

包含电抗器支路电阻的可控串补 (TCSC) 特性分析

邹振宇¹, 马洪涛², 赵建国¹, 程时杰²

(1. 山东大学, 山东 济南 250061; 2. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对电力系统动态模拟实验用的可控串联补偿 (TCSC) 实验样机在实验过程中发现的电抗器支路电流波形与传统分析方法所得到的波形不一致的问题进行研究, 发现波形的不一致是由于电抗器支路所具有的电感支路电阻所引起的。论文采用拓扑建模法, 建立了包含电抗器支路电阻的 TCSC 数学模型, 并推导出 TCSC 中电容支路两端的电压和电感支路中电流的时域计算公式。论文并结合数字仿真波形和动模样机实验结果, 研究了电抗器支路电阻对 TCSC 稳态工作特性的影响。

关键词: 可控串补; 稳态阻抗特性; 数学模型

中图分类号: TM74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)04-0021-03

1 引言

可控串联补偿电容 (TCSC) 作为灵活交流输电系统 (FACTS) 家族的一员在改善电力系统性能方面而具有很多优点, 将 TCSC 用于电力系统能够控制电力系统的潮流、改善系统的稳定性、提高功率传输极限。正因为如此, 近年来 TCSC 越来越引起电力工业界的研究人员和工程技术人员的关注, 其研究得到了迅猛的发展^[1]。

TCSC 的稳态阻抗特性是 TCSC 的一个基本特性, 也是一个最重要的特性, 已有不少文献报道了 TCSC 的稳态阻抗特性, 然而这些结果几乎都是在理想情况, 即忽略了晶闸管控制电抗器支路所包含的电阻 (r) 的情况下得到的。在实现电力系统动模实验用的 TCSC 样机的过程中, 我们发现 TCSC 电抗器支路中的电流波形与文献中报道的电抗器支路中的电流波形不同, 它们并不以电容电压由负向正过零点轴对称, 波形有明显的前倾特征。对此我们进行了研究, 研究结果表明, 电抗器支路中电流波形的畸变是由于电抗器支路中所存在的电阻所引起的。严格的数学推导表明该电阻对 TCSC 装置的阻抗特性有很大影响, 不可以忽略。

TCSC 样机的动模实验表明, 在晶闸管控制的电抗器支路电阻过大时, 在触发角恒定的情况下, 导通角的角度将随电抗器支路电阻的变化而变化, 从而无法按要求实现 TCSC 的阻抗调节功能。尽管目前已有许多国内外专家学者对 TCSC 的稳态阻抗特性进行了大量的研究, 但却未见到文献就这一现象做出相应的报道和研究^[2-4]。

建立 TCSC 元件的精确数学模型是 TCSC 研究

领域的重要课题, 建立模型的方法目前主要包括拓扑建模法与输出建模法^[5]。本文通过分析 TCSC 在不同状态的拓扑结构, 采用拓扑建模法建立了包含晶闸管控制电抗器支路电阻的 TCSC 稳态模型, 推导出有关电流和电压等物理量的数学表达式, 并用所建立的模型和 TCSC 的实验样机对上述现象进行了分析和研究, 得出了一些具有参考价值的结论。

2 TCSC 的工作原理和样机的阻抗特性实验结果

TCSC 结构简图如图 1 所示, TCSC 主要由四个元器件组成: 电力电容器 C 、旁路电感 L 和两个反相并联大功率晶闸管 SCR。实际装置中还包括保护用的金属氧化物压敏限压器 MOV, 旁路断路器等。通过对触发脉冲的控制, 改变晶闸管的触发角, 即可改变由其控制的电感支路中电流的大小, 因而可以连续改变总的等效电抗, 也即使线路的串补程度连续的变化。通常设计的运行范围使得晶闸管触发角在约 $145^\circ \sim 180^\circ$ 范围内时, 其等效电抗呈容性; 而触发角在约 $90^\circ \sim 140^\circ$ 范围时, 其等效电抗呈感性, 这段特性使其在系统故障时具有限制短路电流的作用。

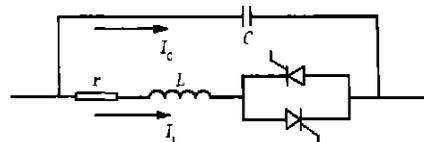


图 1 TCSC 单相结构框图

Fig. 1 The principle diagram of TCSC

在图 2 所示理想状态下, α 为触发角, β 为触发超前角, γ 为导通角, 且 $\alpha + \beta = 180^\circ - \gamma$, 此时 $\gamma = 2\alpha$ 。图 3 为 TCSC 样机的动模实验所录波形, 可以看出此

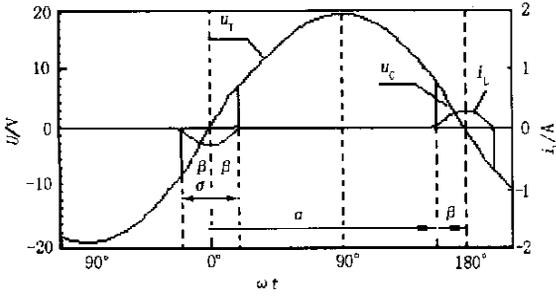


图2 理想状态下 TCSC 各量的波形图(容性)
Fig. 2 Ideal TCSC waveforms of all parameters

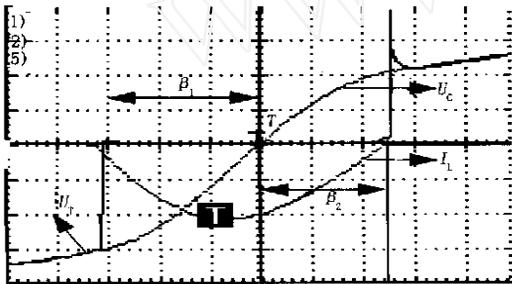


图3 包含电抗器支路电阻时 TCSC 各量的波形(容性)
Fig. 3 The waveforms of TCSC parameters with the resistance contained in the reactance branch

时导通角 $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ 。由于取电容电压为同步信号, $\alpha_1 = 180^\circ - \alpha$, 而由图中可以看出 $\alpha_2 < \alpha_1$, 此时分析 TCSC 稳态特性必须要考虑导通角的此种变化。

3 TCSC 的数学模型

对于稳态运行的电力系统, 遵循一个假设: 线路电流不含谐波分量。取电容电压 u_c 由负变正过零点作为时间零点, 则 $i = I_m \cos \omega t$, 不失一般性可设 $I_m = 1A$ 。

晶闸管导通状态下: 当 $-\alpha_1 = -\alpha < \omega t < \alpha_2$ 时, u_c 和 i_L 满足下列微分方程组

$$\begin{cases} C \frac{du_c}{dt} = \cos \omega t - i_L \\ L \frac{di_L}{dt} = u_c - r \cdot i_L \end{cases} \quad (1)$$

式中 u_c 为电容支路电压; i_L 为电感支路电流。相应的边界条件为:

$$\begin{cases} i_L(-\alpha) = 0 \\ u_c(0) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

解微分方程组(1)并计及边界条件(2), 可得到下式:

$$\begin{cases} u_c(t) = \frac{r}{A} \cos \omega t + \frac{Cr^2 - L + 3A^2}{A} \sin \omega t - C_1 \frac{b}{C} e^{a\omega t} - C_2 \frac{a}{C} e^{b\omega t} \\ i_L(t) = \frac{A_1}{A} \cos \omega t + \frac{rC}{A} \sin \omega t + C_1 e^{a\omega t} + C_2 e^{b\omega t} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\omega = 1/\sqrt{LC}$ 为自然振荡角频率; $k = \omega'$;

$$A_1 = 1 - \omega'^2 LC; A = \omega'^2 r^2 C^2 + 1 - 2\omega'^2 LC + 4L^2 C^2 \text{ 为积分常数};$$

$$a = -\frac{1}{2} (rC - \sqrt{r^2 C^2 - 4LC});$$

$$b = -\frac{1}{2} (rC + \sqrt{r^2 C^2 - 4LC});$$

$$C_1 = -\frac{A_1 a \cos \alpha - a r C \sin \alpha + r C e^{-b k \alpha}}{A (a e^{-a k \alpha} - b e^{-b k \alpha})};$$

$$C_2 = \frac{rC}{Aa} - \frac{C_1 b}{a};$$

式中 $A_1; A; a; b; C_1; C_2$ 都为积分常数。

晶闸管关断状态下: 当 $\alpha_2 < \omega t = 180^\circ - \alpha_1$ 时, u_c 和 i_L 满足下列等式

$$\begin{cases} u_c(t) = u_T(t) \\ i_L(t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

可以推知, 当 TCSC 运行于感性微调模式时, 上述推导公式仍然成立。

4 TCSC 导通特性分析及仿真

4.1 电抗器支路电阻对晶闸管导通的影响

图2可以看出, 理想情况下晶闸管(SCR)端电压 u_T 为奇函数, 此时 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$; 把 $r=0$ 代入(3)式得到晶闸管在导通和关断时刻的端电压:

$$u_T(-\alpha) = -u_T(\alpha) = u_c(\alpha) = \frac{L}{A_1} \left[\frac{-\omega \cos \alpha \sin(k\alpha)}{\cos(k\alpha)} - \sin \alpha \right] \quad (6)$$

此时晶闸管导通对称。然而在实际可控串补装置中, 受到晶闸管控制电抗器支路电阻的影响, 此时 u_T 不再是奇函数, α_1 不再等于 α_2 即公式(6)不再成立。 α_2 的值可以令式(3)中的电感支路电流公式 $i_L = 0$ 求得, 本文中采用数值解法求解 α_2 。表1和表2分别列出了不同补偿度下, 晶闸管导通和关断时刻的端电压值。

表 1 $\alpha = 150^\circ$ 晶闸管导通和关断时刻,晶闸管两端电压(V)

Tab. 1 $\alpha = 150^\circ$,the voltage across the SCR when SCR open or close

$u_T(t)$	$r(\%)$										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°	30°
2	30°	28.2°	27.0°	25.8°	24.6°	23.4°	22.2°	21.6°	20.4°	19.2°	18.6°
/ %	0	6	10	14	18	22	26	28	32	36	38
$u_T(-)$	47.3	43.4	40.4	37.8	35.8	34.0	32.5	31.2	30.1	29.1	28.3
$u_T(>)$	47.3	31.7	25.4	21.3	18.4	16.3	14.7	13.8	12.6	11.6	11.1

表 2 $\alpha = 170^\circ$ 晶闸管导通和关断时刻,晶闸管两端电压(V)

Tab. 2 $\alpha = 170^\circ$,the voltage across the SCR when SCR open or close

$u_T(t)$	$r(\%)$										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10°	10°	10°	10°	10°	10°	10°	10°	10°	10°	10°
2	10°	9.8°	9.6°	9.4°	9.2°	9.0°	8.8°	8.6°	8.4°	8.3°	8.2°
/ %	0	2	4	6	8	10	12	14	16	17	18
$u_T(-)$	5.91	5.89	5.87	5.85	5.83	5.82	5.80	5.78	5.77	5.75	5.74
$u_T(>)$	5.91	5.76	5.61	5.46	5.33	5.19	5.06	4.99	4.80	4.73	4.67

4.2 仿真验证

大量的数字仿真中验证,晶闸管控制的电抗器支路电阻的阻值对装置可控硅的导通效果确实有着很大的影响,该电阻的存在,将会导致晶闸管的不对称导通,从而无法按要求实现 TCSC 的阻抗调节功能,其影响在 TCSC 高补偿区更突出,这点从表 1 和表 2 的对比中也可以看出。图 4 为 MATLAB 仿真波形,仿真参数取电抗器支路电阻 $r = 10 \Omega$,触发角 150° ,可控串补工作在高补偿容性区。可以看出仿真结果与图 3 所录动模实验波形基本一致。

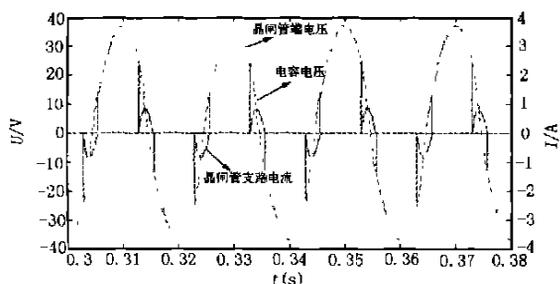


图 4 电容电压、晶闸管(SCR)端电压及电流波形

Fig. 4 The waveforms of capacitor voltage, SCR voltage and inductance current

5 结论

本文以电容电压正向过零点作为时间参考点,采用常用的拓扑建模法推导出 TCSC 电容支路两端的电压和电感支路中电流的时域计算公式。可以从理论上证明可控串补电抗器支路电阻对装置的影响不可忽视,并结合 MATLAB 数字仿真和 TCSC 样机动模实验进行了分析。得出结论:该电阻阻值过大时,引起导通角的变化加剧,导致晶闸管的不对称导通,从而无法按要求实现 TCSC 的阻抗调节功能。

6 附录

动模实验参数:

表 3 晶闸管额定参数

Tab. 3 The rated parameters of thyristor

型号	$I_{TAV}(T_{case74})$	$\text{Min}(V_{RRM}/V_{DRM})$	V_{GT}	I_{GT}
SKKT57/12E	60A	1200A	3V	150mA

- 电力电容 $C = 100 \mu\text{f}$ (实测 $106 \mu\text{F}$), 额定电压 400 V, 额定功率 5 kVar, 额定电流 12.5 A。
- 并联电抗 $L = 16 \text{ mH}$, 为线性度较好的开气隙铁心电抗器, 额定电压 1800 V, 额定电流 4.8 A, 电感电桥法测得电抗器电阻为 3.8Ω 。
- 稳态线路工作电流为 1 A, 为器件的过电压过电流能力留有很大裕度。

参考文献:

- [1] 何大愚. 电力电子技术的进步与柔性交流输电技术的换代发展[J]. 电网技术, 1999, 23(10): 1 - 4.
- [2] 徐政. 可控串补补偿装置的稳态特性分析[J]. 电力电子技术, 1998, 2: 32 - 35.
- [3] 尹忠东, 童陆园, 郭春林, 等. 基于暂态稳定控制的 TCSC 装置特性研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 19 - 25.
- [4] 张东霞, 童陆园, 尹忠东等. 描述可控串补装置暂态特性的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 30 - 34.
- [5] 律方成. 可控串补阻尼电力系统低频振荡控制策略研究[D]. 博士学位论文, 北京, 华北电力大学, 1999.

收稿日期: 2002-08-21; 修回日期: 2002-11-14

作者简介:

邹振宇(1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为可控串补的特性及控制。

马洪涛(1977 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为 TCSC 的模拟和仿真。

(下转第 57 页)

- [2] 杜丁香等. 消弧线圈接地电网有功选线[J]. 继电器, 2002, 30(5).
- [3] 李润先. 中压电网系统接地实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

收稿日期: 2002-08-06

作者简介:

赵建文(1973-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统及自动化方面教学与研究。

The design of new leakage protection using the active component of residual current as method of faulted line selecting

ZHAO Jian-wen

(Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The paper made research and analysis on the topic of residual current distribution, when single-phase earth fault happened in an arc-suppression-coil-earth medium voltage network. It bring forward the proper and new application schema of leakage protection, which use single-chip microcomputer 98c51 as core and use the active component of residual current peak value as faulted line selecting criterion. Thus to improve the sensitivity of leakage protection and the accuracy of selecting faulted line. This system is simply, effective and is put into reality easily.

Key words: arc suppression coil; the active component of residual currents; single-chip microcomputer

(上接第 23 页)

Analysis of the characteristics of the TCSC with its reactance branch containing resistance

ZOU Zhen-yu¹, MA Hong-tao², ZHAO Jian-guo¹, CHENG Shi-jie²

(1. Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper finds out that it is the resistance contained in the reactance branch that makes the characteristic difference between the prototype TCSC used in the power system dynamic simulation laboratory and the traditional analysis results. Using a topological model building method, the TCSC steady state model with the resistance contained in the reactance branch is set up. The time domain representations of the voltage across the capacitor and the current in the inductance branch are deduced. With the help of digital simulation and the prototype test, the influence of the resistance contained in the reactance branch on the steady state characteristics of TCSC was investigated.

Key words: TCSC; steady state resistance characteristics; mathematical model

(上接第 42 页)

邱智勇(1977-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与监控。

黄武浩(1973-), 男, 工程师, 从事电力系统运行工作。

王康元(1973-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统运行与监控。

收稿日期: 2002-09-29; 修回日期: 2002-11-18

作者简介:

XML based protocols component design

QIU Zhi-yong¹, HUANG Wu-hao², WANG Kang-yuan¹

(1. Electric Engineering College, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Hangzhou Power Bureau, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Protocols-oriented method has been adopted in the development of data gathering system before. After the analysis of IEC60870-5 series protocols, this paper puts forward a layer-oriented thought according to semantic information model and protocols' Open System Interconnect Reference Model. By implementation of the thought, adopt XML technology and establish protocols' XML-Schema by using XML technology. Then implement the description of protocols by using XML. The thought realizes reusable objects and custom process of protocols, making protocols can be configured.

Key words: protocols; open system interconnect reference model; extensible markup language; component