内作用时间越长，限流效果越好。



(a) 700 A 时限流器两端电压降及磁链变化



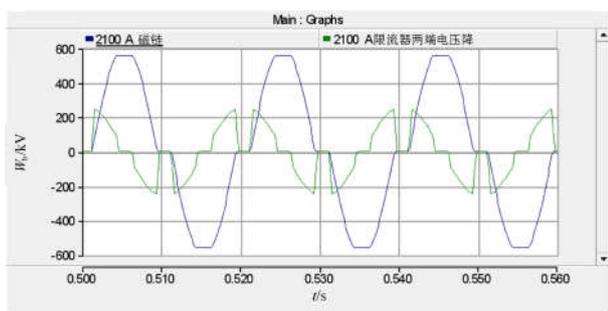
(b) 1900 A 时限流器两端电压降及磁链变化

图 4 不同电流幅值下故障限制状态对比

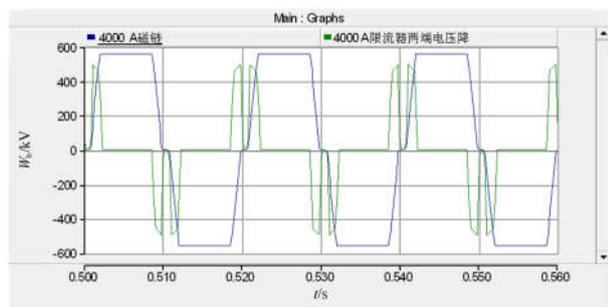
Fig. 4 Comparison of fault limiting states under different current amplitudes

(3) 交流电流幅值超过限流上限时，在电流正半周，当电流小于 i_a 时，对系统运行不产生影响。电流超过 i_a 时，磁链急剧增加，限流器两端电压达到最大值，随着电流继续增加电压降也逐渐降低。电流增加至 i_b 时，两铁心分别处于正反向饱和状态，磁链基本维持在最大值保持不变，电压可以忽略不计，失去限流作用，如图 5 所示。

由图 5 可知，电流下降阶段，电流下降至 i_b 时，铁心再次进入非饱和状态，磁链由最大值逐渐衰减，随着电流的减少，电压逐渐反向增加，电流下降到 i_a 时，电压降达到最大值，电流从 i_a 继续下降再次回到饱和状态，两端电压接近于零。电流负半周期与正半周期同理。图 5(b)中，随着交流电流幅值的增加，限流器处于非限流状态的时间不断增加，限流效果越差。



(a) 2 100 A 时限流器两端电压降及磁链变化



(b) 4 000 A 时限流器两端电压降及磁链变化

图 5 不同电流幅值下限流器失效状态对比

Fig. 5 Comparison of failure states of current limiter with different current amplitudes

3 SFCL 短路阻抗变化分析

在短路故障过程中由于短路电流中存在非周期分量, 使得短路电流在不同周期内是变化的, 并且正副半周并不对称, 导致短路期间铁心所工作的磁化曲线区间也是在变化的, 所以限流器阻抗在每个周波的变化也不同。以 20 ms 为一个周期进行分析, 限流器在每个周期的等效电感也会产生变化。如图 6 所示, 在单相回路中对饱和铁心型 SFCL 进行阻抗分析。

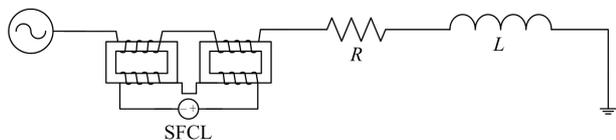


图 6 单相饱和铁心型 SFCL 等效回路

Fig. 6 Equivalent circuit of single-phase saturated core type SFCL

图 6 中, 电压等级为 220 kV, 相电压有效值为 127 kV 线路中, 短路故障在 1 s 时发生, 持续 0.2 s 后线路断开, 故障期间线路电流如图 7 所示。

可以看出, 正常运行时电流有效值为 0.4 kA, 故障发生后短路电流峰值达到 9 kA, 加入前文所述 SFCL 后短路电流峰值下降为 4.6 kA, 达到稳定状态后, 电流有效值从 5.2 kA 下降到 1.4 kA, 限流效果显著。

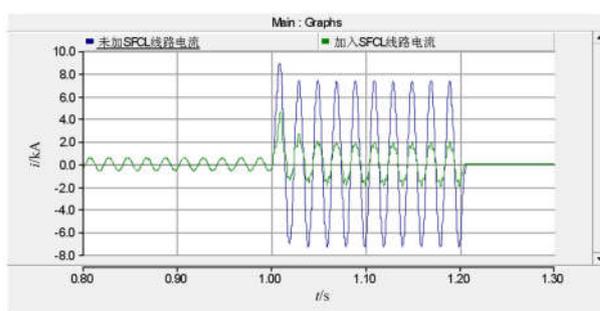


图 7 短路期间线路电流比较图

Fig. 7 Comparison of line current during short circuit

短路故障期间流经限流器电流并不是正弦电流, 所以每个周期限流器限流时间也并不相等, 图 8 为限流器在短路故障期间电感值。

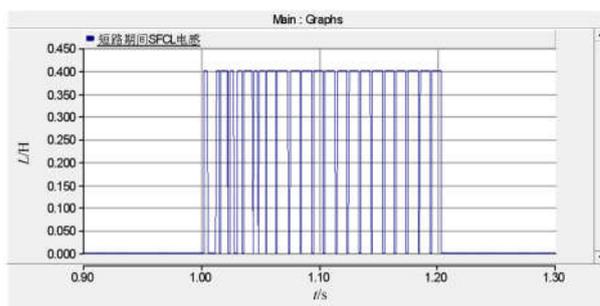


图 8 短路期间 SFCL 电感

Fig. 8 SFCL inductance during short circuit

由图 8 可知, 在非限流期间电感几乎为零, 在限流期间电感为 0.4 H。故障初始阶段, 限流电流并未完全限制在限流范围内, 每个周期内限流时间较短, 随着线路中电流逐渐稳定, 每个周期内处于限流范围内的时间逐渐增加并趋于稳定。为便于分析, 将每个周期内电感积分后取均值替代原变化的电感。每隔 20 ms 对 SFCL 电感进行积分, 如式(7)求得每个积分周期内的电感均值作为等效电感。

$$L_{eq} = \int_{t_0}^{t_0+T} L(t)dt / T \quad (7)$$

等效后故障期间电感如图 9。

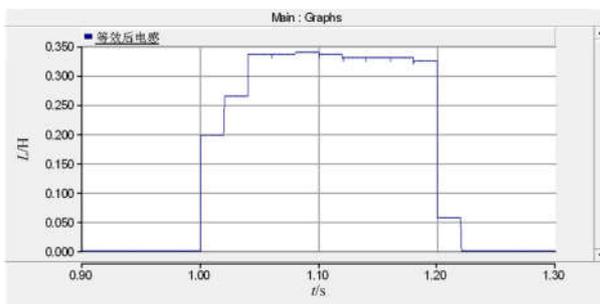


图 9 短路期间 SFCL 等效电感

Fig. 9 SFCL equivalent inductance during short circuit

将接入等效电感与接入限流器后的电流进行比较,如图 10 所示,可以看出两者电流波形在非短路期间一致,在短路期间也接近,证明了等效电感的有效性。

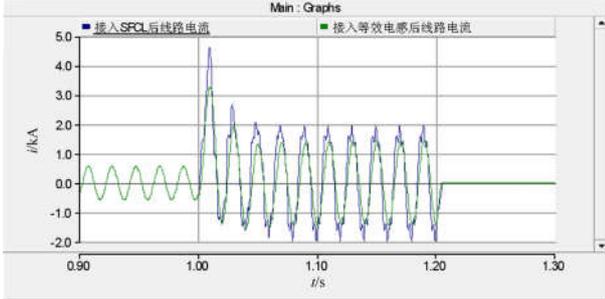


图 10 短路电流比较图

Fig. 10 Comparison of short circuit current

4 SFCL 接入对系统暂态稳定影响

超导限流器接入电网,故障期间限流器的快速响应改变了电网参数,导致系统的整个暂态过程发生变化。以单机系统为例,发电机经变压器与双回路输电线路接入无穷大电网,在双回路上均设有 SFCL,且线路两端设有断路器,如图 11 所示。

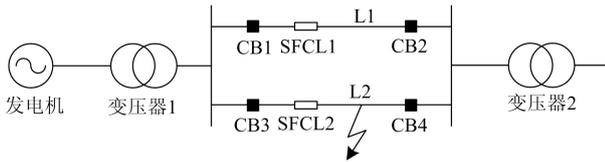


图 11 单机无穷大系统示意图

Fig. 11 Schematic diagram of single machine infinite bus system

系统正常工作时,限流器表现为低阻抗,对系统运行不产生影响,系统总电抗及发电机输出功率特性表达如下。

$$X_{\Sigma 0} = X'_d + X_{T1} + \frac{1}{2}X_L + X_{T2} \quad (8)$$

$$P_0 = \frac{E'U}{X_{\Sigma 0}} \sin \delta \quad (9)$$

式中: X'_d 、 X_{T1} 、 X_{T2} 、 X_L 、 δ 分别为发电机内部暂态等值电抗、变压器等值电抗、线路等值电抗以及发电机功角。

在线路 L2 首端发生三相短路故障,故障后分三阶段对系统进行分析,由于系统各装置电阻较小,分析时忽略不计。第一阶段由于线路 L2 发生三相短路故障, SFCL 还未投入阻抗,发电机对外输出功率几乎为零,由于超导限流器快速响应,导致这一阶段十分短暂,此阶段系统总电抗及发电机输出功率为

$$X_{\Sigma 1} = \text{inf} \quad (10)$$

$$P_1 = 0 \quad (11)$$

第二阶段超导限流器快速响应投入阻抗,系统总电抗产生变化导致发电机输出功率特性随之产生变化,三相短路时附加阻抗为零,该阶段系统等效电路如图 12 所示。

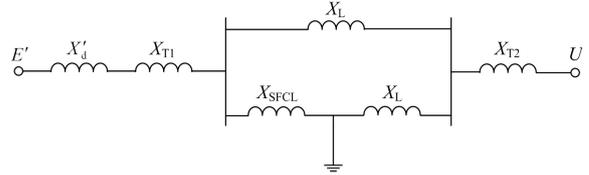


图 12 第二阶段输电线路图

Fig. 12 Transmission line diagram of the second stage

经过星三角等效变换后,输电线路如图 13 所示。

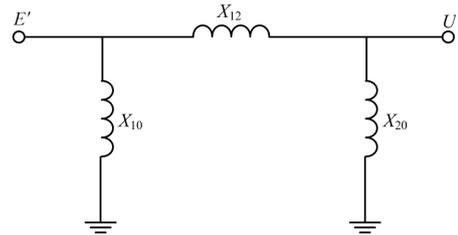


图 13 等效变换后第二阶段输电线路图

Fig. 13 Transmission line diagram of the second stage after equivalent transformation

此阶段系统总电抗及发电机输出功率特性为

$$X_{\Sigma 2} = X_{12} = A_1 + \frac{(X'_d + X_{T1})(X_{T2} X_{SFCL} + A_2)}{X_{SFCL} X_L} \quad (12)$$

$$P_2 = \frac{E'U}{X_{\Sigma 2}} \sin \delta \quad (13)$$

式中: $A_1 = X'_d + X_{T1} + 2X_{T2} + X_L$; $A_2 = 2X_L X_{T2} + X_L^2$ 。故障期间随着超导限流器电抗值 X_{SFCL} 增加,系统总电抗减少,发电机输出电磁功率增加,减少了加速面积,考虑限流器电抗的动态变化,可将第二阶段细分为不同部分。

第三阶段线路 L2 两端断路器及时动作切除故障线路,系统总电抗及发电机输出功率为

$$X_{\Sigma 3} = X'_d + X_{T1} + X_L + X_{T2} \quad (14)$$

$$P_3 = \frac{E'U}{X_{\Sigma 3}} \sin \delta \quad (15)$$

综上所述,将系统正常运行以及故障后三阶段的功角特性曲线绘制如图 14。

图 14 中,故障发生前,发电机工作在 P_0 曲线上 a 点,此时电磁功率与机械功率 P_T 相同,发电机功角为 δ_0 。发生三相短路故障后,故障点电压跌落

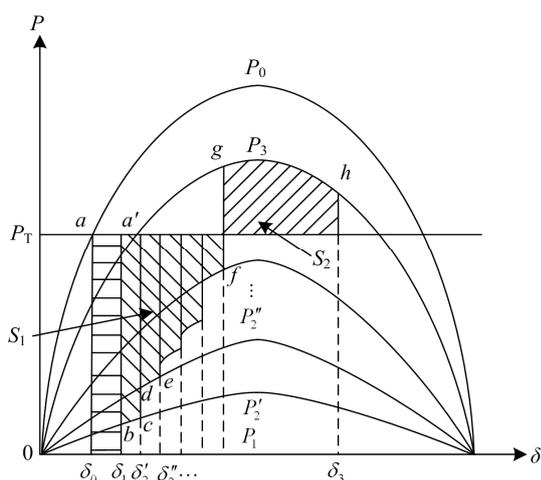


图 14 各阶段系统功角曲线图

Fig. 14 Power angle curves of the system in each stage

至零, 发电机无法输出有功功率, 功角特性曲线为 P_1 , 发电机功角增大至 δ_1 。经过短暂的响应时间后进入第二阶段, 超导限流器开始作用并改变系统阻抗, 假设第二阶段各部分限流器等效电感逐渐增加, 功角特性曲线首先变为 P_2' , 发电机机械功率大于电磁功率, 发电机运行点在曲线上由 b 点运行至 c 点, 随后由于 SFCL 阻抗的动态变化导致功角特性曲线逐渐上移, 转子过剩功率逐渐减少, 但仍是加速性的, 第二阶段结束后, 发电机运行点沿功率曲线运行至点 f , 第一阶段与第二阶段系统加速面积为 S_1 。继电保护装置断开故障线路后进入第三阶段, 保护装置作用切除故障线路, 切除瞬间功角保持不变, 发电机运行点由 f 点转移至 g 点, 此时发电机电磁功率大于原动机机械功率, 过剩功率变为减速性, 转子转速逐渐降低但仍大于同步转速, 功角继续增大, 当运行到点 h 时转子转速到达同步转速功角达到最大值 δ_3 , 第三阶段减速面积为 S_2 。受减速性过剩功率影响转子继续减速, 功角开始减小, 如果不计能量损失, 工作点将不断来回变动, 考虑系统中存在阻尼, 发电机经过减幅振荡后最终稳定在新的平衡点 a' 。

若无 SFCL 的接入, 故障期间发电机无法输出有功功率, 功角特性曲线始终为 P_1 , SFCL 接入后, 故障期间发电机输出功率增加, 减少了加速面积, 提高了系统暂态稳定性。

在 PSCAD 中搭建单机无穷大系统进行仿真, 系统参数如下: 发电机 $S_{GN}=150$ MVA, $U_{GN}=13.8$ kV, $f=50$ Hz, $X'_d=0.314$ pu; 变压器 T1 $S_{TN1}=150$ MVA, 变比为 13.8 kV/242 kV; 线路阻抗 $X_L=0.31$ Ω /km, 长度 $l=100$ km; 变压器 T2 $S_{TN2}=150$ MVA, 变比

为 220 kV/110 kV; 无穷大系统 $U=110$ kV。在 8 s 时发生三相短路故障, 0.2 s 后继电保护动作, 故障切除。

首先分别将限流器模型、固定感抗模型分别接入系统, 与无限流器的系统进行比较, 故障期间短路电流如图 15 所示。

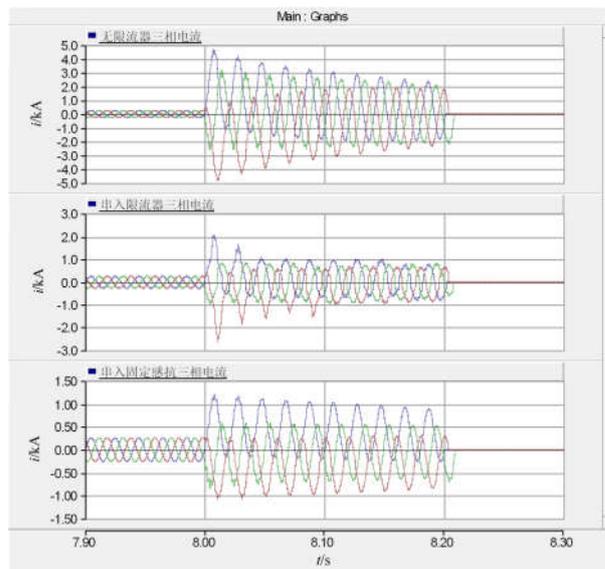


图 15 故障线路中短路电流图

Fig. 15 Short-circuit current diagram of the fault circuit

由图 15 可知, 以蓝色 a 相电流为例, 无故障限流器时短路电流峰值达到了 4.66 kA, 串入限流器后短路电流峰值下降为 2.05 kA, 下降比例达到 56.0%。串入固定感抗后由于电感的持续作用使得短路电流峰值变得更小, 为 1.20 kA。但由于时间常数的增加使得电流的下降过程增加, 需要更多时间电流才能趋于稳定。另一方面, 由于限流器的投入改变了故障期间的功角曲线, 增加了电磁功率的输出, 因此发电机转子转速得到了抑制, 从而发电机功角摇摆幅度也得到减少, 仿真结果如图 16、图 17 所示。

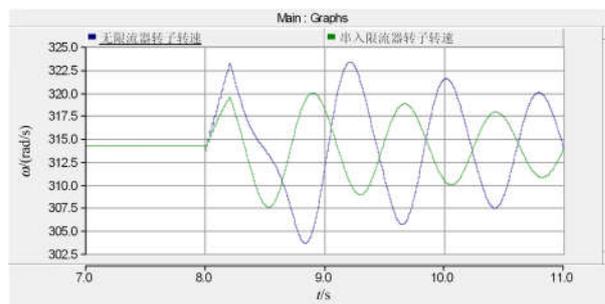


图 16 转子转速曲线示意图

Fig. 16 Schematic diagram of rotor speed curve

图中，发电机转子转速在故障期间的最大值由 323.30 rad/s 下降到 319.95 rad/s，从而功角曲线也得到了显著改善，由于无限流器系统此时已处于即将失稳边缘，需要更多时间恢复到同步转速，导致功角首摆时间增加，且摆幅相比于串入限流器明显增加，首摆功角达到 2.57 rad，相比于串入限流器增加了 0.97 rad。在线路中投入不同感抗值的故障限流器，故障期间功角曲线如图 18 所示。

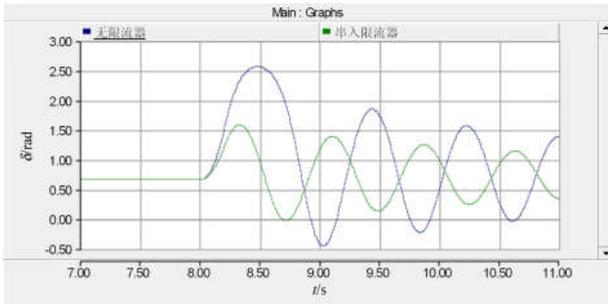


图 17 功角曲线示意图

Fig. 17 Schematic diagram of power angle curve

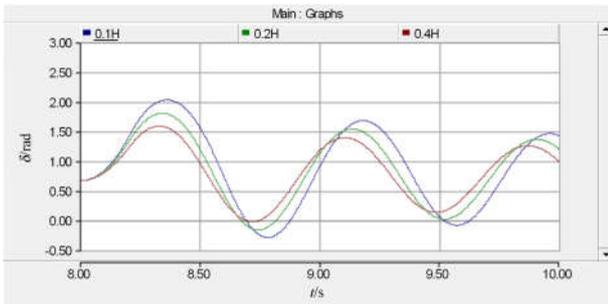


图 18 不同感抗故障限流器对系统暂态稳定的影响
 Fig. 18 Influence of fault current limiters with different inductors on transient stability of the system

图 18 中，限流器感抗值越大，故障期间功角摆幅逐渐越小，系统暂态稳定性得到提高。这是因为随着限流器感抗的增加，系统在故障期间的转移阻抗逐渐减小，输出的电磁功率得到增加，减少了加速面积，更有利于暂态稳定。将该限流器模型与固定感抗模型进行对比，两者功角曲线如图 19 所示。

图 19 中，由于限流器模型在故障期间每个周波内只对限流范围内的短路电流起到限流作用，而固定感抗模型在故障期间始终投入大电感。总体来说限流器模型在故障期间所投入的平均等效感抗比固定感抗模型更小，使得串入限流器模型相比于串入固定感抗模型所得到的功角曲线摆幅更大，增加了 5.59°。

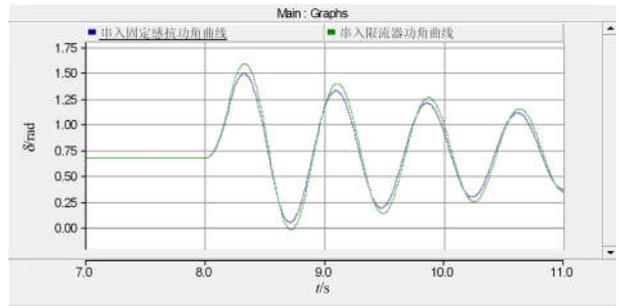
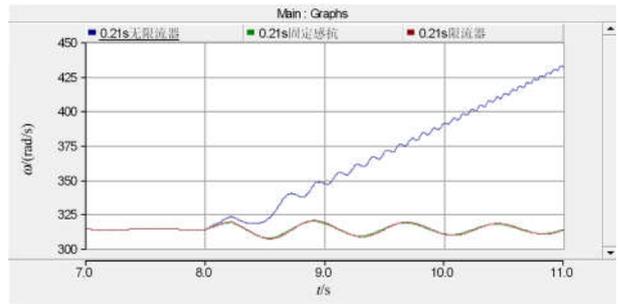


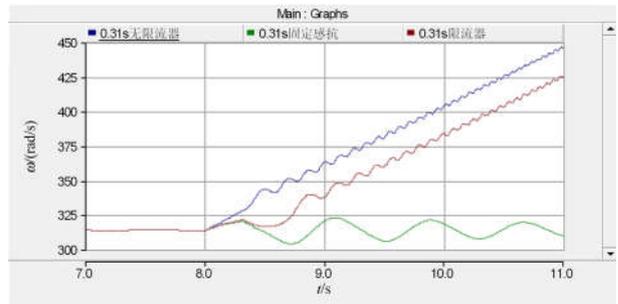
图 19 功角曲线比较图

Fig. 19 Comparison of power angle curves

固定感抗模型与限流器模型都能有效增加极限切除时间，但两者由于模型上的差别会造成极限切除时间的差异。图 20 为不同故障切除时间下各方案的转子转速曲线图。



(a) 故障持续 0.21 s 功角响应曲线



(b) 故障持续 0.31 s 功角响应曲线

图 20 系统功角曲线对比

Fig. 20 Comparison of system power angle curves

图 20(a)中，故障切除时间为 0.21 s，未装设限流器的系统中发电机已失去同步，装设限流器后发电机转速经振荡后依旧可以维持同步。图 20(b)中故障延迟至 0.31 s 切除，由于考虑故障期间阻抗的变化，装设限流器的系统已无法维持同步转速，而接入固定感抗的系统依然能保持发电机的同步。因此串入限流器模型相比于固定感抗的极限切除时间更短，结果更加准确。

5 结论

本文对饱和铁心型在设计过程中应满足的参数要求进行总结, 在 PSCAD 中搭建模型, 分析在不同工作区间下 SFCL 的静态性能, 证明了 SFCL 在短路故障过程中的阻抗动态变化并对其进行等效。在 PSCAD 中将限流器接入单机无穷大系统并与无限流装置时进行比较, 在三相短路情况下分析了由于 SFCL 阻抗的变化导致系统短路期间输出功率的改变过程以及对暂态稳定造成的影响。仿真结果证明线路中加入限流器后, 系统暂态稳定得到明显提高, 并且与所投入故障限流器的电感呈正相关, 增加了故障极限切除时间, 与串入固定电感相比, 可得到更为准确的极限切除时间。

参考文献

- [1] 杨振纲, 李力, 李扬絮, 等. 广东电网短路电流超标问题及对策[J]. 南方电网技术, 2011, 5(5): 90-93.
YANG Zhengang, LI Li, LI Yangxu, et al. The issue of short-circuit current being out of limitation in Guangdong power grid and related countermeasures[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(5): 90-93.
- [2] 娄宝磊. 超高压电网串联谐振型短路电流限制器关键技术[J]. 中国电力, 2017, 50(6): 56-61.
LOU Baolei. Research on key technologies of series resonant type fault current limiters for EHV grid[J]. Electric Power, 2017, 50(6): 56-61.
- [3] 侯玉婷, 李晓博, 刘畅, 等. 火电机组灵活性改造形势及技术应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 8-13.
HOU Yuting, LI Xiaobo, LIU Chang, et al. Flexibility reform situation and technical application of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 8-13.
- [4] ALFEROV D F, Akhmetgareev M R, EVSIN D V, et al. Effect of the rate of the rise in current on transient processes in a superconducting fault current limiter[J]. Technical Physics, 2018, 63(1): 26-31.
- [5] 张谢天, 庄劲武, 高海林, 等. 直流混合型超导限流器强迫换流方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 63-67.
ZHANG Xietian, ZHUANG Jinwu, GAO Hailin, et al. Study on forced commutation method of DC hybrid superconducting fault current limiter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 63-67.
- [6] 信赢, 田波, 魏子镗. 超导限流器基本概念和发展趋势[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(10): 1-7.
XIN Ying, TIAN Bo, WEI Ziqiang. Fundamentals and prospective of superconducting fault current limiters[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering & Energy, 2017, 36(10): 1-7.
- [7] MORICONI F, DE LA ROSA F, DARMANN F, et al. Development and deployment of saturated core fault current limiters in distribution and transmission substations[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21: 1288-1293.
- [8] 信赢. 饱和铁心型超导限流器实用性技术研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(4): 364-372.
XIN Ying. Research and progress in developing key technologies for practical saturated iron-core superconducting fault current limiters[J]. Scientia Sinica Technologica, 2017, 47(4): 364-372.
- [9] 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.
- [10] 吕亚洲, 崔晓丹, 胡阳, 等. 故障限流器对电网安全稳定的影响及应用研究综述[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(7): 25-34.
LÜ Yazhu, CUI Xiaodan, HU Yang, et al. Effects of fault current limiter on the safety and stability of power grid and its application: a research review[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(7): 25-34.
- [11] 赵硕, 张晚英, 张绪红, 等. 新型饱和铁芯型超导限流器的仿真研究[J]. 低温物理学报, 2013, 35(6): 471-475.
ZHAO Shuo, ZHANG Wanying, ZHANG Xuhong, et al. Simulation research on an novel saturated core superconducting fault current limiter[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2013, 35(6): 471-475.
- [12] 姚磊, 钱滢锋, 梅军, 等. 基于铁芯控制的串联补偿型故障限流器[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 169-173.
YAO Lei, QIAN Yingfeng, MEI Jun, et al. Series-compensation-type FCL based on core control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 169-173.
- [13] 雷洋, 田翠华, 魏亮亮, 等. 不同限流阻抗下故障限流器改善风电场故障穿越能力研究[J]. 电网技术, 2015,

- 39(11): 3273-3279.
- LEI Yang, TIAN Cuihua, WEI Liangliang, et al. Fault ride-through capacity enhancement of wind parks by fault current limiters of different limiting impedance[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3273-3279.
- [14] LEE H Y, ASIF M, PARK K H, et al. Feasible application study of several types of superconducting fault current limiters in HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4).
- [15] YANG Yude, SONG Anjun, LIU Hui, et al. Parallel computing of multi-contingency optimal power flow with transient stability constraints[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 204-213. DOI: 10.1186/s41601-018-0095-z.
- [16] 宋军英, 王炜宇, 姜学皎, 等. 网络参数对电网暂态稳定性的影响[J]. 中国电力, 2017, 50(8): 87-92.
- SONG Junying, WANG Weiyu, JIANG Xuejiao, et al. The impact of grid parameters on transient stability[J]. Electric Power, 2017, 50(8): 87-92.
- [17] SON G T, LEE H J, LEE S Y, et al. A study on the direct stability analysis of multi-machine power system with resistive SFCL[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3).
- [18] 许逵, 孙婷, 韩松, 等. 考虑运行损耗的故障限流器布点优化和容量选择[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 21-26.
- XU Kui, SUN Ting, HAN Song, et al. Optimal sitting and parameter selection for fault current limiter constrained with power losses[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 21-26.
- [19] LLAMBES J C, HAZELTON D. Performance of 2G HTS tapes in sub-cooled LN₂ for superconducting fault current limiting applications[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 17(2): 1903-1906.
- [20] 刘洋, 王倩, 龚康, 等. 基于超导储能系统的微电网频率暂态稳定控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 101-110.
- LIU Yang, WANG Qian, GONG Kang, et al. Transient stability control strategy of microgrid frequency based on SMES[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 101-110.
- [21] 袁敞, 丁雨霏, 冯佳耀, 等. 离网条件下的虚拟同步机分布式并联系统暂态稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 22-30.
- YUAN Chang, DING Yufei, FENG Jiayao, et al. Transient stability analysis of virtual synchronous machine distributed parallel system under off-grid condition[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 22-30.
- [22] 金建勋. 高温超导体及其强点应用技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 172-185.

收稿日期: 2019-05-21; 修回日期: 2019-07-05

作者简介:

王 通(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为超导限流器在电力系统中的应用; E-mail: 18368493872@163.com

姚 磊(1983—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为超导限流器在电力系统中的应用。E-mail: yaolei_usst@126.com

(编辑 张爱琴)