

# 用逻辑信号直接驱动直流电力控制 SSR的新技术

林周布

(福州大学电气工程与自动化学院,福建 福州 350002)

**摘要:** 提出一种只要用逻辑信号就能直接控制直流电力控制固态继电器(SSR)的新技术;其特征是不要外接偏置电压源,而由一个特殊隔离变换器将输入逻辑信号变换为能快速开通或关断 IGBT模块的驱动电力。该变换器首先对输入导通信号进行短时的累积储能以达到足够的电能,然后释放为模块的驱动电力,从而实现用信号线就能直接控制 SSR的先进控制方式。结合此技术,还提出了关断缓冲电容器能量的自动放电复位电路。文中给出了新技术的基本电路结构与设计方案;对电路的工作原理进行了理论分析。对电路进行的仿真研究与实验测试,均表明该技术可行且性能优良。

**关键词:** 直流; 固态继电器; 电力控制; 逻辑信号

**中图分类号:** TM57 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)05-0042-05

## 0 引言

许多电子系统要求用高可靠性的低压直流电源作为系统工作电源。当电子系统所消耗的直流电功率较大时,传统的 48 V 级低压直流电源难以满足系统的高效率供电要求;为了减小配电电缆的体积与重量,一些自动化电子系统的直流供电电压等级已扩大到 110 V,甚至达到 220 V,而电流则达到 100 A 级。此外,如果考虑到开关高速断开时线路分布电感产生的附加尖峰电压,加在开关器件上的直流电压将更高。这样系统就需要有耐高压(600 V 或更高电压规格)、无弧高速切换的直流电力控制开关。由于本体技术局限,虽然电磁开关在一些性能上能满足使用要求,但是要自我克服其先天缺陷极为困难。这些缺陷包括分断直流负载时发生的触头电弧现象、开关速度慢、控制不精确、电气寿命较低、要用较大电功率驱动励磁线圈等。现代自动化系统信号总线的发展趋势是用较少的电缆线、较快的系统周期时间、数据信号与电力信号都在同一根电缆线上传输并用数字逻辑电平作为接口标准、执行部件能挂在信号总线上并直接受系统计算机监控、达到运行简单经济。显然,以新型绝缘栅双极型电力半导体模块(IGBT module)为执行部件的固态继电器(SSR)技术,具备了作为较高电压等级直流电力自动控制开关的必要条件<sup>[1,2]</sup>。但是,要将此种技术灵活、便利地应用于自动化电子系统,还要求此类 SSR 具有如下功能<sup>[3]</sup>,即:

1) 不用附加偏置电压源,直接将输入逻辑信号作为 SSR 的电力驱动与通断控制信号。

2) 输入信号电平与通常通讯接口信号电平兼容,即要求通态时的输入直流电平控制信号为 3.5 ~ 15 V,且输入电流平均值小于 20 mA,断态时输入直流低电平信号小于 1.5 V。

3) 保持 SSR 的快速开关优点,符合电气接口系统的周期时间要求,使总开通时间  $T_{ON}$  与关断时间  $T_{OFF}$  在 ms 数量级。

4) 输入与输出要达到规定的电气安全隔离标准,要具有完善的自保护功能。

现有 IGBT 模块的驱动集成电路成品,大多数是以高频 PWM 工作为条件而设计的;如日本富士公司的 EX851、三菱公司的 M57959 等,它们均要求输入电压较高、输入电流较大而不能满足上述要求。其它直流 SSR 控制电路都要求附加一个偏置电压源,因此也不能满足上述要求。本文提出一种能在信号总线上用接口逻辑信号直接驱动的、以 IGBT 模块为执行开关部件的直流电力控制 SSR 新技术。

## 1 新技术的电路结构与设计方案

为了满足上述要求,提出由图 1 功能框图构成的一种 SSR 新技术。这是由不用偏置电源的信号检测与高效隔离型 DC/DC 变换器单元电路 A、IGBT 驱动电压源及故障检测与保护单元电路 B、IGBT 模块与附加在其上的尖峰电压吸收、嵌位与缓冲单元电路 C,共四个部分构成。其中核心技术为图 1 中的涉及电力处理方面的电路。这些电路要解决的三个技术问题分别是:

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(A0210010)

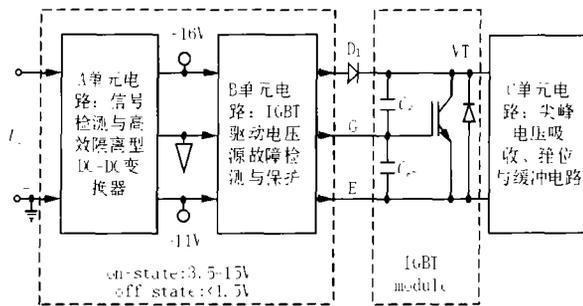


图1 低压直流控制 SSR的电路组成框图

Fig 1 Block diagram of low-voltage DC power control SSR

1) 高速响应输入控制逻辑信号,并能快速将逻辑高电平(电功率限制为 $3.5\text{ V} \times 20\text{ mA} = 70\text{ mW}$ )的导通控制信号,在较短时间内用高效隔离 DC/DC 变换器转换为 IGBT 模块所要求的开通或关断驱动电力。

2) 该驱动电力应达到 IGBT 模块所要求的两路低内阻稳压源的驱动要求,即在开通与通态时为 $+15\text{ V}$ ,在关断与断态时为 $-5\text{ V}$ ,因执行保护而强迫关断时要置于 $-10\text{ V}$ 。

3) 为吸收开关高速断开时线路分布电感产生的附加尖峰电压而设的缓冲电路,其缓冲能量的放电复位不能影响 IGBT 模块的工作。

IGBT 模块的开关速度与通断的动态效果直接依赖于模块极间寄生电容的充放电,特别是集电极端子与栅极端子之间耦合电容的密勒(miller)效应对电路影响很大,有必要对其作用效果进行理论分析。

设 IGBT 接通时的输入驱动电压为  $V_{ge}$ , 栅极-发射极间输入电路的电容为  $C_{ge}$ , 根据库仑定律(Coulomb's law), 此时密勒电容  $C_{gc}$  获得的电量增量为

$$Q_{gc} = C_{gc} (V_{ge} - V_{ce}) = C_{gc} V_{ge} (1 - V_{ce} / V_{ge}) \quad (1)$$

这里的简化过程是:  $V_{ce(on)} = 0$ ,  $V_{ge} = V_{ge}$ ,  $V_{ce} = V_{ce(on)} - V_{ce(off)} - V_{ce(off)} = -V_{ce}$

假定密勒电容  $C_{gc}$  的作用可以用并联在 IGBT 栅极电路的电容  $C_{ge}$  来等效, 根据电荷守恒定理, 有

$$Q_{gc} = C_{ge} V_{ge} = C_{ge} V_{ge} \quad (2)$$

根据式(1)、(2), 可以得出

$$C_{ge} = C_{gc} (1 + V_{ce} / V_{ge}) \quad (3)$$

这样并联在 IGBT 输入端的等效电容

$$C_{in} = C_{ge} + C_{gc} (1 + V_{ce} / V_{ge}) \quad (4)$$

若要开关的直流高压为  $220\text{ V}$ , IGBT 模块接通电压  $V_{ge}$  为  $15\text{ V}$ , 而高速关断时分布电感产生的附

加电压尖峰, 加在器件上的直流电压  $V_{ce}$  可能高达  $450\text{ V}$ , 显然对于这种工况, 由于密勒电容产生的效应, 使得密勒电容  $C_{gc}$  对输入端的作用相当于在输入端并联一个高达 31 倍  $C_{gc}$  的电容。从器件参数数据手册知,  $100\text{ A}$ 、 $600\text{ V}$  级的 IGBT 模块的栅极电容  $C_{gc}$  的量值可达  $15\text{ nF}$ , 密勒电容  $C_{gc}$  的量值达  $3\text{ nF}$ 。由式(4)知, 在 IGBT 模块开通时输入端的等效电容可达到  $100\text{ nF}$  的数量级。对此要求 SSR 的驱动控制电路的开通电流  $i_{in}$ , 由库仑定律的微分形式得:

$$i_{in} = C_{in} * V_{ge} / t \quad (5)$$

以一种典型应用为例, 设某一个 IGBT 模块的  $C_{in}$  为  $100\text{ nF}$ , 取  $V_{ge}$  为  $15\text{ V}$ ,  $t$  为  $0.1\text{ ms}$ , 可得开通电流  $i_{in}$  为  $15\text{ mA}$ 。显然, 对于  $15\text{ V}$  的驱动电压, 其开通功率达  $225\text{ mW}$ , 远超过最大输入信号功率规格 ( $70\text{ mW}$ )。若开关速度要更快, 就要在 IGBT 关断时在其栅极加上负偏压, 再考虑控制电路的各个功能子电路都需要偏置功率与隔离传输中的功率损耗; 则要求 SSR 的开通功率至少为  $400\text{ mW}$ 。因此, 虽然在稳态期间逻辑信号的电能可以满足 IGBT 模块的驱动电力要求, 但在开通与关断动态时, 输入信号就不能满足 IGBT 模块的驱动电压源或汇要求。这是以 IGBT 模块为执行部件, 但无附加偏置电源的 SSR 必须正视的第一个技术问题。

提出一个新思路来解决这个问题。即: 虽然  $t$  值较大可以使开通电流  $i_{in}$  较小, 但它也使得 IGBT 模块的开通损耗增大。显然这种降低器件可靠性的作法不可取; 为此仍取  $t$  值较小的方案。这样必须有一个能将低功率的导通逻辑信号变换为能猝发通断 IGBT 电力的特殊变换器电路。该电路在 SSR 的导通逻辑信号期间, 能先将导通逻辑信号的电能用高频脉冲储能变换方式在短时间 ( $0.1\text{ ms}$ ) 内完成积累性的储能, 在储能电路能量达到  $E = 0.5 C_{in} V_{ge}^2$  时, 立即用低内阻高速功率开关电路将此能量作为瞬时开通或以后快速断开 IGBT 模块的电能。这样就必须将输入控制逻辑信号检测电路与电能变换电路分为独立的两部分, 前者解决信号的正确识别与高速响应问题, 后者则完成将连续的信号电能以电气隔离方式变换为猝发通断的电能。

第 2 个问题的解决依赖于有闭环负反馈功能的双路输出高精度稳压电路。为了提高可靠性与缩小装置的体积, 必须合理选用高性能专用集成电路。

第 3 个问题的实质是如何实现关断缓冲电容器的放电复位问题。对于要求在高电流下快速动作的 DC SSR, 为了要应对实际存在的较长接线而致较大

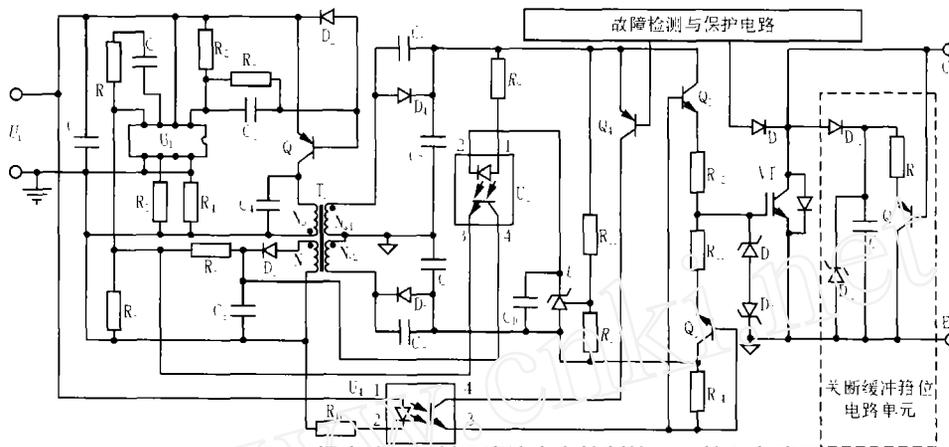


图 2 提出的用于低压直流电力控制的 SSR 核心电路图

Fig 2 Kernel circuit of the proposed SSR applied to DC power control

分布电感的现象,为了要应对负荷可能含有直流电动机类阻感性负荷等问题,就要用较大量值的电容器来吸收关断暂态能量,由此出现电容器电能的放电复位问题。由于 SSR 中 IGBT 的开关速度远低于高频变换器中 IGBT 的开关速度,缓冲电能仅占整个装置的很小部分,因此对其的处理不重点考虑电能的再生利用问题,而是重点考虑如何在不影响 IGBT 模块工作前提下使之迅速放电而复位问题,以保证在频繁通断工况要求下,SSR 绝不发生任何过压击穿问题。传统的 RDC 有损关断缓冲电路,其工作原理是利用 IGBT 开通时,将电容器吸收的缓冲电能通过限流电阻  $R$  直接对 IGBT 放电。故存在 IGBT 开通时发生额外的电容放电涌流问题,这个涌流不但加重了 IGBT 的开通损耗,而且可能使通过检测集电极电压降来间接采样 IGBT 电流的电路失误。本技术采用由功率晶体管为主构成的电容器电能自动快速放电复位电路来简单处理这个问题。

图 2 就是提出的 DC SSR 新技术的电路图。图 2 中  $U_{in}$  为输入控制逻辑信号。单元电路 A 的功能主要由一个呈现电流源性质的高频隔离储能式变换器与光电耦合器来完成。由脉冲调制控制电路功能块  $U_1$ 、高频 pnp 开关三极管  $Q_1$ 、变压器(实质是耦合电感器)  $T_1$ 、光电耦合器  $U_2$ 、输出高频整流二极管  $D_4$  与  $D_5$ 、电容器  $C_4$ 、 $C_6$ 、 $C_7$ 、 $C_8$  与  $C_9$  构成有特色的高性能隔离型 DC/DC 变换器。由绕组  $N_p$  与接在变压器绕组上的电容器构成有谐振腔的变形反激式(flyback)变换器,这种对输入源呈现电流源性质的变换器,结合 PWM 与 PFM 混合调制方法<sup>[4]</sup>,使开关管  $Q_1$  能以接近软开关方式在短时高效地完成对输入逻辑信号的积累储能功能,这样大大减小了对输

入控制信号的电流要求。图 2 中由光电耦合器  $U_4$ 、开关控制管  $Q_4$ 、功率开关管  $Q_2$  与  $Q_3$  构成 IGBT 的猝发开通或关断驱动电路。为了使该控制装置微型化以及能在较短时间内有效积累储能,输入信号电平较低时采用频率高达 70 kHz 的脉冲宽度调制 PWM 工作模式,输入信号电平较高(超过 7 V)时自动转入较低频率的脉冲频率调制 PFM 工作模式,这样使得当输入信号电压幅度变化很大仍能维持稳定的输出电压,而且在较高输入电压时输入电流能减小很多,容易与使用较高电压但扇出电流较小的 MOS 器件类接口缓冲电路兼容。检测与驱动电路单元放在高频变压器的次边,并与模块的栅极电路共地,这样不但能提供两路稳定的电压,而且有利于对 IGBT 的工作状态进行实时检测并正确执行保护。

## 2 仿真分析与实验测试

图 3 为 SSR 输入导通信号电平为 3.5 V 时变换器中开关管  $Q_1$  的电压、电流测试波形图。从图中可以看出由于谐振腔电容器  $C_4$  的存在,使得开关管  $Q_1$  开通时为接近零电流,关断时由于谐振腔吸收了关断电压尖峰,使得关断为缓冲状态。为了便于理解这种变形反激式变换器的准谐振作用,图中还给出了谐振腔中元件绕组  $N_p$  的电压波形  $U_{Np}$ 。显然,谐振峰电压较输入导通信号电平高很多,有利于在很低信号电压下高效实现积累储能功能。

根据图 2 制作了少量的实验样品进行模拟测试。图 2 电路的 IGBT 模块用接一个 15 A、600 V 的 IGBT 分立器件 GT15J101,并在其 G、E 两端并联接上一个 0.1  $\mu$ F 电容来模拟。此时该 IGBT 的 GE 两

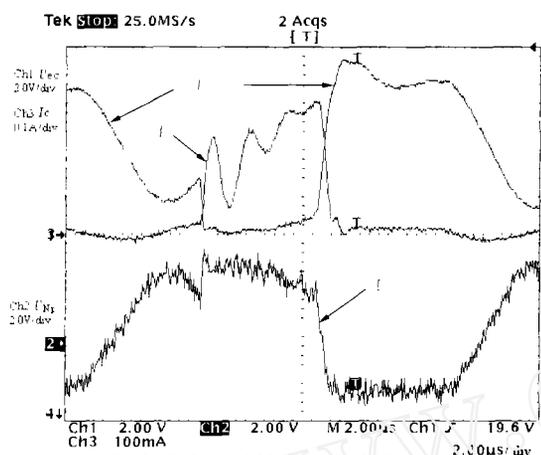


图3 新电路中开关管电压电流波形图

Fig 3 Tube voltage and current waves in new circuit

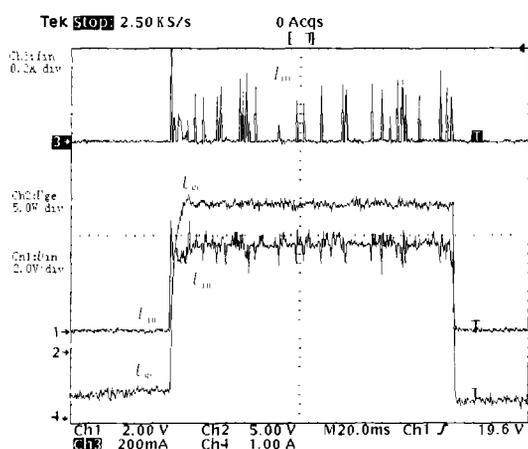


图4 DC SSR控制波形图

Fig 4 Control waveforms of DC SSR

端输入电容与 IGBT 模块的等效输入电容相当。用 555 定时器制作一个可调电压幅值的矩形脉冲信号作为输入信号源,用数字存储示波器进行测试。在输入导通信号电压幅值为 3.5 V 时测得加在图 2 上的输入控制信号  $U_{in}$  与输出驱动信号  $U_{go}$  的开关通断过渡波形见图 4。从图中可以看出开通时间不超过 0.2 ms,断开时间约为 0.4 ms,且断开时电路仍能维持 -5 V 左右的较低电压,以确保电路在断开时有较强的防误导通能力。图 4 还给出在输入导通信号电平为 3.5 V 时输入端未经滤波的电流波形。可以看出由于采用高频准谐振脉冲工作方式,使得输入电流波形为高频低幅值的窄脉冲,容易用高频滤波器滤去高频分量,使得输入平均电流很小,达到输入导通逻辑信号的最高电流为 20 mA 的限定要求。测试结果表明,当输入电压幅值为 3.5 V 时,测得输入电流小于 19.5 mA;输入电压幅值为 5 V 时,

测得输入电流小于 15 mA;输入电压幅值为 10 V 时,测得输入电流小于 7 mA;输入电压幅值为 15 V 时,测得输入电流小于 6 mA。

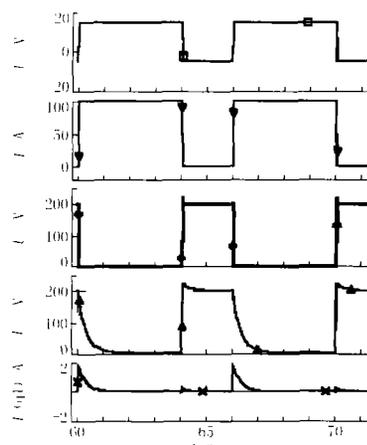


图5 IGBT关断缓冲仿真波形图

Fig 5 Simulated waveforms of IGBT with turn-off snubber

用 PSpice 电路仿真软件对图 2 电路进行仿真分析研究。仿真电路条件为:负荷工作电压为 200VDC,电流为 100 A,负荷接线的总分布电感用一个 10  $\mu$ H (相当于数米长的导线)的电感器来等效,关断缓冲电容器容量为 3.3  $\mu$ F。图 5 分别为其中 IGBT 模块的电压、电流波形、缓冲电容器的电压波形、放电复位晶体管的电流波形图。可以看到,虽然等效分布电感较大,但由于缓冲电容器取值较大(较一般变换器电路所用的缓冲电容器要高两个数量级),而且有能快速自动完成放电复位电路的支持,IGBT 模块的电压、电流波形良好。

### 3 结论

从理论分析、仿真研究以及实验测试结果可以得出如下结论:

- 1) 新技术可以用于无偏置电压源、只用输入控制逻辑信号、并以 IGBT 模块作为执行部件的直流电力控制 SSR。
- 2) 将导通逻辑信号有效地转换为能快速开通 IGBT 驱动电力的方法,可以用于与 IGBT 模块相关的电子驱动电路。
- 3) 缓冲电容器的快速自动放电复位方法,对实际 SSR 电路有一定的参考价值。
- 4) 该技术符合在同一根信号线上,用逻辑信号直接控制 SSR 的先进控制方式。但电路所用的元器件较多,宜使之成为集成组件,才能转化为商品并实现其应用价值。

## 参考文献:

- [1] Bishop A. 黄正,译. 固态继电器及其应用指南(一) [J]. 机电元件, 1996, 18(1): 48-64  
Bishop A. HUANG Zheng, Trans Guide of Solid State Relays and Their Applications, Part [J]. Electromechanical Components, 1996, 18(1): 48-64.
- [2] Rozanov Y, Akimov E. Commutation of Static and Hybrid Switches[A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical Contacts, Arcs, Apparatus and Applications (IC-ECAAA). Xi an(China): 1997. 397-402
- [3] GJB1515A-2001 固体继电器总规范, 中国电子技术标准化研究所 [S].

General Specification for Solid State Relays, China Electronics Standardization Institute [S].

- [4] 丁道宏. 电力电子技术(修订版) [M]. 北京: 航空工业出版社, 1990  
D NG Dao-hong Power Electronic Technology, Revised Edition [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1990.

收稿日期: 2004-07-02; 修回日期: 2004-08-28

## 作者简介:

林周布 (1952 - ), 男, 高级工程师, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为电力电子技术及其应用。E-mail: lzb@fzu.edu.cn

### A novel technique for a DC power control SSR driven by logical signal directly

L N Zhou-bu

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** A novel technique for a DC power control SSR is proposed, which can drive the SSR applied to DC power control only with logical signal directly. Its feature is that the input logical signal is converted to drive power by a special isolated converter, which makes a IGBT module turn on or off quickly, without any other biased voltage sources. The converter accumulates the signal energy in short time firstly. As the energy is so large that can drive the module, the converter releases it then. Thus the advanced way of directly control SSR in the same signal line is realized. With the technique, a reset circuit of automatic discharge for energy captured in the turn-off snubber capacitor is also presented. In this paper, basic circuit construction and the design approach are presented, the operation principle of the circuit is analyzed theoretically. The circuit simulation study and experimental testing verify that the technique is feasible with better performance.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Fujian Province (No. A0210010).

**Key words:** DC; solid-state relay (SSR); power control; logical signal

(上接第 7 页 continued from page 7)

收稿日期: 2004-07-02; 修回日期: 2004-09-17

## 作者简介:

陈茂英 (1979 - ), 女, 硕士研究生, 从事微机继电保护

方面的研究; E-mail: chenmaoying515@163.com

杨明玉 (1965 - ), 女, 讲师, 从事微机继电保护的的教学与研究工作;

张新国 (1954 - ), 男, 副教授, 从事微机继电保护的的教学与研究工作。

### Research on a fault phase selection algorithm based on fault transient voltage

CHEN Mao-ying, YANG Ming-yu, ZHANG Xin-guo, HU Ju

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** On analysing the characteristic of high frequency transient voltage of various fault types, this paper puts forward a new fault phase selection algorithm based on transient voltage with wavelet transform. Using the wavelet modular maxima of transient voltage modular components and the Lipschitz exponents of transient voltage of each phase, reliable phase selection can be realized. The paper simulates a typical 500 kV transmission line and the results verify that the algorithm is correct and fast.

**Key words:** fault phase selection; transient voltage; wavelet transform