

9-4-2020

A new method of fast simulation for electromagnetic transients of SVC and TCSC

Shengyang XU

School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Xiaoming MAO

School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Liyun MAI

School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

XU, Shengyang; MAO, Xiaoming; and MAI, Liyun (2020) "A new method of fast simulation for electromagnetic transients of SVC and TCSC," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 4, Article 9.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.04.009

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss4/9>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

SVC 和 TCSC 电磁暂态快速仿真新方法

徐圣扬, 毛晓明, 麦立昀

(广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 在传统电磁暂态仿真中, 静止无功补偿器(SVC)和晶闸管控制串联电容器(TCSC)的求解速度较慢。为克服这一不足, 提出一种快速模拟 SVC 和 TCSC 电磁暂态过程的新方法。首先, 根据晶闸管控制电抗器(TCR)支路通、断状态不变时 SVC 和 TCSC 的状态方程不变这一特点, 建立分时段不变状态方程; 通过引入辅助变量, 将模型由非齐次转化为齐次线性方程组, 得到各工况下统一的表达式。然后, 采用缩放平方法计算矩阵指数, 得到模型的输出响应。最后, 与传统电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 的计算结果进行对比, 验证所提方法的合理性和高效性。

关 键 词: SVC; TCSC; 仿真; 电磁暂态; 缩放平方法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.009 中图分类号: TM743 文章编号: 1673-9140(2020)04-0066-10

A new method of fast simulation for electromagnetic transients of SVC and TCSC

XU Shengyang, MAO Xiaoming, MAI Liyun

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In the traditional electromagnetic transient simulation, the computation speed of SVC (Static Var Compensator) and TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation) is relatively slower. In order to overcome this deficiency, a new method of fast simulation for the electromagnetic transients of SVC and TCSC is proposed. For the fact that the state equations of SVC and TCSC are unchanged when the state of TCR (Thyristor Controlled Reactor) branches stay the same, the piecewise time-invariant state equations of SVC and TCSC are developed firstly. Then, auxiliary variables are introduced and the model is transformed from a set of non-homogeneous linear equations into homogeneous ones to obtain the unified expression suitable for varied working conditions. Finally, the scaling and squaring method is utilized to compute the matrix exponent and the response of the model is obtained. The feasibility and high efficiency of the proposed method is verified by comparing with the results from classical electromagnetic transient simulations using the PSCAD/EMTDC software package.

Key words: SVC; TCSC; simulation; electromagnetic transient; the scaling and squaring method

柔性交流传输系统(flexible AC transmission systems, FACTS)应用大功率、高性能电力电子设备对电力系统的主要参数进行灵活控制, 可有效改善现有电力系统的安全性和稳定性^[1]。静止无功补偿器(static

var compensator, SVC) 和晶闸管控制串联电容器 (thyristor controlled series compensation, TCSC) 是 FACTS 装置中的典型代表^[2-3], 在世界范围内得到了广泛的工程应用。目前, SVC 和 TCSC 的数学模型主要有 3 种: 准稳态模型^[4-6]、电磁暂态模型^[7-9] 和动态相量模型^[10-14]。

准稳态模型采用相量技术建立 SVC 和 TCSC 的仿真模型, 运算速度快, 能较为准确地刻画设备在正常和对称故障条件下的动态输出, 因而广泛应用于电力系统机电暂态仿真程序中。

电磁暂态模型在精确的电路层面对 SVC 和 TCSC 进行三相建模, 精度高, 能准确模拟设备在各种工况下的暂态响应, 因而广泛应用于电磁暂态仿真程序以及机电—电磁混合程序中^[15-16]。不过, 为捕捉开关通、断时刻系统模型的变化, 其仿真步长小, 计算速度较为缓慢。

动态相量模型是一种介于准稳态和电磁暂态仿真模型之间的相量模型。它基于状态空间的平均理论, 把时域信号表示成时变傅里叶级数的形式, 再通过对主要频率成分暂态行为的刻画, 获得原始信号的动态描述。对于电力电子设备, 动态相量法建模的关键在于开关函数的建模, 目前已提出三相对称工况下的开关函数模型^[10-11]。不对称条件下, 由于阀组关断时刻受外电路条件影响且装置特征谐波并不稳定, 故建立准确的开关函数模型十分困难, 限制了此项研究的进一步发展。

综上, 现有的机电暂态、电磁暂态和动态相量模型在模拟 SVC 和 TCSC 的动态行为时均不能兼顾快速性和准确性。该文给出一种 SVC 和 TCSC 电磁暂态快速仿真新方法, 在不降低计算精度的前提下, 提高仿真计算的速度, 对于电磁暂态及机电—电磁混合仿真技术的发展有一定的参考价值。

1 模型的建立

1.1 SVC 电磁暂态仿真新模型

以六脉冲 TCR-FC 型 SVC 装置为例 (TCR 为晶闸管控制电抗器 (thyristor controlled reactor)), 如图 1

所示, 推导其电磁暂态仿真新模型。

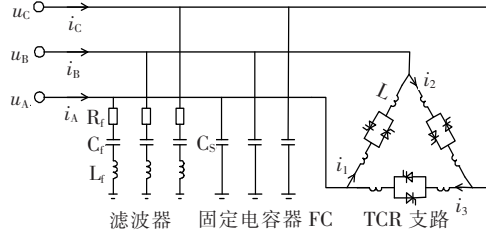


图 1 六脉冲 TCR-FC 型 SVC 装置

Figure 1 Six-pulse TCR-FC type SVC device

不失一般性, 设连接母线电压的三相基波分量的表达式为

$$\begin{cases} u_A = U_{Am} \sin(\omega t + \varphi_A) \\ u_B = U_{Bm} \sin(\omega t + \varphi_B) \\ u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \varphi_C) \end{cases} \quad (1)$$

若引入辅助变量:

$$\begin{cases} v_A = U_{Am} \cos(\omega t + \varphi_A) \\ v_B = U_{Bm} \cos(\omega t + \varphi_B) \\ v_C = U_{Cm} \cos(\omega t + \varphi_C) \end{cases} \quad (2)$$

则有

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega & & \\ & \omega & \\ & & \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega & & \\ & -\omega & \\ & & -\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

设 i_A, i_B, i_C 分别为装置吸收的三相电流, i_1, i_2, i_3 分别为 AB、BC、CA 相 TCR 支路电流, $u_{af}, i_{af}, u_{bf}, i_{bf}, u_{cf}, i_{cf}$ 分别为滤波器各相电容电压和电感电流, 则六脉冲 TCR-FC 型 SVC 的状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{X} = [i_1, i_2, i_3 \mid u_{af}, i_{af}, u_{bf}, i_{bf}, u_{cf}, i_{cf} \mid u_A, u_B, u_C \mid v_A, v_B, v_C]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L}_k & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z} & \mathbf{F} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{W} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{W} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)中 $\mathbf{Z}$ 、 $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{W}$ 为常数矩阵,分别为

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0 & 1/C_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/L_f - R_f/L_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/C_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/L_f - R_f/L_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/C_f \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/L_f - R_f/L_f & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1/L_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/L_f \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{W} = \text{diag}\{\omega, \omega, \omega\} \quad (10)$$

$\mathbf{L}_k$ 是随时段变化的矩阵,可根据第 k 个时段 TCR 支路晶闸管通断的情况形成:

$$\mathbf{L}_k = [\mathbf{L}_{AB}, \mathbf{L}_{BC}, \mathbf{L}_{CA}]^T \quad (11)$$

式中 当 AB、BC、CA 相之间有晶闸管处于导通状态时, $\mathbf{L}_{AB} = [1/L \quad -1/L \quad 0]$ 、 $\mathbf{L}_{BC} = [0 \quad 1/L \quad -1/L]$ 、 $\mathbf{L}_{CA} = [-1/L \quad 0 \quad 1/L]$; 当 AB 或 BC 或 CA 相之间的 2 个晶闸管均处于关断状态时, $\mathbf{L}_{AB} = \mathbf{L}_{BC} = \mathbf{L}_{CA} = [0 \quad 0 \quad 0]$ 。

1.2 TCSC 电磁暂态仿真新模型

以三相 TCSC 电路为例,如图 2 所示,推导其电磁暂态仿真新模型。

不失一般性,设三相电流源的表达式为

$$\begin{cases} i_A = I_{Am} \sin(\omega t + \varphi_A) \\ i_B = I_{Bm} \sin(\omega t + \varphi_B) \\ i_C = I_{Cm} \sin(\omega t + \varphi_C) \end{cases} \quad (12)$$

引入辅助变量:

$$\begin{cases} q_A = I_{Am} \cos(\omega t + \varphi_A) \\ q_B = I_{Bm} \cos(\omega t + \varphi_B) \\ q_C = I_{Cm} \cos(\omega t + \varphi_C) \end{cases} \quad (13)$$

有类似于式(3)、(4)的关系成立。

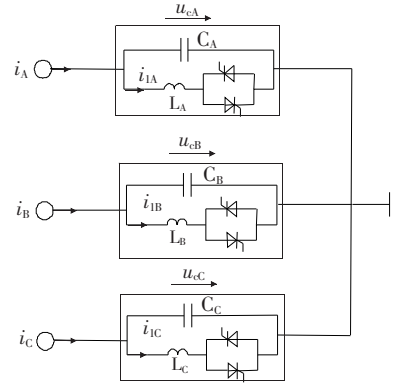


图 2 含 TCSC 的简单系统

Figure 2 A simple system with TCSC

设三相 TCSC 支路的电感电流分别为 i_{lA} 、 i_{lB} 、 i_{lC} , 电容电压分别为 u_{cA} 、 u_{cB} 、 u_{cC} , 并设 $\mathbf{R}_p = [u_{cp}, i_{lp}]^T$ (p 可取 A、B、C), 不难写出 p 相的状态方程为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_p \\ i_p \\ q_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{kx} & \mathbf{B}_{kx} & 0 \\ 0 & 0 & \omega \\ 0 & -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_p \\ i_p \\ q_p \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中 k 为时段; $\mathbf{A}_{kx}$ 、 $\mathbf{B}_{kx}$ 均为时变矩阵。当晶闸管处于开通状态时, $\mathbf{A}_{kx} = \mathbf{A}_{onx}$, $\mathbf{B}_{kx} = \mathbf{B}_{onx}$; 当晶闸管处于关断状态时, $\mathbf{A}_{kx} = \mathbf{A}_{offx}$, $\mathbf{B}_{kx} = \mathbf{B}_{offx}$ 。其中,

$$\mathbf{A}_{onx} = \begin{bmatrix} 0 & -1/C_x \\ 1/L_x & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{offx} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{onx} = \mathbf{B}_{offx} = \begin{bmatrix} 1/C_x \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

设 $\mathbf{X} = [R_A, R_B, R_C, i_A, i_B, i_C, q_A, q_B, q_C]^T$, 综合 A、B、C 三相的状态方程, 仍有式(5)成立。此时,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}' & \mathbf{B} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{W} \\ 0 & -\mathbf{W} & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{A}' = \text{diag}\{\mathbf{A}_{kA}, \mathbf{A}_{kB}, \mathbf{A}_{kC}\} \quad (16)$$

$$\mathbf{B} = \text{diag}\{\mathbf{B}_{kA}, \mathbf{B}_{kB}, \mathbf{B}_{kC}\} \quad (17)$$

综上, SVC 和 TCSC 所有工况下的三相状态方程可以统一表示成式(5)所示分段齐次线性微分方程组的形式。

2 模型的求解

2.1 状态变量的递推公式

前文分析可知, SVC 和 TCSC 的齐次线性状态

方程在 TCR 支路导通状态不发生变化时是不变的。记 k 为时段编号, t_k^{st} 表示第 k 个时段的起始时刻,对应的状态变量初值为 X_k^{st} ; t_k^{ed} 表示第 k 个时段的结束时刻,对应的状态变量末值为 X_k^{ed} 。则

$$\begin{cases} t_k^{\text{st}} = t_0, \\ \mathbf{X}_k^{\text{st}} = \mathbf{X}_0, \end{cases} \quad k = 1 \quad (18)$$

$$\begin{cases} t_k^{\text{st}} = t_{k-1}^{\text{ed}}, \\ \mathbf{X}_k^{\text{st}} = \mathbf{X}_{k-1}^{\text{ed}}, \end{cases} \quad k > 1 \quad (19)$$

用矩阵指数法对式(5)进行求解,得:

$$\mathbf{X}(t) = e^{\mathbf{A}_k(t-t_k^{\text{st}})} \mathbf{X}(t_k^{\text{st}}), t \in [t_k^{\text{st}}, t_k^{\text{ed}}] \quad (20)$$

其中, $\mathbf{A}_k$ 为第 k 个时段状态方程的系数矩阵。

状态变量的递推公式为

$$\mathbf{X}(t) = e^{\mathbf{A}_k(t-t_k^{\text{st}})} e^{\mathbf{A}_{k-1}(t_{k-1}^{\text{ed}}-t_{k-1}^{\text{st}})} \cdots e^{\mathbf{A}_1(t_1^{\text{ed}}-t_1^{\text{st}})} \mathbf{X}(t_1^{\text{st}}) \quad (21)$$

当 TCR 支路中晶闸管的通、断状态发生改变时,整个模型的工况也发生一次变化,进入下一时段。

2.2 晶闸管通断时刻的确定

当晶闸管两端电压极性为正,且参考电压(电流)的相位角等于触发角 α 时,晶闸管由关断变为导通状态。为了得到参考电压(电流)的相位角,需要借助锁相环(phase locked loop, PLL)。PLL 能使输出的频率和相位与输入信号保持一致,详细原理可参考文献[17]。

晶闸管的关断时刻由外电路决定,发生在电流过零时刻,该文的识别方法:①求解式(5)所示 SVC 或 TCSC 状态方程,比较该时刻与上一时刻 TCR 支路电感电流;若正、负性(方向)发生改变,令该时刻为晶闸管的关断时刻;②若 TCR 支路电感电流从上一时刻的非零值变为该时刻的零值,则该时刻为晶闸管关断时刻。

2.3 状态变量初值的求取

由式(21)可知,确定初值 $\mathbf{X}(t_1^{\text{st}})$ 后才能递推计算状态变量的大小。

1) SVC 最关键的状态变量是 TCR 支路的电感电流。

当 $\omega t \in [k\pi + \alpha, (k+2)\pi - \alpha]$ ($k=0,1,\dots$) 时,TCR 支路导通,电感电流初值为

$$i_L = \frac{V_m}{\omega L} [\cos(\alpha + k\pi) - \cos \omega t] \quad (22)$$

其中, V_m 为输入电压的幅值, α 为触发角。其余时刻的 TCR 支路处于关断状态,电感电流为零。

输入电压和辅助变量的初值可由式(1)、(2)求得。与滤波器和固定电容器相关的状态变量初值可置零,通常 1~2 个周波即达稳态。

2) TCSC 最关键的状态变量是各相的电容电压和电感电流。

当 $\omega t \in \left[\left(\alpha - \frac{\pi}{2} + k\pi \right), \left(\frac{3\pi}{2} - \alpha + k\pi \right) \right]$ ($k=0,1,\dots$) 时,TCR 支路导通,电感电流和电容电压初值计算为

$$\begin{cases} i_L = \\ D[\sin \omega t + (-1)^k \frac{\cos \alpha}{\cos \lambda \beta} \cos \lambda(\omega t - \frac{\pi}{2} - k\pi)] \\ \{ \\ u_C = \\ DL[\omega \cos \omega t - (-1)^k \frac{\cos \alpha}{\cos \lambda \beta} \omega_0 \sin \lambda(\omega t - \frac{\pi}{2} - k\pi)] \end{cases} \quad (23)$$

其中

$$\begin{cases} D = \lambda^2 / (\lambda^2 - 1) I_m \\ \lambda = \omega_0 / \omega \\ \{ \\ \omega_0 = 1 / \sqrt{LC} \\ |\beta = \pi - \alpha \end{cases} \quad (24)$$

当 $\omega t \in \left[\left(\frac{\pi}{2} - \alpha + k\pi \right), \left(\alpha - \frac{\pi}{2} + k\pi \right) \right]$ ($k=0,1,\dots$) 时,TCR 支路关断,电感电流和电容电压初值计算为

$$\begin{cases} i_L = 0 \\ \{ \\ u_C = (-1)^k \left[\frac{I_m}{\omega C} \sin \alpha + V_0 \right] - \frac{I_m \cos \omega t}{\omega C} \end{cases} \quad (25)$$

其中, V_0 为晶闸管开通和关断时刻的电容电压瞬时绝对值。输入电流和辅助变量的初值可由式(12)、(13)求得。

2.4 矩阵指数的计算方法

由式(21)可见,矩阵指数 $e^{\mathbf{A}t}$ 的计算十分关键。该文采用缩放平方法计算,基本思想为对矩阵指数

e^{At} 作数学变换:

$$e^{At} = [e^{At/N}]^N \quad (26)$$

先用截断一无穷级数逐步逼近 $e^{At/N}$, 再用快速幂算法对 $e^{At/N}$ 进行 N 次乘法计算(详细计算原理可参考文献[18]), 计算流程如图 3 所示, E 为收敛精度,

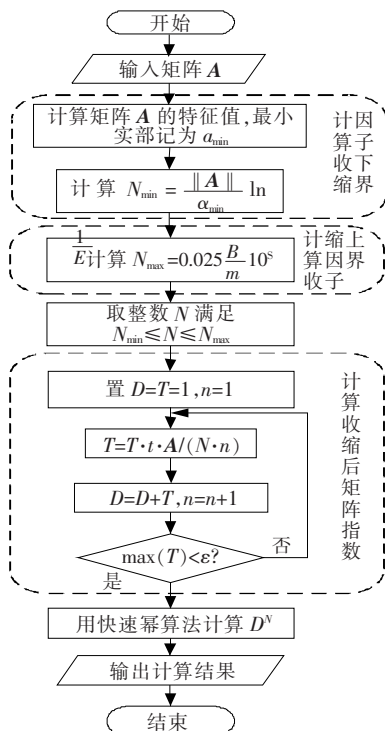


图 3 缩放平方方法计算流程

Figure 3 Flow chart of the scaling and squaring method

3 仿真算例

在 Simulink 仿真平台上实现电磁暂态仿真新算法。分别以 SVC(图 1)和 TCSC(图 2)系统为算例, 对新方法和 PSCAD 仿真软件的计算结果进行比较, 仿真参数完全一致, 计算步长均取 $50 \mu\text{s}$, 仿真时长为 1 s , 以验证新方法的有效性和优势。

3.1 SVC 仿真算例

图 1 中设 TCR 支路的电感 $L=0.0975 \text{ H}$, 滤波器支路电阻 $R_f=0.1 \Omega$, 电感 $L_f=10 \text{ H}$, 电容 $C_f=200 \mu\text{F}$, 固定电容器 FC 的电容 $C_s=3 \mu\text{F}$, 触发角 $\alpha=100^\circ$, 输入为三相对称的电压源:

B 为舍入误差的约束极限, S 为计算机的字长, m 为所取规格化浮点数的数目。

2.5 算法流程

SVC 和 TCSC 电磁暂态快速仿真新算法流程如图 4 所示。

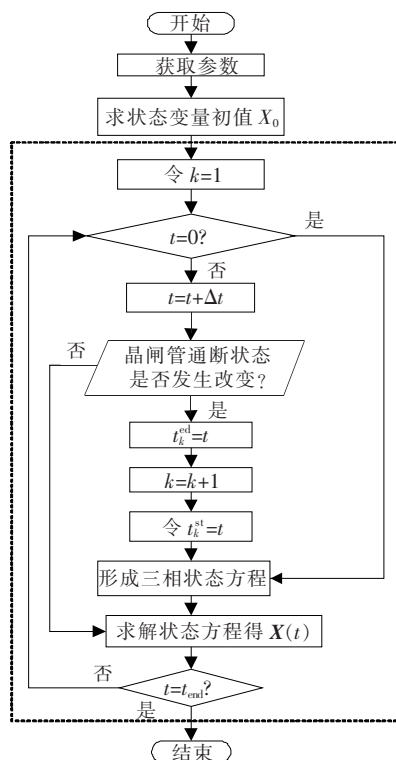


图 4 新方法流程

Figure 4 Flow chart of the new method

$$\begin{cases} u_A = U_{Am} \sin(\omega t) \\ u_B = U_{Bm} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (27)$$

其中, $U_{Am}=U_{Bm}=U_{Cm}=10 \text{ kV}$, $\omega=2\pi f=100\pi$ 。

稳态情况下, 三相电压源幅值由 10 突变为 4 kV 、A 相电压源幅值由 10 突变为 6 kV 、三相触发角由 100° 突变为 145° 、A 相电压源幅值由 10 突变为 5 kV 且三相触发角由 100° 突变为 145° 时(突变时刻均为 $t=0.15 \text{ s}$ 时), 新方法和 PSCAD 仿真结果的比较分别如图 5~9 所示。各采样点误差率的平均值如表 1 所示, 新方法与 PSCAD 仿真耗时比较如表 2 所示。可见, 新方法与经典电磁暂态仿真软件 PSCAD 的计算结果吻合良好, 在计算速度上有明显优势。

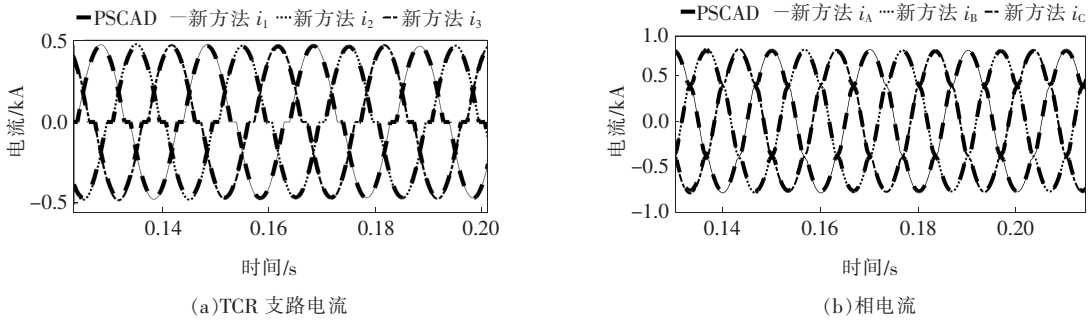


图 5 稳态情况下新方法与 PSCAD 对于 SVC 仿真结果比较

Figure 5 Simulation results comparison when using the new method and the PSCAD program under steady state for SVC

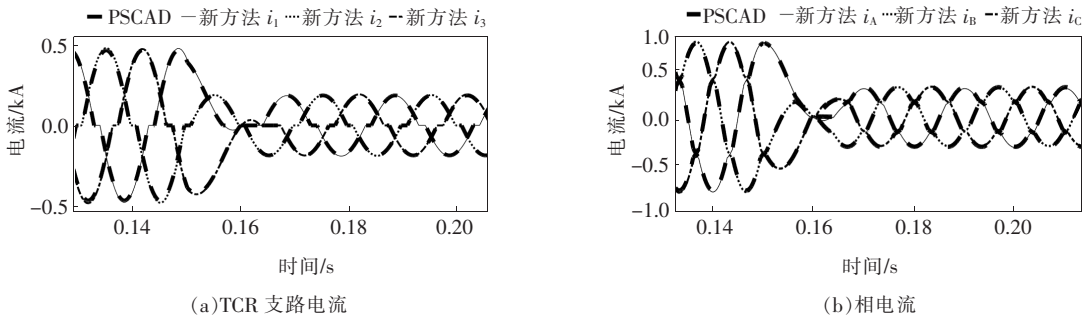


图 6 三相电压幅值由 10 突变为 4 kV 时新方法与 PSCAD 对于 SVC 仿真结果比较

Figure 6 Simulation results comparison when using the new method and the PSCAD program with three-phase voltage amplitudes change from 10 to 4 kV for SVC

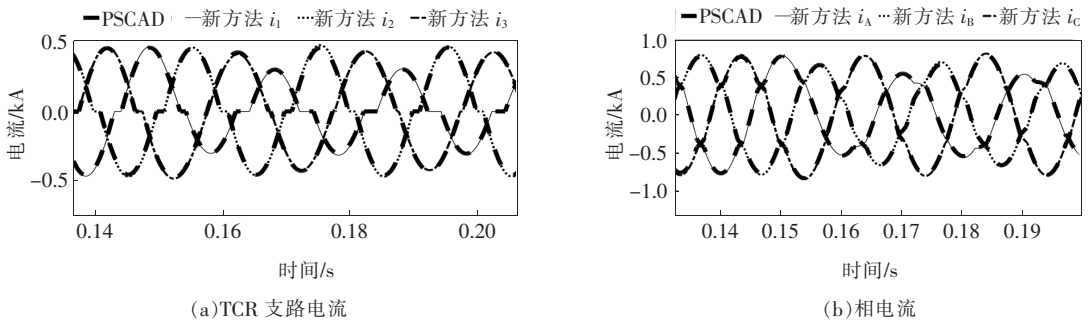


图 7 A 相电压幅值由 10 突变为 6 kV 时新方法与 PSCAD 对于 SVC 仿真结果比较

Figure 7 Simulation results comparison when using the new method and the PSCAD program with phase-A voltage amplitude changes from 10 to 6 kV for SVC

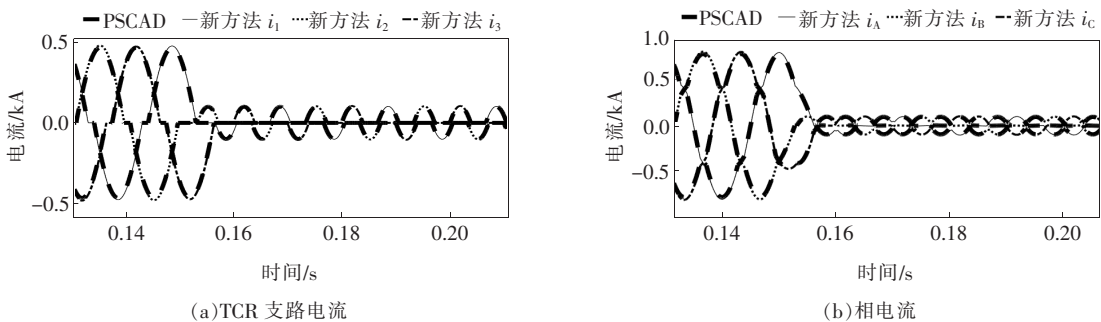


图 8 三相触发角由 100°突变为 145°时新方法与 PSCAD 对于 SVC 仿真结果比较

Figure 8 Simulation results comparison when using the new method and the PSCAD program with three-phase firing angles change from 100° to 145° for SVC

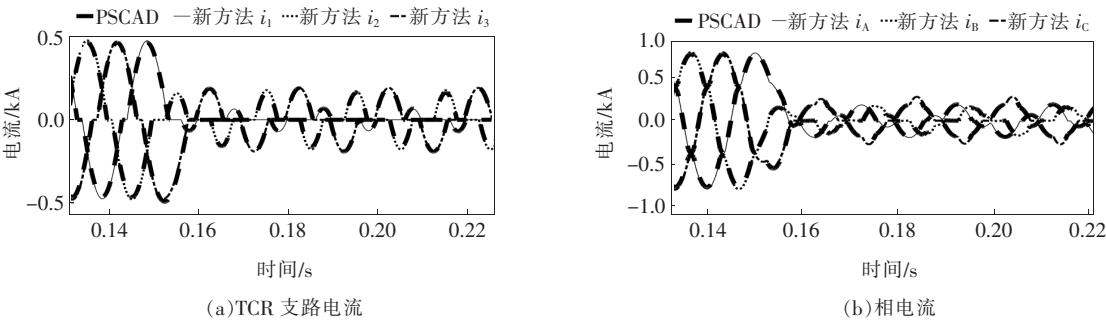


图 9 A 相电压幅值由 10 突变为 5 kV 且三相触发角由 100°突变为 145°时新方法 与 PSCAD 对于 SVC 仿真结果比较

Figure 9 Simulation results comparison when using the new method and the PSCAD program with phase-A voltage amplitude changes from 10 to 5 kV and three-phase firing angles change from 100° to 145° for SVC

表 1 SVC 仿真结果误差率

Table 1 SVC simulation percent errors %

仿真算例 序号	误差率	
	TCR 支路电流	相电流
1	0.03	0.05
2	0.13	0.14
3	0.15	0.20
4	0.07	0.09
5	0.23	0.26

表 2 新方法 与 PSCAD 仿真 SVC 耗时比较

Table 2 Time-consumption comparison using the new method and the PSCAD program for SVC s

仿真算例 序号	耗时	
	PSCAD	新方法
1	5.016	1.633
2	6.103	1.856
3	5.984	1.862
4	7.442	1.974
5	7.701	1.982

3.2 TCSC 仿真算例

图 2 中设 TCSC 的电容 $C_a=C_b=C_c=501.4\text{ }\mu\text{F}$, 电感 $L_a=L_b=L_c=2.01\text{ mH}$, 初始触发角 $\alpha_0=160^\circ$ 。输入为三相对称的电流源:

$$\begin{aligned} i_A &= I_{Am} \sin(\omega t) \\ i_B &= I_{Bm} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_C &= I_{Cm} \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \tag{28}$$

其中, $I_{Am}=I_{Bm}=I_{Cm}=2\sqrt{2}\text{ kA}$, $\omega=2\pi f=100\pi$ 。

稳态情况下、三相电流源幅值由 $2\sqrt{2}$ 突变为 $3\sqrt{2}\text{ kA}$ 、C 相电流源幅值由 $2\sqrt{2}$ 突变为 $1.2\sqrt{2}\text{ kA}$ 、三相触发角由 160° 突变为 170° 、C 相电流源幅值由 $2\sqrt{2}$ 突变为 $2.7\sqrt{2}\text{ kA}$ 且三相触发角由 160° 突变为 170° 时(突变时刻均为 $t=0.2\text{ s}$ 时), 新方法和 PSCAD 仿真结果的比较如图 10~14 所示。各采样点误差率的平均值如表 3 所示, 新方法与 PSCAD 仿真耗时比较如表 4 所示。结果再次表明, 新方法在不降低计算精度的前提下有效提高了计算效率。

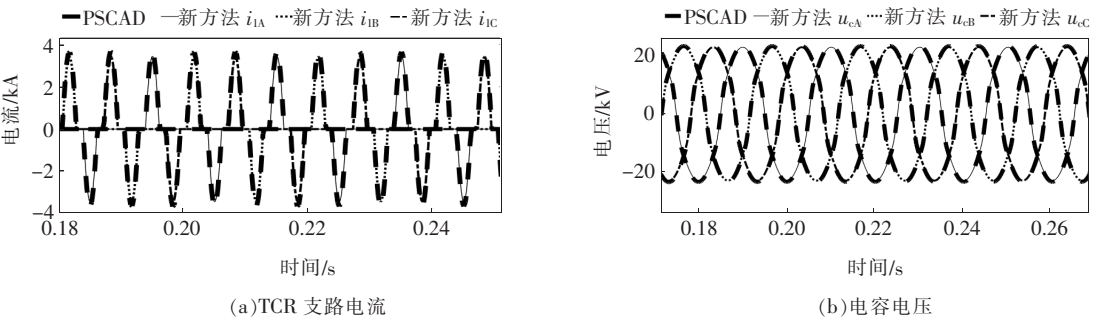


图 10 稳态情况下新方法 与 PSCAD 对于 TCSC 仿真结果比较

Figure 10 Simulation results comparison when using the new method and the PSCAD program under steady state for TCSC

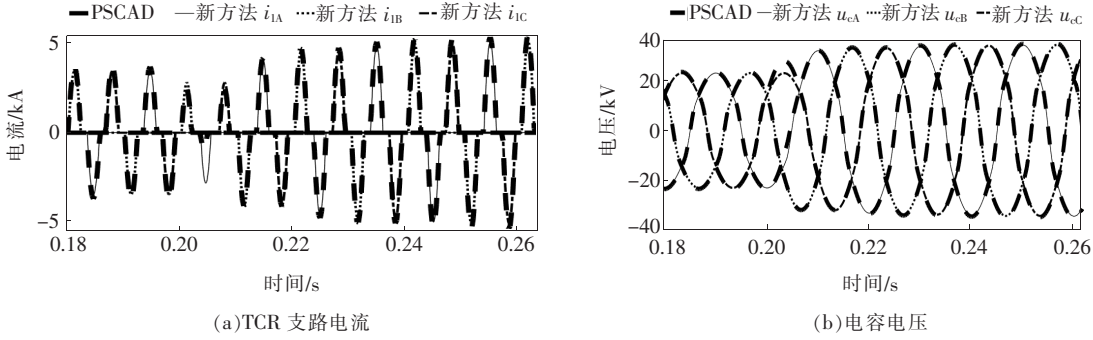


图 11 三相电流幅值由 $2\sqrt{2}$ 突变为 $3\sqrt{2}$ kA 时新方法与 PSCAD 对于 TCSC 仿真结果比较

Figure 11 Simulation results comparison when using the new method and the PSCAD program with three-phase current amplitudes change from $2\sqrt{2}$ to $3\sqrt{2}$ kA for TCSC

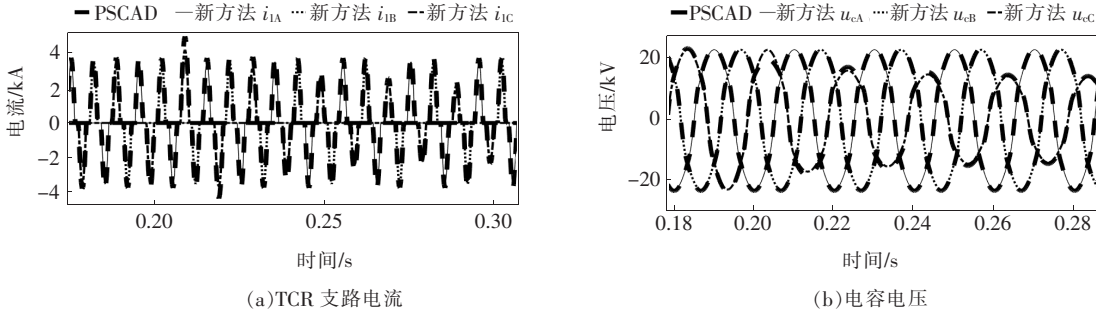


图 12 C 相电流幅值由 $2\sqrt{2}$ 突变为 $1.2\sqrt{2}$ kA 时新方法与 PSCAD 对于 TCSC 仿真结果比较

Figure 12 Simulation results comparison when using the new method and the PSCAD program with phase-C current amplitude changes from $2\sqrt{2}$ kA to $1.2\sqrt{2}$ kA for TCSC

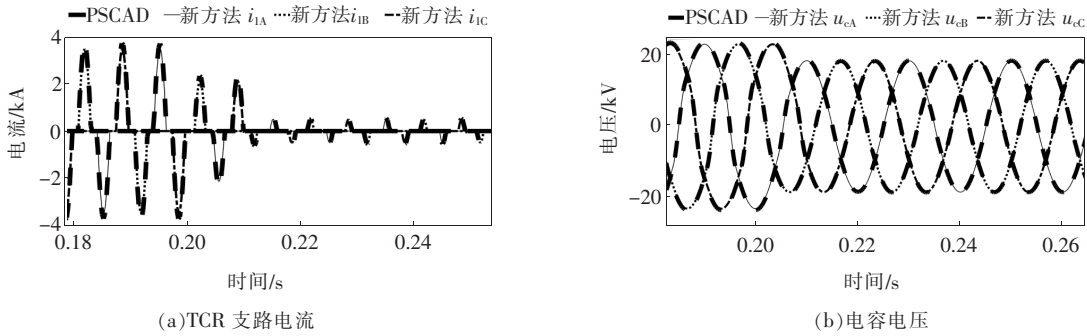


图 13 三相触发角由 160° 突变为 170° 时新方法与 PSCAD 对于 TCSC 仿真结果比较

Figure 13 Simulation results comparison when using the new method and the PSCAD program with three-phase firing angles change from 160° to 170° for TCSC

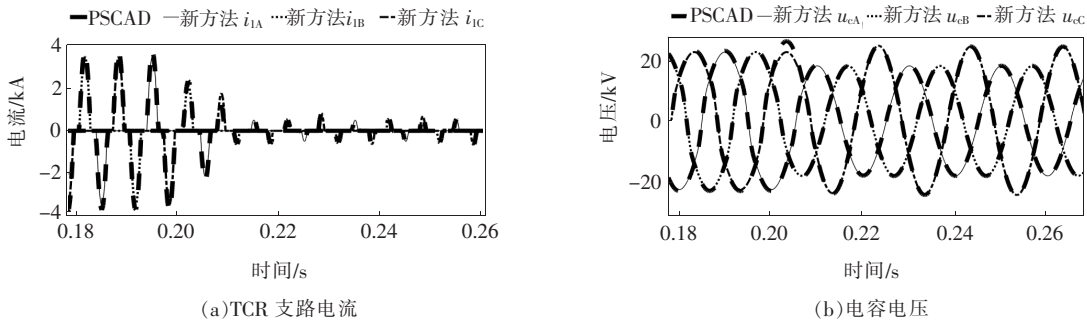


图 14 C 相电流幅值由 $2\sqrt{2}$ 突变为 $2.7\sqrt{2}$ kA 且三相触发角由 160° 突变为 170° 时新方法与 PSCAD 对于 TCSC 仿真结果比较

Figure 14 Simulation results comparison when using the new method and the PSCAD program with phase-C current amplitude changes from $2\sqrt{2}$ to $2.7\sqrt{2}$ kA and three-phase firing angles change from 160° to 170° for TCSC

表 3 TCSC 仿真结果误差率

Table 3 TCSC simulation percent errors %		
仿真算例 序号	误差率	
	TCR 支路电流	电容电压
1	0.05	0.07
2	0.23	0.18
3	0.29	0.22
4	0.11	0.15
5	0.26	0.38

表 4 新方法 与 PSCAD 仿真 TCSC 耗时比较
Table 4 Time-consumption comparison using the new method and the PSCAD program for TCSC s

仿真算例 序号	耗时	
	PSCAD	新方法
1	6.212	1.546
2	7.339	1.832
3	7.058	1.765
4	7.295	1.759
5	7.286	2.066

4 结 语

该文提出一种 SVC 和 TCSC 电磁暂态快速模拟新方法,在不降低计算精度的前提下,较大幅度提升了仿真计算的速度,得到以下主要结论:

1)当晶闸管通断状态不变时,SVC 和 TCSC 的状态方程形式不变。利用这一特点,并引入正弦辅助变量,可建立 SVC 和 TCSC 分段时不变齐次线性状态方程;

2)采用矩阵指数法求解状态方程,并用缩放平方法计算矩阵指数,稳定性好,效率高。

3)在稳态情况和对称及不对称故障状态下,新方法都能与传统的电磁暂态仿真软件 PSCAD 所得结果吻合良好,耗时至少降低 66%。

在较大规模系统中进一步验证该文算法的可行性和可靠性是下一步的努力方向。

参考文献:

[1] 嵇康, 邵能灵, 刘剑, 等. 基于暂态电压的多端柔性直流线路保护方案[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 3-10.

Ji Kang, TAI Nengling, LIU Jian, et al. Protection scheme for multi-terminal VSC-HVDC lines based on transient voltage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 3-10.

[2] 雷前, 鲍伟, 瞿海妮, 等. 多馈入直流系统无功补偿选址研究[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 56-60.

LEI Qian, BAO Wei, QU Haini, et al. Site selection for reactive power compensation of multi-infeed HVDC systems[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 56-60.

[3] 方红伟, 方思远, 朱彦, 等. TCSC 改善波浪发电系统的性能分析[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(4): 5-11.

FANG Hongwei, FANG Siyuan, ZHU Yan, et al. Performance improvement analysis of wave power generation by TCSC[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(4): 5-11.

[4] Yang Y, Zhu X, Gao L, et al. Look-up table approaches for TCSC impedance control considering thyristor conduction characteristic[J]. The Journal of Engineering, 2017, 13(1): 1408-1412.

[5] 唐伦, 丁理杰, 史华勃, 等. 用于大规模电磁暂态模型自动生成的拓扑分层识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 100-108.

TANG Lun, DING Lijie, SHI Huabo, et al. Topology hierarchical identification method for automatic model generation of large-scale electromagnetic transient simulation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 100-108.

[6] Piyasinghe L, Miao Z, Khazaei J, et al. Impedance model-based SSR analysis for TCSC compensated type-3 wind energy delivery systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 179-187.

[7] 黄杰, 陈武晖, 董德勇, 等. 面向风电场 SSO 抑制的 TCSC 参数电磁暂态智能优化方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2411-2417.

HUANG Jie, CHEN Wuhui, DONG Deyong, et al. EMTP-based smart optimization of TCSC parameters oriented for mitigating wind farm SSO[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2411-2417.

[8] Jovcic D, Pahalawaththa N, Zavahir M, et al. SVC dynamic analytical model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1455-1461.

[9] Jovcic D, Pillai G N. Analytical modeling of TCSC dy-

- namics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1097-1104.
- [10] Kotian S M, Shubhanga K N. Dynamic phasor modeling and simulation[C]//Annual IEEE India Conference (INDICON), New Delhi, 2015.
- [11] 鄂志君, 房大中, 陈家荣, 等. 基于晶闸管控制电抗器的 FACTS 动态相量模型[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 26-30.
- E Zhijun, FANG Dazhong, CHEN Jiarong, et al. Dynamic phasor models of TCR based FACTS[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 26-30.
- [12] 党杰, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 计及电抗器支路电阻的 TCSC 动态相量法模型[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 542-545.
- DANG Jie, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Dynamic phasors model of TCSC considering resistance of reactor branch[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 542-545.
- [13] Kotian S M, Shubhanga K N. Design of a subsynchronous damping controller using a dynamic phasor-based model of TCSC[C]//Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE), Bangalore, 2016.
- [14] Jusan F C, Gomes S, Taranto G N. SSR results obtained with a dynamic phasor model of SVC using modal analysis[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(6): 571-582.
- [15] 徐得超, 张星, 何飞, 等. 电力系统机电-电磁混合仿真边界解耦算法研究[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1130-1137.
- XU Dechao, ZHANG Xing, HE Fei, et al. Research on power system electromechanical-electromagnetic hybrid simulation algorithm based on boundary decoupling[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1130-1137.
- [16] 刘俊, 孙惠文, 吴柳, 等. 电力系统暂态稳定性评估综述[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 44-53+122.
- LIU Jun, SUN Huiwen, WU Liu, et al. Overview of transient stability assessment of power systems[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 44-53+122.
- [17] 张志霞, 朴在林, 郭丹, 等. 一种应用于电力系统的锁相环[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 250-254+222.
- ZHANG Zhixia, PIAO Zailin, GUO Dan, et al. A kind of phase-locked loop for power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 250-254+222.
- [18] Higham N J. The scaling and squaring method for the matrix exponential revisited[J]. SIAM Review, 2005, 51(4): 747-764.