

[电容补偿]

可控串联电容补偿装置建模及应用仿真：一种基于 Matlab/PSB 的方法

文/广东电网有限责任公司阳江供电局 任建明

可控串联电容补偿装置是柔性交流输电系统的重要一员，为电力系统稳定运行提供可靠支撑。本文基于 Matlab/PSB 搭建三相输电系统以及 TCSC 模型。在 Simulink 环境下，对三相电力系统进行静态和暂态的仿真，研究 TCSC 对电力系统稳态潮流以及暂态稳定性的影响。

柔性交流输电系统（Flexible AC Transmission System, FACTS）是综合电力电子技术、微处理和微电子技术、通信技术和控制技术而形成的用于灵活快速控制交流输电的新技术。比较常见的 FACTS 包括静止无功补偿器（Static Var Compensator, SVC）、静止同步串联补偿器（Static Synchronous Series Compensator, SSSC）和可控串联补偿装置（Thyristor Controlled Series Compensator, TCSC）等。TCSC 作为 FACTS 家族中的重要成员之一，可以灵活控制电力系统的潮流、阻尼系统的低频振荡和次同步谐振等。在工程应用方面，TCSC 在美国的亚利桑那州和俄勒冈州及瑞典等地已取得了显著的经济效益。

我国能源分布不均、能源中心与负荷中心之间的不协调给电网带来了电压不稳定、系统振荡和潮流调控复杂等诸多风险与挑战。因此，需要提高输电系统的输电能力和调控能力，才能有效解决输电难题。这为 TCSC 在电力系统中的实地应用提供了良好的机遇。我国在甘肃电网碧口-成县-天水系统、天生桥至广东的 500 kV 输

电线路等工程中应用了 TCSC，显示了 TCSC 对电网潮流的调节能力。此外，我国的电力研究人员积极参与到 TCSC 的研究与开发之中，包括对输电线路继电保护的影响、对电压的调节作用、对次同步振荡的抑制作用、对交直流系统输电能力的影响和 TCSC 控制策略等。

Matlab/Simulink 是 Matlab 的一个用于实现工程问题的模型化及动态仿真的产品，其中 SimPowerSystems 模块（SimPowerSystems Block, PSB）提供了典型的电气设备和元件，如变压器、传输线、发电机和电力电子器件等。在电力系统分析、发电机分析和电力电子电路分析等都有优异的表现，受到科研人员的青睐。

本文首先概述 TCSC 的基本工作原理；然后基于 Matlab/PSB，实现 TCSC 建模以及含 TCSC 的电力系统建模；随后，基于 Matlab/Simulink 对含 TCSC 的电力系统进行静态和暂态仿真，并研究 TCSC 对电力系统的电压以及传输功率的影响；最后对全文进行总结，并给出本文的结论。

可控串联补偿装置的工作原理

可控串联补偿装置主要由串联电容和含有分路电抗、反并联晶闸管的并联回路所组成,同时包含作为过电压保护的氧化锌避雷器 MOV 和旁路断路器,如图 1 所示。

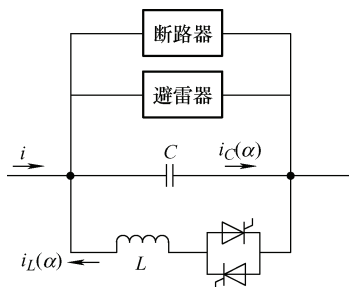


图 1 TCSC 原理图

为了使串补电容可变,用晶闸管可控电抗器 (Thyristor controlled reactor, TCR) 的可控感抗抵消部分固定容抗,TCR 采用触发角控制。TCR 支路的等值电抗为

$$X_L(\alpha) = X_{L0} \cdot \frac{\pi}{\pi - 2\alpha\pi/180^\circ - \sin(2\alpha\pi/180^\circ)} \quad (1)$$

TCSC 基频等值阻抗为电容支路的电抗 X_C 与 TCR 支路的电抗 $X_L(\alpha)$ 并联求得

$$X_{tcsc}(\alpha) = X_C // X_L(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_C + X_L(\alpha)} \quad (2)$$

X_{tcsc} 基于 X_C 取标么值 X_{tcsc}'

$$X_{tcsc}' = X_{tcsc} / X_C \quad (3)$$

X_{tcsc}' 与触发角 α 关系示意图如图 2 所示。具体计算参数为: 频率 $f=50$ Hz, 电容 $C=109.855 \mu\text{F}$, 电感 $L=0.043$ H, 则 $X_C=28.9675 \Omega$, $X_{L0}=13.5088 \Omega$ 。在控制范围内, 触发角在 145° 附近时出现谐振, 实际运行时要避免。TCSC 等值阻抗与触发角 α 的关系示意图如图 2 所示。

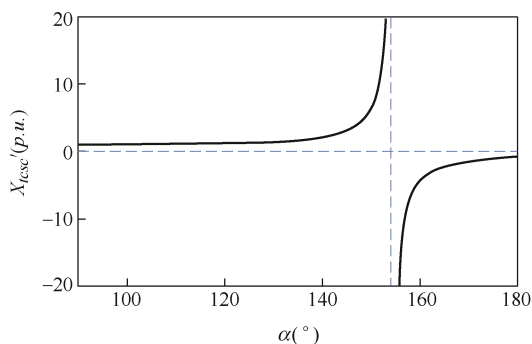


图 2 TCSC 等值阻抗与触发角 α 的关系示意图

基于 Matlab/PSB 的 TCSC 建模

1. 简化电力系统建模

在 Matlab/PSB 中搭建简化电力系统模型,如图 3 所示。该系统为单机单负荷等值交流系统,模型包括发电机模型、三相变压器模型、三相传输线模型、三相负荷模型以及 TCSC 模型。此外,传输线短路故障模型也接入至电力系统模型中。详细建模如图 3 所示。

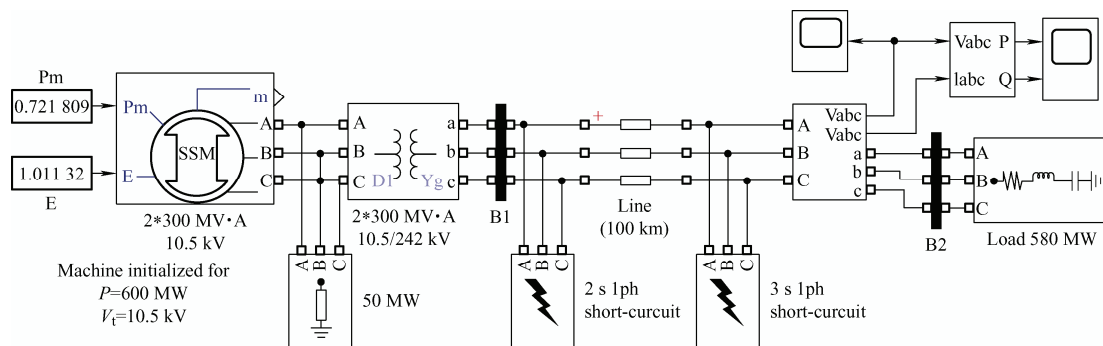


图 3 简化电力系统模型

(1) 发电机建模

发电机模型选择同步发电机模型,输出功率 2×300 MW, 额定电压 10.5 kV, 设为 PV 节点, 发电机端口挂 50 MW 的负载。

(2) 三相变压器建模

三相升压变压器的变比为 10.5 kV/242 kV。为了限制变压器产生的三次谐波, 变压器采用 Yg/d1 接法。变压器低压侧采用三角形联结, 高压侧采用星型联结。其

余参数设置见表 1。

表 1 三相变压器参数

参数		值
额定功率 $P_n/V \cdot A$		$2 \times 300e^6$
额定频率 f_n/Hz		50
绕组 1 参数	电压比 $V_1 Ph-Ph/V_{rms}$	$10.5e^3/1.732$
	电阻 $R1/p.u.$	0.002
	电感 $L1/p.u.$	0.08
绕组 2 参数	电压比 $V_2 Ph-Ph/V_{rms}$	$242e^3$
	电阻 $R2/p.u.$	0.002
	电感 $L2/p.u.$	0.08
磁阻 $R_m/p.u.$		500
磁感 $L_m/p.u.$		500
饱和特性	电流 $i_1/p.u.$	0.002 4
	磁通 $\phi_{i1}/p.u.$	1.2
	电流 $i_2/p.u.$	1.0
	磁通 $\phi_{i2}/p.u.$	1.52
初始通量	磁通 $\phi_{oA}/p.u.$	0.8
	磁通 $\phi_{oB}/p.u.$	-0.8
	磁通 $\phi_{oC}/p.u.$	0.7

(3) 三相传输线建模

传输线采用三相分布式导线模型，设置频率为 50 Hz，具体参数设置见表 2。

表 2 三相线路参数

参数		值
相数 N		3
频率 f_n/Hz		50
电阻	$r_1/(\Omega/km)$	0.012 73
	$r_0/(\Omega/km)$	0.386 4
电感	$l_1/(H/km)$	$0.933\ 7e^{-3}$
	$l_0/(H/km)$	$4.126\ 4e^{-3}$
电容	$C_1/(F/km)$	$12.74e^{-9}$
	$C_0/(F/km)$	$7.751e^{-9}$
线路长度/km		100

(4) 三相负荷建模

负荷模型设为 PQ 节点，大小为 580 MW，其余参数见表 3。

表 3 三相负荷参数

参数	值
结构	Y 接地 Y (grounded)
额定线电压 V_n/V_{rms}	$220e^3$
额定频率 f_n/Hz	50
有功 P/W	$580e^6$
感性无功 Q_L (positive var)	100
容性无功 Q_C (negative var)	100

(5) 短路故障建模

短路故障模型设置在传输线两端。具体故障参数设置见下文仿真算例。

2. TCSC 建模

三相 TCSC 模型如图 4 所示。

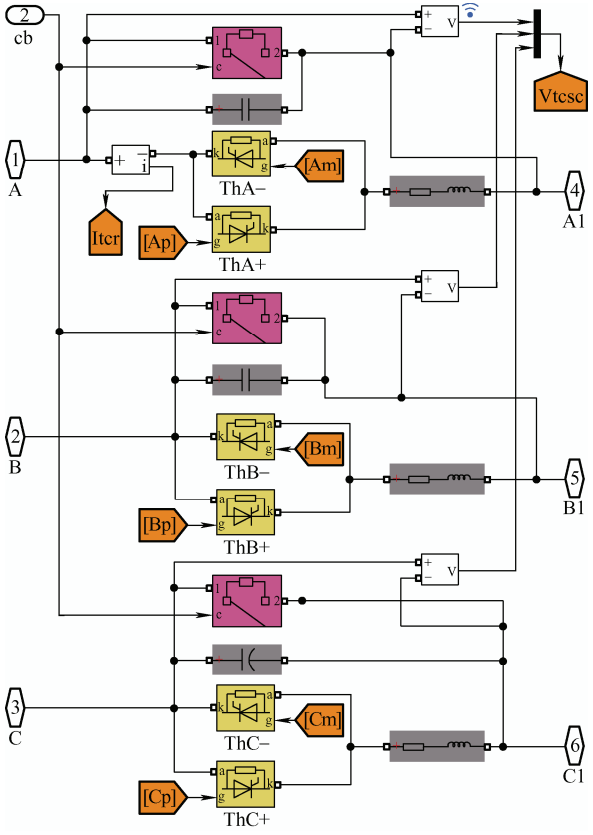


图 4 三相 TCSC 模型

TCSC 等效阻抗的改变就是通过改变晶闸管的触发角 α 实现的。模型仿真的是三相电力系统，每相均串联一个 TCSC 模块，每个 TCSC 模块具有一对反并联晶闸管，系统共有 6 个晶闸管。利用脉冲发生器的输出脉冲分别控制 6 个晶闸管的导通。线路的感抗为 $0.041\ 3\ \Omega$ ，TCSC 的容抗值设置比线路感抗略大，以补偿线路的感抗，具体参数见表 4。

表 4 三相 TCSC 参数

参数		值
TCR 电感/H		0.043
TCSC 电容/F		$21.977e^{-6} \times 5$
质量因子		500
晶闸管缓冲电路	电阻 R/Ω	5000
	电容 C/F	$50e^{-9}$
晶闸管数据	导通电阻 R_{on}/Ω	$1e^{-2}$
	正向平均压降 V_f/V	0

含 TCSC 的电力系统建模如图 5 所示。

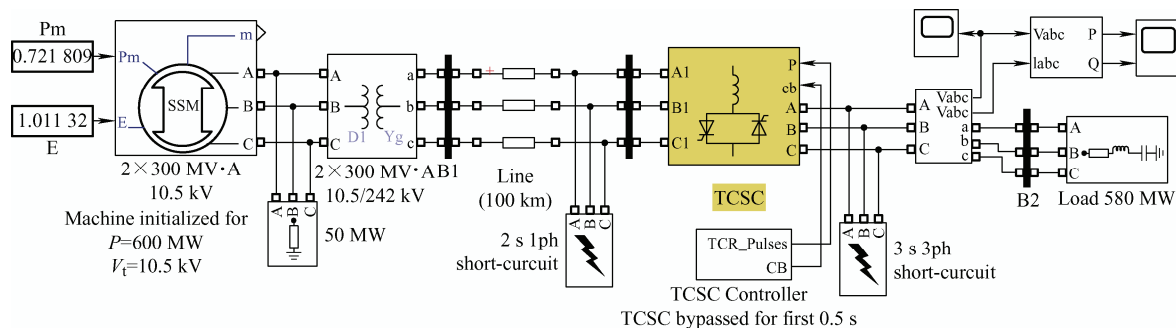


图 5 含 TCSC 的电力系统模型

含 TCSC 的电力系统稳态及暂态仿真

1. 含 TCSC 的电力系统稳态仿真

设置在 0.5 s 前，三相线路上的 TCSC 被旁路；在 0.5 s 时刻，TCSC 投入，监测仿真过程中传输线路输送功率和传输线末端负荷侧母线（母线 2，B2）的电压变化，结果如图 6 和图 7 所示。

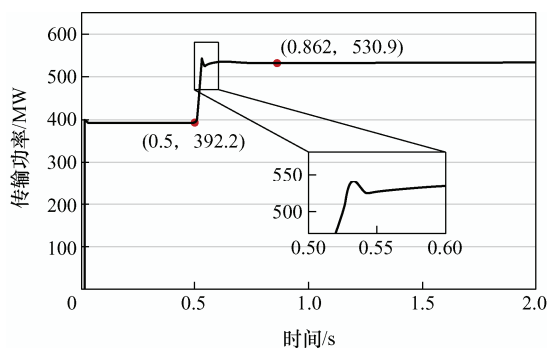


图 6 TCSC 投入后线路输送功率变化

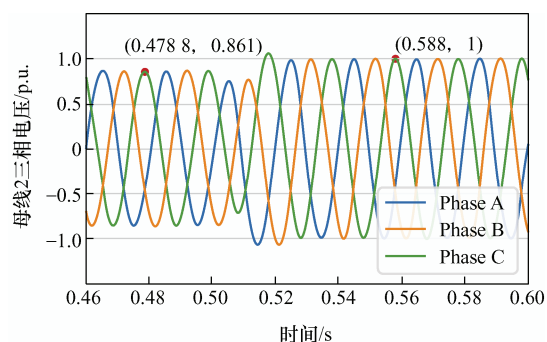


图 7 TCSC 投入后母线 2 电压波形

由仿真结果可以看出，TCSC 投入前，输送功率为 392.2 MW，对于发电机发出 600 MW 功率来

说，线路的输送能力明显不足。0.5 s 时，TCSC 投入，线路输送功率明显上升；在 0.862 s 时达到稳定，此时输送功率为 530.9 MW，线路输送功率提高了 35.4%，TCSC 提高线路输送功率的能力得以体现。投入 TCSC 前，母线 2 的电压峰值为 0.861 p.u.；投入 TCSC 后，母线 2 的电压峰值为 1 p.u.，提高了 16.1%。

上述结果表明，TCSC 投入到合适的输电线路中，可以提高输电线路传输功率，也可以提高负荷侧电压水平，进而提高电力系统稳定性。

2. 含 TCSC 的电力系统暂态仿真

(1) 单相短路故障

在 2 s 时设置 A 相瞬时性短路故障，故障持续时间为 0.1 s，具体故障参数见表 5。

表 5 A 相瞬时性短路故障参数

参数	值
初始状态	0
故障	A-Ground
故障发生时间/s	2
故障切除时间/s	2.1
故障电阻 R_{on}/Ω	0.001
大地电阻 R_g/Ω	1

仿真结果如图 8 和图 9 所示。

由仿真结果可以看出，2 s 时发生单相瞬时性短路故障，线路传输功率发生跌落，在 260 MW 附近振荡，母线 2 电压 A 相电压幅值降至 0.015 p.u.，B 相电压略下降，幅值降为 0.88 p.u.，C 相电压幅值升高至 1.22 p.u.。

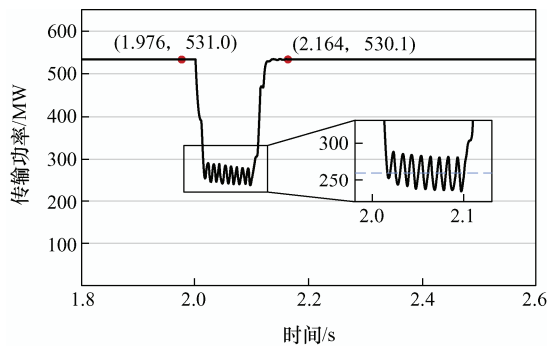


图 8 发生单相瞬时性短路时线路传输功率变化

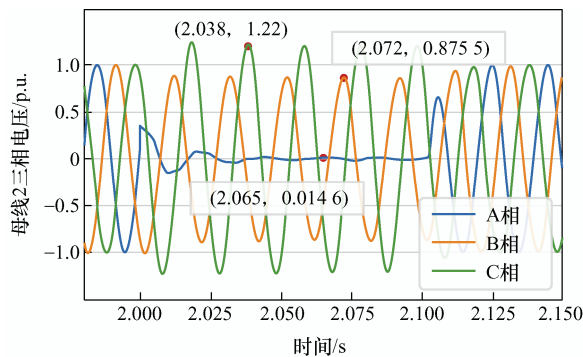


图 9 发生单相瞬时性短路时母线 2 电压变化

在 0.1 s 后故障消除，线路传输功率迅速恢复至正常水平（530.1 MW），母线 2 的电压也迅速恢复至故障前的水平（1.00 p.u.）。

(2) 三相短路故障

在 3 s 时设置三相瞬时性短路故障，具体故障参数见表 6。

表 6 三相瞬时性短路故障参数

参数	值
初始状态	0
故障	ABC-Ground
故障发生时间/s	3
故障切除时间/s	3.1
故障电阻 R_{on}/Ω	0.001
大地电阻 R_g/Ω	1

仿真结果如图 10 和图 11 所示。

由仿真结果可以看出，3 s 时发生三相瞬时性短路故障，线路传输功率发生大幅跌落，甚至出现潮流反向，有功反向潮流最大达-430.2 MW。母线 2 电压幅值降至 0。

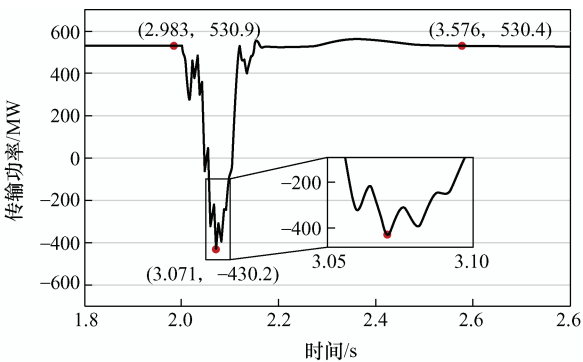


图 10 发生三相瞬时性短路时线路传输功率变化

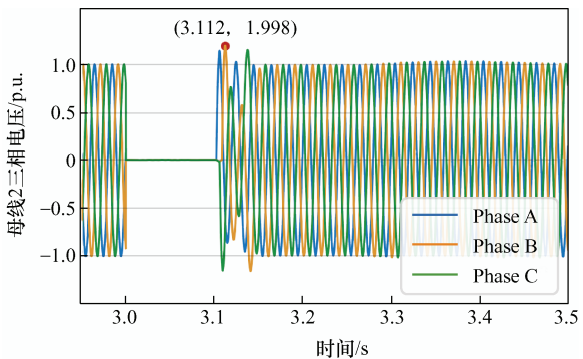


图 11 发生三相瞬时性短路时母线 2 电压变化

在 0.1 s 后故障消除，线路传输功率经过 0.5 s 的微幅波动后恢复至正常水平（530.4 MW）；母线 2 的电压有微幅波动，最大电幅值为 1.198 p.u.，经过 0.5 s 后，母线 2 的三相电压均恢复至故障前水平。

结束语

本文利用 Matlab/PSB 实现 TCSC 建模以及三相输电系统和故障系统建模，并将 TCSC 模块接入至输电系统中，提供了一组有效的 TCSC 模型参数及系统仿真参数。

此外，在 Simulink 的环境下，本文对三相电力系统进行稳态仿真和暂态仿真。通过比较 TCSC 的投入前后线路输送功率的变化，得出稳态下，TCSC 能增大线路输送功率，提升负荷侧母线电压并降低输电损耗的结论。进一步，本文分别设置系统发生单相和三相短路故障，研究含 TCSC 的电力系统在不同故障下的暂态稳定性。仿真结果表明，暂态时，TCSC 能够抑制系统功率振荡，提高系统稳定性。EA

（收稿日期：2021.03.10）