

# 考虑晶闸管导通特性的 TCSC 基频阻抗特性分析

杨毅<sup>1</sup>,姚伟<sup>2</sup>,孙海顺<sup>2</sup>,文劲宇<sup>2</sup>,袁宇波<sup>1</sup>

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 211103;

2. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

**摘要:** 通过 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真发现在线路电流同步方式下,可控串联电容补偿(TCSC)基频阻抗特性曲线随着线路电流不同而改变,这将使 TCSC 分层式控制系统中的开环阻抗控制存在明显误差。建立了线路电流同步方式下考虑晶闸管导通特性影响时的 TCSC 基频阻抗模型,从理论上解释了基频阻抗特性随线路电流变化的机理,通过数字仿真分析指出最小二乘查表法存在 TCSC 开环阻抗控制查表误差大的问题,同时提出了二元三点插值查表法和线性插值查表法 2 种新的查表法,并通过动态模拟实验验证了这 2 种查表方法的有效性和可行性。

**关键词:** 可控串联电容补偿; 基频阻抗特性; 晶闸管导通特性; 查表法

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.12.013

## 0 引言

可控串联电容补偿 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) 装置是第一代串联型柔性交流输电系统 (FACTS) 控制器,也是目前实际应用最多且前景看好的一种 FACTS 装置。TCSC 装置的动态模拟实验可以在很大程度上真实地反映实际电力系统中 TCSC 的运行特性,通过测试实验装置的基本性能和控制策略,可以及时发现并解决实现中存在的问题,对实际 TCSC 工程应用具有重要的理论和指导意义<sup>[1-11]</sup>。

典型的 TCSC 控制功能包括电抗控制、电流(功率)控制、次同步谐振(SSR)抑制、阻尼系统、功率振荡、电压控制和开环控制。为实现上述控制功能,宜采用分层控制策略,即将整个 TCSC 控制器分为上层、中层和底层控制。其中,上层控制又称系统级控制,主要功能是根据不同的控制目标(如潮流控制、暂态稳定控制等),选取合理的控制策略,得到中层控制所需要的命令阻抗值;中层控制又称为阻抗控制,是 TCSC 的基本控制功能,主要任务是制定相关的控制策略,使 TCSC 的输出阻抗迅速、准确地跟踪命令阻抗;底层控制也称为触发控制,其输入信号是中层控制输出的晶闸管触发延迟角(简称触发角)的大小,其功能是对晶闸管实现准确的触发。

目前,TCSC 装置大多采用分层控制的方法实现对装置的控制,在 TCSC 的分层式控制系统中,所有的上层控制策略和算法得到的命令阻抗都必须通过中层阻抗控制转换成触发角,然后底层控制根据触发角来控制晶闸管,从而实现预期的控制目的,所以中层控制是整个 TCSC 分层式控制的重要环节,是

一切控制目标能否实现的关键。

实际工程中的 TCSC 中层控制不能直接根据 TCSC 基频阻抗和触发角之间的关系式<sup>[12]</sup>由命令阻抗得到触发角。因为该关系式是一个复杂的超越方程,不能得到它的显式解,而只能通过数值分析的方法由一个给定的阻抗值得到触发角。这个求解过程尽管不是太复杂,但是对实时性要求非常高的中层控制而言,还是不可取的。所以在实际工程中都是根据触发角和基频阻抗的关系式,事先建立一个关于命令阻抗和触发角的对照表,在中层控制时只需根据命令阻抗查表求出触发角即可。由此可见,触发角和基频阻抗的关系曲线是中层控制实现的关键。

基频阻抗特性作为 TCSC 装置最基本的一个特性,有很多文献涉及或对其进行研究,大多数文献中采用忽略晶闸管导通特性及电抗器电阻的理想情况下的基频阻抗特性,仅有部分文献考虑了电抗器电阻对基频阻抗特性的影响,而考虑晶闸管导通特性影响的文献很少。但对 TCSC 动模装置进行数字仿真和动模实验时均发现,按照基频阻抗和触发角之间的关系式进行开环阻抗控制存在明显的误差,因此有必要对此进行较深入的研究。

本文的主要工作是围绕 TCSC 动模装置中层开环阻抗控制的查表误差展开,建立以线路电流同步的、考虑晶闸管导通特性影响时的 TCSC 基频阻抗模型,找出触发角和基频阻抗关系曲线随线路电流变化的数学机理,然后通过仿真分析和编程实践,指出最小二乘法查找对照表存在的问题,并提出了 2 种实用的 TCSC 查表法,最后通过动模实验验证了 2 种新方法的有效性。

## 1 TCSC 数学模型对晶闸管导通特性的处理

TCSC 动模装置一般采用一对反并联的小功率

收稿日期:2014-12-25;修回日期:2015-10-26

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20140114)

Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20140114)

晶闸管模块,整个晶闸管的导通特性可以近似等效为一个恒电阻和一个恒压降(方向和晶闸管导通方向相同)。由于动模实验时的电压级别相对实际工程比较低,线路额定电流仅十几安培,晶闸管导通电流相应也比较低,因此,下面的数学建模中忽略晶闸管导通时的恒电阻特性,仅考虑 1 V 左右的恒压降特性。

需要说明的是,在实际工程中,流过晶闸管的电流和晶闸管两侧的电压都非常高,这时既要考虑晶闸管导通时的恒压降特性又要考虑恒电阻特性。如果晶闸管导通电流为几百安培,此时整个电抗器支路的导通压降大概在几百伏到几千伏之间,晶闸管串的恒压降大概有几十伏,很明显,这时晶闸管导通压降不可完全忽略,此时应该用恒电阻加恒压降模型;如果晶闸管导通电流大到 1 V 管压降可以完全忽略时,整个晶闸管导通特性可以近似为一恒电阻模型。

## 2 建立考虑晶闸管导通特性时基频阻抗模型

目前普遍应用的 TCSC 基频阻抗和触发越前角  $\beta$  之间的关系式如式(1)所示<sup>[12]</sup>:

$$X_{\text{tcsc}} = \frac{1}{\omega C} \left\{ 1 - \frac{K^2 [2\beta + \sin(2\beta)]}{\pi(K^2 - 1)} + \frac{4K^2 \cos^2 \beta}{\pi(K^2 - 1)^2} [K \tan(K\beta) - \tan \beta] \right\} \quad (1)$$

设  $\alpha_u$  为以电容电压作为同步信号时的触发角,触发越前角  $\beta$  为导通角的一半,  $\beta = \pi - \alpha_u$ , 自然谐振角频率(即电容和电抗环路的谐振角频率)  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ ,  $K = \omega_0/\omega$ ,  $\omega$  为工频角频率。由式(1)可知:在  $L$ 、 $C$  确定后即  $K$  确定后 TCSC 的基频等效阻抗只与触发角  $\alpha_u$  有关。与谐振点对应的晶闸管触发延迟角称为谐振触发角  $\alpha_{\text{res}}$ , 其大小由电感和电容的参数决定。式(1)是不考虑晶闸管导通特性的理想状态下推导得到的 TCSC 基频阻抗和触发越前角关系式。

TCSC 晶闸管的不连续导通控制使电路呈现非线性特性,但是在晶闸管导通和截止期间状态变化具有线性和周期性,因此可以采用拓扑分析法<sup>[13]</sup>,通过分段求解线性微分方程(组)的方法分析电路的特性,建立考虑晶闸管恒压降特性的基频阻抗模型。

线路电流同步方式下 TCSC 的稳态波形如图 1 所示。其中,  $i_{\text{TH}}$ 、 $i_{\text{line}}$ 、 $u_c$  分别为晶闸管电流、线路电流和电容电压;  $I_{\text{THP}}$  为晶闸管电流峰值;  $\alpha$  为线路电流同步时的触发角;  $\sigma$  为导通角,  $\sigma = \beta_1 + \beta_2$ , 假设  $\beta = \beta_1 = \beta_2$ 。选定线路电流的正向峰值时刻为时间坐标轴的零点。可以看到,稳态电容电压为奇函数,线路电流为偶函数,晶闸管电流为偶函数,三者都具有半周期对称性。根据这一特点,只要确定了半个周期区间内的稳态计算公式,就可以得到全部时间域上的稳态计

算波形。线路电流用幅值恒定的工频电流源表示,即:

$$i_{\text{line}}(t) = I_m \cos(\omega t) \quad (2)$$

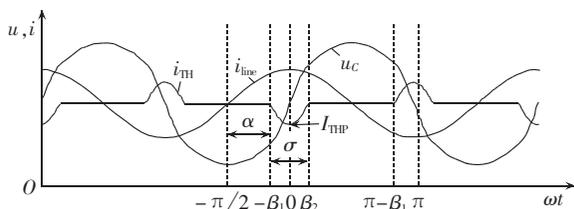


图 1 TCSC 主要电气量的稳态波形

Fig.1 Steady-state waveform of main TCSC parameters

### 2.1 晶闸管导通时的数学模型及求解

当有一个晶闸管处于导通状态时( $\omega t \in [-\beta, \beta]$ ), TCSC 装置为串联电容器与电抗器并联的结构。考虑晶闸管具有恒压降( $U_{\text{TH0}}$ )的导通特性,假定电抗器为纯电感元件。描述 TCSC 电路动态特性的微分方程式如下:

$$\begin{cases} C \frac{du_c(t)}{dt} = i_{\text{line}}(t) - i_{\text{TH}}(t) \\ L \frac{di_{\text{TH}}(t)}{dt} = u_c(t) + U_{\text{TH0}} \end{cases} \quad (3)$$

其中,参数  $C$  和  $L$  分别为串联电容器的电容值以及电抗器的电感值。

将式(2)代入式(3),可得:

$$\begin{cases} \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + \frac{1}{LC} u_c(t) = -\frac{\omega I_m \sin(\omega t)}{C} - \frac{U_{\text{TH0}}}{LC} \\ \frac{d^2 i_{\text{TH}}(t)}{dt^2} + \frac{i_{\text{TH}}(t)}{LC} = \frac{I_m \cos(\omega t)}{LC} \end{cases} \quad (4)$$

边界条件为:

$$\begin{cases} u_c(0) = 0, u_c'(0) = (I_m - i_{\text{TH}}(0))/C \\ i_{\text{TH}}(0) = I_{\text{THP}}, i_{\text{TH}}'(0) = 0, i_{\text{TH}}(\beta/\omega) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

解二阶常系数线性微分方程式(4)得到晶闸管导通时( $\omega t \in [-\beta, \beta]$ )的电容电压表达式,记为  $u_{c1}(t)$ :

$$u_{c1}(t) = u_c(t) = \frac{I_m}{\omega C} \frac{1}{K^2 - 1} \times \left[ \frac{K \cos \beta}{\cos(K\beta)} \sin(K\omega t) - \sin(\omega t) \right] + U_{\text{TH0}} [\cos(K\omega t) - 1] \quad (6)$$

其中,  $K = \omega_0/\omega$ , 自然谐振角频率  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ , 工频角频率  $\omega = 100 \pi \text{ rad/s}$ 。

### 2.2 晶闸管截止时的数学模型及求解

当 2 个晶闸管均处于关断状态( $\omega t \in [\beta, \pi - \beta]$ )时, TCSC 电路等效为一个串联电容支路,其状态由以下一阶微分方程描述:

$$C \frac{du_c(t)}{dt} = i_{\text{line}}(t) \quad (7)$$

边界条件:

$$u_c(t_0) = u_c(\beta/\omega) = u_{c1}(\beta/\omega) \quad (8)$$

解一阶微分方程式(7)得到晶闸管关断时( $\omega t \in$

$[\beta, \pi-\beta]$  的电容电压表达式, 记为  $u_{C2}(t)$ :

$$u_{C2}(t) = \frac{I_m}{\omega C} \left\{ \frac{K \cos \beta}{K^2 - 1} [\tan(K\beta) - K \tan \beta] + \sin(\omega t) \right\} + U_{TH0} [\cos(K\beta) - 1] \quad (9)$$

稳态运行时, TCSC 电容电压量是具有半波奇对称特性的周期变化量, 对电容电压量进行 Fourier 分析, 其中, 电容电压基波幅值  $A_1$  的计算式为:

$$A_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi u_{C2}(t) \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2}{\pi} \left[ \int_{-\beta}^\beta u_{C1}(t) \sin(\omega t) d(\omega t) + \int_\beta^{\pi-\beta} u_{C2}(t) \sin(\omega t) d(\omega t) \right] \quad (10)$$

将式(6)和式(9)代入式(10)积分后可得:

$$A_1 = \frac{I_m}{\omega C} \left\{ 1 - \frac{K^2}{\pi(K^2 - 1)} [2\beta + \sin(2\beta)] + \frac{4K^2 \cos^2 \beta}{\pi(K^2 - 1)^2} [K \tan(K\beta) - \tan \beta] \right\} - \frac{4}{\pi} U_{TH0} \cos \beta [1 - \cos(K\beta)] \quad (11)$$

由式(11)可以得到考虑晶闸管管压降时的基频阻抗和触发角关系式(12):

$$X_{TCSC} = \frac{A_1}{I_m} = \frac{1}{\omega C} \left\{ 1 - \frac{K^2}{\pi(K^2 - 1)} [2\beta + \sin(2\beta)] + \frac{4K^2 \cos^2 \beta}{\pi(K^2 - 1)^2} [K \tan(K\beta) - \tan \beta] \right\} - \frac{4}{\pi} \frac{U_{TH0}}{I_m} \cos \beta [1 - \cos(K\beta)] \quad (12)$$

式(1)和式(12)分别为不考虑晶闸管导通特性的理想状态和考虑晶闸管导通特性时 2 种情况下推导得到的基频阻抗和触发越前角关系式, 观察比较后可以发现: 式(12)比式(1)多出一个含有  $U_{TH0}$  的项, 正是这一项导致基频阻抗特性曲线随着线路电流的变化而变化, 线路电流幅值越小, 基频阻抗特性曲线与理想情况相差越大; 线路电流幅值越大, 基频阻抗特性曲线与理想曲线越接近, 当线路电流幅值足够大时, 则可以忽略晶闸管导通管压降的影响。

### 3 TCSC 基频阻抗特性曲线的仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件<sup>[14]</sup>中建立的仿真模型如图 2 所示, 该电路采用工频电流源给 TCSC 装置供电, 装置的基本参数为:  $C=680 \mu\text{F}$ ,  $L_1=2.5 \text{ mH}$ ,  $K=2.44$ , 线路电流作为同步信号, 谐振触发角为  $53.1^\circ$ , 线路电阻  $R=1.31 \Omega$ ,  $L=0.073 \text{ H}$ , 假定电抗器为理想状态。

当晶闸管的管压降设计为  $1 \text{ V}$  时, 在不同线路电流 ( $1 \text{ A}$ ,  $4 \text{ A}$ ,  $40 \text{ A}$ ) 条件下的容性区基频阻抗值和触发角关系曲线如图 3 所示。由图可见, 晶闸管导通压

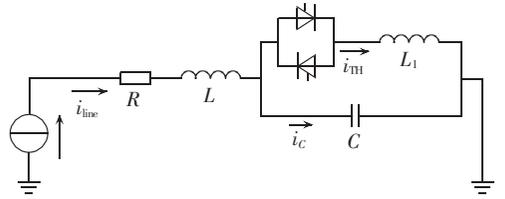


图 2 电流源条件下的 TCSC 装置简单仿真模型  
Fig.2 Simple simulation model of current-source TCSC

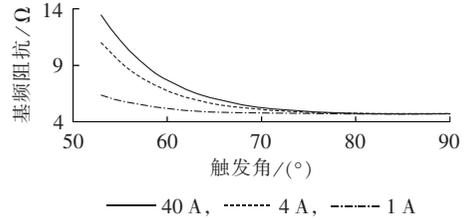


图 3 考虑管压降时不同线路电流条件下的基频阻抗和触发角关系曲线

Fig.3 Curve of fundamental-frequency impedance vs. firing angle for different line currents, voltage drop of thyristor is considered

降对 TCSC 的基频阻抗特性有显著影响。

当晶闸管的管压降设计为  $0$  时, 即在不考虑管压降的理想状态下, 线路电流大小对阻抗特性几乎没有影响, 如图 4 所示。

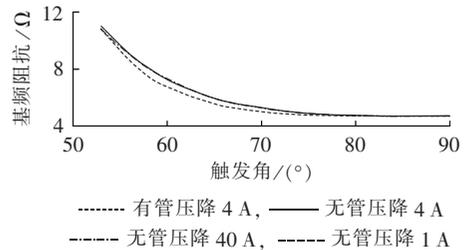


图 4 有无管压降时基频阻抗和触发角关系曲线  
Fig.4 Curve of fundamental-frequency impedance vs. firing angle for with and without voltage drop of thyristor

通过仿真结果来定性分析晶闸管导通管压降对基频阻抗特性曲线影响的原因。

利用图 2 搭建 2 个模型同时进行仿真, 两模型参数设置中, 晶闸管导通管压降分别设为  $1 \text{ V}$  和  $0 \text{ V}$  (即不考虑导通管压降的理想状态), 线路电流设置为  $4 \text{ A}$ , 触发角给定  $58^\circ$ , 其他条件相同, 仿真结果见图 5, 图中  $i_{TH1}$ ,  $u_{TH1}$ ,  $i_{C1}$ ,  $u_{C1}$  分别为考虑管压降时的晶闸管电流、晶闸管电压、电容器电流和电容器电压;  $i_{TH2}$ ,  $u_{TH2}$ ,  $i_{C2}$ ,  $u_{C2}$  分别为不考虑管压降时的晶闸管电流、晶闸管电压、电容器电流和电容器电压。

假设 TCSC 初始状态为闭锁 (Block) 状态, 此时 TCSC 相当于固定串补, 即电容直接串联在线路中, TCSC 等效基频阻抗为电容器的容抗值  $X_C$ , 此时电容器两端电压为  $u_{C0}$  ( $u_{C0} = i_{line} X_C$ )。考虑晶闸管导通管压降与不考虑该压降相比, 在每次晶闸管触发后的半个导通期间, 由于电容电压  $u_{C0}$  经过晶闸管分压后加在

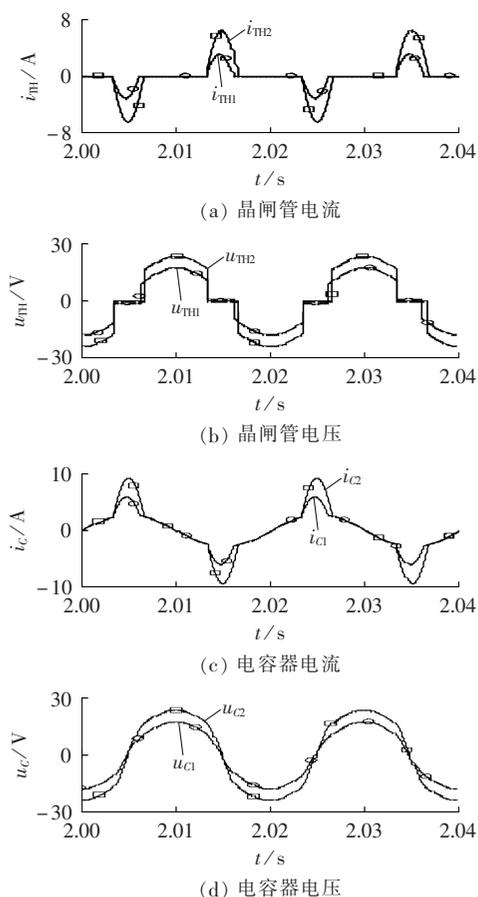


图 5 有无晶闸管导通压降时 TCSC 各电气量的对比波形

Fig.5 Comparison of waveform between with and without voltage drop of thyristor for different TCSC parameters

电抗上的电压值减小,从而晶闸管电流  $i_{T1}$  也将减少,并导致晶闸管提前关断,见图 5(a)和(b),又由图 6 所示的电流关系公式  $i_C = i_{line} + i_{T1}$ ,可见晶闸管导通期间对电容器的充电电流  $i_C$  变小,如图 5(c)所示,因此电容器电压  $u_C$  减少,如图 5(d)所示,而线路电流  $i_{line}$  不变,所以 TCSC 等效基频阻抗值变小。

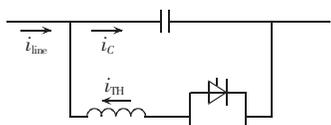


图 6 TCSC 容性运行模式

Fig.6 Capacitive operating mode of TCSC

由于动模实验的电压级别较低,线电压为 800 V,整个 TCSC 上的压降一般仅为几十伏,此时晶闸管的导通压降带来的影响不可忽略,因此有必要采用新的查表方法来减少由此带来的误差。

## 4 新 TCSC 中层阻抗控制查表法

### 4.1 最小二乘查表法及其存在的问题

TCSC 中层阻抗控制中开环控制方式如图 7 所

示,该方式是通过简单的查表运算,得到与命令阻抗值  $X_{order}$  相对应的触发角  $\alpha$ ,然后通过底层触发卡直接去触发晶闸管。



图 7 开环阻抗控制原理框图

Fig.7 Schematic diagram of open-loop impedance control

这里对照表反映的是没有考虑晶闸管管压降时基频阻抗和触发角 2 个变量之间的对应关系,其中查对照表的方法采用的是最小二乘法,在主控程序中实现过程如下:在控制程序初始化时加载对照表,加载方法是先通过文件操作读取离线生成好的基频阻抗和触发角数据文件,然后调用函数,该函数利用最小二乘法求基频阻抗与触发角的关系曲线,即得到拟合多项式的各项系数,当需要将命令阻抗转化成相应触发角时,调用函数,该函数利用多项式系数计算得到触发角作为返回值传送给底层触发卡去触发控制晶闸管。

由前面的分析可知,对于实际小容量的动模装置,如果不考虑晶闸管导通管压降,而仅通过建立基频阻抗和触发角 2 种变量的对照表进行查表存在较明显的误差;另外,就 2 种变量的对照表而言,这里采用最小二乘法拟合曲线也存在一定的问题,主要是查表误差较大。

图 8 中实线是将电容电压同步方式下容性区 76 组触发角和对应的基频阻抗原始数据导入 MATLAB 后中直接连线得到的曲线;虚线则是经过最小二乘法(五阶多项式)拟合后得到的曲线。可见两者存在较大误差,如上层命令阻抗值为  $10 \Omega$ ,中层阻抗控制通过查表,即通过图中虚线得到触发角  $149.9634^\circ$ ,而从实线上查出是  $8.4352 \Omega$ ,误差达到 18.55%。因此,本文提出 2 种实用的中层阻抗控制查表法,即二元三点插值查表法和线性插值查表法。

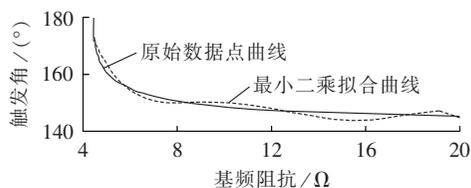


图 8 电容电压同步方式下容性区基频阻抗和触发角关系曲线

Fig.8 Curves of fundamental-frequency impedance in capacitive region vs. firing angle in capacitor voltage synchronization mode

### 4.2 二元三点插值查表法

下面利用在 PSCAD/EMTDC 下的仿真数据和 MATLAB 中绘制的图形以及 C 语言描述的算法编程来说明新的查表方法:首先,调节图 2 中的电流源,

在 10 种不同线路电流(1 A, 1.5 A, 2 A, 2.5 A, 3 A, 4 A, 5 A, 6 A, 10 A, 40 A)条件下分别采用 MultipleRun 多步运行模块进行仿真,产生不同触发角下的基频阻抗值,这里设置触发角范围为从 90° 每次运行递减 1° 直至 53°,仿真结束后利用导出的输出数据文件在 MATLAB 中画出容性区基频阻抗值和触发角关系曲线,如图 9 和图 10 所示(图 10 中不含线路电流为 40 A 条件下的关系曲线);然后按照 PSCAD/EMTDC 中查表元件(X-Y Transfer Function)文件格式生成查表文件,利用 MultipleRun 多步运行模块对给定的命令阻抗值进行二维查表,得到相应的触发角。

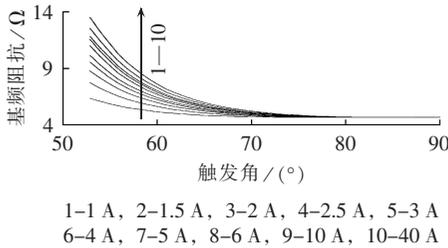


图 9 不同线路电流条件下容性区基频阻抗值和触发角关系曲线

Fig.9 Curve of fundamental-frequency impedance in capacitive region vs. firing angle for different line currents

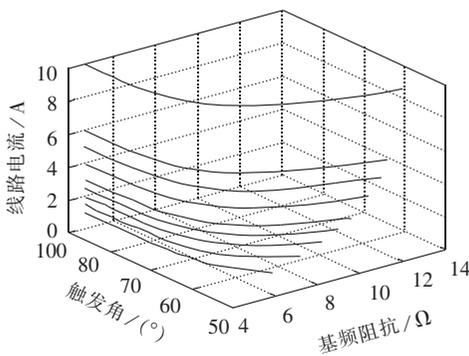


图 10 容性区线路电流、基频阻抗和触发角关系三维图

Fig.10 Three-dimensional diagram of line current, fundamental-frequency impedance and firing angle in capacitive region

应用 C 语言编程实现二元三点插值查表算法,算法简介<sup>[15]</sup>如下:给定矩形域上  $n \times m$  个结点  $(x_i, y_j)$  ( $i=0, 1, \dots, n-1; j=0, 1, \dots, m-1$ ) 上的函数值  $z_{ij} = z(x_i, y_j)$ ,利用二元三点插值公式指定插值点  $(u, v)$  处的函数近似值  $w = z(u, v)$ 。

设给定矩形域上的  $n \times m$  个结点在 2 个方向上的坐标分别为:

$$\begin{aligned} x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} \\ y_0 < y_1 < \dots < y_{m-1} \end{aligned} \quad (13)$$

相应的函数值为:

$$z_{ij} = z(x_i, y_j) \quad i=0, 1, \dots, n-1; j=0, 1, \dots, m-1 \quad (14)$$

选取最靠近插值点  $(u, v)$  的 9 个结点,其 2 个方向上的坐标分别为:

$$\begin{aligned} x_p < x_{p+1} < x_{p+2} \\ y_q < y_{q+1} < y_{q+2} \end{aligned} \quad (15)$$

然后利用二元三点插值公式:

$$z(x, y) = \sum_{i=p}^{p+2} \sum_{j=q}^{q+2} \left( \prod_{\substack{k=p \\ k \neq i}}^{p+2} \frac{x-x_k}{x_i-x_k} \right) \left( \prod_{\substack{l=q \\ l \neq j}}^{q+2} \frac{y-y_l}{y_j-y_l} \right) z_{ij} \quad (16)$$

在实际应用上面算法时,将  $(x_i, y_j)$ 、 $z_{ij}$  分别用  $(X_i, I_j)$  和  $A_{ij}$  代替,  $X_i$  表示基频阻抗,  $I_j$  表示线路电流,  $A_{ij}$  表示晶闸管触发角。将上面仿真得到的数据以文件的方式导入 C 语言程序中作为原始插值数据,当给定插值点,即某一线路电流下的命令阻抗值,调用插值子程序,将返回查表后得到的触发角。

为了测试该查表算法程序的执行时间,调用 C 语言库函数 clock() 分别编写了  $4 \times 4$ 、 $10 \times 20$  以及  $100 \times 100$  区域的插值程序,程序执行时间基本上在  $10.9890 \sim 27.4725 \mu\text{s}$  之间变化。这说明该算法的运算时间受原始插值数据规模大小的影响很小,完全可以满足实际查表的时间响应的要求。另外,经过验证,程序在边界条件可以正常地实现查表功能,并且实际应用时给定原始矩形区域数据可以留有适当的裕度,这样可以避免发生边界失真的情况。

### 4.3 线性插值查表法

观察图 9 和图 10 发现,TCSC 基频阻抗和触发角关系曲线与线路电流有关,且线路电流越大则相同基频阻抗值对应的触发角越大,呈现一种非线性单调变化关系。因此,除了采用二元三点插值法查对照表以外,还可以采用线性插值法进行近似查表,即给定线路电流和命令阻抗,通过线性插值的方法查得对应的触发角。具体实现思路:首先生成多条不同线路电流条件下的基频阻抗和触发角关系曲线,然后根据给定的线路电流确定与之相邻的 2 个线路电流值,再根据命令阻抗,在每条相邻线路电流对应的基频阻抗特性曲线上利用二分法<sup>[16]</sup>找到与之相邻的 2 个阻抗值,近似认为这两点间曲线是一条直线,利用线性插值可以在每条曲线上找到各命令阻抗对应的触发角,最后,再近似认为触发角和线路电流呈线性关系,从而确定本次给定线路电流和命令阻抗条件下的触发角。

## 5 2 种查表法的动态模拟实验结果

下面利用动态模拟实验验证二元三点插值和线性插值 2 种新的查表方法的有效性,实验结果如图 11 所示。图中从左到右依次为不同线路电流条件下(1 A, 1.5 A, 2 A, 2.5 A, 3 A, 4 A, 5 A, 6 A, 7 A, 8 A) 10 条基频阻抗和触发角关系曲线,给定 10 组不同线路电流和命令阻抗值作为插值数据,分别利用二元三点插值法和线性插值法进行插值,插值结果见表 1。

图 11 则更为直观地反映了插值效果,图中“+”和

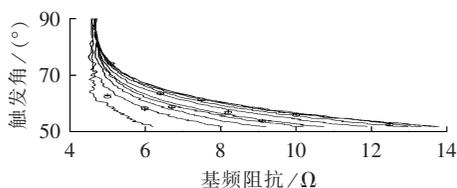


图 11 2 种插值查表法的动态模拟实验结果  
Fig.11 Results of dynamic simulative experiment by two table look-up approaches

表 1 二元三点插值法和线性插值法查表结果  
Table1 Results of table look-up by three-point quadratic interpolation method and linear interpolation method

| 线路<br>电流/A | 命令<br>阻抗/ $\Omega$ | 触发角/ $^{\circ}$ |           | 相差<br>角度/ $^{\circ}$ |
|------------|--------------------|-----------------|-----------|----------------------|
|            |                    | 二元三点插值          | 线性插值      |                      |
| 1.25       | 5.0                | 63.107854       | 62.501874 | 0.6060               |
| 1.50       | 6.0                | 58.025278       | 58.650446 | -0.6252              |
| 2.30       | 6.7                | 58.850125       | 58.971209 | -0.1211              |
| 2.70       | 9.1                | 54.206453       | 54.060341 | 0.1461               |
| 3.50       | 8.2                | 57.327046       | 57.119764 | 0.2073               |
| 4.20       | 6.4                | 63.500124       | 63.583950 | -0.0838              |
| 5.00       | 10.0               | 56.330243       | 56.028110 | 0.3021               |
| 5.70       | 12.5               | 53.007981       | 52.857934 | 0.1500               |
| 6.00       | 7.5                | 61.001955       | 61.590011 | -0.5881              |
| 8.00       | 5.1                | 74.078142       | 74.191041 | -0.1129              |

“o”分别表示采用二元三点插值法和线性插值法查得的触发角。由图可见,2种插值方法均可以实现对命令阻抗和触发角对照表的快速而有效的查找,其中线性查表法已经运用到实际 TCSC 动模装置中。

## 6 结论

a. 本文建立了 TCSC 在线路电流同步方式下考虑晶闸管导通特性影响时的基频阻抗模型,从理论上解释了基频阻抗特性随线路电流变化的数学机理。

b. 对于小容量 TCSC 动模实验装置,由于晶闸管导通特性的影响,不同线路电流时触发角和基频阻抗关系曲线不同,线路电流幅值越小,基频阻抗特性曲线与理想情况相差越大,这给开环阻抗控制带来较大误差。

c. 在 TCSC 中层阻抗控制中,采用最小二乘法查对照表存在较大误差,本文提出了二元三点插值和线性插值 2 种新的查表方法,并通过动态模拟实验验证了 2 种方法的有效性和可行性。

## 参考文献:

[1] 朱庆春,丁洪发,张明龙,等. 与 RTDS 互联的 TCSC 物理模拟装置研制[J]. 电力自动化设备,2005,25(2):50-55.  
ZHU Qingchun,DING Hongfa,ZHANG Minglong,et al. Development of TCSC physical simulative equipment connected with RTDS[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(2):50-55.

[2] 姚伟,杨毅,孙海顺,等. 可控串联电容补偿动态模拟实验装置设计[J]. 电力自动化设备,2007,27(12):76-80.  
YAO Wei,YANG Yi,SUN Haishun,et al. Design and implementa-

tion of TCSC dynamic simulation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(12):76-80.

[3] LI Kejun,ZHAO Jianguo,ZHANG Chenghui,et al. A study on mode-switching control of TCSC based on conditional firing of thyristor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(2):1196-1202.

[4] HU Zheda,DAI Chaobo,WU Shouyuan. A pilot study of a novel TCSC scheme for the UHV transmission lines[C]//2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Shanghai, China:IEEE,2012:1-5.

[5] 林敏,李杰. 500 kV 串联补偿装置自触发及主间隙放电分散性研究[J]. 江苏电机工程,2014,33(6):20-22.  
LIN Min,LI Jie. Research on self-triggering and spark gap discharge dispersion of 500 kV series compensator[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2014,33(6):20-22.

[6] 姚伟,孙海顺,文劲宇,等. TCSC 动模装置及其实验研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(2):51-55.  
YAO Wei,SUN Haishun,WEN Jinyu,et al. TCSC dynamic simulation device and experimental research[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(2):51-55.

[7] 杨志新,杨世海. 基于串联补偿的谐波抑制技术研究[J]. 江苏电机工程,2013,32(2):38-42.  
YANG Zhixin,YANG Shihai. Research on inter-harmonics suppression technology based on series compensation[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2013,32(2):38-42.

[8] HE S E,SUONAN J,BO Z Q. Integrated impedance-based pilot protection scheme for the TCSC-compensated EHV/UHV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(2):835-844.

[9] 赵渊,邱玉良,宿晓岚. 含 TCSC 的电网运行风险评估模型[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):50-58.  
ZHAO Yuan,QIU Yuliang,SU Xiaolan. Operating risk assessment model of power grid with TCSC[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):50-58.

[10] 任旭超,万秋兰. SVC 预防电压失稳的快速控制方法[J]. 江苏电机工程,2014,33(2):1-4.  
REN Xuchao,WAN Qiulan. A fast SVC control method for voltage stability[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2014,33(2):1-4.

[11] 王云洁,胡毅. SVC 电压稳定控制和抑制低频振荡交互影响研究[J]. 江苏电机工程,2013,32(1):23-25.  
WANG Yunjie,HU Tao. Interaction study of SVC voltage stability control and inhibiting of low-frequency oscillation[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2013,32(1):23-25.

[12] 徐政. 可控串补的可控范围及串容与电抗关系的研究[J]. 电工技术学报,1998,13(3):13-17.  
XU Zheng. The controllable impedance range of TCSC and the parameter selection method of its TCR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,1998,13(3):13-17.

[13] 孙海顺. 可控串联补偿装置(TCSC)运行特性分析及实验装置研制[D]. 武汉:华中科技大学,2004.  
SUN Haishun. Characteristics analysis of Thyristor Controlled Series Capacitor(TCSC) and development of an experimental prototype[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2004.

[14] 杨健维,麦瑞坤,何正友. PSCAD/EMTDC 与 Matlab 接口研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(11):83-87.

2006.

[20] 袁志昌,宋强,刘文华. 改善动态相位跟踪和不平衡电压检测性能的改进软锁相环算法[J]. 电网技术,2010,34(1):31-35.

YUAN Zhichang,SONG Qiang,LIU Wenhua. A modified soft phase lock loop algorithm improving the performance in dynamic phase tracking and detection of unbalanced voltage [J]. Power System Technology,2010,34(1):32-35.

作者简介:

林建熙(1987—),男,广东陆丰人,硕士,主要从事电力



林建熙

系统运行分析与控制研究;

袁志昌(1980—),男,江西吉安人,副教授,博士,研究方向为柔性交流输电技术、电力系统稳定仿真(E-mail:yuanzc@tsinghua.edu.cn);

杨银国(1980—),男,湖北广水人,硕士,主要从事电网运行与安全稳定控制、系统优化与调度等方面的研究;

易 杨(1983—),女,四川内江人,硕士,主要从事电力系统分析运行与控制研究。

## Cascaded STATCOM control to enhance its operating performance in asymmetrical fault condition

LIN Jianxi<sup>1</sup>,YUAN Zhichang<sup>2</sup>,YANG Yinguo<sup>1</sup>,YI Yang<sup>1</sup>

(1. Guangdong Power Grid Power Dispatching Control Center,Guangzhou 510600,China;

2. Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China)

**Abstract:** A control method suitable for the cascaded STATCOM in the condition of asymmetrical power system fault is proposed. Its operating performance in asymmetrical fault condition is analyzed based on its equivalent single-phase mathematical model. The control method for the cascaded STATCOM in asymmetrical fault condition is deduced according to the requirement of three-phase DC capacitor for energy balance and a controller with split-phase direct-current tracking is designed. The selection of control parameters and corresponding functions are discussed. The simulative results on PSCAD verify the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** electric inverters; STATCOM; asymmetrical fault; control

(上接第 94 页 continued from page 94)

YANG Jianwei,MAI Ruijun,HE Zhengyou. Interface between PSCAD/EMTDC and Matlab[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(11):83-87.

[15] 徐士良,马尔妮. 常用算法程序集(C/C++描述)[M]. 5 版. 北京:清华大学出版社,2013:135-136.

[16] PRESS W H,TEUKOLSKY S A,VETTERLING W T,et al. C 语言数值算法程序大全[M]. 傅祖芸,赵海娜,丁岩,译. 2 版. 北京:电子工业出版社,1995:96-97.

作者简介:



杨 毅(1983—),男,江苏东台人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用、智能变电站二次系统及信息安全、电力系统继电保护(E-mail:yyang09@qub.ac.uk)。

## Analysis of TCSC fundamental-frequency impedance characteristic considering thyristor conduction property

YANG Yi<sup>1</sup>,YAO Wei<sup>2</sup>,SUN Haishun<sup>2</sup>,WEN Jinyu<sup>2</sup>,YUAN Yubo<sup>1</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute,Nanjing 211103,China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,School of Electrical and Electronic Engineering,Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

**Abstract:** The PSCAD/EMTDC digital electromagnetic transient simulation shows that,the fundamental frequency impedance characteristic curve of TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor) varies along with the line current in line current synchronization mode,which induces obvious deviation of open-loop impedance control in the hierarchical TCSC control system. A TCSC fundamental-frequency impedance model considering the variation of thyristor conduction characteristic in line current synchronization mode is built to theoretically analyze its mechanism and the digital simulation shows the LSM(Least Square Method) applied in the open-loop impedance control has large table look-up error. Two table look-up approaches,i.e. three-point quadratic interpolation method and linear interpolation method,are proposed and their effectiveness and reliability are validated by dynamic simulative experiments.

**Key words:** TCSC; fundamental-frequency impedance characteristic; thyristor conduction property; table look-up method