

电阻型超导限流器的限流和恢复特性仿真分析研究

张琦, 项彬, 马舒幸, 邓朴达, 袁仲滨, 耿英三, 刘志远, 王建华
(西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为进一步探索超导限流器的恢复性能, 准确判断其恢复状态, 对电阻型超导限流器的限流电阻和恢复特性进行了仿真分析研究。基于实验获得的 ST-12-L 超导带材单位电阻-单位热量 ($R-Q$) 拟合曲线, 以及超导的电场强度-电流密度指数 ($E-J$) 公式, 结合液氮相变传热方程, 在 SIMULINK 中建立了电阻型超导限流器的 $R-Q$ 恢复模型和 $E-J$ 恢复模型; 仿真分析了 LC 短路电流下 ST-12-L 超导带材的故障限流和恢复特性; 基于 LC 源和恢复测试回路, 搭建了并联超导带材的限流和恢复实验电路, 进行了 LC 短路冲击下的超导带材的失超限流和恢复测试, 并将实验结果和仿真结果进行了对比。对比发现: 在限流效果仿真中, $E-J$ 恢复模型的电流正、负峰值与实验的最大误差分别为 3.6% 和 15%, 而 $R-Q$ 恢复模型的电流正、负峰值与实验值的最大误差分别为 2.3% 和 8.6%, $R-Q$ 恢复模型的限流仿真更为准确; 在恢复时间仿真中, $R-Q$ 恢复模型的恢复时间最大误差仅为 0.120 s, 误差远小于 $E-J$ 恢复模型的仿真结果。 $R-Q$ 恢复仿真模型能有效模拟超导带材的失超和恢复, 促进电阻型超导限流器在电力系统中的应用。

关键词: 电阻型超导限流器; 超导仿真; 限流电阻; 恢复特性

中图分类号: TM725 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202602015 **文章编号:** 0253-987X(2026)02-0156-10

Simulation Analysis of Current-Limiting and Recovery Characteristics for Resistive Superconducting Fault Current Limiters

ZHANG Qi, XIANG Bin, MA Shuxin, DENG Puda, YUAN Zhongbin,
GENG Yinsan, LIU Zhiyuan, WANG Jianhua

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To further investigate the recovery performance of superconducting fault current limiters and accurately determine their recovery state, a simulation analysis was conducted on the current-limiting resistance and recovery characteristics of resistive superconducting fault current limiters (R-SFCLs). Based on experimentally obtained per-unit resistance-Joule heat ($R-Q$) fitting curves for ST-12-L superconducting tapes and the electric field-current density ($E-J$) power-law relation for superconductors, combined with the heat transfer equation for liquid nitrogen phase change, both an $R-Q$ recovery model and an $E-J$ recovery model for R-SFCLs were established in SIMULINK. The fault current-limiting and recovery characteristics of ST-12-L superconducting tapes under LC short-circuit conditions were simulated and analyzed. An experimental circuit for

收稿日期: 2025-05-25。 作者简介: 张琦(1995—), 男, 博士生; 项彬(通信作者), 女, 副教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52377029); 陕西省科协资助项目(20240407); 电气绝缘与电力设备国家重点实验室资助项目(EIPE22302)。

网络出版时间: 2025-07-24

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250724.1010.004>

current limiting and recovery of parallel superconducting tapes was constructed based on an LC power source and a recovery test loop. Quench current-limiting and recovery tests were performed on the superconducting tapes under LC short-circuit impulses, and the experimental results were compared with the simulations. The comparison shows that in current-limiting simulation, the maximum errors of the positive and negative current peaks between the $E-J$ recovery model and the experiment are 3.6% and 15%, respectively, while those for the $R-Q$ recovery model are 2.3% and 8.6%, indicating that the $R-Q$ model provides more accurate current-limiting simulation. In recovery time simulation, the maximum error of the $R-Q$ recovery model is only 0.120 s, which is significantly smaller than that of the $E-J$ recovery model. The $R-Q$ recovery model can effectively simulate the quench and recovery process of superconducting tapes and promote the application of resistive superconducting fault current limiters in power systems.

Keywords: resistive type superconducting fault current limiter; superconducting simulation; current limiting resistance; recovery characteristics

随着风电、光伏等新能源发电的不断发展,大量直流电源的输入使得新型电力系统的短路电流幅值不断增大,同时电网自身在经济发展中的不断扩张,也促进了电力系统的短路电流幅值和直流分量的不断增加。短路幅值超标和高直流分量都会导致断路器开断失败,严重危害电力系统的安全稳定运行。电阻型超导限流器作为一种新型故障限流技术^[1-3],具有正常工况下的低损耗、高能量密度,以及故障工况下的自动失超限流和高限流阻抗特性^[4-6],能够有效抑制短路电流幅值和直流分量^[7],在系统短路保护中具有良好的应用前景^[8-10]。在国外,俄罗斯2022年完成了220 kV/1.2 kA的三相交流电阻型超导限流器的测试和挂网运行,其限流阻抗超过40 Ω ^[11]。在国内,江苏中天科技股份有限公司2018年完成了220 kV/1.5 kA的交流电阻型超导限流器的制作和测试^[12],100 ms限流阻抗大于3.5 Ω ^[13]。中国南方电网有限责任公司在2020年完成了直流160 kV/1 kA的电阻型超导限流器的测试^[14],5 ms限流阻抗达到8.4 Ω ^[15]。

在实际使用中,电阻型超导限流器失超限流后会转变为电阻态,无法继续通流,需要超导带材冷却恢复到超导态后才能重新进行通流。超导限流器在经受一次冲击后未完全恢复到超导态时,二次冲击后的限流阻抗和恢复时间都比一次冲击时更大^[16]。因此,对电阻型超导限流器恢复状态的判断影响着其应用的可行性。为了对超导限流器的恢复性能进行分析,国内外学者主要采用有限元仿真和Matlab/Simulink数学模型等方法来进行超导建模和仿真分析。

在有限元仿真方面,瑞士洛桑理工学院的 Roy

等^[17]利用COMSOL多物理仿真软件对超导限流器线圈进行了失超限流和恢复仿真,发现超导带材并联电阻可以在失超过程中承载电流从而降低超导的发热并加快超导恢复。英国剑桥大学的 Zhang 等^[18]利用有限元仿真软件COMSOL仿真研究了超导带材的最小失超能和失超传播速度,发现选择高导热材料作为绝缘材料,可以提高线圈的热稳定性。国网福建省电力有限公司电力科学研究院的张振宇等^[19]在电力系统仿真软件PSCAD/EMTDC中开发了新型高温超导带材的电热耦合模块,利用此模型分析了超导电缆在发生短路故障时的电热暂态响应特征。重庆大学的罗书山^[20]基于COMSOL多物理仿真软件建立了YBCO高温超导带材的二维仿真模型,对高温超导带材的限流过程进行了电磁热仿真,分析了高温超导带材直流冲击及恢复特性,并揭示了其失超及恢复过程的能量耗散特性。兰州大学的牛梦蝶^[21]基于耦合的热传导方程和超导电磁方程构建了高温超导线圈的二维电磁-热模型,研究了局部热源触发下高温超导线圈的失超特性。华中科技大学的 Xu 等^[22]通过三维有限元仿真研究了YBCO超导带材在不同热传导模式下的过电流特性,获得了液氮散热和传导冷却两种散热模式下超导带材在短路电流时的电流分布、限流阻抗和温度变化曲线,得出液氮散热相比传导散热具有更好的过电流性能。西安交通大学的 Xiang 团队^[23-25]利用有限元仿真软件仿真研究了不同因素对超导带材恢复时间的影响,发现降低通流时间和幅值、稳定层材料由不锈钢改为铜、增大稳定层厚度、增大临界电流等方式均可以缩短超导带材的恢复时间。

在数值模型方面,合肥物质科学研究院等离子

体物理研究所的管广域等^[26]使用 Matlab/Simulink 构建了超导故障电流限制器并网运行的仿真分析模型,研究了磁偏置高温超导故障限流器在故障限流过程中的限流阻抗和温度变化,并进行了并网运行实验,验证了样机的并网、快速响应、逐级限流和快速恢复能力。中国科学院电工研究所的刘路昕等^[27]在 MATLAB 中建立了 2G 超导带材在大电流冲击条件下的热-电物理模型,获得了超导带材在限流过程中的电流和电阻曲线。华中科技大学的 Tan 等^[28]将单位电阻-单位热量(R - Q)拟合曲线和有限元分析方法结合,将系统仿真和电磁场仿真分开,通过系统仿真获得短路电流参数然后输入到有限元仿真中作为激励,解决了电阻型超导直流限流器在基于模块化多电平换流器的高压直流输电中难以定量分析的问题,并基于上述方法研究了超导限流器的并联电阻对限流和恢复特性的影响。

但是,有限元仿真的时间过长,且有限元仿真软件与电力系统难以耦合,有限元仿真软件-电路仿真软件的联合仿真复杂程度过高且仿真时长相对更长,无法快速分析不同短路电流下的超导失超和恢复特性。 R - Q 模型和基于电场强度-电流密度(E - J)公式的 E - J 模型能够快速仿真超导失超过程中的限流特性, E - J 模型基于带材理论参数与实际值可能存在差别, R - Q 模型通过实验的 R - Q 曲线进行建模,但 R - Q 模型假设系统处于绝热状态,无法准确仿真超导带材的恢复过程。

本文将传热方程耦合进 R - Q 模型的电阻和热量迭代中,建立了超导限流器 R - Q 失超恢复仿真模型,使用实验测得的带材电阻修正 E - J 模型的带材参数,建立了超导限流器 E - J 失超恢复仿真模型。通过用 2 种模型仿真分析了超导带材在不同短路电流下的限流恢复特性,并基于仿真参数进行了超导带材的失超恢复实验,通过实验与仿真结果对比,分析了两种建模方法在限流性能、恢复性能等方面的准确性,验证了仿真结果的准确性。

1 超导限流器仿真模型

超导限流器的 SIMULINK 仿真包括了失超限流过程中的发热和温升过程、限流后的恢复过程、重合闸的通流过程以及重合闸的恢复过程,如图 1 所示。重合闸通流过程中,首次失超后的恢复情况会对重合闸的初始状态造成影响。因此,在超导限流器的模型建立过程中需要考虑两次冲击之间的仿真衔接。

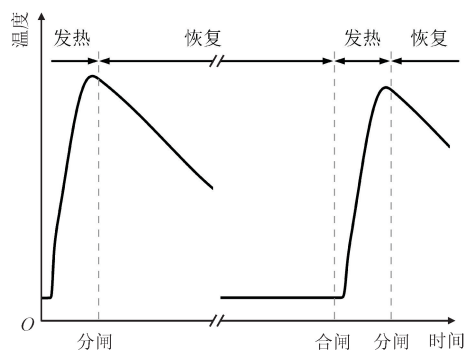


图1 超导带材的失超-恢复-重合闸过程

Fig. 1 Quench-recovery-reclose process of superconducting tape

1.1 基于 R - Q 法的失超恢复仿真模型

由于超导限流器短路限流过程较短,一般为数十 ms,可认为是绝热状态,通过实验获得超导的 R - Q 曲线后,可通过计算带材的热量来求解带材限流过程的电阻变化,完成超导建模。然而,绝热状态忽略散热,无法进行恢复过程仿真。假定超导带材内部温度一致,可以在失超限流仿真的基础上加入温度仿真,超导限流器在失超和恢复过程中的热量变化公式^[16]为

$$U^2 t / R + \nabla \cdot (-k \nabla T) - Q_h = \rho C_0 (\partial T / \partial t) \quad (1)$$

式中: U 为带材电压; t 为发热持续时间; k 为带材热导率; T 为超导带材温度; Q_h 为带材与液氮之间的传热量; C_0 为带材的热容。在 R - Q 仿真中加入超导带材的热平衡方程,通过发热和散热的净热量的计算,可以在超导带材失超仿真的同时计算带材温升和液氮散热,仿真超导失超限流过程和恢复过程的电参数和温度参数。

图 2 为超导带材的 R - Q 失超恢复仿真模型(R - Q 恢复模型)计算流程,每一个仿真步的主要流程如下:

(1)进行超导带材参数(带材长度 L 和并联根数 n_0)和初始温度设定;

(2)进行超导带材电流 I 检测,计算仿真温度下的临界电流并进行失超判断;

(3)在判断超导失超后,进行单步热量计算及热量积分,然后进行超导带材温度 T 、传热量 Q_h 和热容 C_0 的迭代,并将温度 T 输入到失超判断中用于下一步仿真的失超判断;

(4)根据积分热量进行电阻拟合,并与超导带材的电流相乘求解带材电压;

(5)进行下一个仿真步的仿真。

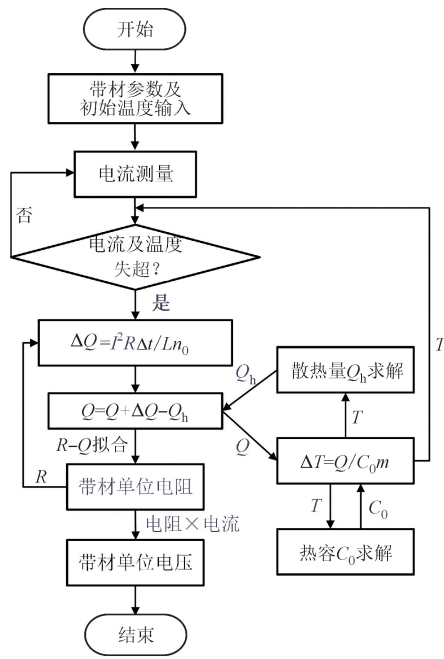


图 2 超导带材的 R-Q 恢复模型失超计算流程
Fig. 2 R-Q recovery model calculation process of superconducting tape

1.2 基于 E-J 公式的失超恢复仿真模型

由于不同电流下超导带材的 R-Q 曲线存在一定差异,且超导带材在温度低于临界温度时,其电压和电阻受到温度、电流、磁场等多重因素影响,可基于 E-J 公式建模进行综合分析。考虑电阻型超导限流器的无感状态可以忽略磁场影响,此时超导的 E-J 特性公式为

$$\rho_{sc} = \frac{E_0}{J_c(T)} \left(\frac{J}{J_c(T)} \right)^{n-1}, \quad J > J_c(T), T < T_c \quad (2)$$

式中: ρ_{sc} 为超导层电阻率; $E_0 = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 为超导层临界电场强度; $J_c(T)$ 为超导层的临界电流密度; T_c 为超导带材的临界温度; n 为超导带材特征常数,一般取 22。本文采用的带材为 ST-12-L 带材, 77 K 自场临界电流为 500 A, 临界温度为 92 K, 室温电阻为 100 mΩ/m。假设电流在各层内部均匀分布, 用超导层电流来代替电流密度, 则 E-J 特性公式可改写为

$$\rho_{sc} = \frac{E_0}{I_c(T)} \left(\frac{I_{sc}}{I_c(T)} \right)^{n-1}, \quad I_{sc} > I_c(T), T < T_c \quad (3)$$

式中: I_{sc} 为超导层电流; $I_c(T)$ 为超导临界电流。超导带材的整体单位长度电阻计算公式为

$$\frac{\rho_{SFCL}}{S_{SFCL}} = \left(\frac{S_{SC}}{\rho_{SC}} + \frac{S(\text{Ag})}{\rho(\text{Ag})} + \frac{S(\text{Cu})}{\rho(\text{Cu})} + \frac{S_{\text{Sub}}}{\rho_{\text{Sub}}} + \frac{S_{\text{SUS}}}{\rho_{\text{SUS}}} \right)^{-1} \quad (4)$$

式中: ρ_{SFCL} 为超导带材电阻率; $\rho(\text{Ag})$ 为银电阻率; $\rho(\text{Cu})$ 为铜电阻率; ρ_{Sub} 为基底层电阻率; ρ_{SUS} 为不锈钢电阻率; S_{SFCL} 为超导带材截面积; S_{SC} 为超导层截面积; $S(\text{Ag})$ 为银层截面积; $S(\text{Cu})$ 为铜层截面积; S_{Sub} 为基底层截面积; S_{SUS} 为不锈钢层截面积。通过超导的 E-J 特性以及并联电阻公式, 可以获得超导带材的单位长度电阻。通过实验测试与理论参数建模下的带材室温电阻比值, 可以在带材的电阻、热容、温升等参数计算中对带材体积修正, 使修正后的带材电阻与实验结果一致。同时, 也使得热容、温度等参数计算值更接近实际值, 缩小 E-J 恢复模型仿真与实际情况的差距。

基于超导 E-J 特性建立的超导带材 E-J 失超恢复仿真模型(E-J 恢复模型) 计算流程如图 3 所示。与 R-Q 恢复模型不同的是, 超导带材 E-J 失超恢复仿真模型需要在计算出带材温度后, 求解电流在超导层的分配, 从而计算超导层电阻最终获得带材的整体电阻。

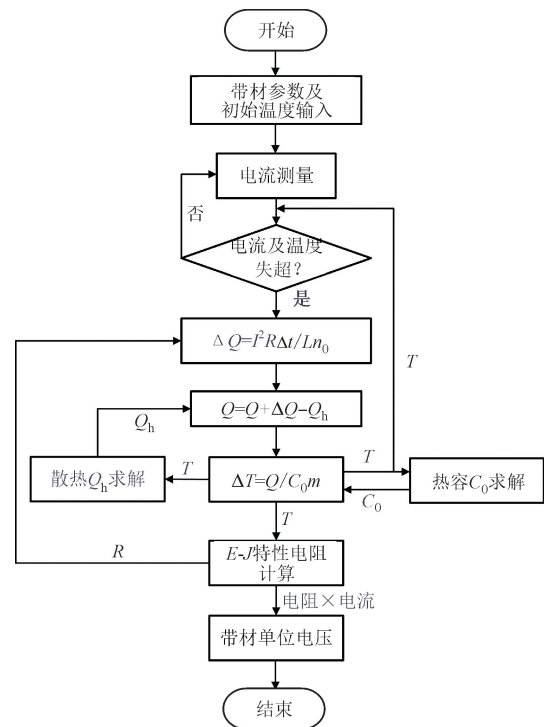


图 3 超导带材的 E-J 恢复模型计算流程

Fig. 3 E-J recovery model calculation process of superconducting tape

2 超导限流恢复性能仿真

基于超导带材的 R - Q 恢复模型和 E - J 恢复模型,分析了超导带材在 LC 短路电流源(电容 $C=0.1\text{ F}$,电感 $L=0.1\text{ mH}$)作用下的失超和恢复特性。仿真初始温度设置为 77.2 K ,与实际实验中的温度保持一致,冲击电流持续时间为 20 ms ,仿真超导带材为 3 根 30 cm 长并联的 ST-12-L 带材。仿真分析了预期电流 $3\ 099\sim 5\ 132\text{ A}$ (电容预充电电压 $112\sim 186\text{ V}$)时超导带材的限流和恢复特性。

图 4 为不同预期电流下超导带材电流 I 的仿真结果。可以看出,随着预期电流的增大,限流后电流也逐渐增大。当预期电流从 $3\ 099\text{ A}$ 增大到 $5\ 132\text{ A}$ 时: R - Q 恢复模型的电流正峰值从 $3\ 075\text{ A}$ 增大到 $4\ 965\text{ A}$,负峰值从 $-2\ 036\text{ A}$ 增大到 $-2\ 862\text{ A}$; E - J 恢复模型的电流正峰值从 $2\ 948\text{ A}$ 增大到 $4\ 825\text{ A}$,负峰值从 $1\ 891\text{ A}$ 增大到 $2\ 830\text{ A}$ 。对于不同预期电流, R - Q 恢复模型的首峰值和次峰值略大于 E - J 恢复模型仿真结果。仿真中首峰值的限流效果并不显著。这是因为仿真采用的短路电流源为 LC 源,为避免过阻尼,确保冲击时间基本为 20 ms ,因此在仿真中带材的长度较短为 30 cm ,单位带材耐受电压(电源电压与带材长度之比)为 $373.3\sim 620\text{ V/m}$,而带材室温为 $100\text{ m}\Omega/\text{m}$,使得 3 根带材并联后的限流电阻较低(带材室温时电阻为 $0.01\ \Omega$),仿真的限流效果较差。

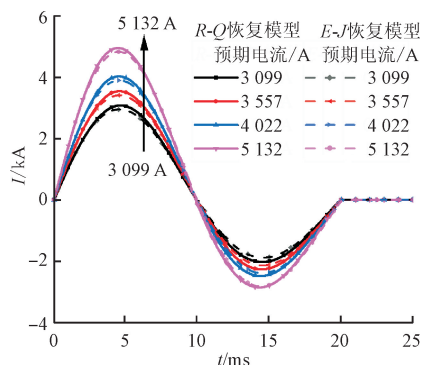


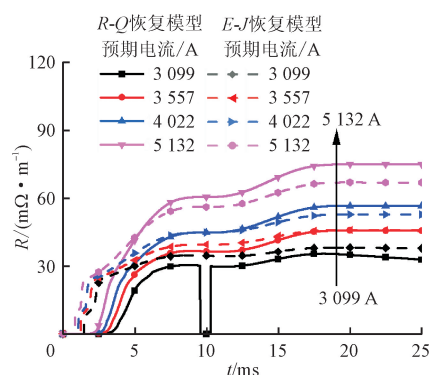
图 4 不同预期电流下超导带材电流的仿真结果

Fig. 4 Simulation current of superconducting tape with different prospective current

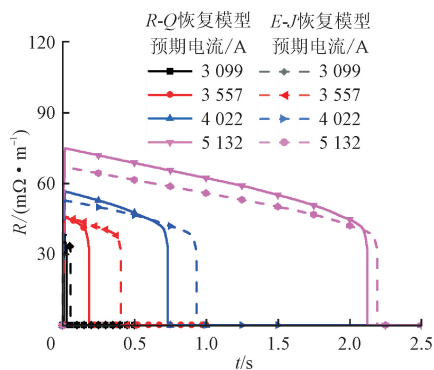
图 5(a)为 R - Q 恢复模型和 E - J 恢复模型的限流过程电阻仿真结果。可以看出,随着短路电流注入,超导失超电阻从 0 开始上升,在电流过零点附近电阻趋于平缓,且 E - J 恢复模型的超导电阻在失超初期上升更快, R - Q 恢复模型的超导电阻在失超后

$1\sim 2\text{ ms}$ 才从接近 0 开始快速上升。随着预期电流的增大, R - Q 仿真电阻最大值从 $35.41\text{ m}\Omega/\text{m}$ 增大到 $74.88\text{ m}\Omega/\text{m}$, E - J 恢复模型电阻最大值从 $33.84\text{ m}\Omega/\text{m}$ 增大到 $66.89\text{ m}\Omega/\text{m}$,且 E - J 恢复模型电阻先大于后小于 R - Q 恢复模型的电阻。预期电流 $3\ 099\text{ A}$ 时, R - Q 恢复模型电阻在 10 ms 附近跳变为 0,这是因为带材此时温度低于临界温度,电流小于临界电流时电阻为 0。

图 5(b)为 R - Q 恢复模型和 E - J 恢复模型的恢复过程电阻仿真结果。需要说明的是,使用恢复测试回路测试超导恢复时间,当恢复回路小电流下超导两端电压测试结果为 0,即超导电阻降低到 0 时,认为超导带材恢复到超导态,此时带材温度小于 92 K 。由图可知,随着预期电流的增大, R - Q 恢复模型的恢复时间从 0.007 s 增大到 2.108 s , E - J 恢复模型的恢复时间从 0.036 s 增大到 2.173 s , R - Q 恢复模型的恢复时间始终小于 E - J 恢复模型。



(a) 限流过程电阻仿真结果



(b) 恢复过程电阻仿真结果

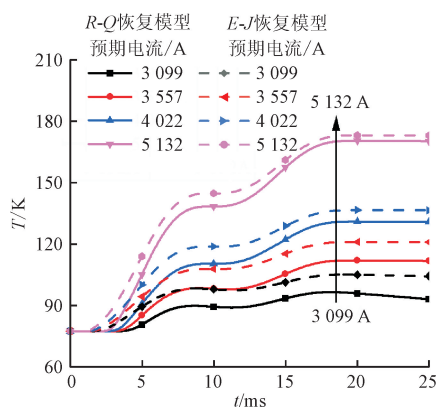
图 5 不同预期电流下的超导带材仿真电阻曲线

Fig. 5 Simulation resistance of superconducting tape with different prospective current

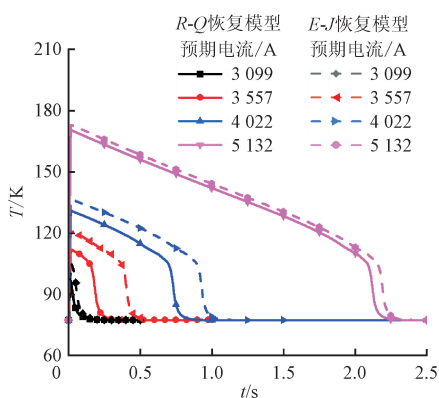
图 6(a)为不同预期电流的限流过程温度仿真结果。可以看出,与电阻仿真结果类似, E - J 恢复模型的超导温度比 R - Q 恢复模型的在失超初期上升

速度更快,且 R - Q 恢复模型的带材恢复到 77.2 K 的时间始终小于 E - J 仿真的。随着预期电流的增大, R - Q 恢复模型在 20 ms 的温度从 95.6 K 增大到 170.2 K, E - J 恢复模型在 20 ms 的温度从 104.0 K 增大到 172.8 K,且 R - Q 恢复模型的最大温度始终小于 E - J 恢复模型的最大温度。

图 6(b)为不同预期电流的恢复过程温度仿真结果。需要说明的是,使用温度传感器测试超导恢复时间时,一般将超导带材温度降低至短路冲击前的初始温度 77.2 K 的时间称为恢复时间。由图可知,随着预期电流从 3 099 A 增大到 5 132 A, R - Q 恢复模型温度恢复到 77.2 K 的时间从 0.156 s 增大到 2.253 s, E - J 恢复模型温度恢复到 77.2 K 的时间从 0.197 s 增大到 2.330 s。 R - Q 恢复模型仿真的温度恢复时间始终小于 E - J 恢复模型温度的仿真结果,且在预期电流较小或较大时,两者比较接近,在两者之间时仿真结果相差较大。



(a)限流过程温度仿真结果



(b)恢复过程温度仿真结果

图 6 不同预期电流下的超导带材仿真温度曲线

Fig. 6 Simulation temperature of superconducting tape with different prospective current

对比两种模型的仿真结果可知, E - J 恢复模型

的限流效果略大于 R - Q 恢复模型。在仿真初期, E - J 恢复模型的超导带材电阻和温度上升更快,两种仿真模型的超导带材电阻和温度最大值以及恢复到 92 K 和 77.2 K 的时间均存在偏差。在带材尺寸设置相同的前提下,两种模型的恢复设置一致,恢复时间的区别主要由限流过程的结果决定。 R - Q 恢复模型通过实验的单位热量-单位电阻曲线进行建模,其限流仿真结果不受带材尺寸、温度、热容等参数影响。 R - Q 恢复模型通过热量来使电阻从 0 开始上升,使得 R - Q 恢复模型需要一定的热量积累来使电阻和限流效果增大。 E - J 恢复模型需要计算带材电阻率来计算总电阻,当仿真的带材结构参数与实际存在误差时,电阻计算结果会产生偏离,同时也会使热容、热量和温度发生偏离。 E - J 恢复模型的电阻通过 E - J 公式计算,电阻与电流的指数关系使得电阻在失超后迅速增大,也使带材发热更快。电阻和热量以及温度的不一致最终也使两者的恢复过程存在偏差。

3 超导限流恢复仿真和实验验证

为了对比 R - Q 恢复模型和 E - J 恢复模型的准确性,基于仿真电路参数,搭建了 LC 短路测试回路,实验电路如图 7 所示。实验用 LC 源(电容 $C = 0.1$ F, 电感 $L = 0.1$ mH)来提供短路电流。实验带材串联有一个具有反并联二极管的晶闸管,通过晶闸管的触发和关断来控制电路的通断,实验设置的通流时间为 20 ms。超导带材两端并联有直流恢复测试回路,用于测量超导的恢复时间。单根 ST-12-L 带材通过铜片压接固定在 G10 板上,3 根 ST-12-L 带材并联后并通过铜软连接与外电路相连,通过电压探头和霍尔电流传感器测试带材的电压和电流。

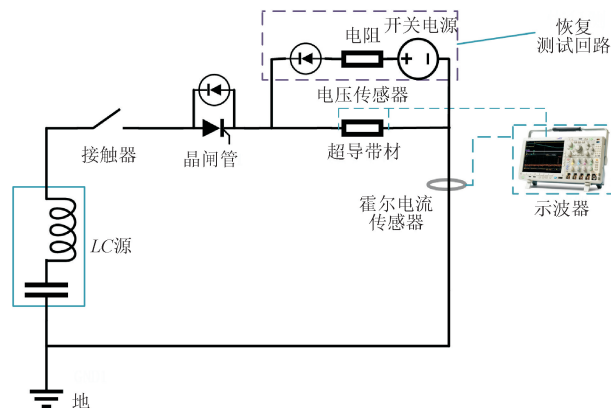


图 7 基于 LC 源的超导带材测试电路

Fig. 7 Test circuit of superconducting tape based on LC source

以预期电流 4 055 A 为例,图 8 为仿真和实验结果的电流曲线对比。可以看出, R - Q 恢复模型电流正峰值为 4 023 A,电流负峰值为-2 493 A, E - J 恢复模型电流正峰值为 3 893 A,电流负峰值为-2 395 A,实验测量电流的正峰值为 3 932 A,电流负峰值为-2 549 A。 R - Q 恢复模型的电流略大于实验结果, E - J 恢复模型的电流略小于实验结果。

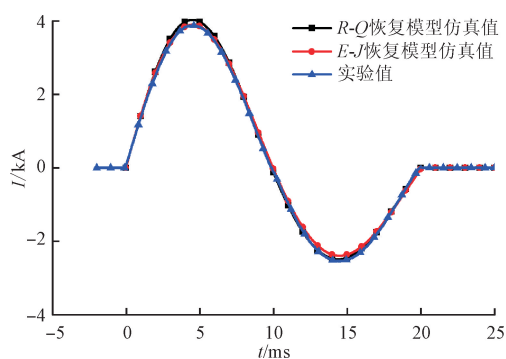


图 8 预期电流 4 055 A 时仿真和实验电流对比
Fig. 8 Comparison of simulation and test current when prospective current is 4 055 A

图 9 为预期电流 4 055 A 时仿真和实验结果的限流过程电阻曲线对比。可以看出,短路电流注入,超导开始失超。随着电阻逐渐上升, R - Q 恢复模型电阻达到最大值 56.62 m Ω /m, E - J 恢复模型电阻达到最大值 52.77 m Ω /m,实验测量电阻最大值为 55.96 m Ω /m。在短路电流注入初期, R - Q 恢复模型的电阻曲线上升较慢,2.5 ms 后电阻值开始快速增大,而 E - J 恢复模型电阻在失超后迅速增大。整体比较下, R - Q 恢复模型的电阻在失超初期更接近实验结果。

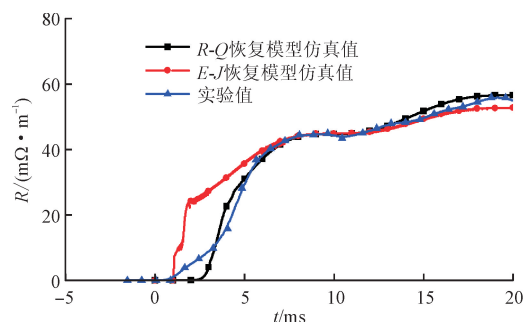


图 9 预期电流 4 055 A 时仿真和实验的限流过程电阻对比
Fig. 9 Current limiting resistance comparison of simulation and test when prospective current is 4 055 A

超导带材在临界电流下的电压为 1 μ V/cm,当电压大于此值时认为带材已失超。 R - Q 恢复模型通过电流是否大于临界电流来判断是否失超并开始计算热量,且 R - Q 恢复模型的电阻上升需要热量积累,使带材电阻在失超初期上升缓慢,限流仿真效果偏低。 E - J 恢复模型中采用 E - J 公式计算电阻,但 E - J 公式本质是稳态关系,在实际测量中为系统达到热/电磁平衡后的结果,在短路初期电阻开始上升时发热较小,未达到平衡点,因此图 9 中 E - J 恢复模型的电阻在短路失超后迅速增大,导致限流效果略大于实验值。

图 10 为预期电流 4 055 A 时仿真和实验结果的恢复过程电阻曲线对比。可以看出, R - Q 恢复模型恢复时间为 0.716 s, E - J 仿真恢复时间为 0.912 s,实验测量恢复时间为 0.709 s。 R - Q 恢复模型的恢复时间更接近实验结果。图 10 中,实验电阻恢复曲线下降趋势为从最大值逐渐降低到 0,而仿真的电阻恢复曲线下降趋势为降低到接近超导态时突然降至 0。这是因为: R - Q 恢复模型中,恢复到超导态时带材的温度为 92 K,大于初始温度 77.2 K,热量积累不为 0; E - J 恢复模型中,带材温度大于 92 K 时超导层为高电阻态,而在温度降低到 92 K 以下时超导层电阻遵守 E - J 指数特性迅速降低,电流小于临界电流时电阻为 0。因此,会出现两个仿真模型电阻从约 40 m Ω /m 跳变到 0 的现象。在实际恢复过程中,超导电阻呈连续平滑下降,无跳变过程。考虑到实际超导限流器的限流工作时间较短,一般为 50~100 ms,且恢复过程中的电阻计算值并不影响带材的散热和温度恢复过程,因此 R - Q 恢复模型仿真的恢复电阻跳变对超导限流器短路限流和恢复仿真的影响可忽略。

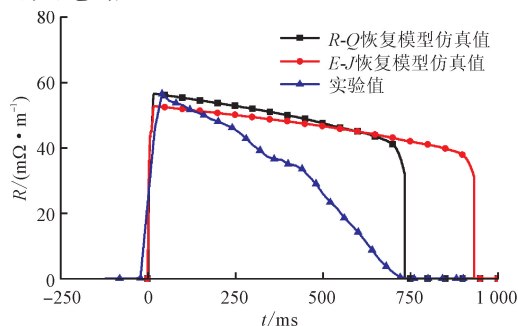


图 10 预期电流 4 055 A 时仿真和实验的恢复过程电阻对比
Fig. 10 Resistance in recovery comparison of simulation and test when prospective current is 4 055 A

图 11 为不同预期电流的实验和仿真电流峰值对比。可以看出,随着预期电流的增大,实验电流正峰值从 3 040 A 增大到 4 967 A,电流负峰值从 2 228 A 增大到 3 038 A。在正半波, R - Q 恢复模型的电流峰值始终略大于实验电流峰值,而 E - J 恢复模型的电流峰值始终略小于实验电流峰值。 R - Q 恢复模型的电流正、负峰值与实验电流的最大误差分别为 2.3% 和 8.6%, E - J 恢复模型的电流正、负峰值与实验电流的最大误差分别为 3.6% 和 15%, R - Q 恢复模型的正负峰值相比 E - J 恢复模型更接近实验结果。

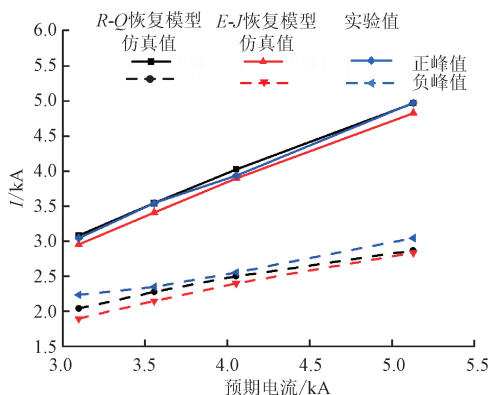


图 11 不同预期电流下实验和仿真的电流峰值对比
Fig. 11 Current peak comparison of test and simulation with different prospective current

图 12 为不同预期电流的实验和仿真电阻最大值对比。可以看出,随着预期电流的增大,实验电流正峰值从 33.80 mΩ/m 增大到 86.31 mΩ/m。预期电流小于等于 4 022 A 时, R - Q 恢复模型的最大电阻与实验结果基本一致,误差小于 4.8%, E - J 恢复模型的误差最大为 13.1%;预期电流为 5 132 A 时, R - Q 恢复模型的误差偏大,为 13.2%,但 E - J 恢复

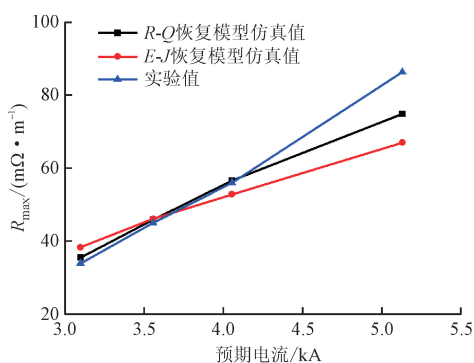


图 12 不同预期电流下实验和仿真电阻最大值对比
Fig. 12 Maximum resistance comparison of test and simulation with different prospective current

模型的最大误差为 22.4%。考虑到实际使用中,ST-12-L 带材超导限流器的限流后阻抗一般小于 65 mΩ/m,因此 R - Q 恢复模型可以准确模拟实际的超导失超电阻。

图 13 为不同预期电流下实验和仿真结果中超导带材恢复到 92 K 的时间对比。可以看出,随着预期电流的增大,实验恢复时间从 0.030 s 增大到 2.228 s。 R - Q 恢复模型的恢复结果与实验结果基本一致,在预期电流为 5 132 A 时达到最大误差,绝对误差为 0.120 s,相对误差仅为 5.4%; E - J 恢复模型仅在轻微失超和严重失超时误差较小,在两者之间时误差较大,在预期电流为 3 407 A 时达到最大误差 0.236 s,为实验恢复时间 0.151 s 的 1.6 倍。因此,在恢复时间仿真中, R - Q 恢复模型的结果相对更加准确。

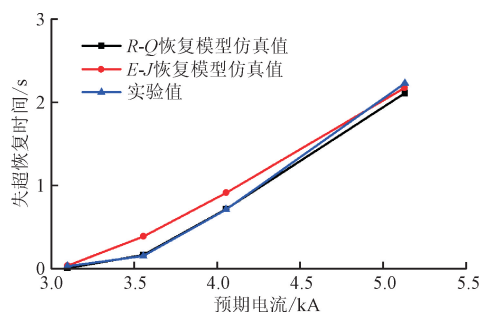


图 13 不同预期电流下实验和仿真失超恢复时间对比
Fig. 13 Recovery time comparison of test and simulation with different prospective current

4 结 论

针对电阻型超导限流器的恢复问题,本文基于 ST-12-L 超导带材 R - Q 拟合曲线和超导的 E - J 特性,结合热量变化方程,建立了 R - Q 恢复模型和 E - J 恢复模型,仿真分析了超导的限流和恢复特性,并通过实验结果对比了两种模型的准确性。本文得到主要结论如下。

(1) R - Q 恢复模型仿真的电流正、负峰值与实验的最大误差分别为 2.3% 和 8.6%, E - J 模型仿真的电流正、负峰值与实验的最大误差分别为 3.6% 和 15%, R - Q 恢复模型的仿真结果更接近实验结果。

(2)预期电流小于等于 4 055 A 时, R - Q 恢复模型的电阻与实验基本一致,误差小于 4.8%,而 E - J 恢复模型的最大误差为 13.1%。 R - Q 恢复模型可以准确模拟超导失超电阻。

(3)在超导恢复仿真中, R - Q 恢复模型与实验结

果保持一致,预期电流最大时误差仅为 0.120 s,而 E - J 恢复模型误差较大。综合考虑限流和恢复过程的仿真准确性,基于 R - Q 曲线和传热的 R - Q 恢复模型可以准确模拟超导的失超和恢复过程,能有效促进电阻型超导限流器在电力系统中的应用。

参考文献:

- [1] CHANG B, CWIKOWSKI O, BARNES M, et al. Multi-terminal VSC-HVDC pole-to-pole fault analysis and fault recovery study [C]//11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1-8.
- [2] 信赢. 超导限流器综述 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(3): 1-9.
XIN Ying. Review on superconducting fault current limiters [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(3): 1-9.
- [3] YANG Kun, ZHANG Licai, TAN Yaxiong, et al. Design of a pancake-type superconducting tape winding according to heat diffusion ability [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-5.
- [4] 刘应杰, 周羽生, 周文晴, 等. 电阻型超导限流器中带材失超与恢复特性 [J]. 低温与超导, 2023, 51(3): 7-13.
LIU Yingjie, ZHOU Yusheng, ZHOU Wenqing, et al. Quench and recovery characteristics of tapes in resistive type superconducting fault current limiter [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2023, 51(3): 7-13.
- [5] CHEN Xiaoyuan, ZHANG Mingshun, CHEN Yu, et al. Superconducting fault current limiter (SFCL) for fail-safe DC-DC conversion: from power electronic device to micro grid protection [J]. Superconductivity, 2022, 1: 100003.
- [6] XIANG Bin, YANG Kun, TAN Yaxiong, et al. DC-current-limiting characteristics of YBCO tapes for DC currents of 50 A to 10 kA [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4): 1-5.
- [7] 倪辉, 黎炜, 兰润栋, 等. 超导故障限流器抑制短路电流直流分量的仿真分析 [J]. 电工电能新技术, 2021, 40(10): 74-80.
NI Hui, LI Wei, LAN Rundong, et al. Simulation analysis of superconducting fault current limiter to suppress DC component of short circuit current [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(10): 74-80.
- [8] SONG Meng, DAI Shaotao, SHENG Chao, et al. Design and tests of a 160-kV/1-kA DC superconducting fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(6): 1-7.
- [9] GUO Peiqian, YUAN Zhichang, MA Tao, et al. Study of 160 kV/1 kA R-SFCL design and application in nanao MMC-MTDC project [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, 32(2): 1-11.
- [10] MA Tao, DAI Shaotao, SONG Meng, et al. Design aspects of transmission voltage superconducting fault current limiters with YBCO tapes in China [J]. Superconductivity, 2022, 4: 100029.
- [11] MOYZYKH M, GORBUNOVA D, USTYUZHANIN P, et al. First Russian 220 kV superconducting fault current limiter (SFCL) for application in city grid [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(5): 1-7.
- [12] DAI Shaotao, MA Tao, XUE Chi, et al. Development and test of a 220 kV/1.5 kA resistive type superconducting fault current limiter [J]. Physica: C Superconductivity and Its Applications, 2019, 565: 1253501.
- [13] ZHANG Jingye, TENG Yuping, QIU Qingquan, et al. Design and development of a 220-kV resistive-type fault current limiters based on 2G-coated conductors [J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2019, 32(12): 3779-3787.
- [14] JIANG Zhe, WANG Yinshun, DAI Shaotao, et al. Application and design of resistive SFCL in ± 160 kV MMC-HVdc system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 1-5.
- [15] SONG Meng, DAI Shaotao, SHENG Chao, et al. Design and performance tests of a 160 kV/1.0 kA DC superconducting fault current limiter [J]. Physica: C Superconductivity and Its Applications, 2021, 585: 1353871.
- [16] XIANG Bin, TANG Zhengquan, ZHANG Qi, et al. Current-limiting and recovery characteristics of resistive-type superconducting fault current limiters during quench-recovery-requench process [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2023, 33(9): 1-11.
- [17] ROY F Ç, DUTOIT B, GRILLI F, et al. Magneto-thermal modeling of second-generation HTS for resistive fault current limiter design purposes [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, 18(1): 29-35.
- [18] ZHANG Min, MATSUDA K, COOMBS T A. New application of temperature-dependent modelling of high temperature superconductors: quench propagation and

- pulse magnetization [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112(4): 043912.
- [19] 张振宇,程诺,罗翔,等. 10 kV 配电网高温超导电缆电热耦合模型仿真分析 [J]. 高压电器, 2020, 56(11): 203-209.
- ZHANG Zhenyu, CHENG Nuo, LUO Xiang, et al. Electrical-thermal coupling model analysis of high temperature superconducting power cable utilized in 10 kV power distribution system [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 203-209.
- [20] 罗书山. 高温超导带材直流冲击及恢复特性与能量耗散研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [21] 牛梦蝶. 多场耦合作用下高温超导线圈的电磁及力学特性研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [22] XU Ying, YANG Zili, FENG Tangyao, et al. Analysis of overcurrent performance of YBCO tape considering different heat exchange conduction [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(5): 1-5.
- [23] TAN Yaxiong, YANG Kun, XIANG Bin, et al. Heat generation and temperature rise in a resistive type superconducting fault current limiter [C]//2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 286-287.
- [24] XIANG Bin, JUNAID M, GAO Lei, et al. Effects of short circuit currents on quench and recovery properties of YBCO tapes for DC SFCL [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 1-6.
- [25] XIANG Bin, WANG Wenqing, LI Hongxu, et al. Study on the influencing factors to reduce the recovery time of superconducting tapes and coils for the DC superconducting fault current limiter applications [J]. High Voltage, 2022, 7(3): 483-495.
- [26] 管广域,丁开忠,董育军,等. 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 [J]. 低温物理学报, 2020, 42(4): 185-191.
- GUAN Guangyu, DING Kaizhong, DONG Yujun, et al. Analysis and verification of electro-thermal characteristics of magnetic bias superconducting current limiter superconducting current limit unit under power failure operation [J]. Low Temperature Physical Letters, 2020, 42(4): 185-191.
- [27] 刘路昕,张京业,滕玉平,等. 限流器用第二代超导带材大电流冲击过程的物理模型研究 [J]. 电工电能新技术, 2017, 36(10): 76-80.
- LIU Luxin, ZHANG Jingye, TENG Yuping, et al. Study of physical model of resistive superconducting fault current limiter under AC over-current [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(10): 76-80.
- [28] TAN Xiangyu, REN Li, LIANG Siyuan, et al. Analysis of R-SFCL with shunt resistor in MMC-HVDC system using novel R-Q method [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1-5.

(编辑 陶晴)