

IGBT 在核电站棒控系统中的应用

Application of IGBT in Rod Control System of Nuclear Power Station

许育周 李 涛 王春生

(中核华核技术研究院有限公司,广东 深圳 518124)

摘要: 针对目前基于可控硅的核电站棒控系统存在输出电流纹波大、电流上升和下降时间长等特点,提出了基于绝缘栅双模型晶体管(IGBT)的棒控系统。IGBT 作为新型大功率开关器件,具有电压型控制、输入阻抗大、驱动功率小、控制电路简单、开关损耗小、工作频率高和元件容量大等优点。实际应用表明,IGBT 减小了棒控系统输出的电流纹波和电流上升、下降时间,十分适合应用于核电站棒控系统中。

关键词: IGBT 棒控系统 核电站 整流 脉宽调制 纹波

中图分类号: TP211+.5 **文献标志码:** A

Abstract: At present, most of the rod control system in nuclear power stations are using SCR, so the ripple of output current is big, and the rising time and falling time of the current are long, to overcome this demerits, the rod control system based on IGBT is proposed. IGBT is a new type of large power switching device; it features voltage control, high input impedance, small driving power, simple control circuit, low switching loss, high working frequency and large capacity. Practical application shows that the ripple and current rising and falling time are decreased, this shows that IGBT is suitable for application of rod control system in nuclear power station.

Keywords: Insulated gate bipolar transistor(IGBT) Rod control system Nuclear power station Rectification
Pulse width modulation Ripple wave

0 引言

棒控系统是核电站反应堆十分重要的控制系统,它是控制棒驱动机构的电源控制装置^[1]。电源柜是棒控系统的重要设备,其作用是驱动机构的三个线圈提供相应大小的时序电流,使驱动机构提升、保持和下降控制棒束,以调节反应堆功率。

目前,国内外在役二代或二代加核电站棒控系统主要基于可控硅整流技术。该技术决定了输出电流纹波较大,上升和下降时间较长。在某些情况下,电流纹波会超出阈值引发电流故障报警,影响系统的安全性。

基于绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)的整流技术由于采用了脉宽调节等技术,可以克服可控硅技术的缺点,因而越来越受到国内外厂商的重视。岭澳二期核电站、欧洲 EPR 三代核电站采用了 IGBT 技术。

1 可控硅棒控系统缺点分析

可控硅是 20 世纪五六十年代发明的半控型整流

器件,被广泛应用于电力电子设备中^[2]。可控硅是一种电流驱动的半控型元件,当其被触发导通后,不能自主关断。只有当阳极电压下降到接近或低于阴极电压时,可控硅才能关断。

可控硅的开关速度也相对较慢。可控硅与 IGBT 的性能比较如表 1 所示。

表 1 可控硅与 IGBT 性能比较

Tab.1 Performance comparison for SCR and IGBT

器件	控制方式	工作频率	开关速度	饱和压降
可控硅	半控,不可自主关断	低 (小于 10 kHz)	数 μ s	低 (0.5 ~ 1 V)
IGBT	全控,可自主关断	高 (高于 50 kHz)	数百 ns	中 (1 ~ 2 V)

由表 1 可知,可控硅的灵活性、工作频率、开关速度上都比 IGBT 逊色。

由可控硅构成的棒控系统具有输出电流纹波大、上升和下降时间较长、控制电路复杂等缺点。由于这些缺点,近年来,人们开始使用新型的功率器件 IGBT 作为整流器件。

传统的棒控系统均将可控硅作为整流元件。由三只可控硅构成的三相半波整流主电路如图 1 所示。

国家科技支撑计划基金资助项目(编号:2011BAA06B01)。

修改稿收到日期:2013-10-20。

第一作者许育周(1981-),男,2004 年毕业于南华大学核工程与核技术专业,获学士学位;主要从事核电站仪控系统的研究工作。

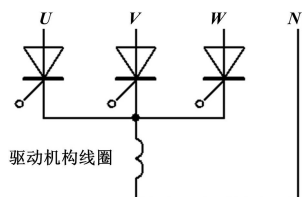


图 1 可控硅三相半波整流电路

Fig. 1 Three phase half wave rectification based on SCR

2 IGBT 发展历史及特点

电力电子器件的发展经历了可控硅(SCR)、可关断可控硅(GTO)、功率晶体管(GTR)、功率场效应管(MOSFET)和绝缘栅晶体管(IGBT)等阶段^[3]。目前,电力电子器件正朝着大容量、高频率、易驱动、低损耗、模块化、复合化方向发展。IGBT 器件诞生于 20 世纪 80 年代,90 年代初进入实用化。与其他电力电子器件相比,IGBT 具有电压型控制、输入阻抗大、驱动功率小、控制电路简单、通断速度快、工作频率高、元件容量大等优点^[4]。近几年来,IGBT 的性能提高很快,额定电流已达数百安培,耐压达 1 500 V 以上,而且还在不断提高。

IGBT 是集 GTR 与 MOSFET 二者优点于一体的复合器件,它既有 MOSFET 的输入阻抗高、速度快、开关损耗小、驱动电路简单、要求驱动功率小、极限工作温

度高、易驱动的特点,又具有 GTR 的通态电压低、耐压高和电流容量大的优点。IGBT 为电压控制通断的自关断器件,其频率特性介于 MOSFET 与功率晶体管之间,可正常工作于数十 kHz 频率范围内。IGBT 正日益广泛地应用于体积小、噪声低、性能高的变频电源及大功率的交流伺服电机的调速系统中,在较高频率的大、中功率应用中占据了主导地位,并已开始在上述领域取代 GTR 和 MOSFET。

IGBT 技术经过 20 多年的发展,现已成为一种非常成熟的产品。其具有电路简单、开关损耗小、工作频率高和元件容量大等优点,在电力电子领域得到了广泛应用。

3 IGBT 在棒控系统中的应用

目前,核电站棒控系统主要应用的是传统的可控硅技术和新型的 IGBT 技术。驱动机构所要求的电流波形是一种直流脉冲波形,因此可设计一种由 IGBT 构成的斩波器^[5]。就全控性能而言,IGBT 是最适合斩波应用的器件,而且技术简单,几乎 IGBT 器件本身就构成了斩波电路。

目前,IGBT 技术已成功应用于广东岭澳二期核电站棒控系统、中国原子能研究院快中子反应堆的棒控系统。这些反应堆的棒控系统运行情况良好。

可控硅和 IGBT 这两种器件构成的棒控系统的性能指标比较如表 2 所示。

表 2 两种方案性能比较

Tab. 2 Compare of two schemes performance

方案	输出电流纹波	上升下降时间	控制方式	电源利用效率
可控硅方案	较大(提升电流约 2.5 A)	较长(提升 70 ~ 80 ms)	复杂(相序控制)	低(三相半波整流)
IGBT 方案	很小(提升电流小于 0.5 A)	较短(提升 50 ~ 60 ms)	简单(脉宽调制)	高(正、负半周整流)

从表 2 可以看出,由 IGBT 构成的棒控系统的性能都优于可控硅系统。

以岭澳核电二期棒控系统为例,简述 IGBT 在棒控系统中的应用情况。由 IGBT 构成的主电路结构如图 2 所示。

岭澳二期棒控系统主电路由两块 IGBT 构成。其中,VT₁ 为斩波管,它的主要作用是对要求的电流值与驱动机构线圈反馈回来的实际电流值进行比较后,产生不同脉宽的矩形方波,以进行电流大小的调节。VT₂ 为逆变管,它的主要作用是当某时刻要求电流时导通,要求切断电流时关断,达到控制电流输出或关断的时间。

通过控制 VT₁ 和 VT₂ 的导通与关闭,就可以产生符合驱动机构要求的电流波形。

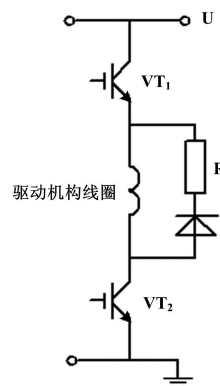


图 2 IGBT 主电路图

Fig. 2 Main circuit of IGBT

各管子的控制脉冲波形和输出电流波形如图 3 所示。

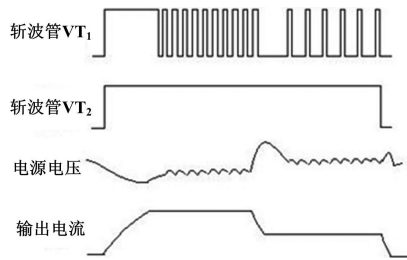


图3 控制脉冲波形和输出电流波形

Fig. 3 Control pulse waveform and output current waveform

当 VT_1 和 VT_2 都关断时,驱动机构线圈将产生一个较强的自感电动势。为了释放这个电动势的能量,在驱动机构线圈的两端并联一个电阻 R ,以释放其产生的自感电动势。

这个电动势释放的快慢将直接决定输出电流的上升和下降时间。它的时间常数为 L/R ,其中, L 为驱动机构线圈的电感量。可见,增大 R 可以减少自感电动势的释放时间^[6]。但是如果 R 增加得太大,也增加了电阻的功耗,使其发热严重。

改进方法主要有两种,其中一种改进的方法是用齐纳二极管代替电阻,这种方法可以大大减少自感电动势的释放时间。另一种方法是将自感电动势释放到电容器中。这种方法不但释放时间快,而且将驱动机构线圈的磁场能量转化成电能,以供下次动作使用,且不产生多余的热量使机柜升温。

4 IGBT 使用注意事项

虽然 IGBT 作为近来非常流行的器件,得到了广泛应用,但 IGBT 也有其自身的缺点。使用时应该根据器件的特点设计相应的线路和选择合适的参数。

① IGBT 容量选择

IGBT 的过流能力比可控硅的过流能力要弱一些,一般过流时间只有数十微妙。其过流峰值也只约为额定电流值的两倍。元件实际允许通过的电流受安全工作区的限制而减小,导通时间越长,元件发热越严重,导通电流越小。因此,在选择 IGBT 容量时,一般要选择额定电流大于实际工作电流的 2~3 倍。

② 栅极驱动电压 U_{ge}

栅极驱动电压对 IGBT 的性能有比较大的影响。 U_{ge} 电压越高,导通压降越低,但受到器件性能限制,一般不能超过 20 V。为了减小 IGBT 的开关损耗,应使其从截止区和饱和区之间的过度时间尽量短。这就要求 U_{ge} 脉冲前沿很陡,使 IGBT 快速开通。在关断时,应设计下降沿陡的反向偏置电压,使之快速关断,减小关断损耗。IGBT 导通中及瞬时过载时,栅极驱动源应能

提供足够的功率,使 IGBT 不退出饱和而损坏。实际应用中, U_{ge} 一般取 12~15 V。

③ 栅极电阻 R_g

栅极电阻 R_g 对 IGBT 的导通和关断时间影响很大。为了改善控制脉冲前后沿陡度,减少 IGBT 集电极大的电压尖脉冲,需在栅极串联电阻 R_g 。 R_g 越大,IGBT 的导通和关断时间也就越长,开关损耗也就越大; R_g 越小,导通和关断时间也就越短,关断损耗也就越小。但 R_g 过小会造成 di/dt 增高,产生较大的集电极电压尖峰,可能引起误导通或损坏 IGBT。因此,要根据具体电流容量和电压额定值及开关频率,选择合适的串联阻值,而且栅极串联电阻应随着 IGBT 电流容量的增加而减小。 R_g 一般为十几至几百欧姆。

④ 栅射电阻 R_{ge}

IGBT 的栅极输入阻抗是十分高的,通常高达几个甚至几十个兆欧,对静电十分敏感。IGBT 一般都工作在较高电压状态下。当集射极间加有高压时,IGBT 易受干扰,使栅射电压超过开启阈值电压引起误导通。在栅射极间并接一栅射电阻 R_{ge} 可防止此现象发生。 R_{ge} 太小,会使 IGBT 开通时间变大,增加 IGBT 的开关损耗和降低开关频率。通常 R_{ge} 取 $(1\ 000 \sim 5\ 000) R_g$,并将 R_{ge} 并联在栅极与射极最近处。

⑤ 驱动电路

由于 IGBT 一般应用于电力电子设备的高压场合,故驱动电路与控制电路应严格隔离。栅极驱动电路要简单、实用,抗干扰性能好,自身保护功能完整,到 IGBT 的引出线尽量短,且采用双绞线,使电路有较强的抗干扰能力。在实际应用中,为达到更好的效果,在过流保护上还需采用如软关断、降栅压等方法;采用钳位电路防止产生浪涌电压等^[7]。

5 结束语

IGBT 经过 20 多年的应用和发展,已成为一种非常成熟可靠的产品。由于 IGBT 是一种电压控制型的全控型器件,控制方式简单,适合应用于核电站棒控系统中。虽然 IGBT 存在过流时间小、容易受干扰等不足之处,但只要合理选择 IGBT 的参数和合理设计其驱动和保护电路等,完全可以避免不足,并充分发挥 IGBT 的优势。

在应用 IGBT 的在役核电站中,棒控系统运行良好,由此证明 IGBT 应用于棒控系统是可行而且安全可靠的。

(下转第 46 页)