

# 一种脉冲电流工况下晶闸管缓冲电路的优化方法\*

全 玮<sup>1,2</sup>, 李 华<sup>1</sup>, 傅 鹏<sup>1</sup>, 王 琨<sup>1,2</sup>, Mahmood Ul Hassan<sup>1</sup>, 宋执权<sup>1</sup>

(1. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 科学岛分院, 合肥 230026)

**摘 要:** 对脉冲工况下超导磁体失超保护系统的晶闸管阀组缓冲回路参数进行设计和优化。基于晶闸管反向恢复电流的指数衰减模型建立了晶闸管关断时刻的电流数学模型。通过测试实验获得关键参数之间的关系并结合晶闸管性能及系统要求在 Matlab 中建立晶闸管电流反向恢复模型。考虑关断时刻电流下降率、反向恢复电压峰值等性能指标要求及回路研制费用, 提出了一种脉冲工况下晶闸管缓冲回路的参数设计及优化方法。在 Matlab 中搭建失超保护系统模型, 对比优化前后缓冲回路对系统在晶闸管关断时刻电气性能的影响, 仿真结果显示, 相比于原参数, 最优参数下, 反向恢复电压峰值降低了 11%, 反向恢复电压变化率峰值降低了 43%。同时, 回路制造成本降低为原先的 1/7。

**关键词:** 失超保护; 晶闸管; 缓冲回路; 脉冲电流

中图分类号: TM135

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190280

## A parameter optimization method of snubber circuit of thyristor under pulse current working condition

Tong Wei<sup>1,2</sup>, Li Hua<sup>1</sup>, Fu Peng<sup>1</sup>, Wang Kun<sup>1,2</sup>, Mahmood Ul Hassan<sup>1</sup>, Song Zhiquan<sup>1</sup>

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Science Island Branch, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** As thyristor valve is the core equipment of quench protection system of large fusion device, the design and optimization of its snubber circuit parameters are related to the safety and reliability of the valve and even the whole quench protection system. So far, most of the design and optimization of snubber circuit parameters are based on DC steady-state conditions. However, there are few literatures on parameter optimization under impulse conditions. In this paper, the buffer circuit parameters of thyristor valve are designed and optimized under the pulse condition of superconducting magnet quench protection system. Based on the exponential model of thyristor reverse recovery current, the current mathematical model at the turn-off time is established. The relationship between the key parameters is obtained through experiments, and the reverse recovery model of thyristor current is established in Matlab according to thyristor performance and system requirements. Considering the performance requirements such as current drop rate at turn-off time, peak reverse recovery voltage and the cost, a parameter design and optimization method of thyristor snubber circuit under pulse condition is proposed. The model of quench protection system is built in Matlab, the simulation results show that compared with the original parameters, the optimal parameters reduce 11% of the peak reverse recovery voltage and 43% of the peak reverse recovery voltage change rate. At the same time, the manufacturing cost of the circuit is reduced to 1/7 of the original one.

**Key words:** quench protection; thyristor; snubber circuit; pulse current

当超导磁体由层间摩擦等原因使得导体电阻值的上升时, 磁体电流将在导体内产生大量的焦耳热, 从而导致磁体温度急剧上升, 对超导磁体造成不可逆的破坏<sup>[1]</sup>。这种超导磁体由超导态向阻态转变的过程被定义为超导磁体的失超。失超保护系统的作用是当磁体发生失超时, 利用大电流直流断路器、换流技术及大功率移能电阻将磁体中的能量迅速转移并释放。这对超导磁体的保护有着极其重要的意义<sup>[2-3]</sup>。中国科学院等离子体物理研究所计划建设的大功率超导测试平台中的失超保护系统应用了先进的人工过零换流技术<sup>[4]</sup>。其换流支路中的晶闸管阀

\* 收稿日期: 2019-07-31; 修订日期: 2019-10-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFE0300504)

作者简介: 全 玮 (1993—), 男, 博士研究生, 从事聚变电源失超保护系统研究; tongwei@ipp.ac.cn。

通信作者: 宋执权 (1975—), 男, 研究员, 从事大功率聚变电源系统及开关技术研究; zhquansong@ipp.ac.cn。

组控制脉冲电流的导通,决定了直流断路器关断的可靠性和成功率。由于整个系统及线路的杂散参数的存在,在晶闸管关断的瞬间将在其两端产生很高的关断过电压。一旦晶闸管阀组无法正常工作,整个失超保护系统运行的稳定性会受到严重的影响<sup>[5-7]</sup>。

目前降低晶闸管关断时反向过电压最有效的方法是在其两端并联 RC 缓冲电路降低过电压。然而,参数的不匹配不仅会大大增加回路的研制成本,还将使其过电压保护能力大打折扣,甚至会增加晶闸管关断失败的概率。本文首先对失超保护系统的动作过程及晶闸管的运行工况进行了描述和分析。为了建立有效的晶闸管模型以对其关断过程进行仿真,对中车时代 MKPE 330-052 晶闸管进行了脉冲放电测试实验,得到电流下降率、反向恢复电荷及反向恢复电流峰值与通态脉冲电流峰值之间的关系。基于实验结果,在 Matlab 仿真平台上搭建了系统电路模型,根据晶闸管的性能手册及系统要求提出了一套缓冲回路参数的优化方法。仿真结果表明:对比原缓冲回路参数,通过该优化方法得到的参数可使晶闸管反向过电压降低 11%,反向电压变化率降低 43%,同时造价降低为原造价的 1/7。

## 1 失超保护系统换流技术

图 1 为人工过零型失超保护系统换流过程简化图。其中:  $C$  为脉冲电容;  $L$  为脉冲电抗器;  $T$  为晶闸管阀组; BPS 为机械开关; VCB 为真空开关; DR 为泄能电阻。磁体正常运行时,主回路 BPS 处于闭合状态并长期流过数十 kA 的超导磁体电流,此时 TCL 支路处于断开状态。当超导磁体发生失超时, BPS 开关断开,换晶闸管阀组  $T$  闭合,磁体电流从 BPS 支路转移至 TCL 支路中。当 BPS 恢复阻断性能后,晶闸管阀组  $T$  断开,磁体电流最终转移至泄能支路中,并将其中的能量在泄能电阻 DR 中消耗<sup>[8-9]</sup>。

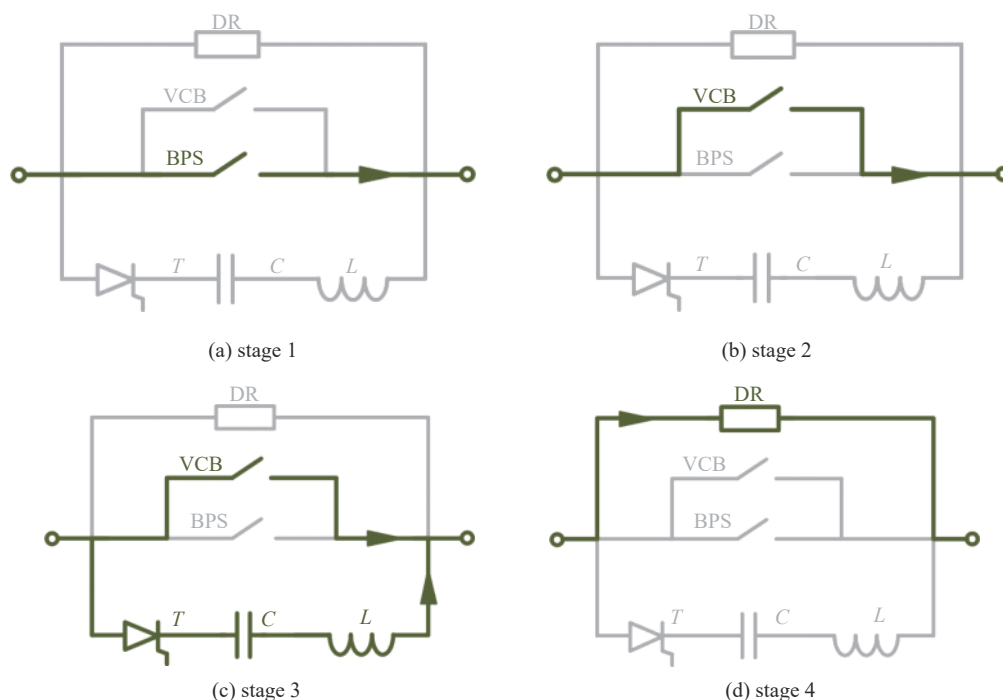


Fig. 1 Simplified commutation diagram of quench protection system (QPS)

图 1 人工过零型失超保护系统换流过程

晶闸管阀组的工作可靠性对失超保护系统有着重要的地位。一旦阀组关断失败, VCB 将无法使磁体电流换流至泄能电阻。这将导致磁体因焦耳热累积使其温度过高,遭受不可逆的损坏。晶闸管的反向恢复特性是导致其关断失败甚至永久失效的主要原因。缓冲电路用于降低晶闸管两端的过电压。因此对缓冲回路的参数进行合理的设计和优化是非常有必要的。

## 2 晶闸管反向恢复模型

### 2.1 分析模型的选择

晶闸管的基区具有低掺杂、大注入的特点,在导通过程中,其内部充斥着大量的载流子。当晶闸管被施加反向电压被强制关断时,正向电流逐渐衰减到零。但残余的载流子并不能立即消失,晶闸管短时间内仍然保持导通,

电流过零后继续反向流通。随后,晶闸管恢复阻断能力,反向电流迅速下降,从最大值衰减至稳定的漏电流<sup>[10]</sup>。在此过程中由于  $di/dt$  极大,在系统杂散电感上将会产生极高的过电压。这个过程就是晶闸管的反向恢复过程。

目前,对于晶闸管反向恢复过程最常用的分析模型有以下三种:突然截止型模型、指数型模型和双曲模型<sup>[11]</sup>。突然截止模型是反向假定恢复电流达到峰值时,晶闸管突然完全截止,相当于开路。这种分析方法对于求解等效电路的微分方程十分便利。然而,大多数晶闸管的恢复过程都是“软恢复”,反向恢复电流不会突然截止。因此,对于反向恢复过程的描述必须有时间参数的考虑。其简化电流波形如图 2 所示,反向恢复电流表达式为

$$i_r(t) = \begin{cases} -t \frac{di}{dt}, & t_0 < t < t_1 \\ -I_{RM} e^{-\frac{t-t_1}{\tau}}, & t_1 \leq t \leq t_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $I_{RM}$  为反向恢复电流峰值;  $\tau$  为时间常数。指数函数很好地模拟反向恢复电流,相比于突然截止模型,指数函数模型所描述的反向恢复电流更加准确。同时,利用计算机进行数值计算可以很好地解决微分方程组求解繁琐的问题。

### 2.2 反向恢复过程关键参数关系

公式(1)中,  $di/dt$  取决于外电路的杂散参数。一旦  $I_{RM}$  已知,反向电流峰值时间  $t_1$  就可以求得。因此,求解反向恢复电流的关键在于  $I_{RM}$  与时间常数  $\tau$ 。反向恢复电荷  $Q_{rr}$  与时间常数的关系如下

$$Q_{rr} = Q_d + Q_j = \frac{I_{RM}^2}{2 \frac{di}{dt}} + I_{RM} \tau \quad (2)$$

式中:  $Q_d, Q_j$  分别为定义的两部分电荷。求解方程(2)可得

$$\tau = \frac{Q_{rr}}{I_{RM}} - \frac{I_{RM}}{2 di/dt} \quad (3)$$

在反向恢复过程中,  $Q_{rr}$  不仅仅与脉冲电流的峰值  $I_p$  有关,还与电流过零点的  $di/dt$  有关。通过晶闸管脉冲工况测试结果可知,  $di/dt$  与  $I_p$  存在线性关系。实验电路、实验结果及  $di/dt$  与  $I_p$  关系曲线见图 3 及表 1。图 3 中  $C=1.11 \text{ mF}$ ,  $L=25 \text{ } \mu\text{H}$ ,  $R_{dc}=1 \text{ m}\Omega$ 。

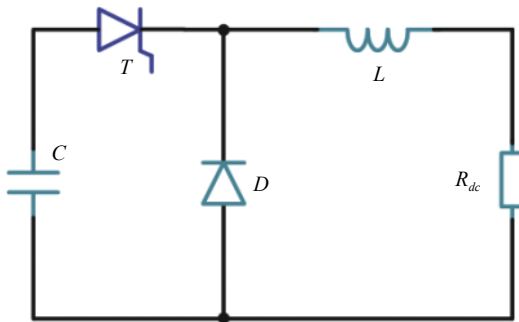


Fig. 3 Test circuit for thyristor reverse recovery characteristic  
图 3 脉冲工况下晶闸管测试实验电路图

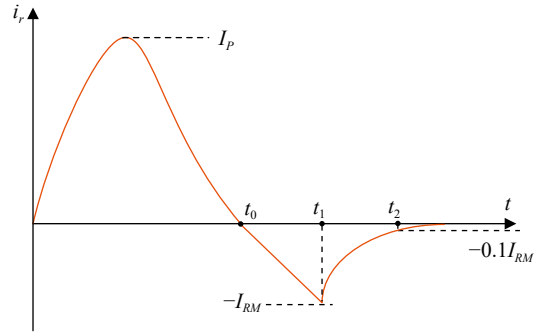


Fig. 2 Exponential function model  
图 2 指数型模型波形图

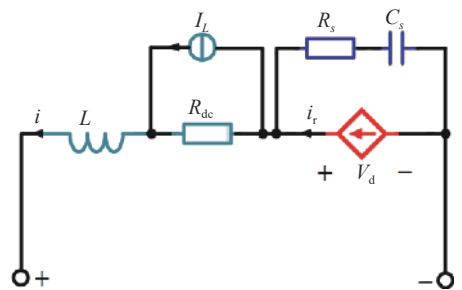


Fig. 4 Equivalent circuit diagram of snubber circuit during the reverse recovery process  
图 4 等效电路图

因此,  $Q_{rr}$  关于  $di/dt$  和  $I_p$  的关系式可以被简化为仅与  $di/dt$  有关,其表达式如下

$$Q_{rr} = a_0 + a_1 \left( \frac{di}{dt} \right) + a_2 \left( \frac{di}{dt} \right)^2 + \dots \quad (4)$$

### 3 瞬态分析

为了更好地理解缓冲电路的工作原理,在失超保护系统中,对缓冲电路工作的瞬态进行了一系列的推导和研究。其推导结果同时也对后续参数的优化起到了很大的帮助<sup>[12]</sup>。在磁体电流换流开始前,充电电容预充电 7 500 V。考虑到充电电压相对较高且换流时间极短,充电电容可用 7 500 V 直流电压源进行等效。另外,由于超导磁体电感

表 1 晶闸管反向恢复过程中电气参数数据

Table 1 Specific characteristics of thyristor during reverse recovery process

charge voltage/V	$I_p/A$	$I_{RM}/A$	$di/dt/(A \cdot \mu s^{-1})$	$Q_{rr}/\mu C$
1 000	6 622	895	37.10	8 057.3
1 500	9 935	967	50.96	8 412.8
2 000	13 250	1 100	76.54	9 049.2
2 500	16 560	1 206	97.41	9 568.7
3 000	19 880	1 330	121.22	10 153.0
3 500	23 190	1 402	135.97	10 505.4
4 000	26 500	1 523	160.26	11 076.2
4 500	29 810	1 627	179.44	11 517.1
5 000	33 160	1 738	198.98	11 962.4
5 500	36 480	1 846	221.88	12 471.5
6 000	39 790	1 915	238.76	12 849.6
6 500	43 090	2 014	256.90	13 244.7
7 000	46 380	2 132	279.01	13 715.9
7 500	49 880	2 230	298.37	14 122.1

高达 H 级, 因此可将其等效为 100 kA 直流电流源。对于晶闸管反向恢复过程中流过的电流用受控电流源进行等效。等效后的电路如图 4 所示。

根据第 2.2 节分析, 当得到脉冲电流峰值  $I_p$  及  $di/dt$  的值后,  $Q_{rr}$  就可以根据表达式 (4) 求出。此时, 电流表达式的微分方程如下, 其中,  $U$  为系统两端电压。

$$L \frac{di}{dt} + R_{dc}i + (i - i_r)R_s + \frac{1}{C_s} \int (i - i_r)dt = U \quad (5)$$

将反向恢复电流指数模型代入公式 (5), 可得

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R_{dc} + R_s}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC_s}i = \left( \frac{1}{LC_s} - \frac{R_s}{L\tau} \right) I_{RM}e^{-t/\tau} \quad (6)$$

令  $\xi = (R_{dc} + R_s)/2L$ ,  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC_s}$ ,  $p = \xi/\omega$  后, 将式 (6) 简化后, 可得

$$\frac{d^2i}{dt^2} + 2\xi \frac{di}{dt} + \omega_0^2i = \left( \omega_0^2 - \frac{R_s}{L\tau} \right) I_{RM}e^{-t/\tau} \quad (7)$$

根据电路中缓冲电阻、缓冲电容的不同, 电路的震荡可分为欠阻尼、过阻尼和临界阻尼三种震荡形式。三种不同形式对应的电流  $i$ 、反向恢复电压  $V_d$  及反向恢复电压变化率  $dV_d/dt$  如下, 其中  $i_{Un}$  为欠阻尼震荡电流,  $i_{Ov}$  过阻尼震荡电流,  $i_{Cr}$  临界阻尼震荡电流。

(1) 欠阻尼震荡 ( $\xi < \omega_0$ )

$$i_{Un}(t) = (A_1 \cos \omega_r t + A_2 \sin \omega_r t) e^{-\xi t} + K e^{-t/\tau} \quad (8)$$

其中

$$K = \frac{\tau(\tau - R_s C_s)}{LC_s - \tau C_s(R_{dc} + R_s) + \tau^2} I_{RM} \quad (9)$$

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - \xi^2} \quad (10)$$

$$\begin{cases} A_1 = I_{RM} - K \\ A_2 = \frac{U/L + K/\tau + \xi(I_{RM} - K)}{\omega_r} \end{cases} \quad (11)$$

$$V_{d\_Un} = U - L \frac{di}{dt} - R_{dc}i = U + \{[(L\xi - R_{dc})A_1 - L\omega_r A_2] \cos \omega_r t + [L\omega_r A_1 + (L\xi - R_{dc})A_2] \sin \omega_r t\} e^{-\xi t} + K \left( \frac{L}{\tau} - R_{dc} \right) e^{-t/\tau} \quad (12)$$

(2) 过阻尼震荡 ( $\xi > \omega_0$ )

$$i_{Ov}(t) = (B_1 e^{\omega_1 t} + B_2 e^{-\omega_1 t}) e^{-\xi t} + K e^{-t/\tau} \quad (13)$$

其中

$$\omega_{r2} = \sqrt{\xi^2 - \omega_0^2} \quad (14)$$

$$\begin{cases} B_1 = \frac{(\xi + \omega_{r2})(I_{RM} - K) + U/L + K/\tau}{2\omega_{r2}} \\ B_2 = -\frac{(\xi - \omega_{r2})(I_{RM} - K) + U/L + K/\tau}{2\omega_{r2}} \end{cases} \quad (15)$$

$$V_{d\_Ov} = U - [B_1(L\omega_{r2} - L\xi + R_{dc})e^{\omega_{r2}t} - B_2(L\omega_{r2} + L\xi - R_{dc})e^{-\omega_{r2}t}]e^{-\xi t} + K\left(\frac{L}{\tau} - R_{dc}\right)e^{-t/\tau} \quad (16)$$

(3) 临界阻尼震荡 ( $\xi = \omega_0$ )

$$i_{Cri}(t) = (C_1 + C_2 t)e^{-\xi t} + K e^{-t/\tau} \quad (17)$$

其中

$$\begin{cases} C_1 = I_{RM} - K \\ C_2 = \frac{U}{L} + \frac{K}{\tau} + \xi(I_{RM} - K) \end{cases} \quad (18)$$

$$V_{d\_Cri} = U - [LA_2 + (R_{dc} - L\xi)(A_1 + A_2 t)]e^{-\xi t} + K\left(\frac{L}{\tau} - R_{dc}\right)e^{-t/\tau} \quad (19)$$

#### 4 缓冲回路参数优化

缓冲回路的参数设计与优化取决于其晶闸管的工作环境(包括反向恢复过程中的外部电感、电压和关断瞬间的电流变化率)和晶闸管本身的性能。根据超导测试平台失超保护系统的设计要求以及晶闸管性能参数表,可以确定 RC 缓冲回路的参数设计要求,见表 2,其中  $T_{vj}$  为晶闸管结温。

表 2 RC 缓冲回路设计要求

Table 2 Design specification of RC snubber circuit for QPS in LSTF

symbol	parameter	value
$L/\mu\text{H}$	external inductance	25
$V_{dRM}, V_{RRM}/\text{V}$	max. repetitive peak forward and reverse blocking voltage of chosen thyristor	5 200
$dV_d/dt_{crit}/(\text{V} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	critical rate of rise of commutating voltage of chosen thyristor ( $di/dt=500 \text{ A}/\mu\text{s}, T_{vj}=125 \text{ }^\circ\text{C}$ )	3 000
$I_{RM}/\text{A}$	peak value of reverse recovery current ( $di/dt=500 \text{ A}/\mu\text{s}, T_{vj}=125 \text{ }^\circ\text{C}$ )	1 825.7
$N_S$	thyristor series number	2

优化方法如下:

**第一步:** 根据晶闸管阀组反向恢复过程实验数据,利用公式(4)和(5)求出  $I_{RM}$  和  $\tau$  的值。

**第二步:** 根据第 3 节的瞬态分析结果,利用 Matlab 仿真软件对反向恢复电压峰值  $V_{dmax}$  和反向恢复电压变化率  $dV_d/dt$  的表达式进行处理,得到不同缓冲电容  $C_s$  和缓冲电阻  $R_s$  组合下  $V_{dmax}$  和  $dV_d/dt$  的最大值。在本失超保护系统工况下,晶闸管选用株洲中车 MKPE 330-052 型晶闸管。失超保护系统回路中  $V=7500 \text{ V}, L=25 \mu\text{H}, R_{dc}=0.05 \Omega$ ,将第一步计算结果  $I_{RM}=1825.7 \text{ A}, \tau=7.9 \times 10^{-6}$  代入公式(3)中可得  $Q_{rr}$  和  $I_{RM}$  的表达式为

$$Q_{rr}(\mu\text{C}) = -0.0062 \times (di/dt)^2 + 41.532 \times (di/dt) + 7564.3 \quad (20)$$

$$I_{RM}(k\text{A}) = 0.0045 \times (di/dt) + 0.42 \quad (21)$$

Matlab 仿真计算结果如图 5、图 6 所示,图 5 中,随缓冲电容和缓冲电阻值的增大,反向恢复电压峰值  $V_{dmax}$  持续下降。同时,由图 6 可以看出反向恢复电压变化率与缓冲电容值无关,仅随缓冲电阻值的增大而增大。

根据表 2 要求及 MKPE330-052 性能参数表可知,晶闸管临界反向恢复电压为 5 200 V,临界电压变化率为 2 500 V/ $\mu\text{s}$ 。考虑到安全裕度,选用 4 只晶闸管并联方式组成阀组。图 7 为  $(dV_d/dt)_{max}$  随  $R_s$  的变化趋势图,由图可知,  $C_s$  的变化对  $V_d$  的峰值有显著的影响。然而,当  $C_s$  的值逐渐增大,影响开始减弱。此外,存在一个  $R_s$  的值,使得在该阻值下  $V_d$  的峰值最小。根据图 8 可知,  $dV_d/dt$  的峰值与  $R_s$  的值成正比关系,同时受  $C_s$  的影响较小。



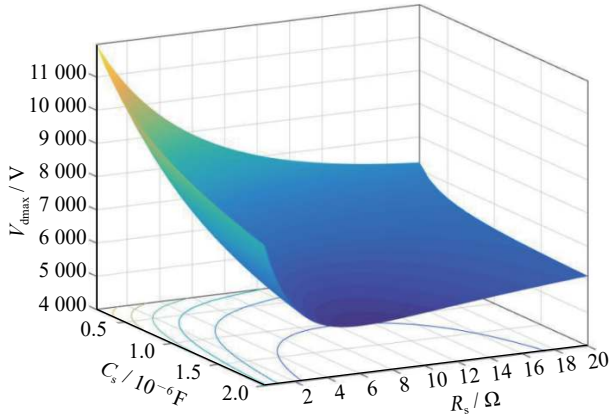


Fig. 5 Peak value of  $V_{dmax}$  under various set of  $R_s$  and  $C_s$ .

图 5 反向恢复电压峰值随  $C_s, R_s$  变化趋势

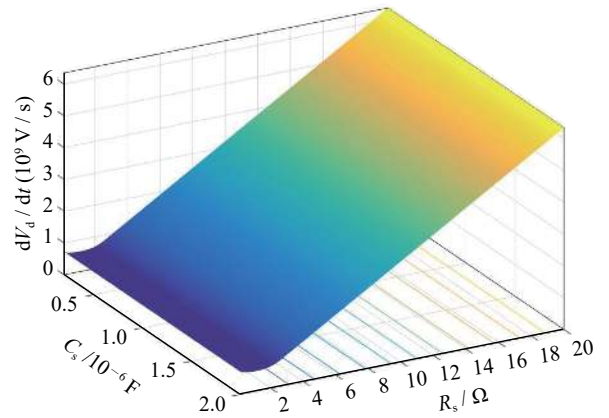


Fig. 6 Peak value of  $dV_d/dt$  under various set of  $R_s$  and  $C_s$ .

图 6 反向恢复电压变化率峰值随  $C_s, R_s$  变化趋势

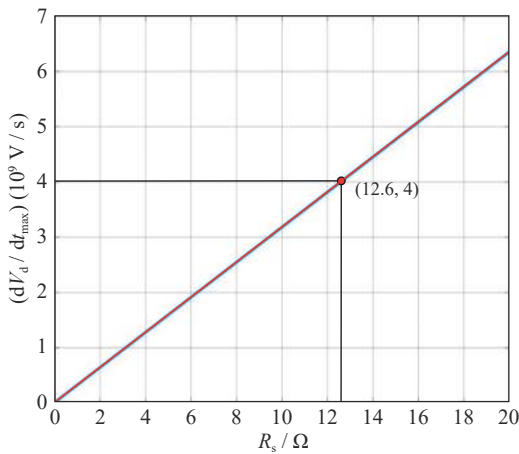


Fig. 7 Peak value of  $dV_d/dt$  as a function of  $R_s$

图 7  $dV_d/dt_{max}$  随  $R_s$  的变化趋势

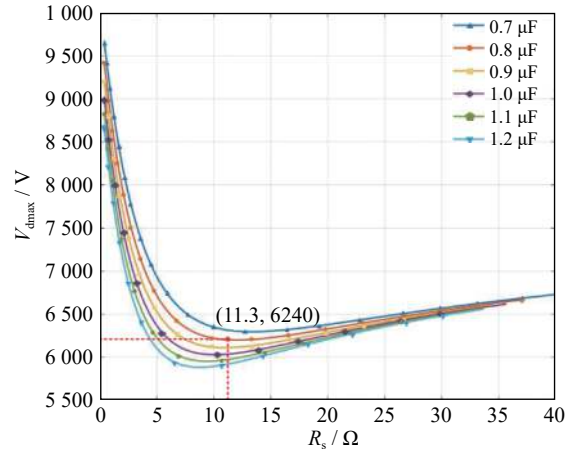


Fig. 8 Peak value of  $V_d$  as a function of  $R_s$  and  $C_s$

图 8 反向恢复电压变化率峰值随  $C_s, R_s$  变化趋势

**第三步:** 为了满足  $dV_d/dt$  的要求, 首先应计算出满足要求条件下最大  $R_s$ 。图 7 为  $dV_d/dt_{max}$  随  $R_s$  的变化趋势。再根据  $V_d$  的要求计算出符合条件的  $C_s$  值。图 8 中红色框区域内为可应用参数。最后, 在可应用参数中得到  $R_s$  和  $C_s$  的最小组合即为最优参数。 $RC$  的最优参数及对应的电压特性如表 3 所示。

### 5 仿真与对比

对比原利用回路电容电感所储存的能量守恒进行缓冲回路参数的设计方法相比, 本文所描述的优化方法使缓冲回路的工作效率大大提升。为了验证本文所述优化方法所获得的缓冲回路参数的优越性, 在 Matlab 仿真软件中建立了基于指数模型的晶闸管反向恢复模型, 并将其集成与失超保护系统中。将优化后缓冲回路参数与原计划使用参数  $R_s=20 \Omega, C_s=5 \mu F$  进行对比。其电流与电压波形如图 9 所示。关键参数值见表 4。通过对比可知, 采用优化参数的缓冲回路大大提高了晶闸管阀组运行的可靠性和经济性, 相比于原参数, 采用最优参数后反向恢复电压峰值  $V_{dmax}$  降低了 11%, 反向恢复电压变化率峰值  $(dV_d/dt)_{max}$  降低了 43%。同时, 对比于原采用的  $R_s=20 \Omega, C_s=5 \mu F$  缓冲回路参数, 优化后参数  $R_s=11.3 \Omega, C_s=0.8 \mu F$  将回路制造成本降低为原先的 1/7。

### 6 结论

本文提出了一种脉冲工况下晶闸管阀组缓冲电路参数的优化方法。首先对失超保护系统的动作过程及晶闸管的运行工况进行了描述和分析。并建立有效的晶闸管模型来对其关断过程进行建模分析。之后, 基于脉冲工况下晶闸管测试实验结果在 Matlab 仿真平台上搭建了系统电路模型, 最后根据晶闸管的性能手册及系统要求提出

表 3 RC 的最优参数及对应的电压特性

Table 3 The optimum  $R_s, C_s$  and corresponding circuit parameters

symbol	parameter	value
$R_s/\Omega$	Snubber Resistance	11.3
$C_s/\mu F$	Snubber Capacitance	0.8
$V_{dmax}/V$	Maximum Reverse Recovery Voltage	6 210
$(dV_d/dt)_{max}/(V \cdot \mu s^{-1})$	Maximum $V_d$ change rate	3 600

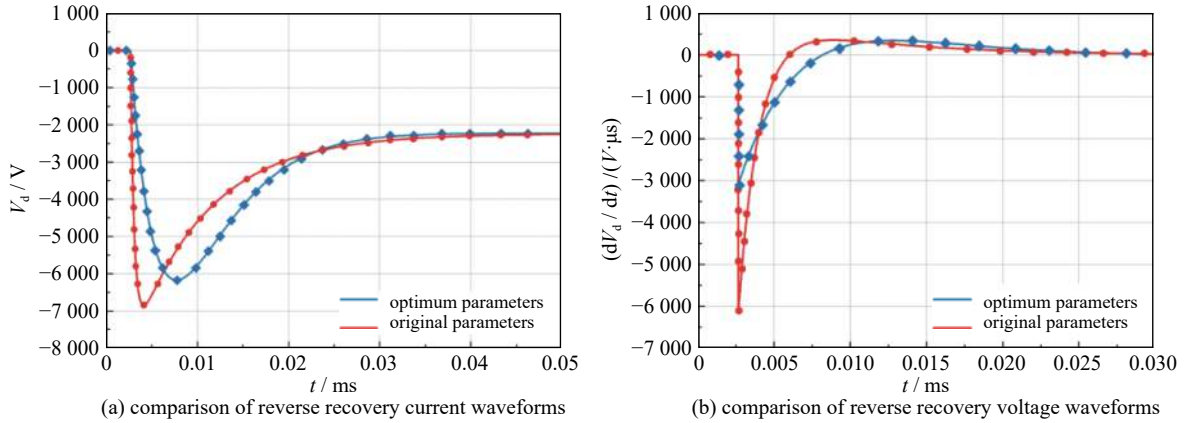


Fig. 9 Comparison of reverse recovery current and voltage waveforms

图 9 反向恢复电流电压波形对比

了缓冲回路参数的优化方法。该优化方法以较低的制造成本满足了晶闸管阀组最高的性能要求,大幅提高了失超保护系统运行的可靠性。仿真对比结果验证了该参数优化方法的可行性和优越性。计划后续将搭建完整的晶闸管阀组反向恢复测试平台,对比不同缓冲回路参数对晶闸管反向恢复过程的影响。并将整体晶闸管阀组加入失超保护系统中进行实验,对比不同缓冲回路参数对系统各部分造成的影响,以进一步验证本脉冲工况下晶闸管阀组缓冲回路参数优化方法的正确性。

#### 参考文献:

- [1] Song Yuntao, Li Jiangang, Wan Baonian, et al. Concept design of CFETR tokamak machine[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2014, 42(3): 503-509.
- [2] 李华, 宋执权, 汪舒生, 等. 核聚变装置中直流保护开关的研究进展[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36: 233-239. (Li Hua, Song Zhiquan, Wang Shusheng, et al. Study on DC protection switch for superconducting coils in magnetic confinement fusion device[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36: 233-239)
- [3] Ren Yong, Zhu Jiawu, Gao Xiang, et al. Electromagnetic, mechanical and thermal performance analysis of the CFETR magnet system[J]. *Nuclear Fusion*, 2015, 55: 093002.
- [4] Wang Shusheng, Song Zhiquan, Fu Peng, et al. Conceptual design of bidirectional hybrid dc circuit breaker for quench protection of the CFETR[J]. *IEEE Trans Applied Superconductivity*, 2018, 46(5): 1497-1502.
- [5] 李世平, 任亚东, 熊思宇, 等. 150 mm高压脉冲功率晶闸管的研制与应用[J]. *大功率变流技术*, 2012, 1(13): 13-16. (Li Shiping, Ren Yadong, Xiong Siyu, et al. Development and application of 150 mm high-voltage pulse power thyristors[J]. *Control and Information Technology*, 2012, 1(13): 13-16)
- [6] 董汉彬. 功率晶闸管的暂态热特性研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. (Dong Hanbin. Research and application on instantaneous thermal characteristic of power thyristors. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012)
- [7] 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): 103-109. (Yue Ke, Lu Longchen, Sun Wei, et al. Application of reverse recovery characteristics in high power thyristor testing[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(1): 103-109)
- [8] 宋执权. EAST超导托卡马克极向场电源失超保护系统的研制[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007. (Song Zhiquan. Research and development of quench protection system in poloidal field power supply system for EAST super-conductive TOKAMAK. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2007)
- [9] 温家良, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 高压晶闸管运行试验方法与试验装置的研究与开发[J]. *电网技术*, 2006, 32(21): 26-31. (Wen Jiali, Tang Guangfu, Zha Kunpeng, et al. Operational test method of high voltage thyristor valves and development of its synthetic test equipment[J]. *Power System Technology*, 2006, 32(21): 26-31)
- [10] Lou Lifang, Liou J J. An improved compact model of silicon-controlled rectifier (SCR) for electrostatic discharge (ESD) applications[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2008, 55(12): 3517-3524.
- [11] 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: 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: 115001)
- [12] Lee C W, Park S B. Design of a thyristor snubber circuit by considering the reverse recovery process[J]. *IEEE Trans Power Electronics*, 1988, 42(3): 503-509.

表 4 电气参数对比

Table 4 Comparison of electrical parameters

	optimum parameters	Practical parameters
$I_{RM}/A$	1 815	1 835
$(di/dt)_0/(A \cdot s^{-1})$	$309 \times 10^6$	$307 \times 10^6$
$v_{dmax}/V$	6 168	6 960
$(dV_d/dt)_{max}/(V \cdot \mu s^{-1})$	3 598	6 285