

电抗器品质因数对 TCSC 特性的影响 及阻抗特性的双解现象

孙海顺¹, 裴志宏¹, 程时杰¹, 赵建国², 段献忠¹

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院 湖北省 武汉市 430074;

2. 山东大学电气学院 山东省 济南市 250061)

EFFECTS OF THE REACTOR'S QUALITY FACTOR ON THE CHARACTERISTICS OF TCSC AND ITS DUAL IMPEDANCE SOLUTIONS

SUN Hai-shun¹, PEI Zhi-hong¹, CHENG Shi-jie¹, ZHAO Jian-guo², DUAN Xian-zhong¹

(1. College of Electric and Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China; 2. School of Electric Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China)

ABSTRACT: Unlike the ideal reactor, the quality factor of the reactor (simply represented by Q) used in the implemented TCSC can only take limited value. This will affect the characteristics of the thyristor controlled series capacitor (TCSC) to some extent. This problem is further analyzed by time-domain digital simulation. Results show that with limited Q values, the resonant condition of the equivalent fundamental frequency impedance of the TCSC differs from that of the ideal case. It is found that for the same firing angle order in the capacitive operation condition, the equivalent reactance of the TCSC decreases with the decrease of Q , while that for the inductive operation condition will increase. Such effects may change due to the firing control mode used. With the capacitor voltage as the reference signal for firing control, the equivalent fundamental impedance of the TCSC is a monodromic function to the firing angle order. However, two equivalent fundamental impedances will exist when the line current is used as the reference signal. This is the so-called dual impedance solutions phenomenon of the TCSC. Further investigation shows that dual impedance solution phenomenon is a natural result of line current time scale used. The relationship between the dual impedance in the line current time scale and the monodromic impedance is found. The solutions above mentioned are verified by the time domain simulation.

KEY WORDS: Electric power engineering; Power system;

基金项目: 国家自然科学基金重大项目课题(50595412); 国家重大基础研究规划发展项目 973 子课题项目(2004CB217906)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China(50595412); Project supported by Chinese National Key Basic Research Fund (2004CB217906).

Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC); Quality factor of the reactor; Steady state impedance characteristic; Dual impedance solution

摘要: 可控串联电容器(TCSC)装置的晶闸管控制支路电抗器(TCR)品质因数只能是有限值, 该文通过时域数字仿真分析了这一参数对 TCSC 稳态阻抗特性的影响。仿真分析结果表明在电抗器品质因数有限的情况下, TCSC 等效阻抗特性的谐振点相对理想情况会出现偏移; 同时, 在容性运行区间, 对于同样的触发角指令, Q 值越小, TCSC 的等效基频电抗也越小, 而在感性运行区间, 情况则刚好相反。这种影响在感性和容性运行区间还因 TCSC 同步触发控制方式不同而存在较大的差异。当以电容电压过零点为同步触发参考时标时, 触发角指令与等效阻抗之间是单值对应关系, 而以线路电流为同步触发参考时标时, 触发角指令与等效阻抗之间是双值对应关系, 即所谓的双解阻抗特性。文章进一步研究了线电流同步方式下 TCSC 等效基频阻抗呈现双解的现象, 指出产生该现象的根本原因是采用了不同的触发参考时标。TCSC 等效基频阻抗特性的双解现象实际上是在以线路电流过零点为触发参考时标时 TCSC 表现出的一种特殊运行特性。它与以电容电压同步触发参考时标的阻抗特性之间具有确定的对应关系。在两种不同的触发时标下, 通过详细时域仿真验证了上述结论。

关键词: 电力工程; 电力系统; 可控串联电容器(TCSC); 电抗器品质因数; 稳态阻抗特性; 双解阻抗特性

1 引言

在可控串联电容器(TCSC)的控制系统中, 通常

采用稳态阻抗与晶闸管触发角之间的关系进行阻抗控制，因此需要得到准确的阻抗/触发角特性^[1-4]。这一特性在理论上可以通过傅立叶分析得出^[5-7]。但是在理论分析的过程中，常常需要作出如下的假设：TCSC的外加激励电源为恒定正弦电流源；晶闸管控制电抗器支路(TCR)为理想的支路，即晶闸管为理想的单向开关，不计其导通压降，而且电抗器为纯电感元件，不含电阻，其工频品质因数 Q 为无限大等。

在实际的TCSC装置中，上述假设的条件往往不成立。首先TCSC的TCR支路电抗器采用空心电抗器，其 Q 值不可能为无限大。美国BPA电网Slatt变电站的TCSC工业装置采用的电抗器设计品质因数为90^[5]。用于实验研究的TCSC装置由于体积和经济性等方面的原因，其 Q 值更不容易做得很大，其值远低于工业装置。因此，需要了解 Q 值参数对TCSC运行特性的影响。

文献[8]通过物理装置模拟试验发现了电抗器 Q 值参数对于TCSC运行特性的影响，但其只是作了简单的分析。文献[9]通过状态空间分析利用数值计算的方法来精确计算考虑 Q 值参数时的TCSC基频阻抗特性，但其计算没有考虑同步触发控制方式的影响。

本文以实验TCSC装置为例，通过数字仿真分析了电抗器品质因数对于TCSC基频阻抗特性的影响，并对文[10]所提出的基频阻抗双解现象进行了深入的研究。找出了产生该现象的根本原因。

2 TCSC 运行的基本理论

恒定正弦电流源激励的TCSC单相电路如图1所示。图中，TCSC由一个串联电容器支路和一个反向并联晶闸管控制的电抗器支路并联组成。图中的TCR支路串联电阻表示电抗器品质因数有限时，该支路的等效电阻。

图2给出了典型的TCSC电容电压、晶闸管电流和线路电流的波形。定义触发角 α 为晶闸管承受正向电压的起始时刻（也就是电容电压过零时刻）到触发脉冲发出时刻之间的电气角度；触发越前角定义为： $\beta = \pi - \alpha$ ，如图2中触发角 $\alpha = 150^\circ$ 。图中 $\alpha_f = 60^\circ$ ，表示以线路电流过零点为参考所定义的触发角，其作用将在后文给出。由晶闸管不连续导通产生的脉冲电流对串联电容器形成附加充放电过程，由此影响到TCSC的基频等效阻抗特性。

根据对晶闸管电流的分析^[1-3]，TCSC稳态工频电抗是晶闸管触发角的函数关系可描述为

$$X_{TCSC} = \frac{-j}{\omega C} \left[1 - \frac{k^2(2\beta + \sin 2\beta)}{\pi(k^2 - 1)} + \frac{4k^2 \cos^2 \beta}{\pi(k^2 - 1)^2} (ktgk\beta - tg\beta) \right] \quad (1)$$

式中 系数 k 为电容器和电抗器工频电抗比值的平方根， $k = \omega_0/\omega$ ， $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ ， ω 为工频角频率。

根据式(1)可得TCSC等效阻抗与晶闸管触发角之间的关系如图3所示。图3中的电抗 X_{TCSC} 是以串联电容工频电抗为基准的标么值，并且以容性电抗为正。

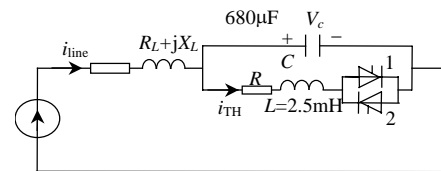


图 1 TCSC 实验电路

Fig. 1 Experimental TCSC circuit

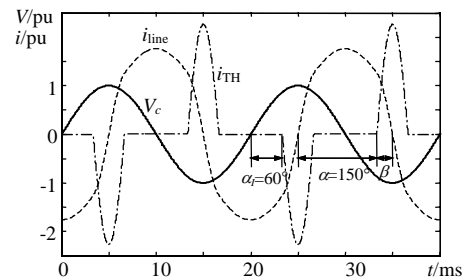


图 2 典型 TCSC 运行变量波形

Fig. 2 Typical operation waveform of tcsc

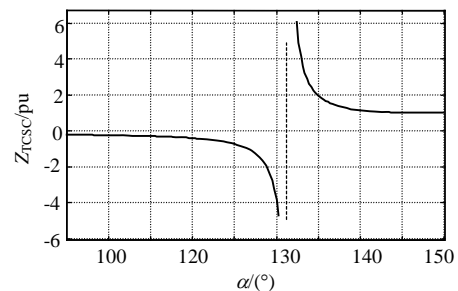


图 3 TCSC 的等效基频阻抗特性

Fig. 3 Equivalence fundamental frequency impedance characteristic of TCSC

对TCSC而言，每半个周波可能的触发角为 $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ ，中间存在一个工频谐振点，对应的谐振点触发角记为 α_{res} 。由图3可以看出，当触发角为 180° 时，晶闸管全关断，TCR支路脉冲电流为零，TCSC等效基频阻抗即为串联电容容抗，取

1.0pu, TCSC的这种运行状态称为BLOCK运行模式。从BLOCK运行模式开始,逐渐减小触发角 α ,晶闸管开始导通,并随着 α 的减小,晶闸管导通区间不断增大,同时,在减小到谐振触发角 α_{res} 之前,晶闸管导通电流幅度也不断增大。由此脉冲电流对电容器的增压作用,使得TCSC呈现不断增大的容性阻抗运行特性。当触发角继续减小越过谐振点时,TCSC的运行阻抗特性发生变化,呈现感性运行特性。此时随着触发角的进一步减小,晶闸管导通区间仍然不断增大,直到 $\alpha=90^\circ$ 时晶闸管完全导通,此状态称为BYPASS运行模式。但此时脉冲电流的幅度却随着触发角的减小也减小。因此,在这个过程中,TCSC的等效基频阻抗为不断减小的感性阻抗。触发角靠近谐振点的时候TCSC的等效阻抗很大,相应地晶闸管脉冲电流和电容电压也很大。

由此可以定性地建立一个基本的概念,即晶闸管的导通电流幅度和宽度决定了TCSC的等效基频阻抗特性。这个概念对下面将要解释的线路电流同步方式下TCSC出现阻抗双解的现象很重要。

3 考虑电抗器Q值影响的TCSC阻抗特性

3.1 仿真条件

电抗器的Q值参数对于TCSC的晶闸管支路导通特性有重要的影响,因而会影响到TCSC的等效基频阻抗特性,使之不同于图3所示的理想情况。本文利用EMTDC计算程序对图1所示的TCSC系统进行了数字仿真研究。为了研究电抗器Q值的影响,假定晶闸管导通时的电压降为零。仿真时分别考虑了电抗器工频品质因数Q为2、10、90以及无穷大等几种情况以及电容电压同步和以线路电流同步2种触发控制方式。

3.2 电容电压同步方式

仿真得到电容电压同步方式下TCSC的稳态工频阻抗与触发角之间的关系如图4所示。由图4可以看出:

(1) 无论Q值大小如何变化,由谐振点确定的感性和容性运行区间界限非常明显,整个运行区间触发角指令和运行电抗之间都是单值映射关系。数字仿真也表明:当触发角在2个区间之间跳变时,TCSC的阻抗特性也会发生相应的跳变。

(2) Q值对谐振点所对应的触发角有影响,当Q值较低时,谐振点触发角减小。在本文的算例中

$k=2.42$,可以计算出Q值无限大时与谐振点对应的触发角为 $\alpha_{res}=142^\circ$ [2-3]。TCSC容性运行区间为 $[142^\circ, 180^\circ]$,感性运行区间为 $[90^\circ, 142^\circ]$ 。在 $Q=2$ 的情况下,谐振点对应的触发角为 $\alpha_{res}=139.7^\circ$ 。Q=10和Q=90时, α_{res} 比较接近于理想情况。由于此时靠近谐振点处运行不容易稳定,仿真中难以准确地确定该值。仿真还表明,当Q=2时,在谐振点附近TCSC等效基频阻抗相角接近于零,主要呈现为较大的等效电阻特性。

(3) 在容性运行区间,对于同样的触发角指令,Q值越小,TCSC的等效基频电抗越小。而在感性运行区间,情况则刚好相反。对于相同的触发角指令,与较小Q值所对应的TCSC等效基频电抗反而较大,这一点可以通过比较不同Q值情况下的晶闸管脉冲电流得到验证。

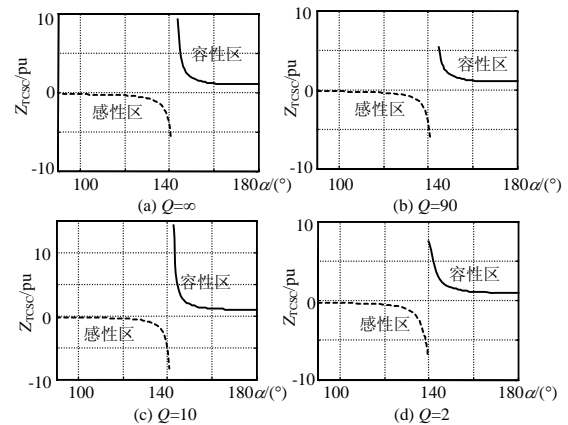


图4 不同Q值参数下的TCSC等效基频阻抗特性 (电容电压同步)

Fig. 4 Equivalence Fundamental Frequency Impedance Characteristic of TCSC with different Q (fired with the reference of the capacitor voltage)

图5比较了在TCSC的感性运行区间及相同触发角指令下,不同Q值参数对应的TCSC电容电压、线路电流以及晶闸管导通电流的波形。从图5可以看出,Q=2时导通电流的幅值明显大于其他情况。这进一步说明Q值通过影响晶闸管支路的导通特性从而影响到TCSC等效电抗特性的概念是正确的。

由图5还可以发现一个非常重要的现象,那就是Q值越小的时候,电容电压过零点与线路电流过零点之间的相位差越小。这一现象在TCSC运行于容性运行区间以及在以线路电流为同步方式时也存在,后文将要说明,这是导致线路电流同步方式下TCSC呈现阻抗双解特性的一个重要因素。

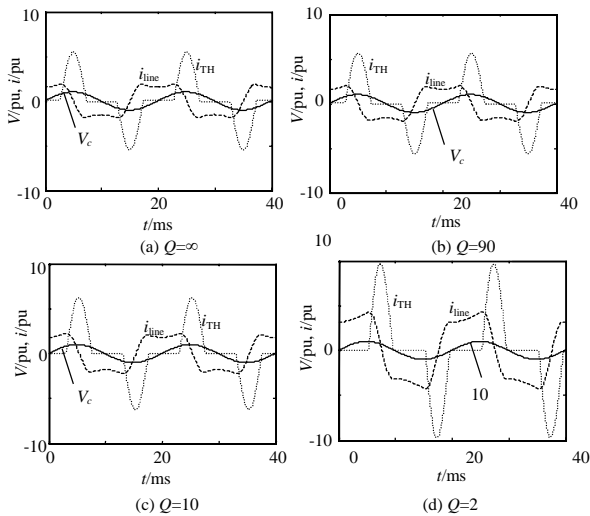


图5 不同 Q 值下TCSC在感性运行区运行时的波形
(电容电压同步)

Fig. 5 Waveforms of Inductive TCSC with different Q
(Fired with the reference of the capacitor voltage)

3.3 线路电流同步方式

上述讨论都是以电容电压过零为参考点定义触发角的情况。然而，大多数TCSC控制系统采用线路电流作为同步参考信号^[11-19]。记以线路电流过零点为参考所定义的触发角为 α_l 。在理想情况下，2种触发角定义之间满足关系式 $\alpha = \alpha_l + 90^\circ$ ，参见图2。对于图3所示阻抗曲线，如果用 α_l 代替 α 作为触发时标来表示TCSC的等效基频阻抗特性，那么横坐标应该是从 0° 到 90° ，对于本文讨论的系统，谐振点触发角为 52° 。也就是说，在 Q 值无限大的情况下，容性运行区间为 $\alpha_l \in [52^\circ, 90^\circ]$ ，感性运行区间为 $\alpha_l \in [0^\circ, 52^\circ]$ 。

图6是在线路电流同步运行方式下，通过数字仿真，得到的与不同 Q 值对应的TCSC等效基频阻抗特性。由图6可以得出与图4类似的结论， Q 值的大小将会影响到TCSC晶闸管导通情况，从而影响到TCSC的稳态等效基频阻抗。与运行于电容电压同步方式不同的是，无论是在感性运行区间还是在容性运行区，对于同样的触发角指令， Q 值越小，相应的TCSC等效基频阻抗也越小。在需要将TCSC运行于感性区间的时候，这点必须给予足够的关注。

由计算结果还可以看到一个非常特殊的现象，即： Q 值有限时，如图6(c)和(d)所示，在线路电流同步方式下，当TCSC从呈容性阻抗特性的BLOCK运行模式开始逐渐减小触发角一直到 α_l 接近 0° 时，TCSC始终呈现容性的等效基频阻抗特性。这与理想情况下TCSC容性运行区间为 $\alpha_l \in [52^\circ, 90^\circ]$ 似乎

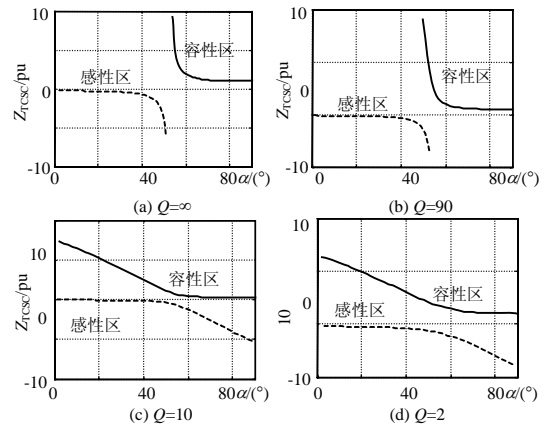


图6 不同 Q 值参数下的TCSC等效基频阻抗特性
(线路电流同步)

Fig. 6 Equivalence fundamental frequency impedance characteristic of TCSC with different Q
(Fired with reference of the line current)

是矛盾的。而当TCSC从TCSC呈感性阻抗特性的BYPASS运行模式开始逐渐增大触发角时，TCSC始终呈现感性的等效基频阻抗特性，这又似乎与理想情况下TCSC感性运行区间为 $\alpha_l \in [0^\circ, 52^\circ]$ 相矛盾。这种触发角与等效阻抗之间非单值映射的关系在文献[6]中称为考虑电抗器支路电阻影响时TCSC稳态运行区域内的等效基频阻抗双解现象。下一节我们将对此现象进行深入的分析和讨论。

4 关于有限 Q 时TCSC等效基频阻抗特性双解的分析

文献[10]分析了以线路电流为同步方式时TCSC电路的稳态阻抗特性，利用解析的方法建立了触发角与导通角之间的隐式关系，指出在同样的触发角条件下TCSC阻抗存在双解，即：对于一个确定的触发角，TCSC的等效基频阻抗既可能呈现感性，也可能呈现容性，由其历史运行状态决定。

为了深入分析上述TCSC等效基频阻抗双解现象产生的原因，考虑 $Q=2$ 时TCSC的运行情况，其等效基频阻抗特性如图6(d)所示。图中，任取一个触发角 $\alpha_l=48^\circ$ ，理论分析表明，此时TCSC应该工作于感性区间，但是从该图可以看出：此时TCSC既能工作于容性区，也能工作于感性区，要根据触发控制策略而定。图7(a)和(b)分别是2种状态下的稳态运行波形。

现在再从另一个时间坐标来观察上述现象：因为图4(d)所示的触发角与等效基频阻抗特性曲线是以电容电压过零为参考时标得到的曲线，它所描述

的系统 and 图 6(d) 是完全一样的。一个自然的想法即是：如果将图 6 所示的以线电流过零为参考时标得到的阻抗特性曲线换算成以电容电压过零为参考时标的阻抗特性曲线，会有什么结果。

在理想情况下，这 2 个参考时标相互差 90° 的相位，这种换算是一件非常容易的事，即：将触发脉冲时间移动 90° 即可。但如前所述，由于电抗器的 Q 不可能为无穷大，使该相位差变成一个随 Q 而变化的小于 90° 的变数，这给触发角的换算带来困难。为此，采用了这样的办法：通过时域仿真得到在线电流触发方式下对应于某一触发角 TCSC 电容电压和晶闸管电流的波形。比较电容电压过零的时刻与晶闸管导通电流的起始时刻，可以计算出与该线电流触发方式下触发角对应的等效电容电压触发方式下的触发角。对图 6 所示的线电流触发参考时标下的 2 条阻抗特性曲线逐点等值到电容触发参考时标，得到了图 8 所示的结果。

图 8 中，上端横坐标为线路电流参考时标，底部横坐标为电容电压参考时标。图中虚线表示的是线路电流同步方式下的阻抗特性，实线表示的是经过时标转换得到的等效电容电压同步方式下的阻抗特性。可以看出，经过时标的转换后，在线电流参考时标下的等效基频阻抗双解现象消失了，双解特性曲线中在触发角上相互重叠的感性和容性阻抗曲线分别对应于电容电压参考时标下的 2 个在触发相角互不重叠的 2 个分支，分别与图 4(d) 所示的 TCSC 的等效基频阻抗特性相对应。

由图 7(b) 的波形分析可知，由图 7(b) 的波形分析可知，当 TCSC 运行在感性状态下，触发角 $\alpha_f=48^\circ$ 时，以电容电压过零为参考时标，得到等效的触发角为 $\alpha=122.4^\circ$ 。其对应关系在图 8 中标示出来。

为了验证本文采用的 2 种触发参考时标变换的正确性，可以在同一 TCSC 模型上，用两种触发参考时标上相对应的 2 个触发角分别触发各自触发方式下的 TCSC，应该得到相同的结果。图 9 比较了电容电压同步方式下 $\alpha=122.4^\circ$ 时以及线路电流同步方式下 $\alpha_f=48^\circ$ 时 2 种情况下 TCSC 有关变量的波形。结果表明两者几乎完全一致，从而验证了上述分析结论的正确性。

以上分析表明，TCSC 等效基频阻抗特性的双解现象实际上是在以线路电流过零点为参考的触发方式下，TCSC 表现出的一种特殊运行特性。它与

电容电压同步触发方式之间具有对应关系，当 Q 值不同时，这种对应关系会发生变化。

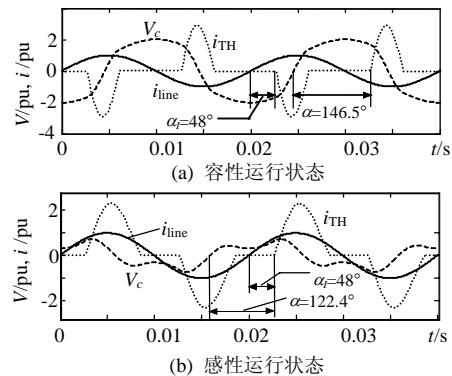


图 7 同一触发角指令下 TCSC 的两种运行状态
Fig. 7 Two possible steady operation states of the TCSC at the same firing angle

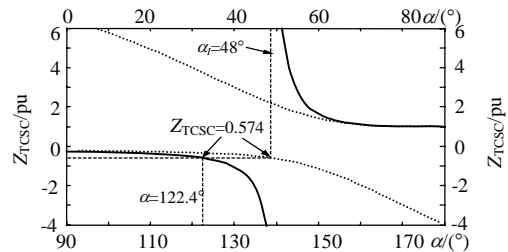


图 8 两种触发参考时标下的阻抗特性转换
Fig. 8 Transformation of Impedance Characteristics between two different Time Scale

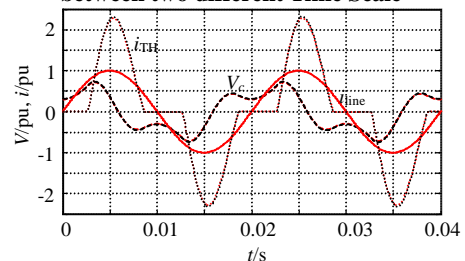


图 9 两种同步方式下等效运行状态的比较
Fig. 9 Comparison of the equivalent state under different firing control modes

5 结论

本文利用数字仿真的方法详细分析了 TCSC 中 TCR 支路电抗器的 Q 值对其等效基频阻抗特性的影响，深入讨论了线路电流同步方式下 TCSC 的基频等效阻抗与控制触发角之间的关系，得出以下结论：

(1) 当考虑电抗器 Q 值参数的影响时，TCSC 触发控制的 2 种参考时标即电容电压过零点和线路电流过零点之间的相位差小于理想值 90° 。

(2) TCSC 的阻抗特性取决于晶闸管控制支路的导通状态。在线路电流同步方式下，电抗器的 Q

值限制了晶闸管导通电流的幅度和宽度,从而使 TCSC 实际运行触发角在电容电压过零点的参考时标下偏离其理论值。

(3) 以电容电压为同步信号时, TCSC 的等效基频阻抗特性与触发角之间是单值映射关系。在线路电流同步方式下, TCSC 的等效基频阻抗与触发角指令之间不是单值映射关系。对于同一个 TCSC 物理系统, 2 种同步方式下的系统阻抗特性之间存在对应关系。

参考文献

- [1] 葛俊, 童陆园, 耿俊成, 等. TCSC 抑制次同步谐振的机理研究及其参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 25-29.
Ge Jun, Tong Luyuan, Geng Juncheng *et al.* The mechanism research of SSR mitigation by TCSC and its parameter design[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 25-29.
- [2] 周孝信, 李亚健, 武守远, 等. 可控串补晶闸管触发控制的电容电压增量控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 1-4.
Zhou Xiaoxin, Li Yajian, Wu Shouyuan *et al.* Capacitor voltage increment control of TCSC triggering algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 1-4.
- [3] 李亚健, 周孝信, 武守远, 等. 以可控串补抑制次同步谐振的物理模拟试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 1-4.
Li Yajian, Zhou Xiaoxin, Wu Shouyuan *et al.* SSR mitigation test study of TCSC on analog simulator [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 1-4.
- [4] 刘晓东, 杨煜, 陈陈. 基于采样数据模型方法的可控串联补偿系统对次同步振荡抑制作用的分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 1-5.
Liu Xiaodong, Yang Yi, Chen Chen. SSR computational analysis in TCSC system based on sample-data model[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 1-5.
- [5] Larsen E V, Clark K, Miske S A *et al.* Characteristics and rating considerations of thyristor controlled series compensation[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1994, 9(2): 992-1000.
- [6] 徐政. 可控串联补偿装置稳态特性分析[J]. 电力电子技术, 1998, 32(2): 32-35.
Xu zheng. Steady Analysis of TCSC[J]. Power Electronics, 1998, 32(2): 32-35.
- [7] Helbing S G, Karady G G. Investigations of an advanced form of series compensation Power Delivery[J]. IEEE Transactions on, 1994, 9(2): 939-947.
- [8] 邹振宇, 马洪涛, 赵建国, 等. 包含电抗器支路电阻的可控串补(TCSC)特性分析[J]. 继电器, 2003, 31(4): 21-23.
Zou Zhenyu, Ma Hongtao, Zhao Jianguo *et al.* Analysis of the characteristics of the TCSC with its reactance branch containing resistance[J]. Relay, 2003, 31(4): 21-23.
- [9] Ghosh A, Joshi A, Mishra M K. State space simulation and accurate determination of fundamental impedance characteristics of a TCSC[C]. 2001, IEEE, Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, OH United States, 2001.3: 1099-1104.
- [10] 闫冬, 赵建国, 武守远. 考虑电抗器支路电阻影响时的 TCSC 稳定运行区域内的双解现象[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 67-72.
Yan Dong, Zhao Jianguo, Wu Shouyuan. Dual solutions phenomenon of tcsc in steady operation area considering resistance influence of reactaor branch [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 67-72.
- [11] Jalali, S G, Lasseter, R H, Dobson, I. Dynamic response of a thyristor controlled switched capacitor[J]. IEEE Transaction on Power System, 1994, 9(3): 1609-1615.
- [12] Perkins B K, Iravani M R. Dynamic modeling of a TCSC with application to SSR analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(4): 1619-1625.
- [13] 张慧媛, 姜建国, 冯宇. 可控串补装置的动态建模及数字仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 14-18.
Zhang Huiyuan, Jiang Jianguo, Feng Yu. Dynamic modeling and digital simulation of TCSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 14-18.
- [14] Daneshpooy A, Gole A M. Frequency response of the thyristor controlled series capacitor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(1): 53-58.
- [15] L. Fan, Feliachi, Ali, Schoder. Karl Selection and design of a TCSC control signal in damping power system inter-area oscillations for multiple operating conditions[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 62(2): 127-137.
- [16] 武守远, 李亚健, 周孝信, 等. 用 TNA 模拟试验研究可控串补控制器[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 47-50.
Wu Shouyuan, Li Yajian, Zhou Xiaoxin *et al.* Controller design for TCSC simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 47-50.
- [17] 刘晓冬, 解大, 陈陈. 可控串联补偿(TCSC)系统感性微调区的 Pitchfork 分叉现象[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 1-4.
Liu Xiaodong, Xie Da, Chen Chen. Pitchfork bifurcation phenomenon of TCSC in inductive vernier operation mode[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 1-4.
- [18] 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.
Zhang Dongxia, Tong Luyuan, Yin Zhongdong *et al.* Analytical mathematical model for describing the dynamic behavior of the thyristor controlled series compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 30-34.
- [19] 葛俊, 童陆园, 耿俊成. 基于电容电压同步下 TCSC 暂态特性的数学描述 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 1-5.
Ge Jun, Tong Luyuan, Geng Juncheng. Mathematical model for describing transient characteristics of TCSC based on capacitor voltage synchronization mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 1-5.

收稿日期: 2004-09-02。

作者简介:

孙海顺 (1971-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统分析和 FACTS 控制技术;

裴志宏 (1976-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制, 负荷建模等;

程时杰 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为人工智能方法、电力系统运行与控制等;

赵建国 (1955-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统调度自动化, 计算机监控等。

段献忠 (1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析、FACTS 及其控制、电力市场、电力信息与网络控制等;

