

DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2017.4.138

中图分类号:TM732

文献标志码:A

基于 10 kV 高压自取能光电触发 TSC 装置的 延时触发角谐波分析

关寒星, 曾 光

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安 710049)

摘要: 高压晶闸管投切电容器(TSC)无功补偿装置作为传统高压无功补偿装置在高压领域应用较为广泛, 但因其晶闸管全导通时阀组端电压为 0, 无法从阻尼回路中取能用于晶闸管触发, 故自取能光电触发电路一直是研究攻关的难点。为解决这一难题, 自主研制了一套基于自取能光电触发 10 kV 高压 TSC 装置, 通过延迟一定的触发角度实现晶闸管触发电路的自取能。但 TSC 与 TCR 不同, 当存在延迟角时必然会因为 du/dt 的影响引起冲击电流, 造成触发脉冲的紊乱。因此, 为了抑制冲击电流, 在实际使用中必须配置电抗器。通过理论和仿真分析了 TSC 触发脉冲延迟角及电抗器与谐波含量的关系。

关键词: 自取能; 晶闸管投切电容器; 触发角延迟; 谐波

Harmonic Analysis of Firing Angle Delay Based on Self-power Supply Optical Trigger 10 kV High-voltage TSC Device

GUAN Hanxing, ZENG Guang

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710049, China)

Abstract: Taking high-voltage thyristor switched capacitor(TSC) reactive power compensation device as a conventional high-voltage reactive power compensation device is widely used in high-voltage areas. but because the thyristor is turned on completely, valve terminal voltage is zero, which can not be taken from the damping circuit and be used to trigger thyristors, so self-power supply optoelectronics trigger circuit has been a hot research to overcome the difficulties. In order to solve this problem, our research group independently developed a set device based on self-power supply photoelectric trigger 10 kV high-voltage TSC to achieve self-power supplying of the thyristor trigger circuit through delaying a certain angle. But TSC is different from TCR when there is bound to cause a surge current due to the impact of the firing angle delay according to du/dt , causing the trigger pulse disorder. Therefore, in order to reduce surge current, it must be configured reactor in actual use. This paper analyzes the relationship between TSC trigger pulse delay angle and reactor and the harmonic content through the theoretical and simulation.

Keywords: self-power supply; thyristor switched capacitor; firing angle delay; harmonics

随着电力电子技术的发展, 各种新型的快速补偿无功装置相继应用到电力系统中。晶闸管投切电容器 TSC (thyristor switched capacitor) 就是一种广泛应用于配电系统的动态无功补偿装置。TSC 具有优良的动态无功功率补偿性能, 它能快速跟踪冲击

负荷的突变, 随时稳定电网最佳功率因数, 实现动态无功补偿、减小电压波动, 提高电能质量, 节约电能^[1]。而晶闸管作为电力系统中的开关器件有着无可比拟的优点, 如: 开关无触点, 操作寿命几乎是无限的; 通断时刻可精确控制, 可快速无冲击地将电容器接入电网, 大大减少了投切时的冲击电流和操作困难且动态响应时间短^[2,3]。

20 世纪 70 年代以来, 由于电力电子技术的高速发展, 各种电力电子装置在电力系统、工业、交通

收稿日期: 2015-12-08

基金项目: 陕西省重点学科建设专项基金资助项目(105-5X1201)

Project Supported by Key Discipline Special Foundation of Shaanxi Province(105-5X1201)

及家庭中的应用日益广泛,谐波所造成的危害也日趋严重。世界各国都对谐波问题予以充分关注,不少国家和国际学术组织都制定了限制电力系统谐波和用电设备谐波的标准和规定。因此对本装置中因电力电子器件的存在而引起的谐波问题的分析是必要的^[4]。

1 TSC 的基本原理

晶闸管投切电容器 TSC 为一种并联型晶闸管投切电容器装置,其单相基本结构如图 1 所示,主要由并联的一对晶闸管 T_1 、 T_2 与电容器相串联组成。并联晶闸管 T_1 、 T_2 就像一个双向开关, T_1 在供电电压的正半波导通, T_2 在供电电压的负半波导通;控制电容器起到将其从电网投入和切除的作用^[5-7]。

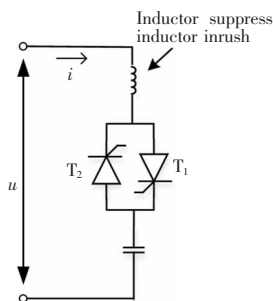


图 1 单相 TSC 结构

Fig.1 Structure of single-phase TSC

在电容器两端无残压的前提下,TSC 触发角 α 的可控范围是 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。当 α 为 0° 时,晶闸管全导通,此时 TSC 中投切电容器两端电压完全跟随电网电压,阀组两端电压为 0。传统设计中,选取投切时刻的总原则是:TSC 投入电容的时刻也就是晶闸管开通的时刻,必须是电源电压与电容器预先充电电压相等的时刻,即晶闸管端电压的过零点,以确保电容器投切过程中无过电压、无涌流的产生。但全导通时,阀组端电压为 0,无法从阻尼回路中取能用于晶闸管触发,故自取能光电触发电路并不适用^[8-10]。

为解决此难题,自主研发了一套基于自取能光电触发 10 kV 高压 TSC 装置,通过延迟一定的触发角实现晶闸管触发电路的自取能,其缺点是引入了附加的谐波含量。通过对引入谐波含量的仿真分

析,为工程实践应用提供一定的理论基础。

2 电流分析

2.1 单相电流分析

假设回路中已配置合适的电抗器使电流达到如图 2 所示的理想状态,则 TSC 电流有效值是触发角 α 的函数,其可控范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

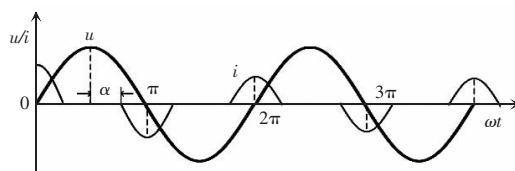


图 2 单相 TSC 回路的电压和电流波形

Fig.2 Waveforms of voltage and current in single-phase TSC circuit

i_c 为偶函数且具有半波对称性,进行傅里叶分解后 TSC 电流仅有余弦项且不存在偶次谐波,基波电流及各次谐波电流的有效值表达式推导如下。

假设均压后晶闸管接入的电源电压为正弦信号,即

$$u = \sqrt{2} U \sin(\omega t) \tag{1}$$

由图(1)可得

$$u_s = u_1 + u_c \tag{2}$$

根据电路储能元件的电压电流基本关系,进行二次求导后可得关于电流 $i_c(\omega t)$ 的动态电路二阶微分方程,即

$$\frac{d^2 i_c(\omega t)}{d(\omega t)^2} + \frac{1}{LC} i_c(\omega t) = \frac{\sqrt{2} U}{L} \cos(\omega t) \tag{3}$$

解此二阶符号系数非齐次线性微分方程,便可得到电容电流的基本表达式。由数学基础,二阶符号系数非奇次线性微分方程的通解由其对应的齐次方程的通解和非齐次方程的一个特解组合而成。

所给方程的特征方程为

$$r^2 + \sqrt{\frac{1}{LC}} = 0 \tag{4}$$

其根是一对共轭复根,因此所求微分方程的通解为

$$y = C_1 \cos \sqrt{\frac{x}{LC}} + C_2 \sin \sqrt{\frac{x}{LC}} \tag{5}$$

方程的初始条件由电路储能元件的初始值决

定,设初始条件为

$$y|_{x=\alpha} = i_C|_{\omega t=\alpha} = 0, y'|_{x=\alpha} = \frac{u_L(\alpha)}{L} \quad (6)$$

根据波形分析,晶闸管开通时刻有

$$u_L(\alpha) = \sqrt{2} U \left[1 - \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \right] \quad (7)$$

将式(6)代入式(5),可得方程组

$$\begin{cases} C_1 \cos\sqrt{\frac{\alpha}{LC}} + C_2 \sin\sqrt{\frac{\alpha}{LC}} = 0 \\ \sqrt{\frac{1}{LC}} \left(C_2 \cos\sqrt{\frac{\alpha}{LC}} - C_1 \sin\sqrt{\frac{\alpha}{LC}} \right) = E \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$E = \frac{\sqrt{2} U}{L} \left[1 - \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \right] \quad (9)$$

$$C_1 = -\sqrt{\frac{2C}{L}} U \sin\sqrt{\frac{\alpha}{LC}} \left[1 - \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \right]$$

$$C_2 = \sqrt{\frac{2C}{L}} U \sin\sqrt{\frac{\alpha}{LC}} \left[1 - \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \right] \quad (10)$$

对于非奇次方程部分,则有

$$y'' + \frac{1}{LC} y = \frac{\sqrt{2} U}{L} \cos(\omega t) \quad (11)$$

设其特解为 $y^* = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t)$,对 t 求导得

$$y^{*'} = -a \omega \sin(\omega t) + b \omega \cos(\omega t)$$

$$y^{*''} = -a \omega^2 \cos(\omega t) - b \omega^2 \sin(\omega t) \quad (12)$$

代入方程(11),解得: $a = \frac{\sqrt{2} UC}{1-LC}$, $b = 0$ 。

综上所述,可得到 LC 与晶闸管串联回路的电流方程表达式为

$$i_C(\omega t) = \frac{\sqrt{2} UC}{1-\omega^2 LC} \cos(\omega t) \quad (13)$$

对投切电容器的电流波形进行傅里叶分解得

$$i_{in} = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (14)$$

其中:

$$b_n = 0$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_C(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) =$$

$$\frac{4}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2} + \alpha}^{2\pi} \frac{\sqrt{2} UC}{1-\omega^2 LC} \cos(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t)$$

(15)

电流的等效基波有效值为

$$I_1 = \frac{a_1}{\sqrt{2}} = \frac{4\sqrt{2} UC}{\pi(1-\omega^2 LC)} \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{4} \sin(2\alpha) \right] \quad (16)$$

各次谐波的电流有效值为

$$a_n = \sqrt{2} I_n$$

$$I_n = \frac{a_n}{\sqrt{2}} = -\frac{4\sqrt{2} UC}{\pi(1-\omega^2 LC)} (D_1 + D_2) \quad (17)$$

其中:

$$D_1 = \frac{\sin\left[(n+1)\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)\right]}{2(n+1)};$$

$$D_2 = \frac{\sin\left[(n-1)\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)\right]}{2(n-1)}。$$

式中: I_1 为基波电流有效值; U 为系统电压有效值; α 为触发角; I_n 为谐波电流; n 为谐波次数, $n=2k+1$, $k=1, 2, \dots$ 。

2.2 三相电流分析

从三相电流角度分析,若六脉冲 TSC 三相系统是对称的,且所有晶闸管对称触发,即每相对称晶闸管触发角相差 120° ,每一相中的一对反并联晶闸管触发角相差 180° ,那么在正、负半波中就会出现对称的电流脉冲,因而只产生奇次谐波。在负载端,3次谐波只在负载内流动,故电力系统中并不会引入3次谐波。

3 Matlab 仿真分析

3.1 仿真参数选取

装置平台基于 10 kV 高压,故 23 个晶闸管串联以满足电压和容量的要求,单管承压为 350 V。仿真时取三相电压源频率为工频 $f=50$ Hz,电源电压有效值 $U=350$ V,投切电容器电容 $C=38 \mu\text{F}$ 。根据项目要求,以星型负载为例分析。

3.2 触发角和电流谐波含量的关系

图 3 为 TSC 电流各次谐波含量与触发延时角的关系曲线。当触发角 $\alpha \neq 0^\circ$ 时,使用一定容量的电抗器后,理想情况下,通过傅里叶分析可以得到电

流各次谐波分量的幅值与 α 的关系, 如式(17)所示。根据工程实践,一般选电抗为投切电容器容抗的 6%~12%, 仿真中选 6%。由图 3 可知,TSC 的各次谐波含量 I_n/I^* 随着触发延迟角 α 的变化而变化。

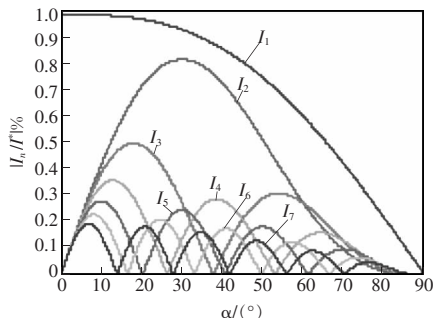


图 3 TSC 电流各次谐波含量与触发延时角关系
Fig.3 Relationship between each harmonic content of TSC current and trigger delay angle

图中, I_1 为基波电流幅值, I^* 为电流的基准值, 取为

$$I^* = \frac{4\sqrt{2} UC}{\pi} \quad (18)$$

为了将谐波成分与基波成分关系表达更清楚, 在图中将基波电流的含量百分数除以 2, 即缩小一半来表示。由图 3 可得到各次谐波为零点时对应的触发延时角。在实际工况中, 可以根据需要, 在保证晶闸管取能的基础上避免特定次谐波。表 1 为 TSC 电流中最主要次谐波的含量及其最大值时对应的触发延时角。当 L 取不同值时, 结论相似。

表 1 TSC 谐波电流最大值及其对应触发延时角

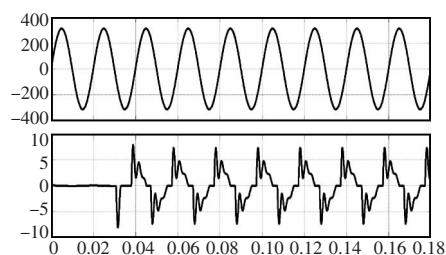
Tab.1 Maxmum of harmonic current and its corresponding trigger delay angle

谐波次数 n	谐波幅值 $I_n/I^*/\%$	$\alpha /(^{\circ})$
1	1.963 5	1
3	0.811 9	30.01
5	0.495 3	18.01
7	0.355 4	12.87
9	0.277 0	10.01
11	0.226 7	8.19
13	0.192 0	6.93
15	0.166 5	6.01
17	0.146 4	5.30

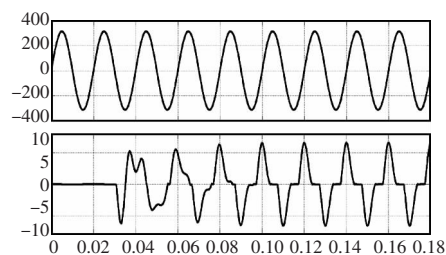
3.3 电感和电流谐波含量的关系

TSC 在触发角不为 0 时会引入大量谐波, 因冲击电流的存在, 电流波形严重畸变。此时傅里叶电流分析适用的前提仍然是, 必须要配置一定容量的电抗器。

图 4 为电网电压和 TSC 电流波形。选定相同 α 时, 不同的 L 取值, 电流波形差异很大, 由此分析抑流电感 L 、触发角 α 和 TSC 电流各次谐波含量的关系。



(a)电抗器参数匹配前的电流



(b)电抗器参数匹配后的电流

图 4 单相 TSC 回路电流波形

Fig.4 Current waveforms of single phase TSC

3.4 触发角、抑流电感和电流谐波含量的关系

由式(17)知,TSC 电流中的各次谐波含量是谐波次数 n 、抑流电感 L 和触发角 α 共同作用的结果。图 5 为 α 角、抑流电感的感抗和容抗之比(简称感抗系数) k' 和电流谐波含量 I_n/I^* 的三维曲面。

由图 5 可见, 当固定触发角 α 时, 对于不同谐波次数的谐波电流, 随着感抗系数 k' 的增加, 各次谐波电流含量普遍有增大的趋势, 且基本呈现线性增大; 当固定感抗系数 k' 时, 各次谐波电流含量与 α 的关系见图 3, k' 一般为 6%~12%, 且感抗系数 k' 增加时, 各次谐波电流含量随触发角 α 的增大呈增大趋势, 但各次谐波电流最大值时所对应的触发角是一定的, 如表 2 所示, 与上文分析相符。

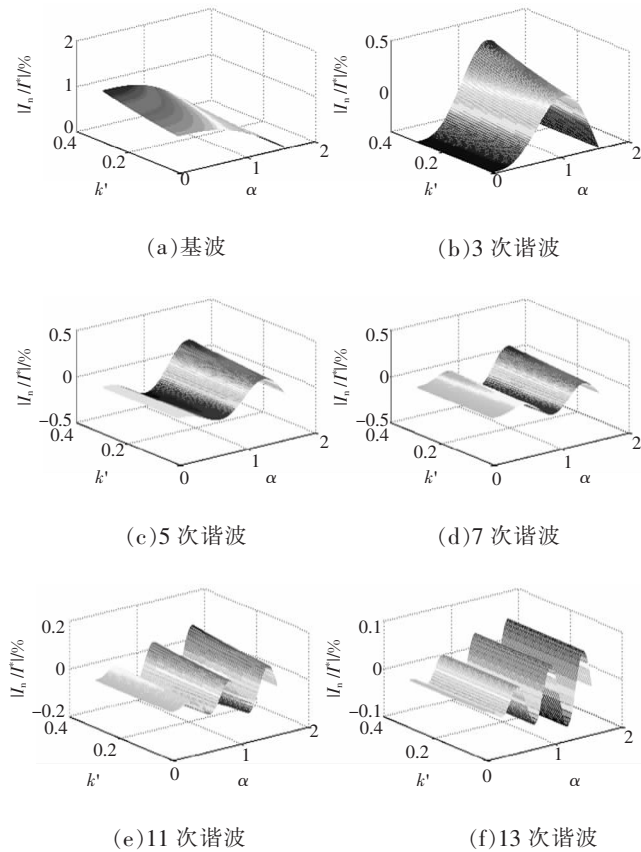


图 5 触发角、抑流电感和电流谐波含量的三维曲面
Fig.5 Oscillograph waveforms of input and output

表 2 TSC 谐波电流最大值的触发延时角

Tab.2 Trigger delay angle of TSC harmonic current maximum

n	3	5	7	9	11	13	15	17
$\alpha / (^\circ)$	30.01	18.01	12.87	10.01	8.19	6.93	6.01	5.30

4 结语

在电力系统中,谐波影响越来越严重。由于谐波分量,很可能使系统达到谐振条件,放大谐振电流。因此有必要对触发角延时型 TSC 中的谐波分量进行分析。本文介绍了 TSC 的基本原理及该自取能光电触发 10 kV 高压 TSC 装置的谐波产生原因,在 Matlab 中的 Simulink 仿真环境下建立了模型与仿真,并给出触发角 α 、抑流电感和电流谐波含量的三维曲面图,仿真结果与理论推理计算相吻合。为自取能光电触发 TSC 的工程应用提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 陶昆, 陈乔夫, 周理兵, 等. 基于磁控开关的高压无功补偿新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(30):136-144.
Tao Kun, Chen Qianfu, Zhou Libing, et al. A novel high-voltage reactive power compensation method based on magnetic-controlled switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(30): 136-144(in Chinese).
- [2] 梁秀霞, 高连强, 张凌华. TSC 低压动态无功补偿脉冲触发装置[J]. 低压电器, 2007, 23:50-52.
Liang Xiuxia, Gao Lianqiang, Zhang Linghua. TSC low voltage dynamic reactive power compensation pulse trigger device[J]. Low Voltage Apparatus, 2007, 23:50-52(in Chinese).
- [3] 张维, 肖国春, 胡磊磊, 等. 二控三型 TSC 快速重复投切晶闸管闭锁问题研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 109-116.
Zhang Wei, Xiao Guochun, Hu Leilei, et al. Thyristors latch-up phenomenon in a TSC with capacitor banks switched repeatedly[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12):109-116(in Chinese).
- [4] 高建强, 汪原浩. 基于晶闸管控制电抗器谐波分析的仿真研究[J]. 能源技术与管理, 2014, 39(5):182-184.
- [5] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
- [6] 韩前前, 戴珂, 陈新文, 等. 单相 Buck 型动态电容器无功补偿控制策略研究[J]. 电源学报, 2017, 15(1):23-30.
Han Qianqian, Dai Ke, Chen Xinwen, et al. Research on reactive power compensation control strategy for single-phase buck-type dynamic capacitor[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(1):23-30(in Chinese).
- [7] 吴艳娟. 采用 APF 和 SVC 改善微网电能质量[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1):147-150.
Wu Yanjuan. Combined system of APF and SVC for power quality improvement in microgrid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(1):147-150(in Chinese).
- [8] 王莉, 申宁, 庞延庆. 串联晶闸管阀组触发电路设计[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2011, 14(6):16-18, 30.
Wang Li, Shen Ning, Pang Yanqing. Design of the trigger circuit used in the series SCRs valve[J]. Journal of Shandong Electric Power College, 2011, 14(6):16-18, 30(in Chinese).

(下转第 149 页)

统的四线圈模型研究[J]. 电源学报, 2015, 13(1):101-106.

Wang Guodong, Yuan Lulu, Wang Yunjian. Research on the four coil model of magnetically-coupled resonant wireless power transmission systems[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(1): 101-106(in Chinese).

[11]王振亚, 王学梅, 张波, 等. 电动汽车无线充电技术的研究进展[J], 电源学报, 2014, 12(3): 27-32.

Wang Zhenya, Wang Xuemei, Zhang Bo, et al. Advances of wireless charging technology in electric vehicle[J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(3): 27-32(in Chinese).

[12]Ma Long, Liang Guishu, Dong Huaying. Sensitivity analysis of the networks with fractional order reactance[J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(3):6-10.

[13]Soltan A, Radwan A G, Soliman A M. Fractional-order mutual inductance: analysis and design[J]. Int. J. Circ. Theor. Appl.,

2016, 44(1):85-97.



刘潇

作者简介:

刘潇(1990-),男,硕士研究生,研究方向:电力电子系统分析与控制,E-mail: rayshawn1220@163.com。

张波(1962-),男,通信作者,教授,博士生导师,研究方向:电力电子与电力传动,E-mail:epbzhang@scut.edu.cn。

谢帆(1985-),男,博士,研究方向:电力电子与电力传动,E-mail:epfxie@scut.edu.cn。

丘东元(1972-),女,博士,教授,研究方向:电力电子与电力传动,E-mail:epdyqiu@scut.edu.cn。

(上接第 142 页)

nese).

[9] 宁志毫, 罗隆福, 张杰, 等. 一种用于中高压静止无功补偿的晶闸管光纤触发改进电路及其设计[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6):31-35.

Ning Zhihao, Luo Longfu, Zhang Jie, et al. Design of optical fiber trigger system for thyristor in medium-high voltage static reactive power compensation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6):31-35(in Chinese).

[10]Olivier G, Mougharbel I, Dobson-Mack G. Minimal transient switching of capacitors[J]. IEEE Transactions on Power De-

livery, 1993, 8(4): 1988-1994.



关寒星

作者简介:

关寒星(1991-),女,通信作者,硕士,研究方向:电力电子及电力传动,E-mail: hephew@outlook.com。

曾光(1957-),男,博士,教授,研究方向:电力电子技术及应用与计算机控制系统,E-mail:g-zeng@mail.xaut.edu.cn。