

Power Flow Calculation Analysis and Modeling with TCSC

Changge Wang

Chongqing University, Chongqing, 400044, China

Abstract

Thyristor controlled series capacitor (TCSC) is a kind of capacitor which is used to control the active power flow of transmission line in power system to keep a certain value. In this paper, TCSC is modeled as newton-raphson power flow algorithm to reduce the complexity of the original power flow algorithm and enhance its availability. In this paper, the influence of TCSC is considered as two injected loads on the sending bus and the auxiliary bus. The reactive load is updated during the iteration until it converges. The parameters of TCSC are calculated according to the voltage of connecting bus and the specified active power. The model addresses the issue of selecting appropriate initial values for TCSC control parameters and verified in IEEE 118 system.

Keywords

power flow calculation; newton-raphson power flow algorithm; FACTS; TCSC; modeling

计及 TCSC 的电力系统潮流计算分析与建模

王长歌

重庆大学, 中国 · 重庆 400044

摘要

晶闸管控制串联电容器 (TCSC) 是一种用于控制电力系统输电线路有功潮流保持某一特定值的电容器。论文考虑了 TCSC 的加入对潮流计算的影响, 将 TCSC 简单建模为牛顿拉夫逊潮流算法, 以降低原潮流算法的复杂度, 增强其可用性。论文将 TCSC 的影响考虑为发送总线和辅助总线上的两个注入负载, 在迭代过程中对无功负载进行更新, 直到收敛。TCSC 参数是根据连接母线的电压和指定有功功率计算出来的, 该模型解决了选择合适的 TCSC 控制参数初值的问题。本文最后采用 IEEE 118 总线标准测试系统验证了所提出的 TCSC 模型。

关键词

潮流计算; 牛顿拉夫逊潮流算法; FACTS; TCSC; 建模

1 引言

柔性交流输电系统 (FACTS) 器件被广泛应用于电力系统中, 以控制系统参数, 如潮流、传输线阻抗、母线电压幅值及相位角。因此, 嵌入 FACTS 可以用来改善电压剖面, 最小化有功和无功损耗, 增加系统的负载能力, 提高电力系统的安全性和稳定性^[1,2]。FACTS 可分为串联、并联和串—并联组合设备。常用的并联设备是静态无功补偿器 (SVC) 和静态同步补偿器 (STATCOM)。而串—并联组合设备有统一潮流控制器 (UPFC)、线间潮流控制器 (IPFC) 和广义统一潮流控制器 (GUPFC)^[3]。除此之外, FACTS 也可以根据它们所使用的电力电子设备进行分类, 如可变阻抗控制器设备和电压源转换器 (VSC) 设备。

通常, 将 FACTS 控制器加入现有的潮流算法中, 如牛顿拉夫逊潮流算法, 会增加编程代码的复杂性^[4], 原因如下:

【作者简介】王长歌 (2000–), 男, 中国山东泰安人, 硕士, 从事电气工程研究。

首先, 将 FACTS 纳入电力系统需要增加新的线路和参考总线。其次, FACTS 的串联或并联阻抗必须添加到原始导纳矩阵。再次, 必须将 FACTS 所贡献的电能纳入电力系统潮流计算。最后, 需要新的代码来计算与 FACTS 相关的雅可比子矩阵。

因此, 基本的潮流计算方法应该改变。在这方面, 针对不同类型的 FACTS 设备 (如 IPFC^[5]、UPFC^[6,7]、GUPFC^[8] 和 SSSC^[9]) 的建模进行了一些研究。TCSC 可用于控制沿指定路径的潮流, 因此, 该装置可以提高系统的暂态和动态稳定性, 提高系统的功率传递能力, 缓解次同步谐振^[10,11]。

为了揭示 TCSC 装置在电力系统中的优势, 简化 TCSC 装置建模的潮流解决方案是至关重要的。因此, 在 [4] 中提出了一个全面的 TCSC 模型。在该模型中, TCSC 的电抗被表示为自变量, 可以在每次迭代中计算。此外, 应扩展雅可比矩阵的大小, 以包含 TCSC 的状态变量。这里需要指出的是, TCSC 状态变量的初始值的选取对于快速收敛是非常关键的。为此, 提出了基于发射角的 TCSC 模型来计算 [12] 中 TCSC 的参数。

论文提出将简单高效的 TCSC 建模引入 NR 潮流算法, 以降低复杂度, 避免雅可比矩阵的修改, 增强原潮流代码的实用性。与传统模型相比, 该模型迭代次数少, 计算时间短。同时, 保留了原有的导纳和雅可比矩阵的结构和对称性, 并易于应用稀疏性技术。该模型解决了选择合适的 TCSC 控制参数初值的问题。迭代过程中可以检查 TCSC 参数是否在限定范围内, 收敛后更新最终值。采用 IEEE 118 总线标准测试系统对所提出的 TCSC 模型进行了测试。

2 TCSC 简介

TCSC (Thyristor-Controlled Series Capacitor) 是一种用于电力系统中的灵活交流输电装置, 它通过控制串联电容器的电抗来调节电力系统中的电压和潮流。TCSC 对电力系统潮流计算有一定的影响, 下面列出了几个主要方面:

- ①电压调节: TCSC 能够根据电力系统的负荷和运行条件来调节串联电容器的电抗, 从而实现对电压的调节。
- ②潮流方向: TCSC 的调节可以改变电力系统中的潮流方向。
- ③潮流大小: TCSC 的调节还可以影响潮流的大小。
- ④耦合效应: 在电力系统中, 各个元件(例如输电线路、变压器等)之间存在耦合效应, 即彼此之间的相互影响。

综上所述, TCSC 作为一种灵活的电力系统控制装置, 可以对电力系统的潮流计算产生重要影响。因此, 在引入 TCSC 后, 需要进行充分的系统分析和潮流计算, 以确保其在电力系统中发挥积极作用。

3 TCSC 简要模型

所提出的 TCSC 模型是基于功率注入的方法, 系统总线数根据 TCSC 数量增加, 其中, 每个增加一个 TCSC 应增加一个参考总线。

图 1 给出了发送总线 S 和接收总线 R 之间的 TCSC 实现, 其中 A 总线为辅助总线(参考总线), 这个装置是用来调整发送和接收总线之间的有功功率等于指定的值 PSP 。同时, 该设备可以简单地建模为两个注入在发送总线和辅助总线的负载, 如图 2 所示。这些负荷的有功功率固定在给定的 PSP 值, 而无功功率则是通过应用基尔霍夫电流定律(KCL)计算出的。

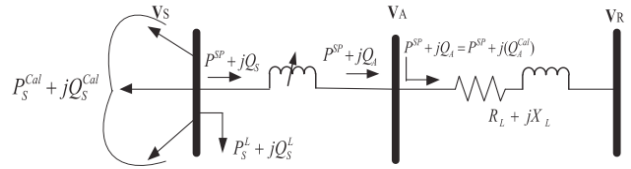


图 1 总线 S 和总线 R 之间的 TCSC 实现

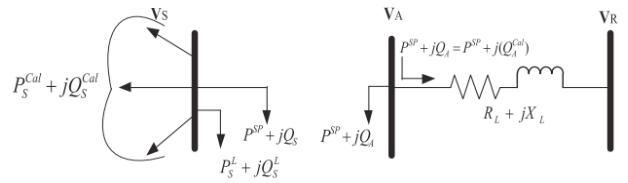


图 2 简单的 TCSC 模型

潮流算法收敛后, 利用式(1)可以得到 TCSC 的最终电抗。

$$X_{TCSC} = \frac{V_S \times V_A \times \sin(\delta_S - \delta_A)}{P^{SP}} \quad (1)$$

每次迭代利用潮流计算更新在发送和辅助总线上注入的无功功率, 将开发的 TCSC 模型实现为 NR 潮流算法的求解过程如图 3 所示。

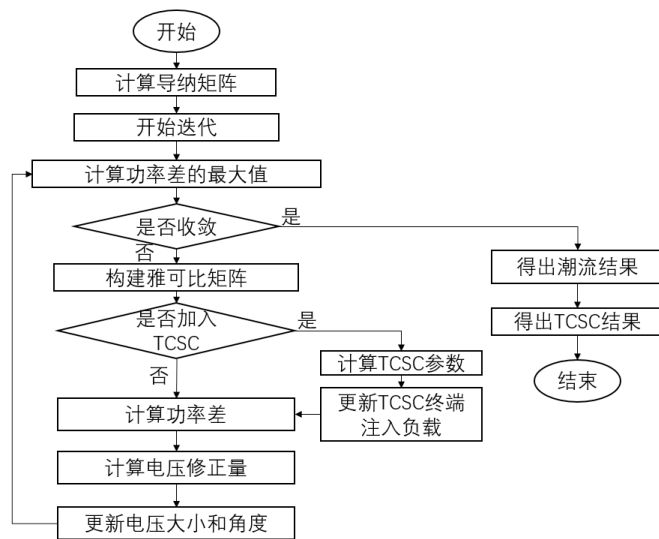


图 3 含 TCSC 模型的 NR 潮流流程图

4 算例与结果

论文提出的 TCSC 模型使用 IEEE 118 总线系统进行了测试。所选的收敛公差取 10^{-6} ，系统基准 MVA 为 100。两个 TCSC 放置在总线 23-32 和总线 65-38 之间。表 1 和表 2 给出了不同指定潮流下 TCSC 对发送母线、辅助母线和接收

母线电压的影响。在表 1 中，23-32 总线选择不同的指定功率（110、120、125MW），当 $X_{TCSC}=0.01678p.u$ 时，发送总线 23 的电压幅值由 0.9997p.u 提高到 1.00048p.u，而接收母线 32 电压幅值保持在 0.964p.u。

表 1 总线间连接 TCSC 的 IEEE 118 总线系统结果（23-32）

p ^{SP}	X _{TCSC} (p.u)	Voltage					
		Send Bus		Auxiliary Bus		Receive Bus	
		Mag. (p.u)	Angle (deg.)	Mag. (p.u)	Angle (deg.)	Mag. (p.u)	Angle (deg.)
Without TCSC		0.99971	0.37090	1.08706	-0.14598	0.964	0.26278
110	0.0409687	1.000444	0.25378	0.99894	0.20863	0.964	0.07876
120	0.0294171	1.000404	0.24367	0.99953	0.209879	0.964	0.07431
125	0.01678	1.00048	0.24010	1.00012	0.22005	0.964	0.078901

表 2 总线间连接 TCSC 的 IEEE 118 总线系统结果（65-38）

p ^{SP}	X _{TCSC} (p.u)	Voltage					
		Send Bus		Auxiliary Bus		Receive Bus	
		Mag. (p.u)	Angle (deg.)	Mag. (p.u)	Angle (deg.)	Mag. (p.u)	Angle (deg.)
Without TCSC		1.0050	1.005	-	-	0.96204	0.29858
190	0.165807	1.0050	0.44858	0.98678	0.124269	0.9574	-0.0730
200	0.1297881	1.0050	0.44633	0.989108	0.1740751	0.95700	-0.03873
205	0.117854	1.0050	0.44549	0.990066	0.1178544	0.95685	-0.02628

5 结论

论文提出了牛顿拉夫逊潮流算法中加入 TCSC 的一种建模方法。在该模型中，TCSC 总线由两个负载总线（发送总线和辅助总线）表示。在基于系统的迭代过程中，两母线注入的有功功率等于给定的有功功率，而无功功率则通过计算得出。收敛完成后，根据 TCSC 母线电压幅值和指定有功潮流，计算收敛后 TCSC 的最终参数。该模型具有较好的减少迭代次数和计算时间的能力，通过 IEEE 118 总线系统验证了所提出的 TCSC 模型在潮流算法中的应用。

参考文献

[1] Mahapatra S, Malik N, Raj S, et al. Constrained optimal power flow and optimal TCSC allocation using hybrid cuckoo search and ant lion optimizer[J]. Int J Syst Assur Eng Manag, 2022(13): 721-734.

[2] 周双.含FACTS装置的结构保持电力系统协调控制方法与应用[D].上海:上海交通大学,2019.

[3] Zhang X P, Rehtanz C, Pal B. Flexible AC transmission systems: modelling and control[J]. Springer Science & Business Media, 2012.

[4] Mohamed Ebeed, Ashraf Mostafa, Mohamed M. Aly, Francisco Jurado, Salah Kamel, Stochastic optimal power flow analysis of power systems with wind/PV/ TCSC using a developed Runge Kutta optimizer[J]. International Journal of Electrical Power &

Energy Systems,2023,152:142-615.

[5] 李娟,孙欣.计及风电不确定性和TCSC功率调节作用的最优潮流研究[J].电气自动化,2019,41(6):21-24.

[6] 黄梦喜,李啸骢,田友飞,等.含TCSC的电力系统潮流计算研究[J].电气开关,2012,50(1):25-29.

[7] Kamel S, Jurado F, Lopes J P. Comparison of various UPFC models for power flow control[J]. Electr Power Syst Res, 2015,121: 243-251.

[8] Kamel S, Jurado F, Chen Z, et al. Developed generalized unified power flow controller model in the Newton-Raphson power-flow analysis using combined mismatches method[J]. IET Gener Transm Distrib, 2016,10(9):2177-2184.

[9] Kamel S, Jurado F, Chen Z. Power flow control for transmission networks with implicit modeling of static synchronous series compensator[J]. Int J Electr Power Energy Syst, 2015(64):11-20.

[10] 付超楠,郭昆丽,杨帆.应用TCSC抑制电力系统次同步谐振的研究[J].电气工程学报,2018,13(1):23-29.

[11] 朱玮珂.TCSC减弱次同步谐振能力的仿真分析[J].电工电气, 2017(11):25-29.

[12] Mahapatra Sheila, Malik Nitin, Raj Saurav, et al. Constrained optimal power flow and optimal TCSC allocation using hybrid cuckoo search and ant lion optimizer[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2021(13): 721-734.