

DOI: 10.7667/PSPC180588

一种基于 CR-CD 型电路的直驱风机变流器 IGBT 过电压保护电路研究

郝林钊¹, 何山^{1,2}, 王维庆^{1,2}, 祁希¹, 江川¹, 朱文婷¹, 汪洋¹, 程静¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830049;

2. 可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘要: 针对直驱风力发电系统中变流器 IGBT 存在过电压脉冲的问题, 基于 IGBT 的物理模型及 C 型、钳位二极管、RC 型和 RCD 型四种过电压保护电路提出了一种新型 CR-CD(Capacitor resistor and capacitor diode)过电压保护电路。首先, 分析了 CR-CD 过电压保护电路的工作原理, 论证了 CR-CD 过电压保护电路抑制过电压脉冲的优良性能。其次, 详细设计了过电压保护电路的参数。最后, 基于 Matlab/Simulink 平台搭建了 CR-CD 型过电压保护电路仿真模型, 分别在恒定和变化负载电感两种工况下进行仿真对比分析。结果表明: CR-CD 过电压保护电路不仅可以有效地抑制过电压脉冲, 还能起到避免因电容造成的过电压脉冲衰减延迟以及缩短 IGBT 关断时间的作用。
关键词: 直驱风机; 变流器; IGBT; 过电压保护; CR-CD

Research on IGBT overvoltage protection circuit of direct drive wind turbine converter based on CR-CD circuit

HAO Linzhao¹, HE Shan^{1,2}, WANG Weiqing^{1,2}, QI Xi¹, JIANG Chuan¹, ZHU Wenting¹, WANG Yang¹, CHENG Jing¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830049, China; 2. Engineering Research Center of Ministry of Education for Renewable Energy Power Generation and Grid Connection Technology, Urumqi 830049, China)

Abstract: Aiming at the problem of overvoltage pulse in IGBT of direct drive wind power generation system, a new type of Capacitor Resistor and Capacitor Diode (CR-CD) overvoltage protection circuit is proposed based on the physical model of IGBT and four kinds of C-type, clamped diode, RC-type and RCD-type overvoltage protection circuit. Firstly, the working principle of CR-CD overvoltage protection circuit is analyzed, and the excellent performance of CR-CD overvoltage protection circuit to suppress overvoltage pulse is demonstrated. Secondly, the parameters of overvoltage protection circuit are designed in detail. Finally, the simulation model of CR-CD type overvoltage protection circuit is built based on the platform of Matlab/Simulink. The simulation results are compared and analyzed under the conditions of constant and variable load inductance. The results show that the CR-CD overvoltage protection circuit can not only effectively suppress the overvoltage pulse, but also avoid the overvoltage pulse attenuation delay caused by capacitance and shorten the IGBT turn-off time.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51767024 and No. 51667020), Ministry of Education Innovation Team Rolling Support Program (No. RT-16R63) and Xinjiang University Doctoral Research Startup Fund Project (No. BS160245).

Key words: direct drive wind turbine; converter; IGBT; overvoltage protection; CR-CD

0 引言

直驱风电系统中变流器内部存在大量电力电子

器件^[1-5], 其中绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 是目前直驱永磁风力(PMSG)发电系统中运用较为广泛的复合型电力电子器件, 它复合了功率场效应管和电力晶体管, 并具有承受大电流、高输入阻抗、高开关频率和低导通压降等优点^[6-10]。变流器在牵引电传动、风力发电系统电能传输与变换、太阳能发电等领域得到了广泛

基金项目: 国家自然科学基金项目(51767024, 51667020); 教育部创新团队滚动支持计划(RT-16R63); 新疆大学博士科研启动基金项目(BS160245)

的应用^[11-14]。

IGBT是电压敏感型电子元器件,对电压大小有严格要求。文献[15-23]采用了钳位二极管(Dav)和C型过压保护,但出现了过电压脉冲衰减延迟以及过电压抑制效果不佳等问题。文献[24]提出的RC型及RCD型过电压保护电路,可以快速地抑制过电压,但因电阻耗能,IGBT动作频繁导致变流器内部产生大量热量,易使其烧坏。

本文在C型、钳位二极管、RC型和RCD型保护电路的基础上设计了新型CR-CD过电压保护电路。在恒定开关频率及恒定输出功率工况条件下搭建了单相全桥变流器C型、RC型、RCD型和CR-CD型过电压保护电路的Matlab/simulink仿真模型,并在恒定开关频率与不同负载电感工况下搭建了单相全桥变流器RCD和CR-CD型过电压保护电路的Matlab/Simulink仿真模型,通过仿真对比,可知CR-CD过电压保护电路能快速有效地抑制过电压和缩短IGBT关断时间,并降低保护电路电阻能耗。

1 变流器IGBT产生过电压机理分析

1.1 IGBT的物理模型

分析IGBT两端产生的过电压,从IGBT内部结构着手,建立其物理模型如图1所示。

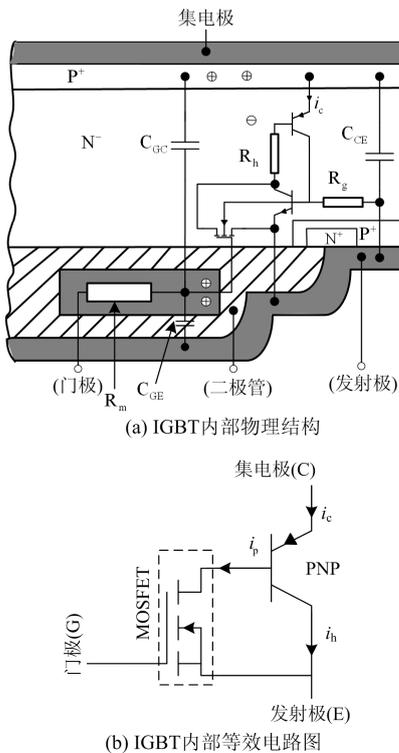


图1 IGBT内部物理描述及等效电路

Fig. 1 IGBT internal physical description and equivalent circuit

图1中, R_h 为漂移电阻, R_g 为门-射极短路电阻, R_m 为MOS沟道电阻, i_h 为流过PNP晶体管的电流, i_p 为流过MOSFET晶体管的电流, C_{Gc} 为米勒电容, C_{CE} 为N-漂移区和门极之间氧化物的门-射电容。

当IGBT关断时,流过IGBT的电流为 i_c ,且由MOSFET晶体管和PNP晶体管分流,因此集电极电流 $i_c = i_p + i_h$;当IGBT正常工作时,流经MOSFET晶体管的电流比流经PNP晶体管的电流要大。在IGBT关断电压上升阶段,要维持恒定的集电极电流,可通过减少发射极提供的电子或消除积累层和N-漂移区中的电荷方法实现。米勒电容 C_{Gc} 是N-漂移区和门极之间耗尽层的电容,且与氧化物电容 C_{GE} 串联。在关断的初始阶段,由于只有积累层电荷作用,耗尽层没有进入工作状态,此时米勒电容较大。随着IGBT两端电压逐渐上升,积累层消失,进入耗尽层阶段,电流迅速增大,电压也随之增大。当以上过程重复进行时,IGBT两端会产生过电压脉冲,IGBT易击穿损坏。

1.2 IGBT外部电路产生过电压机理分析

IGBT关断时刻工作原理如图2所示。

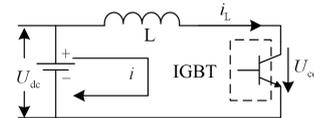


图2 IGBT关断时工作电路图

Fig. 2 Working circuit diagram of IGBT turn-off

变流器及线路中存在的杂散电感和负载电感使变流器内部IGBT由导通状态过渡至关闭状态,集电极电流 i 亦由导通电流逐渐变为0,感应电动势和直流电压发生叠加,从而使IGBT两端产生过电压。由于电路中阻抗产生的电压降影响极小,在此忽略不计,此时IGBT两端的电压值为

$$\begin{cases} U_{ce} = U_{dc} + L \frac{di}{dt} \\ i = i_L \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: U_{ce} 为IGBT集-射极间电压; U_{dc} 为IGBT直流侧电压; L 为电路总电感; $\frac{di}{dt}$ 为IGBT由导通状态到关闭状态时电流变化率; i_L 为流过杂散电感的电流,即为图1中的集电极电流 i_c 。

由于IGBT的耐压能力较差,当IGBT由导通状态过渡至关闭状态时,若无保护电路,IGBT将会被过电压脉冲击穿,使变流器出现故障。

2 过电压保护电路

为了防止IGBT因过电压被击穿,应减少直驱

风力发电变流器内部的杂散电感。在实际变流器系统中，电力电子器件一旦确定，其分布的杂散电感也随之确定。因此，需要设计保护电路来抑制 IGBT 关断时两端产生的过电压。IGBT 过电压保护电路通常有四种：钳位二极管、C 型、RC 型和 RCD 型，前三种电路结构简单，体积小，易于安装。但钳位二极管的过电压脉冲抑制效果不佳，工作时会产生大量热量；C 型保护电路中电容是储能元件，在保护

过程中会造成过电压脉冲衰减延迟，引起两次过电压脉冲的叠加，导致 IGBT 两端因过电压被击穿；RC 电路中存在电阻，在工作时会产生大量热量，并且过电压脉冲抑制效果亦不理想；RCD 型电路适用于中、低和大功率变流器，但是在制造工艺上，结构相对于前面三种保护电路复杂，且对过电压抑制效果不佳。四种保护电路结构如图 3 所示。

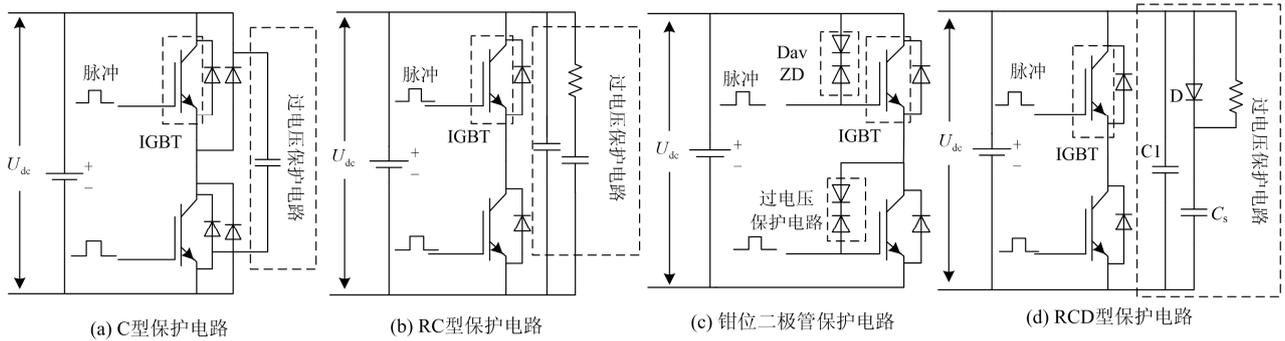


图 3 四种常用 IGBT 过电压保护电路

Fig. 3 Four common IGBT over-voltage protection circuits

针对以上四种过电压保护电路的不足，本文设计了一种新型CR-CD型保护电路。该电路结构如图 4所示。

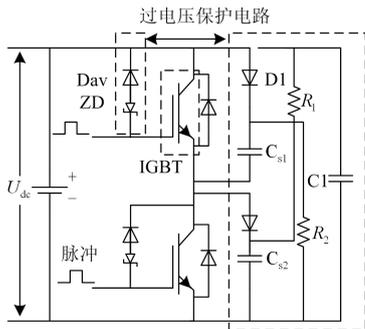


图 4 CR-CD型保护电路

Fig. 4 CR-CD type protection circuit

该电路的优点是低功耗、过电压抑制效果好并适用于高频和低频大容量设备。电容 C_s 在 IGBT 关断前，两端的电压值等于直流侧电压，关断过程中因过电压产生的能量回馈到直流侧，从而减小了保护电路的能量损耗，起到了过热保护的作用。该保护电路中含有快速恢复二极管和钳位二极管，可避免 C 型保护电路过电压较长时间的衰减现象，有效地抑制过电压。当 IGBT 关断时，产生的大电流会通过钳位二极管流向 IGBT 的基极，可以很好地避免 IGBT 在换流时出现较大的过电压。由于电子器件增多，新型保护电路在制造上比其他三种保护电路相对复杂，所以在元器件选择上更加严格。

3 CR-CD过电压保护电路原理分析

根据变流器系统中存在的杂散电感，过电压保护电路和 IGBT 内部存在的电容，将 CR-CD 保护电路工作过程分为三个阶段：(1) 开关动作时 IGBT 和 C_s 换流过程；(2) 杂散电感 L_s 谐振放能过程；(3) 保护电路中电容 C_s 放电过程。

3.1 IGBT和电容C换流过程

该过程由 IGBT 接收到信号开始到 IGBT 完全关断结束，吸收电容上的初始电压值为 U_{dc} ，IGBT 在实际工作中拖尾电流对其影响很小，可以忽略不计，因此处理该过程时对电压电流瞬时值可以进行线性化处理，在变流器“零矢量”开关模式下过电压脉冲最大。线性化处理换流过程的等效电路如图 5 所示，IGBT 关断过程其两端电压和电流的变化波形如图 6 所示。

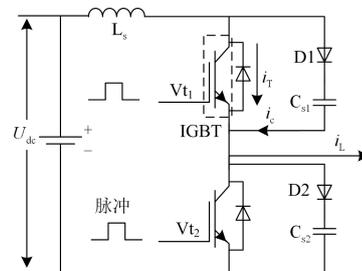


图 5 线性化处理换流等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram of linearization converter commutation

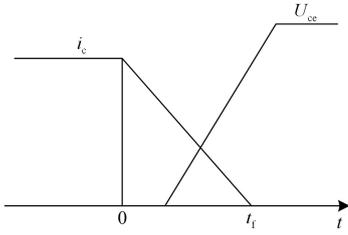

 图 6 IGBT与电容 C_s 换流过程电压 U_{ce} 和 i_c 的变化波形

 Fig. 6 Waveforms of U_{ce} and i_c changes in IGBT and capacitor C_s converter

该过程的时间为 t_f 。由图4和图5可得

$$\begin{cases} i_L = i_T + i_c \\ i_c = \frac{i_L}{t_f} t \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_L 为母线电流; i_T 为换流二极管导通时的电流; i_c 为流过保护电路电容 C_s 的电流。

IGBT关断由0到 t_f 的过程中, 有以下关系式。

$$U_{Vt} = U_{Cs} = U_{dc} + \frac{1}{C_s} \int_0^{t_f} i_c dt = U_{dc} + \frac{i_L t_f}{2C_s} \quad (3)$$

式中: U_{Vt} 为IGBT两端的电压; U_{Cs} 为保护电路中电容 C_s 两端电压。

当且仅当 $t = t_f$ 时, 满足在线性化处理时IGBT模块 VT_1 两端电压值最大, 则

$$\begin{cases} U_{Vt-max} = U_{Cs-max} = U_{dc} + \frac{i_L t_f}{2C_s} \\ i_{Cs} = i_L \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_{Vt-max} 为 $t = t_f$ 时IGBT两端最大电压, 即输出过电压; U_{Cs-max} 为 $t = t_f$ 时保护电路中电容 C_s 两端最大电压。由式(4)可得出 i_L 和 t_f 与 U_{Vt-max} 正相关, C_s 与 U_{Vt-max} 负相关。

3.2 系统寄生电感 L_s 与电容 C_s 谐振放能过程

IGBT换流结束后, 图4中IGBT完全截止, 此时的过电压等效电路如图7所示。电感和电容谐振放能时, 由于开关元件关断速度较快, 若电容很大, 可将开关电流转换阶段电容升高的电压忽略不计。

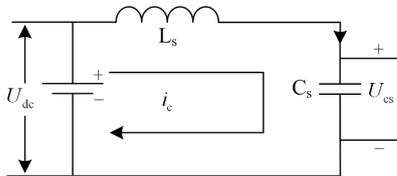


图 7 谐振时的等效电路图

Fig. 7 Equivalent circuit of resonance

由图7可得, 该阶段流过寄生电感 L_s 与电容 C_s

的电流相等, 则由图6可得

$$U_{dc} = L_s \left(\frac{di_c}{dt} \right) + U_{Cs} = L_s \left(\frac{d^2 U_{Cs}}{dt^2} \right) + U_{Cs} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可得

$$U_{Cs} = U_{dc} + \sqrt{[U_{Cs}(0) - U_{dc}]^2 + \frac{L_s i_L^2}{C_s}} \times \sin(W_0 t - \theta) \quad (6)$$

$$\begin{cases} W_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \\ \theta = \tan^{-1} \left(\frac{t_f}{2\sqrt{L_s C_s}} \right) \end{cases} \quad (7)$$

根据式(6)和式(7)有, W_0 为谐振频率, θ 为电容 C_s 两端电压 U_{Cs} 的初相, 当 $\sin(W_0 t - \theta)$ 取最大值1时, U_{Cs} 取得最大值, 并且其最大值为

$$U_{Cs-max} = U_{dc} + \sqrt{[U_{Cs}(0) - U_{dc}]^2 + \frac{L_s i_L^2}{C_s}} \quad (8)$$

$$C_s = \frac{L_s i_L^2}{(U_{Cs-max} - U_{dc})^2} = \frac{L_s i_L^2}{(\Delta U \% U_{dc})^2} \quad (9)$$

$$\Delta U \% = \frac{i_L}{U_{dc}} \sqrt{\left(\frac{t_f}{2C_s} \right)^2 + \frac{L_s}{C_s}} \approx \frac{i_L}{U_{dc}} \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} \quad (10)$$

电容 C_s 两端最大电压 U_{Cs-max} 满足

$$\Delta U \% = \frac{U_{Cs-max} - U_{dc}}{U_{dc}} \times 100\% \quad (11)$$

IGBT实际工作中, 当其处在过阻尼状态时, 其谐振回路中的功率因数小于1^[25], 则有

$$\begin{cases} Q = \frac{1}{R_1} \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} \\ Q < 1 \end{cases} \quad (12)$$

其中, Q 为功率因数。

由式(12)得

$$R_1 > \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} \quad (13)$$

在实际工程中, 电容上电压升高部分的 $\Delta U\%$ 完全等于杂散电感上所存储的电能, $\Delta U\%$ 为过电压保护程度, 一般设定值小于等于20%。

3.3 保护电路中电容 C_s 放电过程

当谐振过程进行到 $\sin(W_0 t - \theta) = 1$ 时, 电容 C_s 两端电压 U_{Cs} 取得最大值, 而谐振电流 $i_c = 0$, 此时电容 C_s 通过电阻 R_s 、直流侧电源 U_{dc} 及负载进行放电。在放电过程中, 负载中的电流不变, 可将负载作恒流源处理, 其等效电路如图8所示。

通过图8列写KVL方程:

$$\frac{U_{Cs} - U_{dc}}{R_s} = i_{Cs} = -C_s \frac{dU_{Cs}}{dt} \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \ln\left(\frac{U_{dc}-U_{Cs}}{U_{dc}-U_{Cs-max}}\right) &= \ln\left(\frac{U_{dc}-U_{Cs}}{-\Delta U\%U_{dc}}\right) \\ U_{Cs} &= U_{dc}\left(1+\Delta U\%e^{-\frac{t}{R_sC_s}}\right) \end{aligned} \right. \quad (15)$$

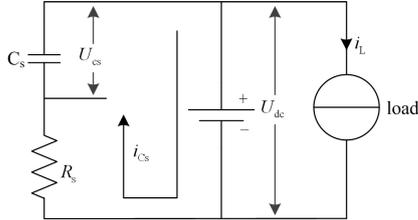


图 8 保护电路Cs放电过程等效图

Fig. 8 Equivalent diagram of Cs discharge process in protection circuit

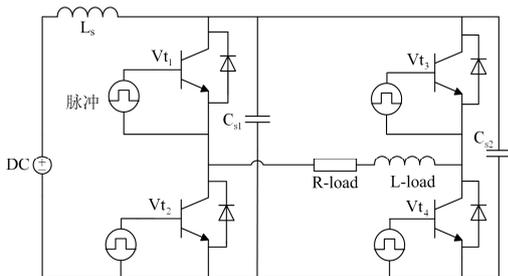
其中, $R_s = R_1 = R_2$ 为保护电路中连接的电阻。

4 仿真分析

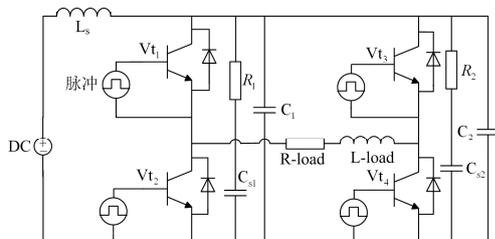
在Matlab/Simulink平台中分别搭建单相全桥变流器IGBT的C型、RC型、RCD型以及CR-CD型过电压保护电路仿真模型,其仿真电路如图9所示。为了验证保护电路的保护效果,分别在相同负载、不同负载两种工况下进行仿真对比。

4.1 相同负载电感

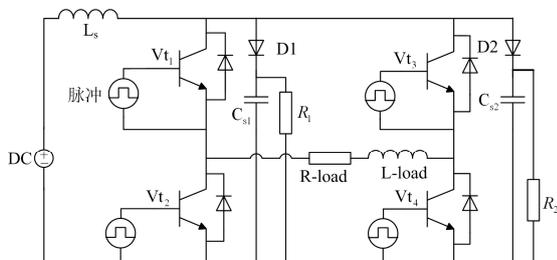
四种保护电路参数设置如表1所示。



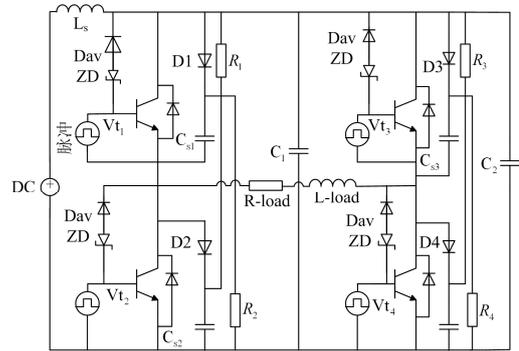
(a) C型过电压保护仿真电路图



(b) RC型过电压保护仿真电路图



(c) RCD型过电压保护仿真电路图



(d) CR-CD型过电压保护仿真电路图

图 9 四种过电压保护仿真电路图

Fig. 9 Four overvoltage protection simulation circuit diagram

表1 系统仿真参数设置

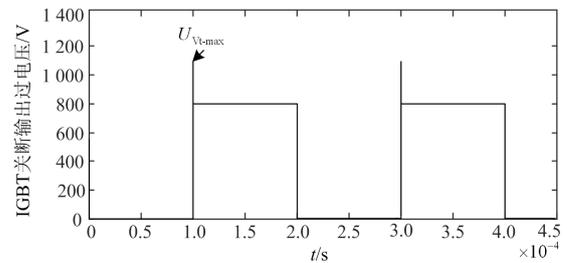
Table 1 System simulation parameter settings

参数	数值	参数	数值
直流侧电压 U_{dc}	800 V	IGBT换流时间 t_r	0.16 μ s
寄生电感 L_s	200 nH	IGBT关断频率 f	5 000 Hz
负载电流 i_L	100 A	基极电压 U_{ge}	15 V

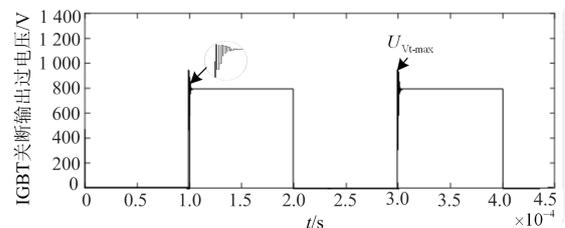
结合表1所列参数,由式(9)、式(13)可求出保护电路电容 C_s 的取值为0.25 μ F,电阻 R_s 的取值范围为: $1.21 \Omega < R_s < 17.1 \Omega$ 。

IGBT输出电压波形如图10所示,其仿真分析结果如表2所示。

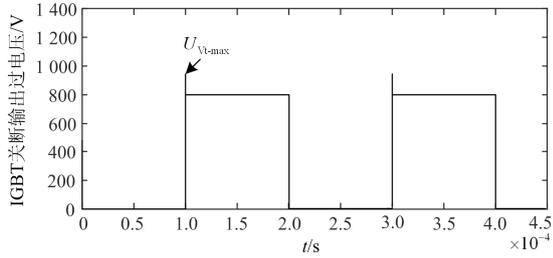
由图10和表2可知,四种保护电路对IGBT关断输出电压有不同程度的抑制效果,在IGBT两端无保护电路时,输出电压比正常输出电压高出37.4%;采用C型过电压保护电路时,输出过电压脉冲比正常输出电压高出20.3%,但该保护电路出现了过电压脉冲衰减延迟;采用RC型保护电路时,过电压脉冲比实际



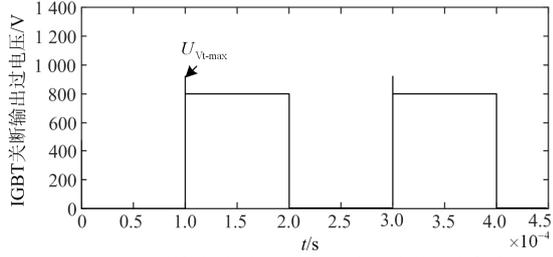
(a) 无保护电路IGBT关断输出过电压仿真波形



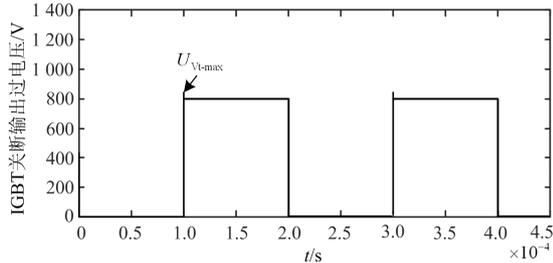
(b) C型保护电路IGBT关断输出过电压仿真波形



(c) RC型保护电路IGBT关断输出过电压仿真波形



(d) RCD型保护电路IGBT关断输出过电压仿真波形



(e) CR-CD型保护电路IGBT关断输出过电压仿真波形

图10 不同保护电路下IGBT关断输出电压

Fig. 10 IGBT turn-off output voltage under different protection circuits

表 2 不同保护电路下IGBT关断输出电压对比

Table 2 Comparison of turn-off output voltage of IGBT with different protection circuits

名称	参考电压/V	输出电压/V	过电压百分比/%
无过电压保护电路		1101	37.4
C型过电压保护电路		962	20.3
RC型过电压保护电路	800	994	24.3
RCD型过电压保护电路		906	13.2
CR-CD型过电压保护电路		820	2.5

输出的电压高出24.3%，该保护电路有效地防止了过电压衰减延迟并有效地抑制了过电压脉冲，但由于该保护电路中存在电阻，产生热量，则IGBT元件动作过于频繁易烧坏变流器；当采用RCD型保护电路时，过电压脉冲比正常输出电压高出13.2%，但该保护电路不能有效地降低电阻能耗，当IGBT动作过于频繁时，变流器会因为温度过高而烧坏；采用本文设计的CR-CD型保护电路时，过电压脉冲比实际输

出的电压高出2.5%，过电压抑制效果在四种保护电路中最佳。

4.2 不同负载电感

为了进一步验证本文CR-CD型过电压保护电路的优越性，在不同负载电感工况下，搭建RCD型和CR-CD型过电压仿真模型进行仿真对比，两种电路参数设置如表3所示。

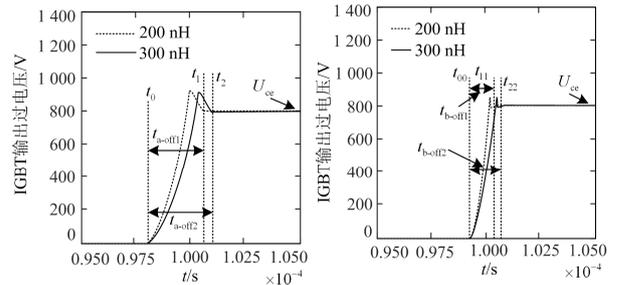
表 3 系统仿真参数设置

Table 3 System simulation parameter settings

负载电感 L_R	直流侧电压 U_{dc}	负载电流 i_L	IGBT关断频率 f	基极电压 U_{ge}
200 nH	800 V	100 A	5 000 Hz	15 V
300 nH	800 V	100 A	5 000 Hz	15 V

结合表2所列参数，由式(9)、式(13)可求出负载电感为200 nH和300 nH时保护电路电容 C_s 的取值分别为0.27 μ F和0.30 μ F，电阻 R_s 的取值范围分别为： $1.26 \Omega < R_s < 20.3 \Omega$ 和 $1.31 \Omega < R_s < 23.3 \Omega$ 。

RCD型和CR-CD型过电压保护电路在不同负载电感时，其过电压仿真波形如图11所示，仿真分析结果如表4所示。



(a) 在RCD保护电路下不同负载电感对IGBT输出过电压仿真波形

(b) 在CR-CD保护电路下不同负载电感对IGBT过电压仿真波形

图11 两种过电压保护电路在不同负载电感时的仿真图

Fig. 11 Simulation diagram of two overvoltage protection circuits under different load inductances

表 4 两种过电压保护电路在不同负载电感时的 IGBT 关断时间对比

Table 4 Comparison of IGBT turn-off time for two overvoltage protection circuits with different load inductances

名称	负载电感	关断起始时间/s	关断截止时间/s	时间差值/s
RCD 保护电路	200 nH	t_0	t_1	t_{a-off1}
	300 nH	t_0	t_2	t_{a-off2}
CR-CD 保护电路	200 nH	t_{00}	t_{11}	t_{b-off1}
	300 nH	t_{00}	t_{22}	t_{b-off2}

由图 11 和表 4 可知，在 RCD 型保护电路中，当负载电感为 200 nH 和 300 nH 时，IGBT 的关断

时间分别为 t_{a-off1} ($t_{a-off1} = t_1 - t_0$) 与 t_{a-off2} ($t_{a-off2} = t_2 - t_0$), 且关断时间随着负载电感增大而增大; 在 CR-CD 保护电路中, 当负载电感为 200 nH 时, IGBT 的关断时间为 t_{b-off1} ($t_{b-off1} = t_{11} - t_{00}$), 而负载电感变为 300 nH 时, IGBT 的关断时间变为 t_{b-off2} ($t_{b-off2} = t_{22} - t_{00}$), 并且关断时电压上升的时刻不变, 因此可知, 过电压保护电路为 CR-CD 型时, IGBT 的关断时间与过电压脉冲衰减时间最短。

5 结论

本文针对变流器 IGBT 在关断时输出过电压脉冲的问题, 设计了一种 CR-CD 新型过电压保护电路, 通过 Matlab/Simulink 构建单相变流器 IGBT 过电压保护仿真平台, 对 C 型、RC 型、RCD 型以及 CR-CD 型过电压保护电路在相同负载电感工况下和不同负载电感工况下的仿真结果进行比较分析, 结果表明新型过电压保护电路 (CR-CD) 对 IGBT 关断过电压抑制效果最佳, 并且能缩短 IGBT 的关断时间和过电压脉冲衰减时间。

参考文献

- [1] 冯江华. 风电变流器的技术现状与发展[J]. 大功率变流技术, 2013(3): 5-11.
FENG Jianghua. Technical status and development of wind power converters[J]. High Power Conversion Technology, 2013(3): 5-11.
- [2] 杨朝晖, 陈昭炜, 罗洋. 适用于 IGBT 串联的有源钳位动态电压均衡电路研究[J]. 高压电器, 2013, 29(3): 24-28.
YANG Chaohui, CHEN Zhaowei, LUO Yang. Research on active clamping dynamic voltage equalization circuit suitable for IGBT series connection[J]. High Voltage Engineering, 2013, 29(3): 24-28.
- [3] 张新燕, 何山, 张晓波, 等. 风力发电机组主要部件故障诊断研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2009, 26(2): 140-144.
ZHANG Xinyan, HE Shan, ZHANG Xiaobo, et al. Fault diagnosis of main components of wind turbine[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science), 2009, 26(2): 140-144.
- [4] 王维庆, 何山, 董新胜, 等. 大型风力发电机的发展新动向[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2014, 31(3): 261-264.
WANG Weiqing, HE Shan, DONG Xinsheng, et al. New trends in the development of large-scale wind turbines[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science), 2014, 31(3): 261-264.
- [5] 梅桂芳, 安昱, 张建. 基于门极阻容补偿网络的 IGBT 串联均压方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 35-47.
MEI Guifang, AN Yu, ZHANG Jian. IGBT series voltage equalization method based on gate resistance capacity compensation network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4): 35-47.
- [6] 胡亮灯, 孙驰, 陈玉林, 等. 大功率 IGBT 的短路故障检测[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2592-2603.
HU Liangdeng, SUN Chi, CHEN Yulin, et al. Short circuit fault detection of high power IGBT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2592-2603.
- [7] ROOSTAE S, THOMAS M S, MEHFUZ S. Experimental studies on impedance based fault location for long transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 169-177. DOI: 10.1186/s41601-017-0048-y.
- [8] 包俊, 丁立波, 王振, 等. 充电机功率切换模块内 IGBT 关断尖峰电压抑制[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(3): 90-93.
BAO Jun, DING Libo, WANG Zhen, et al. IGBT turn-off peak voltage suppression in power switching module of charger[J]. Automation Technology and Applications, 2018, 37(3): 90-93.
- [9] 张谦, 李凤婷, 蒋永梅, 等. 提高直驱永磁风机低电压穿越能力的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 62-67.
ZHANG Qian, LI Fengting, JIANG Yongmei, et al. Control strategy for improving low voltage ride-through capability of direct-drive permanent magnet fan[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 62-67.
- [10] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 44(3): 114-121. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [11] HUANG X, CHANG W, ZHENG T Q. Study of the protection and driving characteristics for high voltage high power IGBT modules used in traction convertor[C] // Industrial Electronics and Applications, June 15-17, 2015, Auckland, New Zealand: 1330-1334.
- [12] HSIEH P S, UDREA F, LIN W C. Integrated avalanche diode for 600 V trench IGBT over-voltage protection[C] // Semiconductor Conference, October 17-19, 2011, Sinaia, Romania: 309-312.
- [13] CHEN J F, LIN J N, AI T H. The techniques of the serial and paralleled IGBTs[C] // IEEE IECON, International

- Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, August 9-9, 1996, Taipei, Taiwan: 999-1004.
- [14] SASAGAWA K, ABE Y, MATSUSE K. Voltage-balancing method for IGBTs connected in series[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(4): 1025-1030.
- [15] LAN D, KUHN H, MERTENS A. Digital adaptive driving strategies for high-voltage IGBTs [C] // Energy Conversion Congress and Exposition, September 17-22, 2011, Phoenix, AZ, USA: 2993-2999.
- [16] 徐红灿, 滕予非, 王晓茹. 基于重复和准比例谐振复合的直驱风机网侧变流器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 95-102.
- XU Hongcan, TENG Yufei, WANG Xiaoru. Control strategy of grid-side converters for direct drive fans based on repetitive and quasi-proportional resonance composites[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 95-102.
- [17] LOBSIGER Y, KOLAR J W. Stability and robustness analysis of d/dt-closed-loop IGBT gate drive[C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 17-21, 2013, Long Beach, CA, USA: 2682-2689.
- [18] MICHEL L, BOUCHER X, CHERITI A. FPGA implementation of an optimal IGBT gate driver based on posicast control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2569-2575.
- [19] 张勇, 夏杨红, 朱洁, 等. 基于双自由度控制的直流微网中多 DG 负极接地故障环流抑制[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1827-1836.
- ZHANG Yong, XIA Yanghong, ZHU Jie, et al. Multi-DG negative ground fault circulation suppression in DC microgrid based on double degree of freedom control[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1827-1836.
- [20] 李宁, 王跃, 张长松, 等. 大功率 IGCT 变流器钳位电路参数的设计方法[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1621-1626.
- LI Ning, WANG Yue, ZHANG Changsong, et al. Design method of clamping circuit parameters for high power IGCT converter[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1621-1626.
- [21] 辛征, 孙树敏, 何晋伟, 等. 基于复合电流调节的单相 LCL 并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 123-129.
- XIN Zheng, SUN Shumin, HE Jinwei, et al. Single-phase LCL grid-connected inverter control method based on composite current regulation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 123-129.
- [22] 曲平, 李耀华, 高范强, 等. 参考波为梯形波模块化多电平变流器模块电容电压均压策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 89-96.
- QU Ping, LI Yaohua, GAO Fanqiang, et al. Modular multilevel converter module capacitor voltage balancing strategy with trapezoidal reference wave[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 89-96.
- [23] 黄云辉, 翟雪冰, 刘栋, 等. 弱电网下风力发电机组并网变流器直流电压稳定性机理分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 3127-3136.
- HUANG Yunhui, ZHAI Xuebing, LIU Dong, et al. Mechanism analysis of DC voltage stability of grid-connected converters for wind turbines in weak grids[J]. High Voltage Technology, 2017, 43(9): 3127-3136.
- [24] 朱世武, 黄长强, 黄承. 光伏并网逆变器 IGBT 关断浪涌电压抑制与预测保护研究[J]. 大功率变流技术, 2014(3): 65-68.
- ZHU Shiwu, HUANG Changqiang, HUANG Cheng. Research on IGBT switching off surge voltage suppression and predictive protection for photovoltaic grid connected inverter[J]. High Power Conversion Technology, 2014(3): 65-68.
- [25] 曹良丰, 彭杰, 周力行, 等. 基于 IGBT 的配电网铁磁谐振抑制装置[J]. 电力学报, 2014, 29(1): 32-35.
- CAO Liangfeng, PENG Jie, ZHOU Lixing, et al. Ferromagnetic resonance suppression device in distribution network based on IGBT[J]. Journal of Electric Power, 2014, 29(1): 32-35.

收稿日期: 2018-05-17; 修回日期: 2018-11-20

作者简介:

郝林钊(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直驱风电变流器过压保护技术; E-mail: 897464969@qq.com

何山(1974—), 男, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为可再生能源利用及控制技术; E-mail: heshanxju@sina.com

王维庆(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为风力发电及并网技术. E-mail: wwq59@xju.edu.cn

(编辑 姜新丽)