

晶闸管阀高位取能电路研究

程宏博¹ 郝润科¹ 杨文煥² 潘宁¹

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093; 2. 天晋电气科技有限公司 上海 200093)

摘要: 由于晶闸管耐压等级高,在高压动态无功补偿装置中广泛使用,由晶闸管串联构成的晶闸管阀,是晶闸管控制电抗器(TCR)的核心器件,在高电压下晶闸管阀驱动电路以何种方式获取能量是高压动态无功补偿装置必须考虑的问题。为了增加晶闸管串联运行的可靠性,设计了一种电压电流取能电路,能够满足 TCR 在各触发角下均能取到能量,给驱动电路供电,实现晶闸管阀高位系统自供电。利用 PSPICE 软件建立各取能电路仿真模型,仿真结果表明:高位取能电路能够减少开关损耗,提高晶闸管运行效率,而且能向驱动电路提供电能,为晶闸管阀的驱动电路稳定供电提供了理论基础。

关键词: 晶闸管阀;TCR;取能电路;驱动电路

中图分类号: TM461.4; TN710.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Study on high energy-obtaining circuit for thyristor valves

Cheng Hongbo¹ Hao Runke¹ Yang Wenhuan² Pan Ning¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Tianjin Electronic and Technology Co., Shanghai 200093, China)

Abstract: Due to the high pressure rating of thyristor, the thyristor widely used in high-voltage dynamic reactive power compensation device. Thyristor valves composed of thyristor series are core devices of thyristor controlled reactor (TCR). In high voltage, driving circuit of the thyristor valve in which manner obtains energy is the problem of high-voltage dynamic reactive power compensation device that must consider. In order to increase the reliability of thyristor series operation, this paper design a voltage and current access circuits to meet both TCR in the trigger angle to obtain energy, to power driving circuit, achieving high thyristor valve system self-powered. Establishment of each energy-obtaining circuit simulation model in PSPICE software, the simulation results show that the high energy-obtaining circuits can not only reduce switching losses and improve the efficiency of thyristor operation but also provide power to the drive circuit, which provide fundamental basis for stable power supply of thyristor driving circuit.

Keywords: thyristor valves; TCR; energy-obtaining circuit; drive circuit

0 引言

就目前晶闸管的制造工艺来看,虽然单只晶闸管耐压水平已经达到 9 000 V,但对于电力系统来说,其耐压水平仍显太低。为了满足以晶闸管为主回路核心器件的静止无功补偿装置^[1-3](SVC)高电压要求,在装置中晶闸管一般都是串联使用的,为了保证串联晶闸管安全运行,其外围还有复杂的外围电路,构成晶闸管高位电子板。由于处于高电压下,其电子板供电是个问题,对于取能电路供电研究成为串联晶闸管可靠运行的关键。

取能电路的概念源于晶闸管的高电压应用,在晶闸管控制电抗器(TCR)装置中,由光电混合触发系统控制晶闸

管阀的触发是目前较为成熟的技术^[4-6]。光脉冲信号送到后必须经过光电转换成电信号后再放大功率,最后再加到元件的门极上已触发晶闸管,为了解决处于高电位的晶闸管电子板供电问题,考虑从高电压的晶闸管两端取得能量,给高位电子板提供电源。目前取能电路主要有电压取能和电流取能两种取能方式,单独的电压取能或是电流取能又存在晶闸管控制角的局限性。为了提高晶闸管阀高位取能电路在各触发角下工作的可靠性。本文采用电压与电流组合取能方式,通过理论分析建立数学模型,设计各取能电路仿真模型,验证电压与电流取能电路优越性,提高晶闸管串联运行的可靠性。

1 晶闸管控制电抗器基本原理

TCR 的基本原理如图 1 所示。单相基本结构由两个反并联的晶闸管同一个电抗器串联,而三相基本结构就是 3 个单相结构三角形联结。当然在实际的高压应用中,基本都是采用多个反并联晶闸管串联使用的。

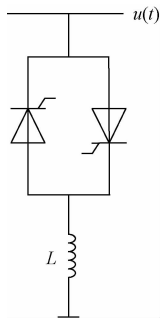


图 1 TCR 主电路结构

分析可知,TCR 触发脉冲延迟角 α 的控制范围为 $90^\circ \sim 180^\circ$ 。通过控制系统不断调节晶闸管触发延迟角 α ,来控制接入电网的等效电抗,从而控制 TCR 吸收的基波电流和无功功率大小。

随着电网电压等级的提高,高压 TCR 的应用也越来越广泛,高压 TCR 中采用许多晶闸管串联形成“开关阀”,这些开关阀一般由 10~20 个晶闸管串联而成,在高压动态无功补偿中,这些串联晶闸管的数量甚至会达到 100 多个。在高压下,为了给晶闸管触发电路供电,采用从晶闸管两端直接取能,经过 DC-DC 直流变换电路,去给触发系统供电,实现高压处,系统自供电。

2 串联晶闸管取能电路的研究

目前晶闸管阀采用的取能方式有电流取能和电压取能两种方式^[7-10]。电流取能是一种通过电流互感器获取晶闸管阀流过的电流,而电压取能直接获取晶闸管阀两端的电压。

2.1 电流取能电路

图 2 为电流取能电路。 I_T 为流过晶闸管阀的电流; T_1 、 T_2 为晶闸管; V 为整流桥;CT 为电流互感器; i_d 为流过电容器 C_1 的直流电流; C 和 L 组成 LC 滤波电路。

电流取能电路的工作过程:晶闸管 T 被触发,电流 I_T 流过晶闸管,电流互感器 CT 的二次侧感应出电流,经过整流桥 V 的整流变为直流电流 i_d ,电流 i_d 流过 D_1 向 C_1 充电,当 C_1 两端的电压达到稳压管 D_z 的稳压值 V_c 是, D_z 反向导通,又因为 D_1 的反向阻断作用使 C_1 两端的电压 U_0 保持平稳。

2.2 电压取能电路

图 3 为电压取能电路。 T_1 和 T_2 为晶闸管; R_1 、 C_1 为动态均压电阻、电容,构成晶闸管的吸收回路;虚线框内为

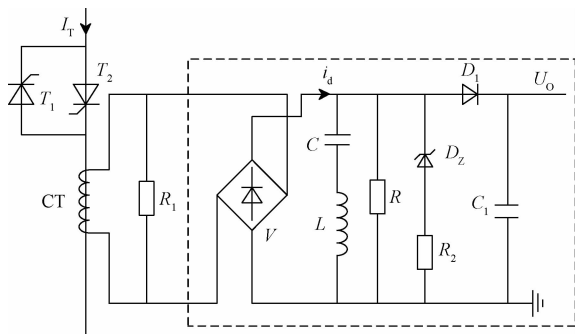


图 2 电流取能电路

取能电路。

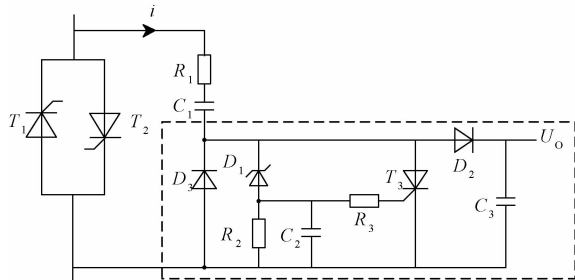


图 3 电压取能电路

电压取能的工作过程:当晶闸管 T_2 处于正向阻断状态时,通过 R_1 、 C_1 、 D_2 向电容 C_3 充电;当 D_3 两端的电压大于稳压二极管 D_1 的限幅值时,将给电容 C_2 充电, T_3 的门极承受正向电压,此时晶闸管 T_3 导通,电流 i 将从 R_1 、 C_1 、 T_3 流过,从而保证 C_3 两端的电压维持在 D_1 的限幅值;当晶闸管 T_2 被触发后, C_1 存储的能量将从 R_1 、 T_2 、 D_3 的回路释放;当晶闸管 T_1 处于正向阻断状态时,电流 i 为负,将从 R_1 、 C_1 、 D_3 流过;当晶闸管 T_1 被触发后, C_1 存储的能量通过 D_2 、 C_3 、 T_1 、 R_1 形成回路又可以给 C_3 充电,供电路持续工作需要;同理,当 D_3 两端的电压大于 D_1 的限幅值后, C_1 存储的能量通过 T_3 、 T_1 、 R_1 释放。

电压取能方式的数学模型:设阀端电压为 u ,吸收回路电流为 i ,当 $U_{C3} < U_{D1}$ 时,吸收回路的等效原理图如图 4 所示。

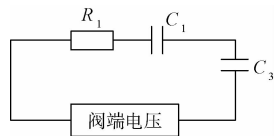


图 4 $U_{C3} < U_{D1}$ 的吸收回路原理

此时,

$$u = Ri + U_{c1} + U_{c3} ;$$

$$U_{c1} = \frac{1}{j\omega C_1} i$$

$$U_{C3} = \frac{1}{j\omega C_3} i$$

当 $U_{C3} \geq U_{D1}$ 时,由于 C_3 被旁路,则吸收回路的等效原理图如图 5 所示。

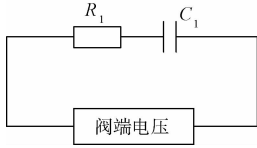


图 5 $U_{C3} \geq U_{D1}$ 的吸收回路原理

此时,

$$u = R_i + U_{C1}$$

$$U_{C1} = \frac{1}{j\omega C_1} i$$

2.3 电压与电流组合取能电路

实际应用中,当晶闸管触发角越接近 90° 时,那么导通角越大,此时充到储能电容上的能量很小,如果晶闸管一直工作在导通状态,那么晶闸管两端的压降电压只有 2 V 左右,储能电容上储存的能量就会很低,无法满足电路电源要求。为了满足晶闸管触发角在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间都能成功取到所需电能,可以采用改进的电压和电流组合取能电路,如图 6 所示。

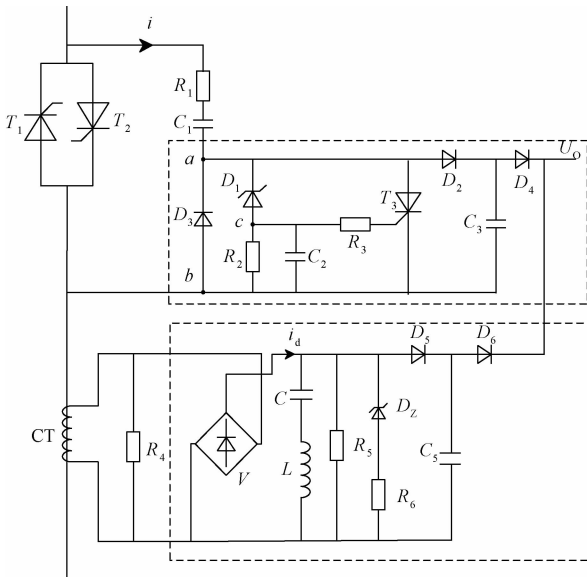


图 6 电压与电流组合取能电路

与一般的电压取能电路相比,当晶闸管处于截止状态时,由电压取能方式取得电能供给触发电路。当晶闸管处于导通之后,由于晶闸管上的压降很低,不能再采用电压取能,而是由电流互感器感应电流来取得电能,这就组成了电压与电流组合取能。而且同时采用电压和电流取能电路,可以使晶闸管无论处于导通,还是关断时都能有效的取出电能,供触发电路供电。但对于同时采用电压方式和电流

取能方式存在电压取能电路和电流取能电路相互干扰问题。为了解决上述问题,采用电压取能电路和电流取能电路并联的方式,在输出端分别接上二极管 D_1 和 D_6 ,能够有效阻断了电压取能电路和电流取能电路间的干扰,使两种取能回路协调工作,实现晶闸管阀高位系统自供电。

3 仿真与分析

3.1 仿真模型

在 PSPICE 中构建了 3 个串联晶闸管均压取能电路的仿真模型。仿真参数设置为:交流电源电压幅值为 2 400 V,阻感负载电阻为 100 Ω ,电感 50 mH,固定电容 200 μ F,控制电抗器电感 250 mH,主电路构建的是 TCR+FC 型静止无功补偿装置模型。每只晶闸管承受幅值为 800 V 电压,仿真所用型号为 MCR218-10,仿真软件里使用的模型均为 PSPICE 元件库自带的专用模型。分别搭建电流取能、电压取能、电压与电流组合取能仿真模型,通过改变晶闸管触发脉冲延迟来控制晶闸管触发角 α 在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 变化,对比分析仿真结果。

3.2 功率损耗分析

多个晶闸管串联起来使用不仅能够满足高压等级的要求,而且对于每个晶闸管而言,其开关损耗是导致晶闸管发热的主要原因,采用取能电路能够利用这部分损耗,从而降低开关损耗,提高产品效益。晶闸管的串联取能电路中损耗主要有静态损耗和动态损耗,静态损耗包括晶闸管的通态损耗 P_{con} 和截止损耗;动态损耗包括晶闸管的开通损耗 $P_{turn-on}$ 和关断损耗。其中,晶闸管的截止损耗和关断损耗可以忽略不计,其总损耗 P_{loss} 可表示为:

$$P_{loss} = P_{con} + P_{turn-on}$$

$$P_{con} = u_{AK}(on) \cdot i_{AK}(on) \cdot T_{on}$$

$$P_{turn-on} = f \int_0^{t_{gt}} u_{AK} \cdot i_{AK} dt$$

式中: f 为开关频率; T_{on} 为导通时间; t_{gt} 为开通时间; $u_{AK}(on)$ 、 $i_{AK}(on)$ 为晶闸管饱和导通电压和电流。

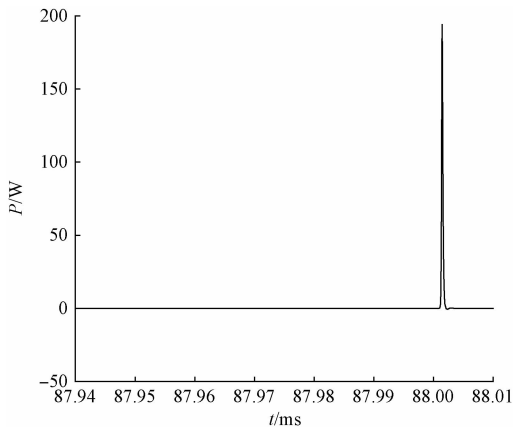
对于高压 TCR 晶闸管的功率损耗,主要来自开通损耗,图 7 分别给出无取能电路和有取能电路中,单个晶闸管开通损耗功率波形。

根据上述功率损耗分析可计算出一个周期内的功率损耗,如表 1 所示。

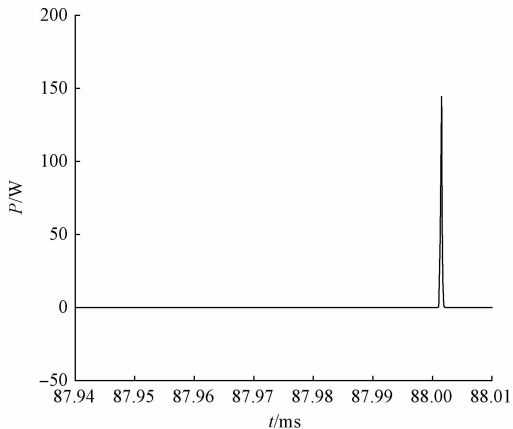
表 1 单个周期内的功率损耗 (mJ)

功率损耗	$P_{turn-on}$	P_{con}	P_{loss}
无取能电路	5.618	1.475	7.093
有取能电路	2.250	1.425	3.675

分析上述数据,可以看出晶闸管的功率损耗,主要来自于开通损耗,尽管单个周期内晶闸管功率损耗减少有限,但在高压 TCR 设备中,是几十个晶闸管串联长时间运行,损



(a) 无取能电路



(b) 有取能电路

图 7 晶闸管开通损耗波形

耗十分严重,如果能够有效的利用这部分损耗能,来为驱动设备供电,能够有效降低晶闸管散热装置的成本,提高设备效率。

3.3 仿真结果分析

将 PSPICE 的仿真结果以数据方式导入 MATLAB 中,最终得到以下图形。

图 8 给出了电流取能电路下,各触发角对应的输出电压波形。

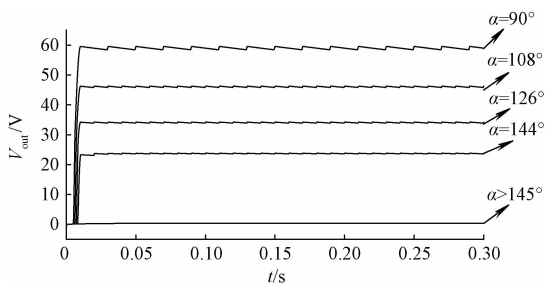


图 8 不同的触发角 α 对应的输出电压

分析波形可以看出,当触发角增大到 145° 时,输出电压几乎为 0,取能失败。只采用电流取能无法满足 TCR 控制

角在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 控制。

图 9 给出了晶闸管触发角 α 在 90° 和 144° 时,输出电压波形,实验调试测得当触发角接近 90° 时,电抗器中流过的电流就相当于不存在任何开关时的永久性稳定电流,晶闸管处于全通状态,此时电压取能失败。图 10 是电压电流取能下,输出电压波形。

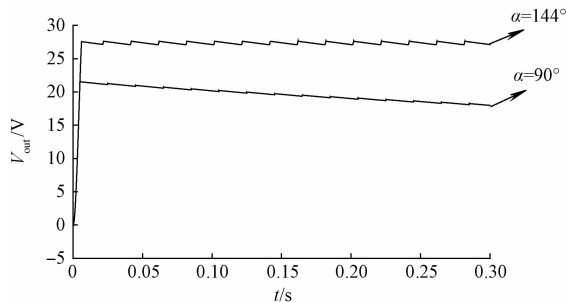
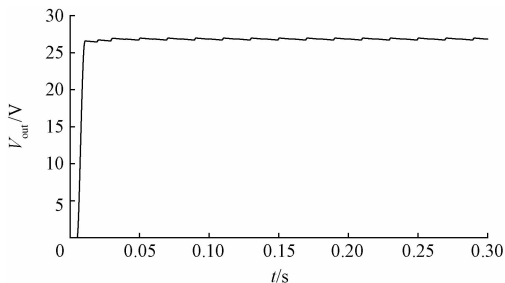
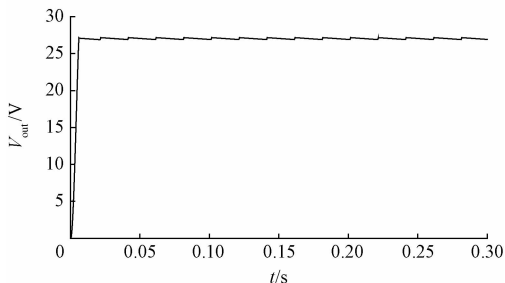


图 9 电压取能下输出电压波形



(a) 触发角 $\alpha=90^\circ$



(b) 触发角 $\alpha=180^\circ$

图 10 电压电流取能下输出电压波形

由图 10 可知,电压与电流组合取能方式下,触发角 α 在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 都能取能成功,输出电压稳定,能够很好的满足高压 TCR 控制系统在各触发角下都能有效取出能量,实现高压侧驱动电路自供电。

4 结 论

在高压动态无功补偿装置中,实现晶闸管触发电路自供电,降低晶闸管损耗,引入高位取能电路。本文采用电压与电流组合取能电路,通过 PSPICE 电路仿真,验证了 TCR 晶闸管触发角在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 变化时成功取得电能。结果表明,电压与电流组合取能电路较单独的电流取能,或是电压取能效果

更好,同时降低了晶闸管的开关损耗,提高产品效益。为高压动态无功补偿装置相关技术研究提供了理论参考。

参考文献

- [1] 程汉湘,无功补偿理论及其应用[M].北京:机械工业出版社,2016:146-156.
- [2] 张柯,李金元,赵波,等.功率模块高电位取能方式研究[J].高压电器,2010,46(9):30-33.
- [3] 王兆安,杨君,刘进军,等.谐波抑制和无功功率补偿[M].3版.北京:机械工业出版社,2015:126-146.
- [4] 刘飞,卢志良,刘燕,等.用于TCR的晶闸管光电触发与监测系统[J].高电压技术,2007,33(6):123-128.
- [5] 李宏.SVC阀基电子及晶闸管高电位控制系统的研究[D].北京:华北电力大学,2012:24-27.
- [6] 杨磊,张正宏,徐振.高压无功补偿装置用驱动电路的取能原理分析[J].变流技术与电力牵引,2014,10(2):60-64.
- [7] LIU K, WANG L, FAN AI L. Design of pulse generator and drive circuit for high-voltage repetition-frequency thyristor series switch [C]. Industrial Electronics and Applications (ICIEA): IEEE, 2016: 2247-2250.
- [8] RAHMANI S, HAMADI A B, AL-HADDAD K. A

new combination of shunt hybrid power filter and thyristor controlled reactor for harmonics and reactive power compensation[C]. Electrical Power & Energy Conference (EPEC): IEEE, 2009.

- [9] XIONG L, FEI L, WANG R, et al. Thyristor photoelectric firing system applied in auto-passing neutral section system [C]. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), IEEE, 2012: 2157-4847.
- [10] 张松,李兰芳,赵刚,等.TCT式可控并联电抗器晶闸管取能方式分析[J].电力系统自动化,2016,40(8):98-102.
- [11] 艾永乐,王伟,王玉栋,等.基于SVG混合补偿的单晶炉功率因数提高[J].电子测量技术,2016,39(2):46-50.
- [12] 夏涛,吴云峰,王胜利,等.基于功率MOSFET的高压纳秒脉冲源研究[J].电子测量与仪器学报,2015,29(12):1852-1861.

作者简介

程宏博,在读研究生,主要从事电力电子与电力传动方向的研究。

E-mail:chenghongbo524@163.com

(上接第31页)

- [10] YUE W U, CHEN G, SHEN Y, et al. Long-term stabilization of the optical fiber phase control using dual PID[J]. Instrumentation, 2015(4): 40-46.
- [11] 郭全民,雷蓓蓓.半主动悬架PID控制的研究和优化[J].国外电子测量技术,2015(4):60-63.
- [12] 李先欣.基于DSP的PID算法温控设计及其在MAX-DOAS系统中的应用[D].合肥:中国科学院合肥物质科学研究院,2012:38-40.
- [13] 崔洋,彭吉,于森,等.负温度系数的工业热敏电阻温度传感器测量误差的不确定度评定[J].电子

测量技术,2014,37(8):104-106.

- [14] 吴扬.半导体温度控制仪的研制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006:15-16.
- [15] 胡杨,张亚军,于锦泉.用于半导体激光器的温控电路设计[J].红外与激光工程,2010,39(5):839-842.

作者简介

贺春贵,1991年出生,硕士研究生,主要研究方向为环境光学污染气体检测研究及电路设计。

E-mail:cghe@aiofm.ac.cn

(上接第36页)

- [15] AMALAITANO D, FASOLINO A R, TRAMONTANA P. A GUI crawling-based technique for android mobile application testing[C]. IEEE Fourth International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops. IEEE, 2011:252-261.

机科学、计算机软件等。

E-mail:1143950228@qq.com

肖悦娱,博士,助理研究员,主要研究方向为特种光纤和光纤传感器等。

E-mail:yyx@staff.shu.edu.cn

作者简介

徐怀宝,硕士研究生,主要研究方向为信息科学、计算