第 50 卷 第 7 期：2774-2783 高电压技术 Vol.50, No.7: 2774-2783
2024 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231591

考虑反向关断特性的晶闸管数字建模方法

辛业春，郝　欢，王　拓，赫羽朋，江守其，王威儒
（现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验(东北电力大学)，吉林 132012）

摘　要：常用电磁暂态仿真软件提供的晶闸管模型忽略了晶闸管的反向关断特性，导致晶闸管换流器的换相失败仿真不精准。为提高对晶闸管阀的仿真准确性，建立了考虑过零点电流变化率、正向电流峰值和结温作用下晶闸管关断特征参数反向恢复电流峰值、反向恢复电荷和关断时间的影响关系；提出了相关影响因素在器件建模中的表征方法，建立包括晶闸管反向阻断恢复过程和正向阻断恢复过程在内的晶闸管自定义数字仿真模型，并构建了考虑器件关断特性的换流器精细化电磁暂态模型。晶闸管模型仿真结果同实际测试值对比，反向恢复电流峰值的仿真误差不超过 5%，关断时间的仿真误差小于 4%，提出的数字仿真模型能较精确反映晶闸管的关断过程；换流器仿真模型能更准确地反映高压直流系统换相失败特征。
关键词：关断特性；换相失败；关断时间；反向恢复；反向阻断；正向阻断

Digital Modeling Method of Thyristor Considering Reverse Turn-off Characteristics

XIN Yechun, HAO Huan, WANG Tuo, HE Yupeng, JIANG Shouqi, WANG Weiru
(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The thyristor model provided by common electromagnetic transient simulation software ignores the reverse turn-off characteristics of thyristor, resulting in inaccurate simulation of commutation failure of the thyristor converter. In order to improve the simulation accuracy of thyristor valve, we established a effect relationship of zero-crossing current change rate, positive current peak and junction temperature on the reverse recovery current peak, reverse recovery charge and turn-off time of thyristor turn-off characteristic parameters. Meanwhile, we proposed a characterization method of related influencing factors in device modeling,and established a custom digital simulation model of thyristor including reverse blocking recovery process and forward blocking recovery process.Moerover, we constructed a refined electromagnetic transient model of the converter considering the turn-off characteristics of the device. The comparison between the simulation results and the actual test values shows that the simulation error of the reverse recovery current peak is less than 5%, and the simulation error of the turn-off time is less than 4%. The proposed digital simulation model can accurately reflect the turn-off process of the thyristor.The converter simulation model can more accurately reflect the commutation failure characteristics of HVDC system.
Key words: turn-off characteristics; commutation failure; turn-off time; reverse recovery; reverse blocking; forward blocking

0　引言

传统高压直流输电技术具有输电能力强、经济性好等优点，已广泛应用于直流输电工程[1-4]。高压直流输电系统换流器的核心元件是半控型大功率晶闸管，其运行特性决定了直流输电系统的性能[5-8]。

导通的晶闸管在承受反向电压关断时，会存在一个关断过程，这个过程往往容易引发高压直流换相失败[9-12]，但常用电磁暂态仿真软件提供的晶闸管模型是一个基于可变电阻的开关模型，忽略了其反向关断特性，认为晶闸管导通与关断能够瞬时完成，所以软件自带模型不能反映运行工况下的换流阀实际特性[13-14]，为进行换相过程精细化仿真分析，对考虑晶闸管关断特性的数字仿真模型的研究显得尤为重要。

目前国内外对晶闸管关断特性建模已有一定研究，文献[15]和[16]提出了考虑二次效应的晶闸管

基金资助项目：国家重点研发计划(2021YFB2400900)；东北电力大学博士科研启动基金(BSJXM-2021205)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2400900), Doctoral Research Start-up Fund of Northeast Electric Power University(BSJXM-2021205).

宏模型，但对晶闸管反向恢复过程的仿真不够准确。为进一步提高模型仿真精度，在宏模型的基础上增加一个反向恢复模块来描述晶闸管的反向恢复特性，但模型比较复杂，不易控制[17-19]。文献[20]提出用非线性电源来建立晶闸管的关断模型，但关断特性仿真结果与实际偏差太大。文献[21]提出用自然生长曲线来模拟晶闸管关断过程中电阻的非线性变化过程，但是晶闸管正向导通电流下降过零时对应的晶闸管电阻求取困难。文献[22-24]提出用指数函数模型来反映晶闸管的关断特性，但没考虑晶闸管的正向阻断恢复过程。文献[25]利用双曲正割函数来建立晶闸管关断模型，但函数中需要确定两个时间常数，较为复杂。

晶闸管的关断过程包括反向阻断恢复过程和正向阻断恢复过程，上述模型缺少对正向阻断恢复过程的描述和建模，未形成反映实际器件完整关断特性的晶闸管数字模型，导致由晶闸管构成的高压直流换相失败相关特性仿真不准确。

本文以 KPc2000-85Y02 型号晶闸管为例，开展晶闸管测试试验，基于实际测试数据，分析过零点电流变化率、正向电流峰值和结温作用下对晶闸管关断特性的影响，设计相关影响因素在器件建模中的表征方法，建立能够在不同结温下反映整个关断过程的晶闸管数字模型，并将晶闸管数字模型用于换流器中，构建了考虑器件关断特性的换流器精细化电磁暂态模型。

1　晶闸管关断过程分析

晶闸管是四层三端结构的半控大功率器件，在导通时，大量的载流子被注入到基区，在承受反压关断时，注入到基区的载流子需要通过迁移、扩散等方式使存储在基区的载流子消散，让晶闸管恢复阻断状态，该过程为晶闸管的关断过程[26-31]。

晶闸管关断过程持续时间为几百微秒，可以把这一过程中晶闸管承受的反向电压近似等效为一个直流电压源。单个晶闸管的简化关断电路如图 1 所示。

图中：i_T 为晶闸管正向导通电流；U_R 为反向关断电压；L_c 为回路电感；R_s、C_s 为阻尼回路参数；J_1、J_2、J_3 分别为晶闸管的 3 个 PN 结；i_{AK} 为流过晶闸管阳极 A 的电流，u_{AK} 为晶闸管阳极 A 与阴极 K 之间的压降。

当晶闸管关断等效电路的开关 S 置于 M 位置，晶闸管阳极承受正向电压且控制极 G 有触发信号，晶闸管导通，流过晶闸管的电流为 i_T，当开关 S 置于 N 位置，晶闸管承受反向关断电压 U_R，进入关断过程，其关断特性如图 2 所示。

图中：I_F 为正向电流峰值；I_{RM} 为反向恢复电流峰值；U_{on} 为正向导通压降；U_{br} 为 J_3 结反向击穿电压；U_{RM} 为反向恢复电压峰值。

t_0—t_1 阶段：t_0 时刻，晶闸管开始承受关断电压 U_R，由于电感 L_c 的存在，会阻碍晶闸管正向电流的变化，流过晶闸管的电流由正向导通电流峰值 I_F 以恒定的电流变化率减小。t_0—t_1 期间，晶闸管在反向关断电压的作用下，基区的非平衡载流子开始被抽离，但此阶段结束基区仍有大量的剩余非平衡载流子，晶闸管仍然保持正向导通状态，导通压降为 U_{on}。

t_1—t_2 阶段：t_1 时刻，晶闸管的正向电流减小到 0，但由于基区大量非平衡载流子的存在，晶闸管的 3 个 PN 结都处于正向偏置状态，流过晶闸管的电流继续以恒定电流变化率反向增大。

t_2—t_3 阶段：t_2 时刻，J_3 结积累的非平衡载流子被消耗完，此时 J_3 结的空间电荷区开始恢复，J_3 结失去正向偏置作用，开始承受反向电压，当反压大到一定值时，J_3 结将会被击穿，击穿电压为 U_{br}，此阶段电感两端电压变小，电流变化率开始下降，电流继续反向增大。

t_3—t_4 阶段：t_3 时刻，J_3 结被击穿，晶闸管承受

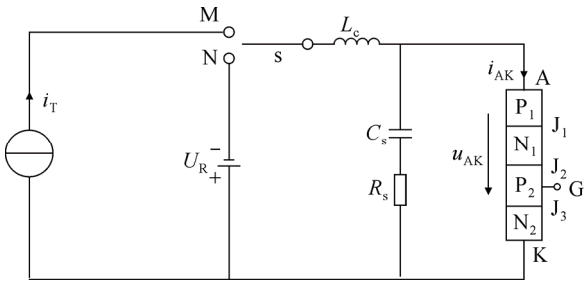


图 1　晶闸管关断等效电路

Fig.1　Equivalent circuit diagram of turn-off of thyristor

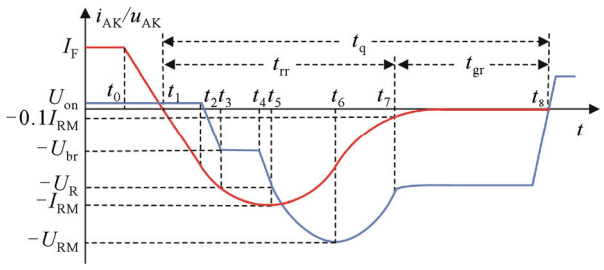


图 2　关断特性

Fig.2　Turn-off characteristic

一段时间的反压 U_{br}，此阶段其电流继续反向增大。

t_4—t_5 阶段：t_4 时刻，J_1 结积累的非平衡载流子被消耗完，此时 J_1 结的空间电荷区开始恢复，J_1 结失去正向偏置作用，开始承受反向电压，随着承受反压的增大，电流变化率逐渐减小。

t_5—t_7 阶段：t_5 时刻，电流变化率减小为零，反向恢复电流达到峰值 I_{RM}，晶闸管压降为反向关断电压 U_R。此阶段电流变化率为正值，晶闸管的压降为电感的感应电动势和关断电压 U_R 之和，在 t_6 时刻即电流变化率最大时会出现反向过电压 U_{RM}，此电压可能造成晶闸管过压损坏。

t_7—t_8 阶段：t_7 时刻，反向恢复电流下降到 0.1 倍的电流峰值，存储在 N_1 基区的少数非平衡载流子开始主要通过复合的方式消去，晶闸管逐渐恢复正向阻断能力，反向恢复电流减小到断态漏电流，直到 t_8 时刻晶闸管才恢复正向阻断能力。

上述 t_1—t_7 阶段的时间称为反向阻断恢复时间 t_{rr}，关断电流在反向阻断恢复时间 t_{rr} 段内的积分定义为反向恢复电荷 Q_{rr}。t_7—t_8 阶段的时间称为正向阻断恢复时间 t_{gr}，关断时间 t_q 定义为 t_{rr} 和 t_{gr} 之和。

2 晶闸管关断特性影响因素分析

晶闸管的关断特性主要受其器件本身参数及其外部运行参数的影响，基于对晶闸管关断过程动态特性分析，确定了晶闸管关断特性的主要影响因素为过零点电流变化率 di/dt、正向电流峰值 I_F 和结温 T_j。

如图 3 所示，过零点电流变化率主要决定非平衡载流子的扫出速度，正向电流峰值主要决定非平衡载流子的初始存储浓度，结温主要决定载流子的寿命。

以 KPc2000-85Y02 型号晶闸管为例，开展晶闸管测试试验，获得晶闸管过零点电流变化率、正向电流峰值和结温这 3 个因素对关断特征参数(反向恢复电流峰值 I_{RM}、反向恢复电荷 Q_{rr}、关断时间 t_q)的影响关系。

2.1 过零点电流变化率和结温综合作用下对晶闸管关断特性的影响

图 4 为结温、过零点电流变化率与关断特征参数的关系曲线图，可知在结温相同时，过零点电流变化率增大，I_{RM}、Q_{rr}、t_q 均逐渐增加。这是由于过零点电流变化率的增大使载流子复合时间减少，导致晶闸管进入关断过程的剩余电荷增多以及关断恢复阻断能力时间延长，从而使 I_{RM}、Q_{rr}、t_q 增加。当过零点电流变化率相同时，由于结温能延长晶闸管基区载流子寿命，则结温的升高也使 I_{RM}、Q_{rr}、t_q 增大。图 4 中 I_{RM}、Q_{rr} 和 t_q 都与过零点电流变化率 di/dt 呈近似线性正相关关系。

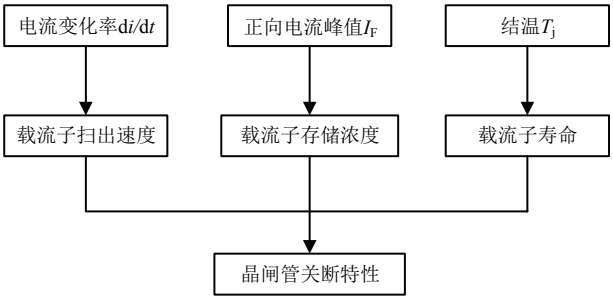


图 3 晶闸管关断特性影响因素

Fig.3 Influencing factors of thyristor turn-off characteristics

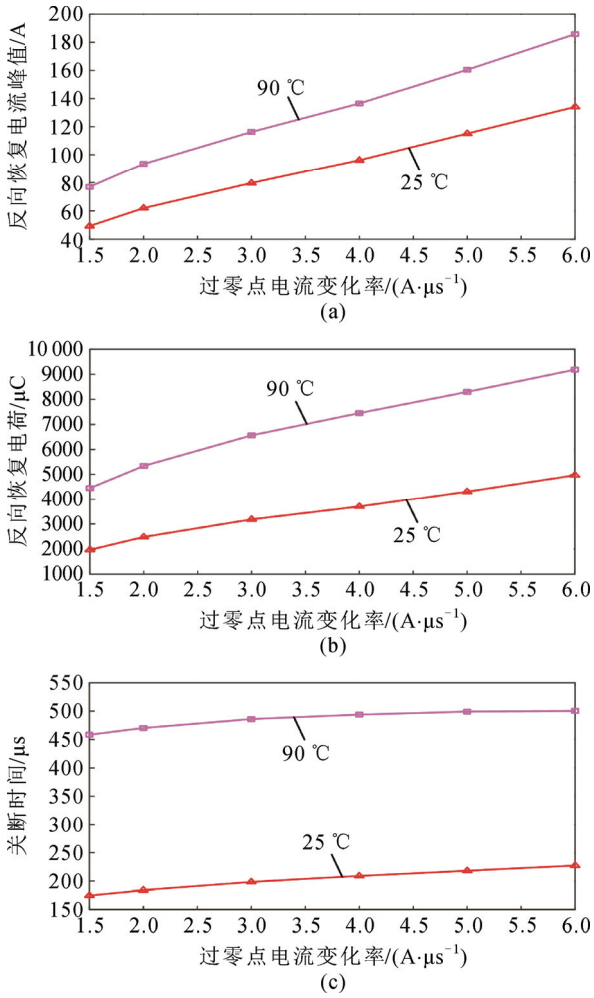


图 4 di/dt、T_j 与 I_{RM}、Q_{rr}、t_q 的关系曲线

Fig.4 Curves between di/dt, T_j and I_{RM}, Q_{rr}, t_q

2.2　正向电流峰值和结温综合作用下对晶闸管关断特性的影响

图 5 为结温、正向电流峰值与关断特征参数的关系曲线图，可知在结温相同时，正向电流峰值 I_F 增大到 1000 A 以上时，关断特征参数 I_{RM}、Q_{rr} 和 t_q 的变化幅度变小。这是由于存储在晶闸管基区的载流子浓度趋于饱和，再增大 I_F 对晶闸管关断特性的影响减小。当 I_F 相同时，结温大幅度升高，I_{RM}、Q_{rr}、t_q 的变化幅度明显增大。

3　考虑晶闸管关断特性的数字建模

3.1　晶闸管关断特性的数学模型

基于晶闸管的结构和内部动态物理过程，使用一次函数和指数函数的分段函数来描述反向恢复电流，其数学表达式为：

$$i_r(t)=\begin{cases}(t-t_a)\left.\dfrac{di}{dt}\right|_{t=t_a}, & t_a\le t<t_b\\ -I_{RM}e^{-\frac{t-t_b}{\tau}}, & t\ge t_b\end{cases}\tag{1}$$

式中：t_a 为晶闸管正向导通电流下降为零的时刻；t_b 为晶闸管反向恢复电流反向增大到峰值所对应的时刻；τ为时间常数。

晶闸管反向恢复电流的数学模型如图 6 所示，模型的关键参数是式(1)中的时间常数τ，具体求解过程如下：

将反向恢复电荷 Q_{rr} 分为三角形阴影区域 Q_1 和指数型阴影区域 Q_2，由式(2)到式(5)可推出时间常数τ。

$$t_b-t_a=-\frac{I_{RM}}{di/dt}\tag{2}$$

$$\begin{cases}Q_1=\left|\displaystyle\int_{t_a}^{t_b}(t-t_a)\left.\frac{di}{dt}\right|_{t=t_a}dt\right|=\frac{1}{2}(t_b-t_a)I_{RM}\\ Q_2=\left|\displaystyle\int_{t_b}^{t_c}-I_{RM}e^{-\frac{(t-t_b)}{\tau}}dt\right|\cong\tau I_{RM}\end{cases}\tag{3}$$

$$Q_{rr}=Q_1+Q_2=I_{RM}\left(-\frac{I_{RM}}{2di/dt}+\tau\right)\tag{4}$$

$$\tau=\frac{Q_{rr}}{I_{RM}}+\frac{I_{RM}}{2di/dt}\tag{5}$$

由上式可知，一旦确定了反向恢复电流峰值 I_{RM}、反向恢复电荷 Q_{rr} 及过零点电流变化率 di/dt 的值后，指数函数中的时间常数τ即可被确定。根据晶闸管实际测试数据对关断特征参数的分析可知，过零点电流变化率 di/dt、正向电流峰值 I_F 和结温 T_j 影响晶闸管关断过程中的反向恢复电荷和反向恢复电流峰值，可通过实测数据建立起在不同结温 T_j 下，Q_{rr}、I_{RM} 与 di/dt、I_F 的函数关系，如式(6)和(7)所示。

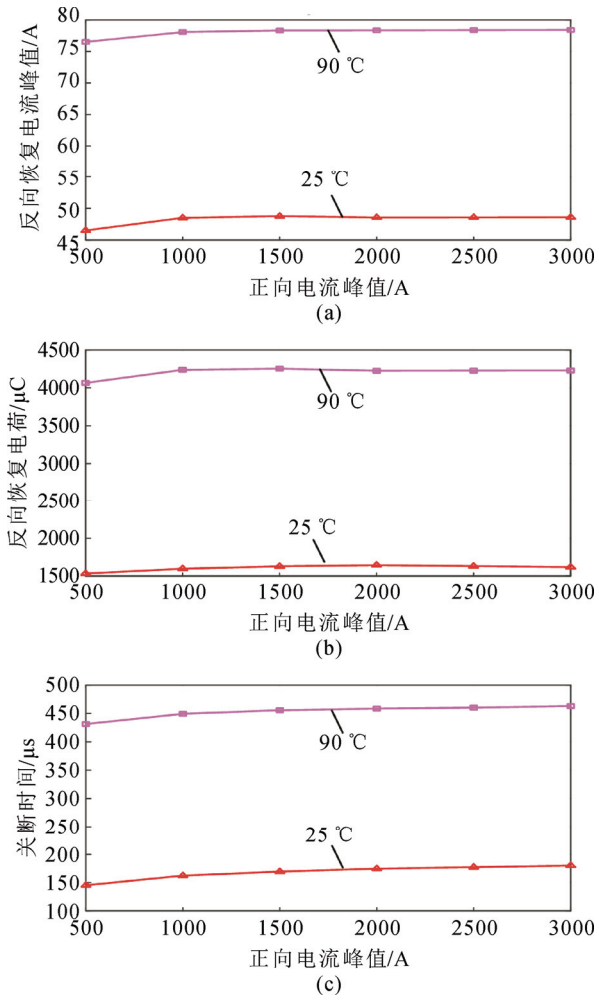


图 5　I_F、T_j 与 I_{RM}、Q_{rr}、t_q 的关系曲线

Fig.5　Curves between I_F, T_j and I_{RM}, Q_{rr}, t_q

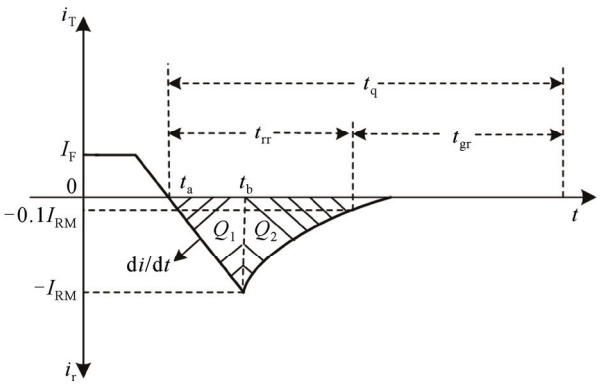


图 6　晶闸管反向恢复电流的数学模型

Fig.6　Mathematical model of reverse recovery current of thyristors

$$Q_{\mathrm{rr}} = \alpha_0 + \alpha_1 \mathrm{d}i / \mathrm{d}t + \alpha_2 I_{\mathrm{F}} \tag{6}$$

$$I_{\mathrm{RM}} = \beta_0 + \beta_1 \mathrm{d}i / \mathrm{d}t + \beta_2 I_{\mathrm{F}} \tag{7}$$

式(6)和式(7)中：系数α_i和β_i可根据器件的实测数据求取，i=0，1，2。

上述晶闸管的数学模型能反映晶闸管反向阻断恢复过程，但不能反映晶闸管的正向阻断恢复过程，在正向阻断恢复过程中，给晶闸管施加正向电压，晶闸管因没有恢复正向阻断而再次导通，反之，晶闸管需按正常导通条件导通。因其晶闸管关断时间t_{q}定义为t_{rr}和t_{gr}之和，所以用关断时间来间接反映晶闸管正向阻断恢复过程，进而实现晶闸管完整的数字建模。

常用电磁暂态仿真软件提供的晶闸管模型定义关断时间t_{q}为一个固定值，但根据产品实测数据分析可知，关断时间t_{q}受过零点电流变化率$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$、正向电流峰值I_{F}和结温T_{j}的影响。因此，关断时间t_{q}是随着外部运行工况变化而变化的，可基于实测数据，进行多元线性回归分析，建立不同结温T_{j}下，t_{q}与$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$、I_{F}的函数关系，如式(8)所示。

$$t_{\mathrm{q}} = \lambda_0 + \lambda_1 \mathrm{d}i / \mathrm{d}t + \lambda_2 I_{\mathrm{F}} \tag{8}$$

式中：λ_i为线性回归系数，i=0，1，2。

3.2 晶闸管数字建模方法

基于晶闸管关断特性的影响因素分析和数学模型，构建晶闸管数字仿真模型。

常用电磁暂态仿真软件中的晶闸管是一个基于可变电阻的开关模型，在承受反向电压关断时，正向导通电流直接截至为零，这与实际工程中的晶闸管关断特性不符。实际工程中的晶闸管在承受反压关断时，电流在减小到零后会继续反向增大到一个峰值，然后再衰减到一个接近于零的数值。这个关断过程包括了反向阻断恢复过程和正向阻断恢复过程，受过零点电流变化率、正向电流峰值和结温的影响，其关断时间也随这 3 个因素变化而变化，并不是一个固定值。晶闸管在关断时间内(未恢复正向阻断的过程中)承受正向电压，晶闸管导通，其在关断时间外(恢复了正向阻断过程后)承受正向电压，晶闸管不导通，晶闸管需按正常导通条件导通。

通过在软件自带晶闸管数字模型的基础上添加反向阻断恢复模块和正向阻断恢复模块来对晶闸管进行完整建模，才能更好地反映出实际晶闸管的关断特性。反向阻断恢复模块在晶闸管电流下降过零后通过数学表达式计算，直接输出反向恢复电流动态值，反映晶闸管的反向阻断恢复过程。正向阻断恢复模块通过在不同T_{j}下建立的t_{q}与$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$、I_{F}的函数关系来反映晶闸管的正向阻断恢复过程。

在 Simulink 仿真平台中构建具有反向阻断恢复模块和正向阻断恢复模块的自定义完整晶闸管模型。图 7 为自定义完整晶闸管建模示意图，图中 A、K、G 分别为自定义晶闸管模型的阳极、阴极和控制极，m 为仿真软件自带晶闸管模型的测量端口，测量其流过的电流i_{AK}及两端压降u_{AK}，当测量到流过晶闸管模型的电流减小到零时，反向阻断恢复模块启动，晶闸管进入反向恢复阶段，并通过采样保持获得晶闸管正向导通电流减小到零的时刻t_{a}。拟合参数计算模块求取拟合函数所需的参数，反向阻断恢复模块实时输出反向恢复电流，正向阻断恢复模块模拟晶闸管正向阻断恢复特性。

拟合参数计算模块如图 8 所示，图中通过关系运算符、微分运算与采样保持获得晶闸管过零点电流变化率$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$和晶闸管正向电流峰值I_{F}，结温T_{j}是依据晶闸管实际测试条件直接输入设定的，这是由于在实际测试中，结温在一定范围内变化时对晶闸管关断特性的影响较小，可用一固定值代替这个范围内变化的结温值，通过设置几组T_{j}数值来选择不同结温下的实测数据，进而得到拟合系数α_i、β_i、λ_i。

反向阻断恢复模块如图 9 所示，通过 3 个函数模块计算出I_{RM}、Q_{rr}和τ的值。通过关系运算符和采样保持确定反向恢复电流达到峰值的时刻t_{b}，在t_{b}时刻指数计算模块启动，实时计算出不同结温下指数形式的反向恢复电流值。选择模块 1 用于切换输出t_{b}时刻前后的反向恢复电流。

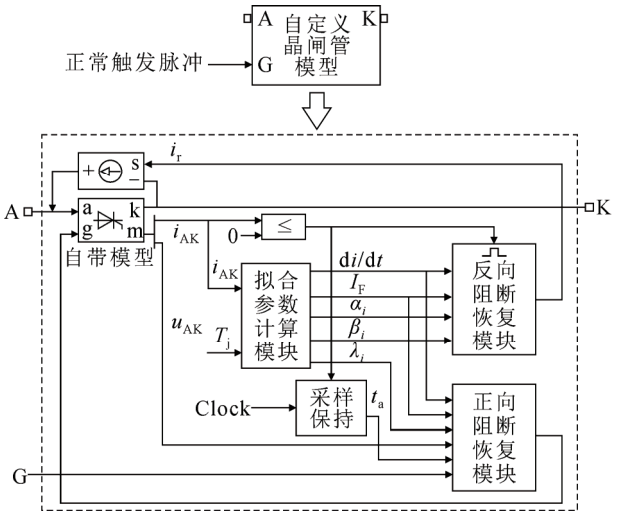


图 7 自定义完整晶闸管建模示意图

Fig.7 Modeling diagram of custom complete thyristor

正向阻断恢复模块如图 10 所示，通过式(8)获得不同结温下的最小关断时间，其实现功能为：当在晶闸管最小关断时间内，即未恢复正向阻断的过程中，检测到晶闸管承受正向电压时，选择模块 2 切换至向晶闸管控制极输入一个高电平，此时晶闸管导通，反之，晶闸管恢复正向阻断能力，需按正常触发才能导通。

另外，晶闸管在量产过程中存在制造工艺的差异，导致晶闸管存在明显的分散性和批次性，在对晶闸管进行数字建模时需要考虑器件本身的分散性、批次性的影响。

随机抽取实际高压直流系统采用的晶闸管 N 个，根据晶闸管测试条件，开展晶闸管测试实验，记录反向恢复电荷 Q_{rr}、反向恢复电流峰值 I_{RM}、关断时间 t_q 的值，由于晶闸管分散性和批次性的影响，Q_{rr}、I_{RM}、t_q 的值会在平均值上下波动，类似正态分布[32]，可以根据偏差值的大小将 N 个晶闸管进行分类(具体分类标准依据实际测试结果确定)，如偏差值在±σ1%的晶闸管归为 N_1 类，偏差值在±σ2%的晶闸管归为 N_2 类，以此类推。用一个典型晶闸管的测试数据代表这一类晶闸管的典型测试数据，基于测试数据，由式(6)到式(8)可得到每类晶闸管的 Q_{rr}、I_{RM}、t_q 的拟合函数，进而对每类晶闸管进行数字仿真建模。

基于上述各类典型晶闸管模型，进一步构建换流器模型，应用于高压直流系统，可以更加真实地反映换流器的换相动态过程，更准确仿真换相失败相关特性。

4　仿真验证与分析

4.1　晶闸管数字模型验证与分析

在 Simulink 平台中搭建等效晶闸管模型关断仿真电路，其电路原理图如图 11 所示：U_{DC} 为直流电源；C 为电容；R_0 为无感电阻，取值为 1 mΩ。

关断电路满足下列表达式：

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=-\frac{U_{DC}}{L_c} \tag{9}$$

$$I_F=U_{DC}\sqrt{\frac{C}{L_c}} \tag{10}$$

$$R_0<2\sqrt{\frac{L_c}{C}} \tag{11}$$

根据式(9)，通过改变回路电感 L_c，可获得不同过零点电流变化率 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$，同理，式(10)中通过改变充电电容 C，可获得不同的正向电流峰值，式(11)是仿真电路产生衰减振荡正弦电流的条件。

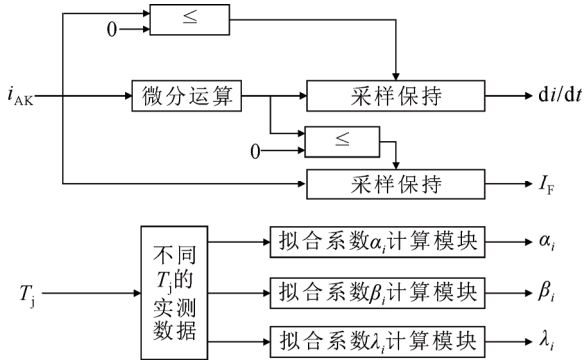


图 8　拟合参数计算模块示意图

Fig.8　Modeling diagram of fitting parameter calculation module

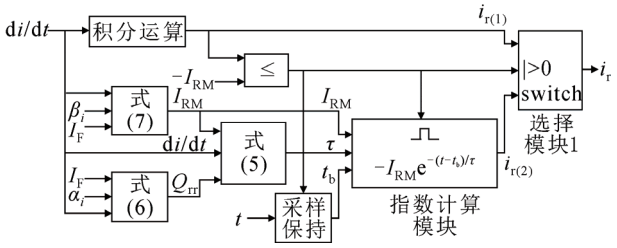


图 9　晶闸管反向阻断恢复模块建模示意图

Fig.9　Modeling diagram of thyristor reverse blocking recovery module

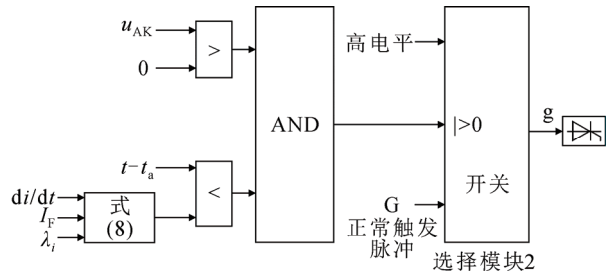


图 10　晶闸管正向阻断恢复模块建模示意图

Fig.10　Modeling diagram of thyristor forward blocking recovery module

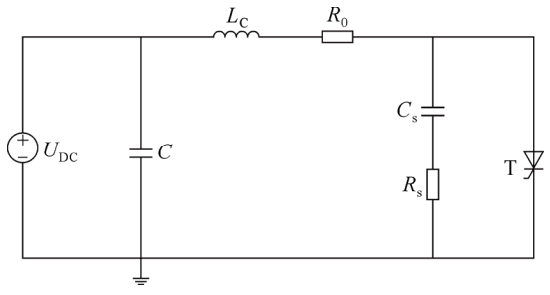


图 11　关断仿真电路

Fig.11　Turn off the simulation circuit

根据晶闸管测试条件，设置结温为 90 ℃，电容充电电压为 200 V，通过改变回路电感、电容与正向电压施加的时刻值，得到一定正向电流峰值下不同过零点电流变化率的关断特性曲线，以正向电流峰值 2000 A 为例，等效晶闸管模型关断过程中反向恢复电流峰值、关断时间的仿真值与实测值的对比如图 12 所示。

由图 12 中的数据对比可知，反向恢复电流峰值的仿真值与实测值误差保持在 5%以内，关断时间的仿真值与实测值误差保持在 4%以内。

设置结温为 90 ℃，电容充电电压为 200 V，正向电流峰值为 2000 A，过零点电流变化率为 2 A/μs，在这种工况对应的关断时间内外给晶闸管施加正向电压，验证晶闸管的正向阻断恢复特性，仿真结果如图 13 所示。

图 13(a)表示在关断时间外即晶闸管恢复了正向阻断后，给等效晶闸管模型施加正向电压，晶闸管按正常导通条件导通。图 13(b)表示在关断时间内给等效晶闸管模型施加正向电压，等效模型立即导通。

综合以上仿真结果，表明建立的晶闸管数字模型可以有效地反映器件的关断特性，更加准确地仿真晶闸管的关断过程。

4.2 换流器数字模型分析

将等效晶闸管模型用于高压直流系统逆变侧换流器中，构建考虑器件关断特性的换流器精细化电磁暂态模型，并在逆变侧交流母线处分别设置经 0.2 H 电感单相接地短路和经 0.27 H 电感三相短路接地故障，对比分析等效晶闸管模型构建的换流器模型和软件自带换流器模型在故障状态下换相特性仿真的差异，仿真结果分别如图 14 和图 15 所示。

观察图 14、15 可知：考虑器件关断特性的换流器模型在两种故障状态下高压直流系统均发生换相失败，而软件自带换流器模型均未发生换相失败。这是由于等效晶闸管模型考虑了关断过程，即在仿真分析中考虑了关断时间，当系统发生故障导致系统关断角对应时间小于换流阀的临界关断角对应时间，系统发生换相失败，而软件自带模型未考虑晶

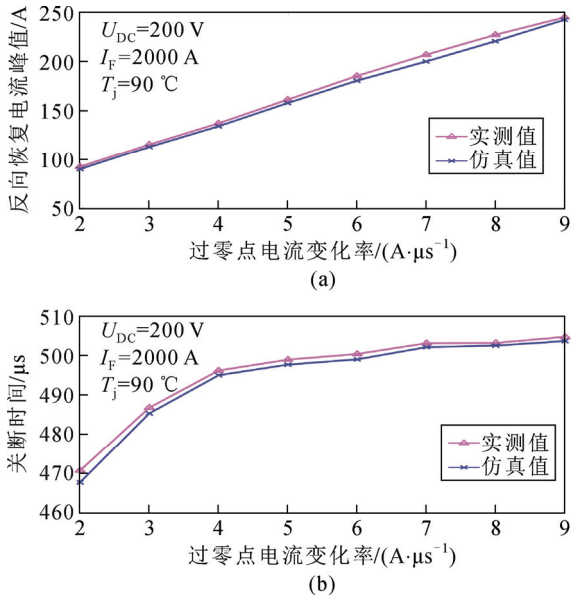


图 12 I_{RM}、t_q 仿真值与实测值对比图

Fig.12 Comparison diagram of I_{RM}, t_q simulation values and measured values

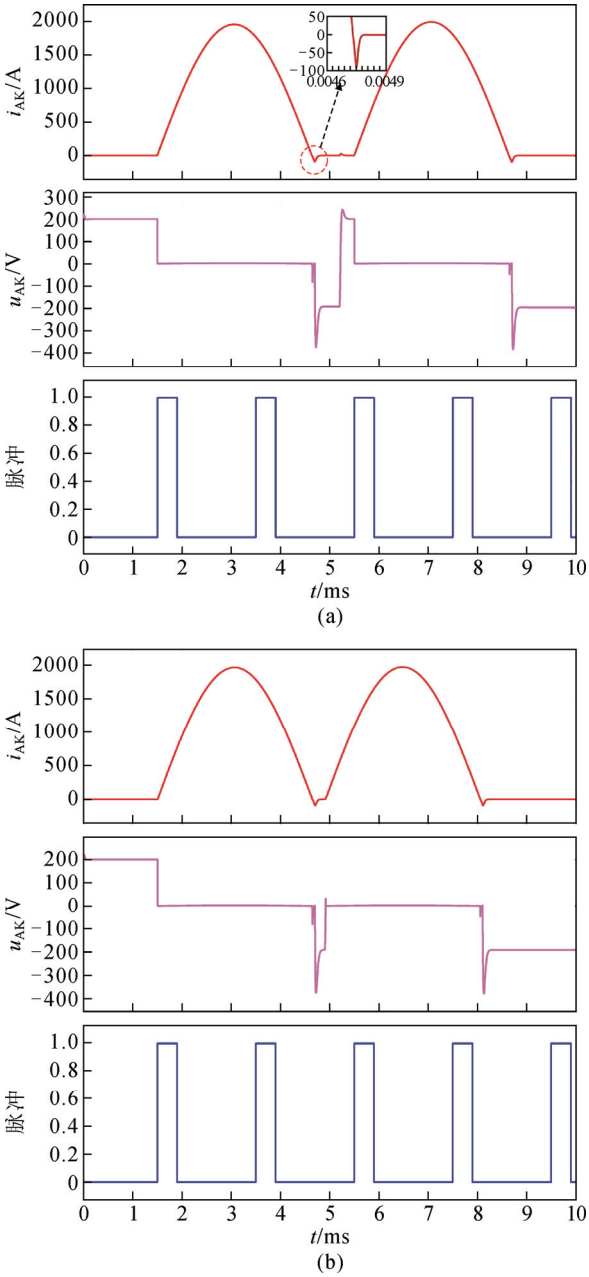


图 13 t_q 内外给等效晶闸管模型施加正向电压示意图

Fig.13 Schematic diagram of applying forward voltage to an equivalent thyristor model inside and outside t_q

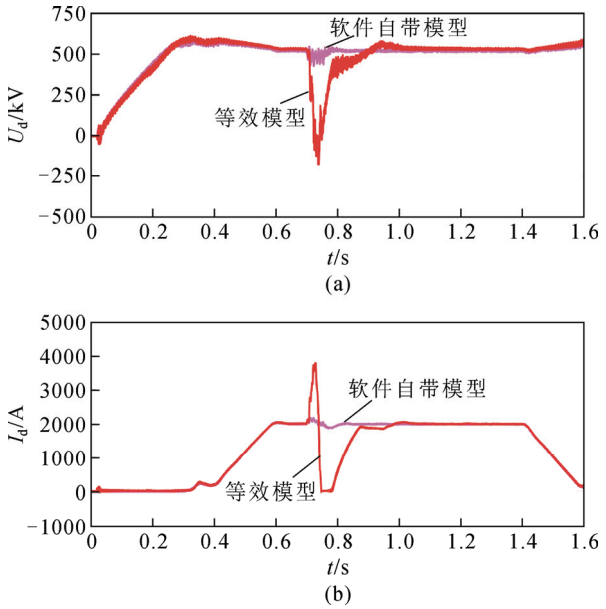


图 14　单相经 0.2 H 电感接地故障下直流电压、电流波形

Fig.14　DC voltage and current waveforms of single-phase grounding fault through 0.2 H inductor

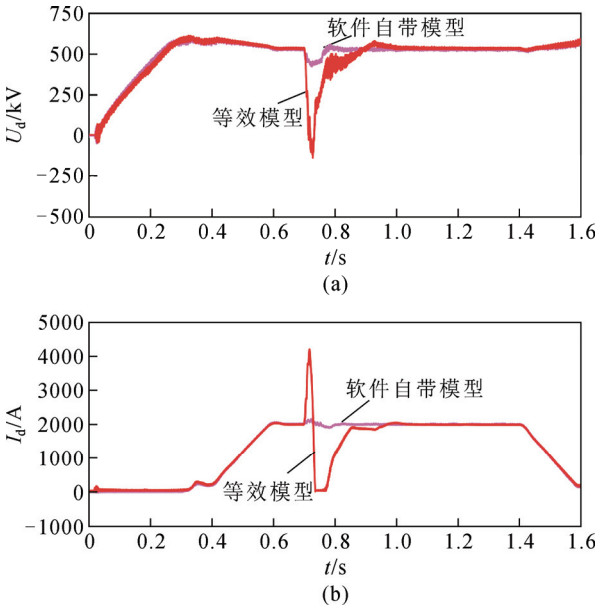


图 15　三相经 0.27 H 电感接地故障下直流电压、电流波形

Fig.15　DC voltage and current waveforms of three-phase grounding fault through 0.27 H inductor

闸管关断过程带来的影响，系统未发生换相失败，由此可看出考虑器件关断特性的换流器更能准确地反映高压直流系统换相失败的特征，为换相失败的相关研究工作提供更精准的仿真模型。

5　结论

本文分析了晶闸管关断动态特性，提出了过零点电流变化率、正向电流峰值和结温三者对晶闸管关断过程影响的表征方法，建立了能反映实际关断特性的完整晶闸管数字仿真模型，将此模型用于晶闸管换流器中，构建了考虑器件关断特性的换流器精细化电磁暂态模型，得出了以下结论：

1）过零点电流变化率和正向电流峰值的增大会增加反向恢复电流过零时刻晶闸管基区非平衡载流子存储浓度，导致反向恢复电荷增多，反向恢复电流峰值增大，关断时间延长。

2）结温升高会使基区非平衡载流子寿命延长，反向恢复电荷增多，导致反向恢复电流增大，关断时间增加。

3）建立了能反映晶闸管关断过程的数字模型，对比分析了仿真值与实测值，反向恢复电流峰值误差不超过 5%，关断时间误差小于 4%，建立的晶闸管数字仿真模型能较精确反映晶闸管的关断特性。

4）构建的考虑器件关断特性的换流器精细化电磁暂态模型在故障情况下能更准确地反映高压直流系统换相失败的特征，为换相失败的相关研究工作提供更精准的仿真模型，对换相失败的研究具有现实意义。

参考文献　References

[1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 2 版. 北京：中国电力出版社，2011：124-127.
ZHAO Wanjun. High voltage direct current transmission engineering technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2011: 124-127.

[2] 赵成勇，叶蕴霞，展瑞琦，等. 电压跌落影响换流阀晶闸管可靠关断的机理研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(12)：4505-4515.
ZHAO Chengyong, YE Yunxia, ZHAN Ruiqi, et al. Research on the mechanism of the voltage drop affecting the reliable turn-off of the thyristor in converter valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4505-4515.

[3] 袁佳歆，莫作权，李旭哲，等. 换流阀用阳极饱和电抗器研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(12)：4829-4841.
YUAN Jiaxin, MO Zuoquan, LI Xuzhe, et al. Review of anode saturable reactor for converter valve[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4829-4841.

[4] 王渝红，寇　然，宋瑞华，等. 基于多判据预测的特高压直流分层接入系统换相失败抑制策略[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1304-1313.
WANG Yuhong, KOU Ran, SONG Ruihua, et al. Commutation failure suppression strategy based on multi-criteria prediction in UHVDC hierarchical connection system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1304-1313.

[5] 简　文，周自强，唐　飞，等. 抑制多馈入直流换相失败的同步调相机优化配置方法[J]. 高电压技术，2021，47(1)：169-177.
JIAN Wen, ZHOU Ziqiang, TANG Fei, et al. Optimal configuration of

synchronous condensers for suppressing multi-infeed DC commutation failure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 169-177.

[6] 唐英杰，徐　政，乐　波，等. 基于高频模型的换流阀换相过冲研究与阻尼回路参数优化[J]. 高电压技术，2021，47(2)：615-626.
TANG Yingjie, XU Zheng, YUE Bo, et al. Study on commutation overshoot and snubber circuit parameters optimization of LCC valve based on high frequency model[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 615-626.

[7] 郭春义，刘　博，赵成勇. 增强型电容换相换流器直流输电系统的新型换相失败抑制协调控制方法[J]. 中国电机工程学报，2019，39(18)：5298-5307.
GUO Chunyi, LIU Bo, ZHAO Chengyong. A novel coordinated control strategy to mitigate the commutation failure for enhanced capacitor commutated converter based HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5298-5307.

[8] 许　钒，周会高，刘　朴，等. ±1100 kV 特高压直流输电晶闸管阀运行试验系统设计[J]. 高电压技术，2012，38(2)：400-406.
XU Fan, ZHOU Huigao, LIU Pu, et al. Design for ±1100 kV UHVDC thyristor valve operational test circuit[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 400-406.

[9] 岳　珂，刘隆晨，孙　玮，等. 反向恢复特性在高功率晶闸管检测试验中的应用[J]. 高电压技术，2017，43(1)：97-103.
YUE Ke, LIU Longchen, SUN Wei, et al. Application of reverse recovery characteristics in high power thyristor testing[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 97-103.

[10] 宋金钊，李永丽，曾　亮，等. 高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力系统自动化，2020，44(22)：1-13.
SONG Jinzhao, LI Yongli, ZENG Liang, et al. Review on commutation failure of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 1-13.

[11] 刘席洋，王增平，郑博文，等. LCC-HVDC 故障恢复型连续换相失败机理分析与抑制措施[J]. 中国电机工程学报，2020，40(10)：3163-3171.
LIU Xiyang, WANG Zengping, ZHENG Bowen, et al. Mechanism analysis and mitigation measures for continuous commutation failure during the restoration of LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3163-3171.

[12] 展瑞琦，叶蕴霞，夏嘉航，等. 混合串联换流阀抑制换相失败的作用原理及动态均压电路参数设计[J]. 中国电机工程学报，2022，42(9)：3385-3397.
ZHAN Ruiqi, YE Yunxia, XIA Jiahang, et al. The action principle of hybrid series converter valve against commutation failure and the design of dynamic voltage equalizing circuit parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3385-3397.

[13] 贺杨烨，郑晓冬，郜能灵，等. 交直流混联电网 LCC-HVDC 换流器建模方法综述[J]. 中国电机工程学报，2019，39(11)：3119-3129.
HE Yangyang, ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, et al. A review of modeling methods for LCC-HVDC converter in AC/DC hybrid power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3119-3129.

[14] 洪泽祺，许　寅，和敬涵，等. 考虑换流器内部故障的 LCC-HVDC 动态平均化建模方法[J]. 电力系统自动化，2019，43(22)：84-93.
HONG Zeqi, XU Yin, HE Jinghan, et al. Dynamic average-value modeling method of LCC-HVDC system considering internal fault of converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 84-93.

[15] LIANG Y C, GOSBELL V J. A versatile switch model for power electronics SPICE2 simulations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1989, 36(1): 86-88.

[16] GRACIA F J, ARIZTI F, ARANCETA F J. A nonideal macromodel of thyristor for transient analysis in power electronic systems[J]. IEEE Transactions on industrial Electronics, 1990, 37(6): 514-520.

[17] 邹　刚，陈祥训，郑健超，等. 用于电力电子系统暂态过程分析的晶闸管宏模型[J]. 中国电机工程学报，1999，19(6)：1-5.
ZOU Gang, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao, et al. Macro-model of thyristor for transient analysis in power electronic system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(6): 1-5.

[18] 赵中原，朱周侠，邱毓昌，等. 高压直流输电用可控硅宏的模型[J]. 高电压技术，2002，28(9)：1-2，16.
ZHAO Zhongyuan, ZHU Zhouxia, QIU Yuchang, et al. Establishment and applications of macro-model of SCR used for HVDC power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(9): 1-2, 16.

[19] 邹　刚，陈祥训，郑健超，等. 一种微观－宏观相结合的晶闸管 PSPICE 模型[J]. 中国电机工程学报，1999，19(7)：6-10，79.
ZOU Gang, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao, et al. Micro-macro pspice model of thyristor[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 6-10, 79.

[20] ABB. Design of RC snubbers for phase control application: 5SYA 2001-01[S]. 2001.

[21] 张　静，汤广福，温家良，等. 高压大功率晶闸管反向恢复特性动态模型[J]. 电力电子技术，2015，49(4)：50-53.
ZHANG Jing, TANG Guangfu, WEN Jialiang, et al. Dynamic modelling of the turn off performance of high voltage power thyristor[J]. Power Electronics, 2015, 49(4): 50-53.

[22] 申　宁，杨　山. 基于 Matlab 的晶闸管换相过电压仿真[J]. 大功率变流技术，2009(2)：12-14.
SHEN Ning, YANG Shan. Simulation of commutating over voltage for thyristor based on Matlab[J]. High Power Converter Technology, 2009(2): 12-14.

[23] LEE C W, PARK S B. Determination of thyristor reverse recovery current parameters[J]. IEEE Proceedings B (Electric Power Applications), 1988, 135(2): 91-96.

[24] 叶明天，李戈琦，陈炫宇，等. 高压直流换流阀晶闸管控制单元保护特性与晶闸管级仿真建模[J]. 电网技术，2020，44(4)：1445-1452.
YE Mingtian, LI Geqi, CHEN Xuanyu, et al. Protection characteristics of thyristor control unit and simulation model of thyristor-level for HVDC converter valve[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1445-1452.

[25] 刘　阳，王少杰，戴　玲，等. 高压直流输电用晶闸管关断特性分析及建模仿真[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4447-4454.
LIU Yang, WANG Shaojie, DAI Ling, et al. Analysis and modeling-simulation on turn-off characteristics of HVDC thyristor[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4447-4454.

[26] 戴　玲，田书耘，金超亮，等. 脉冲功率晶闸管反向恢复特性[J]. 强激光与粒子束，2016，28(11)：115001.
DAI Ling, TIAN Shuyun, JIN Chaoliang, et al. Reverse recovery characteristics of pulse power thyristor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(11): 115001.

[27] 刘隆晨，岳　珂，庞　磊，等. 基于反向恢复特性的换流阀晶闸管级控制单元保护功能测试研究[J]. 电网技术，2017，41(11)：3727-3732.
LIU Longchen, YUE Ke, PANG Lei, et al. Study on protective function test of control unit of thyristor level in HVDC converter valve based on thyristor reverse recovery characteristics[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3727-3732.

[28] 唐英杰，徐　政，乐　波，等. 基于单晶闸管级电路拓扑的串联晶闸管反向恢复过程建模及换相过冲电压研究[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4435-4446.
TANG Yingjie, XU Zheng, YUE Bo, et al. Modeling of reverse recovery process of series thyristor based on single thyristor level circuit topology and study of commutation over-voltage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4435-4446.

[29] 解　婷，汤广福，郑健超，等. 高压直流晶闸管阀故障电流下反向电压特性的分析[J]. 中国电机工程学报，2012，32(1)：140-146.
XIE Ting, TANG Guangfu, ZHENG Jianchao, et al. Analysis on reverse voltage characteristics of HVDC thyristor valves in the fault state[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 140-146.

[30] 王　峰，刘天琪，由新红，等. 基于暂态直流电流预测的换相失败临界电压瞬时值判据[J]. 高电压技术，2021，47(1)：129-137.
WANG Feng, LIU Tianqi, YOU Xinhong, et al. Critical instantaneous voltage of commutation failure based on transient DC current prediction[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 129-137.

[31] 周泓宇，姚　伟，李程昊，等. 一种可降低首次换相失败风险的预测型低压限流控制[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3179-3189.
ZHOU Hongyu, YAO Wei, LI Chenghao, et al. A predictive voltage dependent current order limiter with the ability to reduce the risk of first commutation failure of HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3179-3189.

[32] 高　冲，温家良，于坤山. 反向恢复电荷分散性对直流换流阀的影响[J]. 中国电机工程学报，2008，28(28)：1-5.
GAO Chong, WEN Jialiang, YU Kunshan. Influence of thyristor reverse recovery charge dispersity on HVDC valves[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 1-5.



辛业春
1982—，男，博士，教授，博导
主要从事柔性直流输电技术、输变电运行状态在线监测方面的研究工作
E-mail: xinyechun@163.com

XIN Yechun
Ph.D., Professor



郝　欢
1994—，男，硕士生
主要从事晶闸管数字仿真建模方面的研究工作
E-mail: 1290041009@qq.com

HAO Huan



王　拓(通信作者)
1995—，男，博士生
主要从事直流输电技术、交直流电力系统分析与控制等领域的研究工作
E-mail: wangtuo950408@163.com

WANG Tuo
Ph.D. candidate
Corresponding author

收稿日期　2023-09-03　修回日期　2023-10-13　　编辑　陈　蔓