对 TCSC 模型和阻抗提法的商榷

徐青山[1], 唐国庆[1], 汪 辉[2], 成勋[3]

(1.东南大学电气工程系,江苏 南京 210096; 2.江苏省电力设计院 江苏 南京 210024;

3.上海电力股份有限公司闵行发电厂,上海 200245)

摘要: 灵活交流输电系统(FACTS)技术在电力系统中有着广阔的应用前景,可控串联电容补偿(TCSC)便是FACTS家族的一个重要成员,针对TCSC基波阻抗提法不甚明确的现状,就稳态工作时的时域分析作了比较深入的研究。通过选取串联电流源型等值分析电路,经过严格的数学推导给出了唯一确定的公式定义,对当前研究文献中的一些说法提出了质疑和商榷。同时首次提出了串联电压源型研究模型选取不适的概念,并在Simulink集成环境中建立起仿真模型电路,通过其频域上的仿真结果与前述时域结果的对照分析,充分印证了该提法。

关键词: 电力系统; 灵活交流输电系统; 可控串联补偿

中图分类号: TM721 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2005)01-0024-04

0 引言

随着电网基础设施建设的加快,超高压远距离输电作为我国今后能源发展的重点,全国大电网区域互联的目标都要求线路进一步提高输送容量,降低输送功率损耗。串联电容补偿用来缩短输电线路的电气距离,提高电力网络的功率传输能力已有很长时间的历史,可控串补(TCSC, Thyristor Controlled Series Compensation)也因为其更灵活合理而受到更广泛的重视和应用,因此国内外的专家学者都对TCSC进行了较广泛而深入的研究[1~3]。

1 仿真模型的商榷

仿真模型是研究工作的基础,因为它关系到研究的内容、方法和结果,应当首先予以解决。正确的模型建立应该是在建立正确的研究模型等值电路的基础上。笔者翻阅和分析了许多介绍TCSC阻抗模型方面的论文和资料,TCSC现行研究模型等值电路主要有两种:串联电流源型等值分析电路以及串联电压源型等值分析电路。鉴于TCSC在实际电力系统应用中实属串联型FACTS设备,考虑电流电压归属相应的串并影响,笔者认为只有选取串联电流源型等值分析电路会比较合适,这将在下面的论述中得到印证。

2 基波阻抗的探讨

目前的相关文献或研究报告中,在选取串联电压源型等值研究电路的前提下,关于TCSC的基波阻抗也有几种不同的提法。不知是引用失当还是刊误,特别出现了一些值得商榷的提法,譬如文献[4]中提出的TCSC基波阻抗表达式为:

$$X_{TCSC}=\frac{1}{\omega C}-\frac{A}{\pi\omega C}\cdot(2\sigma+\sin 2\sigma)+\frac{1}{\pi\omega C}\cdot\frac{4A}{k^2-1}\cdot\cos 2\sigma(k\tan k\sigma-\tan\sigma)$$

文献[5]中提出的TCSC基波阻抗表达式为:

$$X_{TCSC}=\frac{1}{\omega C}-\frac{A}{\pi\omega C}\cdot(2\sigma+\sin 2\sigma)+\frac{1}{\pi\omega C}\cdot\frac{4A}{k^2-1}\cdot\cos^2\sigma(k\tan k\sigma-\tan\sigma)$$

以上两式中,

$$A=\frac{k^2}{k^2-1},\quad k=\frac{\omega_0}{\omega},\quad \omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}。$$

上述两式的表达差异是显而易见的,另外尚有一些表达式彼此间有正负号的区别,这尚可以理解,因为可能是由于各自研究中所习惯的阻抗(感性或容性)定义不同造成的。凡此种种不多赘述,下面将由严格的推导给出本文的结论。

3 本文推导

研究电路采用串联电流源型等值电路,如图1所示。TCSC装置简化等值电路包括两个部分:固定的电容 X_{C1}(固定串补部分,FSC)以及与可控硅控制电抗器(TCR)支路并联的电容 X_{C2}(TCSC部分)。

由于TCSC并联电路的品质因素通常较高,研

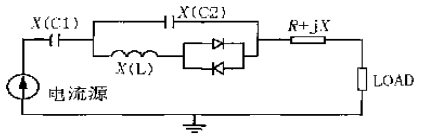

图 1　TCSC 研究模型等值电路

Fig. 1　Equivalent electrocircuit of TCSC model

究时,往往将其电阻忽略,也不计晶闸管压降,即认为 TCSC 是理想的可变电抗。这就可以认为,在晶闸管的换流过程中,流过整个 TCSC 的电流(即线路电流)是不突变的。

TCSC 达到稳态时电感电流波形相对于电容电压过零点是对称的,电容电压自身也是对称的。图 2 示出了稳态情况下 TCSC 单元各元件中的电流与外加电压 V_C、触发角 α 的关系。其中 2σ 为可控硅导通角。

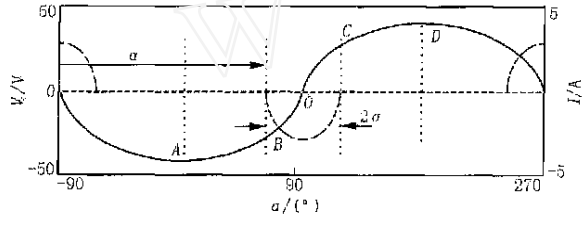

图 2　TCSC 稳态工作波形

Fig. 2　Steady state wave of TCSC

稳态条件可以表示为:

$$\alpha = \pi - \sigma$$
$$V''_{C0} = -V'_{C0} \tag{2}$$

V'_{C0} 为晶闸管关断时刻电容上电压;V''_{C0} 为晶闸管导通时刻电容上电压。

由稳态条件,可以求出晶闸管导通及关断时刻的电容电压稳态值为:

$$V_2 = |V''_{C0}| = |V'_{C0}| = I_m\omega L \cdot \frac{k^2}{k^2-1} \cdot (k\tan k\sigma\cos\sigma - \sin\sigma) = \frac{I_m}{\omega C}\cdot\frac{1}{k^2-1}\cdot(k\tan k\sigma\cos\sigma - \sin\sigma) \tag{2}$$

式中:$k = \omega_0/\omega$,V_2 为图 2 中 C 点电压。

继而可得稳态电容电压峰值 V_P 为

$$V_P = \frac{I_m}{\omega C}(1-\sin\sigma) + V_2 = \frac{I_m}{\omega C}(1-\sin\sigma) + \frac{I_m}{\omega C}\cdot\frac{1}{k^2-1}\cdot(k\tan k\sigma - \sin\sigma) \tag{3}$$

由 TCSC 稳态波形可看出,电容电压 $V_C(t)$ 为偶函数,且是半波对称的。代入初始条件:

$$V_C(t) = V''_C(t) = \frac{I_m}{\omega C}\cdot\frac{1}{k^2-1}\cdot[\cos\sigma(k\sin k\omega t - \sin\omega t) - \sin\sigma(\cos k\omega t - \cos\omega t)] - V_2\cos k\omega t \tag{4}$$

式中:$0 \le t \le \sigma/\omega$。

对上式进行 Fourier 级数分解,可以得到电容电压的基波及各次谐波分量,即:

$$V_C(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a(n)\cos\omega t$$

$$a(n) = \frac{4}{\pi}\int_0^{\pi} V_C(\omega t)\cos(n\omega t)\,d\omega t = \frac{4}{\pi}\int_0^{\sigma} V'_C(\omega t)\cdot\cos(n\omega t)\,d\omega t + \frac{4}{\pi}\int_{\sigma}^{\pi} V''_C(\omega t)\cos(n\omega t)\,d\omega t \tag{5}$$

其中,基波分量为

$$a(1) = -\frac{I_m}{\omega C} + \frac{I_m}{\pi\omega C}\cdot\frac{k^2}{k^2-1}\cdot(2\sigma + \sin 2\sigma) - \frac{I_m}{\pi\omega C}\cdot\frac{4k^2}{(k^2-1)^2}\cdot\cos^2\sigma(k\tan k\sigma - \tan\sigma) \tag{6}$$

因而,基波阻抗为

$$X_{TCSC} = -\frac{1}{\omega C} + \frac{A}{\pi\omega C}\cdot(2\sigma + \sin 2\sigma) - \frac{1}{\pi\omega C}\cdot\frac{4A}{k^2-1}\cdot\cos^2\sigma(k\tan k\sigma - \tan\sigma) \tag{7}$$

式中:

$$A = \frac{k^2}{k^2-1},\quad k = \frac{\omega_0}{\omega},\quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}。$$

至此,我们得到了 TCSC 完整的实际基波阻抗表达式。与前述的两个表达式都相似却不尽相同,符号上存在差异的原因前面亦已述及。

4　印证论述

上面基于串联电流源型研究模型给出了 TCSC 基波阻抗的一种表达,另有研究文献[6]基于串联电压源研究模型提出了这样一种基波阻抗表达:

$$X_{TCSC} = X_C \left\| \left(\frac{X_L}{1 - \frac{2}{\pi}\alpha - \frac{1}{\pi}\sin(2\alpha)}\right)\right. \tag{8}$$

尝试取 $X_C = 1/\omega C = 15\,\Omega$,$X_L = \omega L = 2.6\,\Omega$,在相同的参数情况下对比这两种结论示意如图 3 所示。

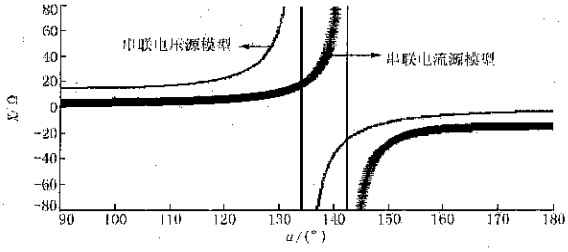

图 3 两种研究模型阻抗表达比较

Fig. 3 Comparison between two model impedances

由图 3 可明显地看出,串联电压源型阻抗感性容性转换的谐振点要较串联电流源型提前。即在同样参数情况下,串联电压源型容性区的可调范围要比串联电流源型得出的范围结论要宽的多。这样的差异是相当明显的,在实际应用中不慎重选取的话就可能因为过信任而导致调节工作中的失误。

为了印证前面所述的串联型研究模型比较合理的设想,我们基于 Matlab Simulink 仿真集成环境,结合 IEEE Second Benchmark on Subsynchronous Resonance 典型网络电路仿真结果求溯于时域和频域两个方面的吻合对照比较。

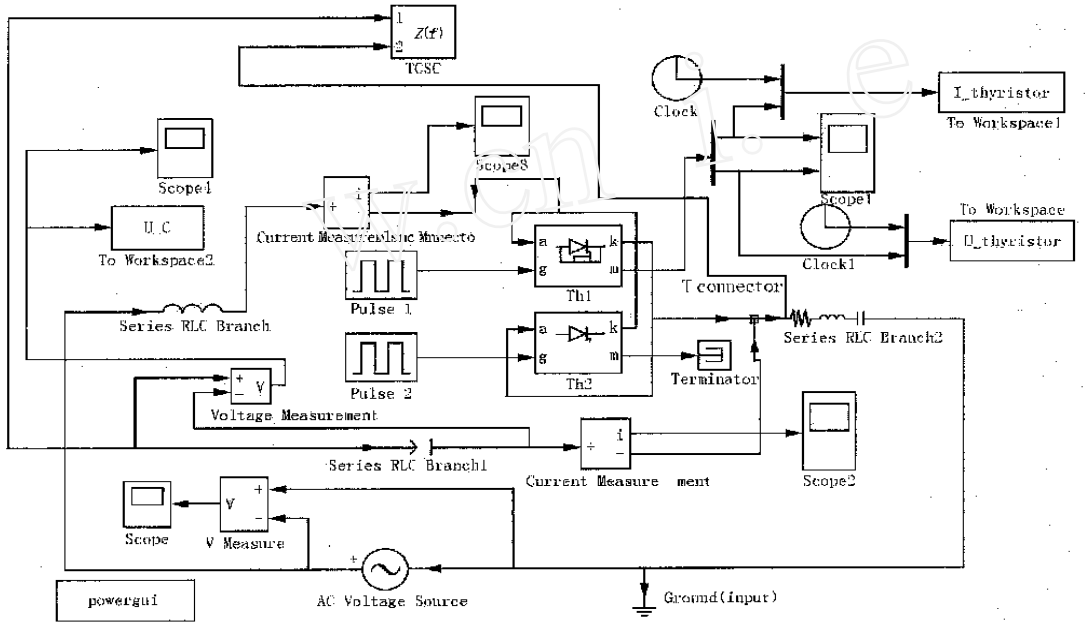

图 4 Simulink 仿真模型

Fig. 4 Simulated models in Simulink representations

在仿真中,我们在 TCSC 两端接上了 $Z-f$ 模块(见图 4)以观察 TCSC 频域下的表现。

图 5 所示就是所得到的 TCSC 幅频响应情况。

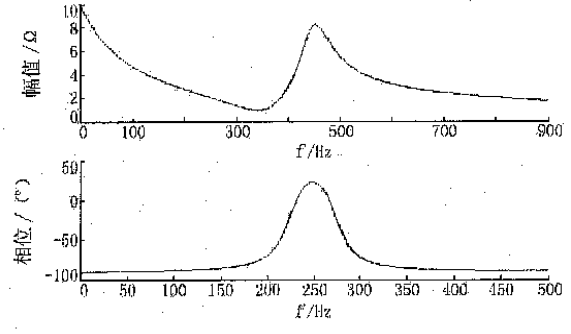

图 5 TCSC 的幅频响应

Fig. 5 Magnification and frequency response of TCSC

从图 5 的幅频响应图可以看出,在通常研究的频率范围(0～100 Hz)内,TCSC 阻抗的幅值随着频率的增加呈单调下降趋势,相角逐渐增大。特别地,在工频 50 Hz 处,可估摸出 TCSC 的阻抗大概在 6～7 Ω 左右,利用前面基于串联电流源型等值电路推导出的 TCSC 基波阻抗公式所计算出的阻抗精确值为 6.341726 Ω,而利用对比的串联电压源型阻抗表达式所计算出的阻抗值为 22.478817 Ω,这显然与从幅频响应图上所得出的结论出入较大。

5 结论

鉴于 TCSC 在实际电力系统应用中实属串联型 FACTS 设备,本文提出只有串联电流源型等值电路是可取研究方式的设想,结合 IEEE Second Benchmark on Subsynchronous Resonance 典型网络电路的仿真结果,论证了这一设想的正确性。

参考文献:

[1] 田杰,尹建华. 可控串联补偿的分析研究[J]. 电力系统自动化,1997,21(10):43-47.

TIAN Jie, YIN Jian-hua. Investigation of the Thyristor Controlled Series Compensation[J]. Automation of Electric Power Systems,1997,21(10):43-47.

[2] Leoidaki E A, Hatziargyriou H D, Papadias B C, et al. Investigation of Power System Harmonics and SSR Phenomena Related to Thyristor Controlled Series Capacitors[A]. 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP '98. 1998. 14-16.

[3] 韩彦华,李琥,施围. 可控串补等值阻抗的计算方法研究[J]. 电工技术学报,2003,18(1):96-99.

HAN Yan-hua, LI Hu, SHI Wei. An Approach to Calculating the Equivalent Impedance of TCSC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2003,18(1):96-99.

[4] 陈淮金. 活交流输电系统技术及其应用[J]. 电力系统自动化,1994,18(3):57-66.

Chen Huai-jin. Technology and Application of Flexible AC Transmissions[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(3):57-66.

[5] 田杰. TCSC 的稳态及暂态特性研究[J]. 浙江电力,1996,6:1-5

TIAN Jie. Steady and Transitory Characteristic of TCSC[J]. Zhejiang Power, 1996,6:1-5.

[6] Daneshpooy A, Gole A M. Frequency Response of the Thyristor Controlled Series Capacitor[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001,16(1).

收稿日期: 2004-05-08

作者简介:

徐青山(1979-),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定运行与控制; E-mail: xu-qingshan@sohu.com

唐国庆(1937-),男,教授,博士生导师,主要从事人工智能、电力电子在电力系统中的应用方面的研究;

汪　辉(1979-),男,助理工程师,主要从事电力系统配网规划方面的工作。

A discussion on TCSC model and impedance

XU Qing-shan[1], TANG Guo-qing[1], WANG Hui[2], CHENG Xun[2]

(1. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 210024, China;
3. Minhang Power Plant of Shanghai Electrical Power Co., Ltd, Shanghai 200245, China)

Abstract: The application of flexible AC transmission system (FACTS) is quite promising in power systems. The thyristor controlled series compensation (TCSC) is an important member of FACTS family. With TCSC established as a studying object, this paper mainly aims at non-committal actuality of base-wave impedance and prosecutes a detailed analysis in time domain. With series-current-source model selected, a unique definition is provided through strict, mathematic deduction, rectifying some expressions in nowadays research works. At the same time, it is firstly brought forward the concept of impropriety upon series-voltage-source model. With simulated circuit established in integrated environment, the concept is fully verified by comparison between results of frequency domain and the ones of time domain.

Key words: power system; flexible AC transmissions; thyristor controlled series compensation

许继集团软件项目入选国家高技术产业项目计划

从河南省发改委传来喜讯,经过不断培育,今年河南省有 3 个软件项目被列入国家高技术产业项目计划,获得 1100 万元的国家专项资金支持。许继集团公司开发的"通用自动化控制系统软件开发平台"软件项目跻身其中。

软件是信息产业最核心和精华的部分。据了解,由于人才、环境等原因,我省软件产业发展滞后,多年来"豫"字号软件项目一直没有被列入国家计划。随着这 3 个软件项目被列入国家高技术产业项目计划,结束了河南省软件项目没有国家级项目的历史,实现了"零"突破。