

6 kV 变频调速系统中 IGCT 串联缓冲电路设计

段先波 王丹 范澍 毛承雄 陆继明
 华中科技大学

摘要: IGCT 单独使用时可以不用缓冲电路。但是 6 kV 及以上高压变频器需要将 IGCT 串联使用以获得更高的耐压水平。此时, IGCT 需要并联缓冲电路才能安全工作。为设计 6 kV 高压变频器串联吸收电路, 通过对 IGCT 特性进行分析, 给出了设计 IGCT 缓冲电路的具体方法, 通过试验验证吸收电路的工作效果。

关键词: 缓冲电路 串联 高压变频器

Design of Snubber for Series IGCTs in Medium Voltage Drive

Duan Xianbo Wang Dan Fan Shu Mao Chengxiong Lu Jiming

Abstract: The single IGCT can work well without the snubber. However, two IGCTs are needed to connect in series when 6 kV medium voltage drive is developed. For the series connected IGCTs, the snubber is necessary. This paper analyzes the characteristics of IGCT and proposes some principles about the design of snubber. Finally, experiments are carried out to demonstrate the performances of the snubber.

Keywords: snubber circuit series connected medium voltage drive

1 引言

高压变频器^[1]因其突出的节能效果, 其应用日益广泛。IGCT (The Integrated Gate Commutated Thyristor) 的开关特性优异, 已成为高压变频器的优先选择。

IGCT 是将在 GTO 基础上进行改良所得的 GCT 和极低电感的门极驱动器结合起来的新型高压大功率电力电子开关器件^[2]。相比传统的 GTO, GCT 结构有所改进。

除了结构上的差异, IGCT 与 GTO 的差异还在于极低的门极—阴极间杂散电感。这一特性使得 IGCT 关断时 di_{GQ}/dt 之值比传统 GTO 高出 2 个数量级, 可达到 $3500 \text{ A}/\mu\text{s}$ 。由此, IGCT 在关断过程中的存储时间很短, 整个关断过程安全迅速。同样, 其开通时间也明显缩短。

在我国, 高压驱动电机以 6 kV 等级为主, 而目前单只 IGCT 最高的耐压水平也不能满足要求。因此, 为了保证器件安全, 在我们研制的三电平结构 6 kV 高压变频器中, 采用 2 只 IGCT 串联

的方案, 以获得更高的耐压等级。器件串联使用会产生均压的问题, 危害器件安全。为了保证 IGCT 的高可靠性工作, 在高压变频器的设计中, 串联缓冲电路必不可少。本文将详细分析 IGCT 串联缓冲电路的设计方法。

2 缓冲电路设计

2.1 单只 GTO 及 IGCT 的缓冲电路

单只 GTO 需要合适的缓冲电路配合才能正常的工作, 如图 1 所示。关断时, 缓冲电路通过 VD_s 向 C_s 充电抑制电压上升率, 并通过 C_s 吸收关断的尖峰电压, 以避免 GTO 关断失败。开通时, 缓冲电路通过 R_s 向 GTO 放电, 帮助所有 GTO 达到擎住电流值^[3]。

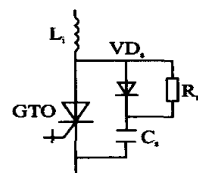


图 1 GTO 缓冲电路

与GTO不同,单只IGCT无缓冲电路也可以安全工作(如ABB ACS系列)。这正得益于IGCT采用的一些新技术。在关断期间,由于极高的门极电流上升率,IGCT在1 μs内即转变成晶体管状态。因此,关断期间IGCT无电压上升率的限制。IGCT也就无缓冲电路工作。

IGCT及GTO开通时都需要限制开通电流 di/dt 的大小。一般通过串联电感来实现,如图1中L。电感值的选取可参照式(1)

$$L \leq U / (di/dt) \quad (1)$$

式中:U为器件承受的电压;di/dt为器件允许的最大电流上升率。

2.2 IGCT 的串联缓冲电路

器件串联使用时,由于特性的差异会产生静态以及暂态电压分配不均衡,导致个别器件上产生过电压威胁器件安全。为保证器件的安全,必须通过使用静态及动态均压电路使串联器件避免承受电压不均导致的过电压。

静态均压的目的是当器件处于阻断状态时,确保器件的电压均衡。如同GTO以及SCR一样,IGCT器件处于阻断状态时,由于不同器件之间的漏电流存在一些差异,各器件的伏安特性不一致。为提高耐压水平而串联使用时,将会在漏电流最小的器件上产生过电压,由此损坏该IGCT元件。静态均压的最常用方法是给每只器件并联一个阻值较大的均压电阻,当流过均压电阻的漏电流大于IGCT漏电流时会取得较好的均压效果。均压电阻的阻值大小决定于各器件漏电流大小的差异,差值大则电阻值要取小。选取静态吸收电阻还要考虑其损耗,在允许的情况下选取较大的电阻以减少电路的损耗^[5]。图2为串联IGCT的静态均压电路。

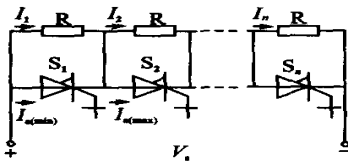


图2 串联IGCT的静态均压电路

假定S₁漏电流最小为I_{a(m in)},而其它器件均有相同的最大漏电流为I_{a(m ax)}。根据电路图可得

$$I_{a(m ax)} - I_{a(m in)} = I_1 - I_2 \quad (2)$$

S₁端电压为V₁(V₁ = I₁R),串联器件的总端电压为V_s,串联个数为n,则可得式(3)

$$V_s = (n - 1) I_2 R + V_1 \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)可得

$$R = (nV_1 - V_s) / (n - 1) (I_{a(m ax)} - I_{a(m in)}) \quad (4)$$

考虑最坏的情况 I_{a(m in)} = 0 则

$$R = (nV_1 - V_s) / (n - 1) I_{a(m ax)} \quad (5)$$

静态均压电阻损耗为

$$P_{sbss} = V_s^2 / (nR) \quad (6)$$

根据以上公式,可以选取合适的静态均压电阻。

由于串联器件的开通时间以及反向恢复电荷之间存在着差异,器件在开通及关断的过程中会出现瞬态的电压分配不均衡。动态均压电路的作用就是为了避免串联IGCT在暂态过程中出现电压分配不均,保证器件在暂态过程中承受的电压处于安全工作区内。常用的IGCT动态吸收电路一般有RCD(如图1)和RC(如图3)两种形式。

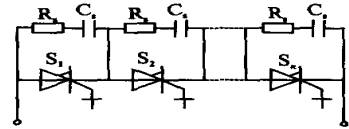


图3 IGCT串联动态均压电路

RCD缓冲电路采用快恢复二极管与电阻并联。关断过程中,电流通过二极管快速给电容充电;开通时,电容通过电阻放电,而二极管截止。RC缓冲电路则在关断时也通过电阻给电容充电。RCD在大容量的设备中使用,可以选用较大的电阻,可以有效地减小开关过程应力。但二极管在反向恢复的过程中会产生过电压,增大尖峰电压。RC型缓冲电路虽然结构简单,但是通过选取合适的阻容值,在6kV变频器中可有效地实现串联IGCT的动态均压。另外,由于快恢复二极管比较昂贵,采用RCD缓冲电路将提高整体成本。

RC缓冲电路参数的设计需要考虑串联IGCT之间的开通、关断差异;开通时放电电流的大小;避免谐振以及损耗等问题。相对而言,开通过程的均压要比关断时容易。

为使IGCT元件在暂态过程中保持均压,电容值的大小必须满足式(7)。缓冲电路还应避免杂散电感引起的过电压损坏器件,则电容必须同时满足式(8)。

$$C_s \geq I_A \Delta t_s (n - 1) / U_A (1/K_u - 1) \quad (7)$$

$$C_s \leq L_s I_A^2 / \Delta U^2 \quad (8)$$

式中:C_s为吸收电容;I_A为最大阳极电流;Δt_s为IGCT间存储时间之差;L_s为线路的杂散电感;ΔU为允许的尖峰电压。

相比GTO,IGCT的存储时间已大大的减小。

其差异也相对较小,即 Δt_s 很小^[5],所以电容值可以取较小的值。根据我们所选用的 IGBT 元件,选取的吸收电容值为 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{F}$ 。

电阻的选取必须避免与选用的电容以及电路的杂散电感形成谐振,同时吸收回路的放电时间常数必须能保证在开通时能及时放电结束。由此,可以根据式(9)选取合适的电阻。

$$R_s = 2\sqrt{L_s/C_s} \quad (9)$$

$$t_{on(\min)} = 5R_s C_s \quad (10)$$

对于所选取的电容和电阻的参数,还必须考虑其在工作中产生的损耗,式(11)给出

$$P_{loss} = C_s V^2 \dot{C}_s \quad (11)$$

以上根据 IGBT 在串联使用时所存在的问题,提出了其缓冲电路的具体设计方法,以下将通过试验验证设计方法以及选取参数的正确性。

3 试验结果

为验证缓冲电路的均压效果,本文采用图 4 所示试验电路对其进行试验研究。试验采用的 IGBT 型号为 5SHX 14H4502。

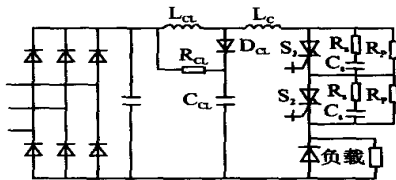


图 4 IGBT 串联吸收实验电路

其中参数的取值根据使用 IGBT 的特性以及前述的公式计算分别取为: $L_\alpha = 5 \sim 20 \mu\text{H}$, $C_\alpha = 5 \sim 10 \mu\text{F}$, $R_\alpha = 1 \sim 5 \Omega$, $R_s = 1 \sim 10 \Omega$, $C_s = 0.1 \sim 1.0 \mu\text{F}$ 。

从图 5a 可以看出,无缓冲时,串联 IGBT 在暂态过程中出现了电压不平衡现象,这样对器件极易产生过电压击穿的危险。而图 5b 和图 5c 分别为吸收电容取 $0.25 \mu\text{F}$ 和 $0.5 \mu\text{F}$ 时的波形。由试验

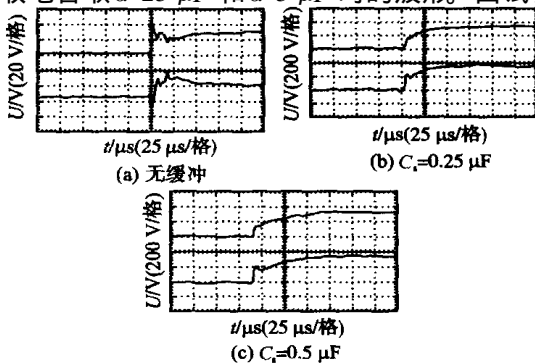


图 5 串联 IGBT 电压波形

波形可以看出,采用缓冲电路时,电压不平衡现象已经得到解决,虽然承受电压不完全相同,但不足以引起器件的过电压。而且对于不同的电容值而言,较大的电容可以得到更好的抑制电压尖峰和均压效果。但根据理论分析及试验结果,过大的电容是没有必要的,而且过大的电容将会造成过大的损耗,影响整个系统的效率。

图 6 为在相同电容值下,选取不同电阻得到的 IGBT 开通时的电流波形。图 6a 中,选取了较小的电阻,则 IGBT 电流由于缓冲电路的谐振产生了振荡,其幅值也较高,可能影响器件的安全。而图 6b 则根据设计方法选用电阻,其开通安全、迅速。

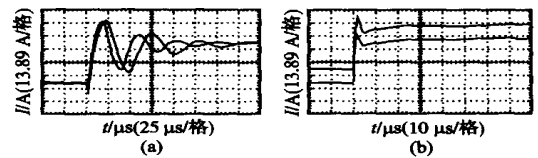


图 6 不同电阻值下开通电流波形

4 结论

经过改进,IGBT 的各种特性都得到了提高,甚至可以无缓冲工作。但在 6 kV 高压变频器中,IGBT 无缓冲串联使用时会因分压不均而产生过电压危险。本文给出了 IGBT 串联缓冲电路的设计方法,并通过选取不同的电阻及电容参数进行了大量的试验。试验结果证明了所采用的缓冲电路及本文设计方法的有效性。配合所设计的缓冲电路,IGBT 可以可靠安全的串联运行。

参考文献

- 1 陆继明,李维波,毛承雄等. 高压变频器输出滤波器研究. 高压技术, 2002, 28(11): 13~16
- 2 李宏. 电力电子设备用器件与集成电路应用指南. 北京: 机械工业出版社, 2001
- 3 王兆安,张明勋. 电力电子设备设计 and 应用手册. 北京: 机械工业出版社, 2002
- 4 John A Pappas, Angelo L Gattozzi, Robert E Hebner. Pulsed-duty Characterization of Turn-off for a Population of SCRs and the Effect of Variation on Equalization Circuit Design. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39: 432~436
- 5 Lyons J P, Vlatkovic V, Espelage P M et al. Innovation IGBT Main Drives. IEEE Thirty-fourth IAS Annual Meeting, IAS 99, 1999, 4: 2655~2661

收稿日期: 2003-07-28

修改稿日期: 2004-11-15