

TCSC 同步信号对抑制次同步振荡的影响研究

刘伟波 康积涛 何波 张利

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: TCSC 在次同步频率下的阻抗特性对于抑制次同步振荡非常有利,但其阻尼效果受到很多因素的影响,还需要对其进行详细深入的研究。在不同的同步信号下,TCSC 会呈现出不同的阻抗响应效果,运用测试信号法对 IEEE 第一标准模型在 PSCAD 平台下进行仿真表明,TCSC 同步信号对次同步电气阻尼的影响作用不大;通过对所设计的次同步附加阻尼控制器进行时域仿真,表明在不同的同步信号下,TCSC 都可以达到抑制次同步振荡的效果。

关键词: TCSC; 同步信号; 次同步振荡; 附加阻尼控制器; 测试信号法

Abstract: The impedance characteristics of TCSC in the subsynchronous frequency are very favorable to suppress subsynchronous oscillation. As the damping effect can be affected by many factors, it needs more detailed and in-depth research. TCSC shows different impedance response effect with different synchronizing signal. The simulation of IEEE first standard model in PSCAD platform using the test signal method shows that TCSC synchronizing signals have little effect on subsynchronous electrical damping. The time-domain simulation for the designed additional subsynchronous damping controller indicates that TCSC can suppress the subsynchronous oscillation with different synchronizing signals.

Key words: TCSC; synchronizing signal; subsynchronous oscillation; additional damping controller; test signal method

中图分类号: TM762 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)03-0028-04

0 引言

次同步振荡是电力系统中机电耦合作用引起的一种振荡失稳,其最大危害可对大型汽轮发电机组的转子轴系造成严重的破坏,是目前大型汽轮发电机组中必须解决的一个问题。目前对于次同步振荡的分析方法主要有:频率扫描分析法、机组作用系数分析法、时域仿真分析法、特征结构分析法、复转矩系数分析法等 [1]。

可控串联补偿技术(TCSC)是目前应用前景比较好的一种 FACTS 装置,具有投资少、设备简单、操作维护方便等优点。它在提高线路输送功率、阻尼功率振荡^[2]、提高系统暂态稳定性^[3]、实现动态潮流控制和抑制系统次同步振荡^[4]都能起到良好的作用。文献 [5] 提出运用测试信号法设计 TCSC 功率振荡阻尼控制器;文献 [6] 基于单机无穷大系统的模型建立了可控串补的状态空间描述,根据线性最优控制理论设计了可控串补控制器;文献 [7] 运用测试信号法设计了附加多模态次同步阻尼控制器。

TCSC 在次同步频率下的阻抗特性对于阻尼次同步振荡非常有利,但其阻抗效果受到很多因素的

影响,例如 TCSC 的控制方式^[8]、触发角大小、同步信号选取等等。这里首先介绍了 TCSC 的同步触发原理,比较了不同触发信号下的阶跃响应;运用测试信号法分析了 TCSC 对于电气阻尼的影响,最后对在不同的同步信号下对所设计的次同步阻尼控制器进行时域仿真,分析同步信号对次同步阻尼的影响。

1 TCSC 触发原理

TCSC 是由一个固定的电容器与一个通过可控硅控制的电抗器并联而成,如图 1 所示。TCSC 的同步触发脉冲是以同步信号过零点为基准的,电容电压 u_c 和线路电流 i_L 都可以作为阻抗控制中触发角的同步信号,不同的阻抗控制方式对 TCSC 的阻抗动态特性有显著的影响。

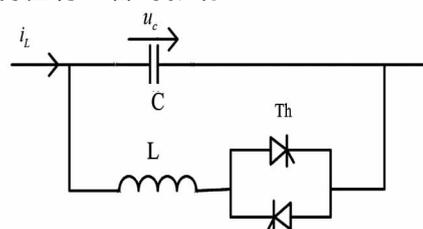


图1 TCSC 结构原理图

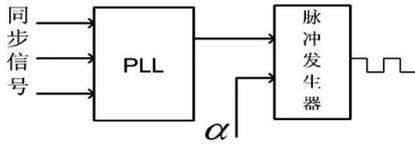


图2 TCSC 触发原理图

对 TCSC 采用开环定阻抗控制方式,令 TCSC 的特征参数 $\lambda = 2.65$ 。当分别采用线路电流和电容电压作为同步触发信号时,阻抗的阶跃响应如图 3 所示,从图中可以看出在电压同步方式下,TCSC 的阻抗阶跃响应^[9]会产生较大的过冲和超调,且需要较长时间才能进入稳定状态,而电流同步触发情况下,基频阻抗则不会产生过冲和超调现象,变化过程比较缓慢,相当于一阶惯性环节。

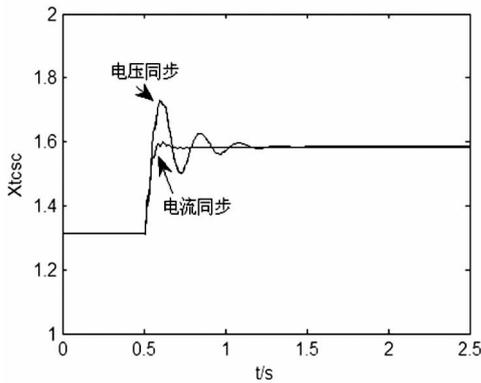


图3 不同同步信号下的阻抗阶跃响应

2 TCSC 抑制次同步振荡原理

TCSC 在同步频率下的阻抗是纯容性的,但是在次同步频率下的 TCSC 会呈现出一个非常不同的阻抗特性,对于阻尼次同步振荡非常有利。从经济因素考虑,一般将 TCSC 和固定串补共同使用以降低投资。

由复转矩系数法可知,在系统的轴系扭振分析中,在轴系的某一扭振频率附近满足机械阻尼系数和电气阻尼系数 D_m 之和 D_e 大于 0,则该轴系扭振是处于稳态的。

$$\begin{cases} \frac{\Delta \dot{T}_m}{\Delta \dot{\omega}} = D_m(\xi) + j \frac{1}{\lambda} K_m(\xi) \\ \frac{\xi \dot{T}_e}{\Delta \dot{\omega}} = D_e(\xi) + j \frac{1}{\lambda} K_e(\xi) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\Delta \dot{T}_m$ 为小扰动下发电机机械转矩增量; $\Delta \dot{T}_e$ 为小扰动下发电机电磁转矩增量; $\Delta \dot{\omega}$ 为同步角速度增量; D_m 、 D_e 分别为系统的机械阻尼系数和电气

阻尼系数^[10]。

$$D_e(\xi) = \text{Re} \left(\frac{\Delta \dot{T}_e}{\Delta \dot{\omega}} \right) \quad (2)$$

由式(2)可见,要使系统的电气阻尼为正, $\Delta \dot{T}_e$ 与 $\Delta \dot{\omega}$ 的相位差必须在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

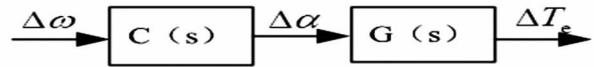


图4 SSDC 提升系统电气阻尼原理

SSDC (subsynchronous damping controller) 提升阻尼的原理如图 4 所示,选取发电机转速偏差 $\Delta \dot{\omega}$ 作为输入信号,其中 $C(s)$ 为需要设计的 SSDC 的传递函数, $G(s)$ 为 TCSC 触发角增量到电磁转矩增量的传递函数,设计 SSDC 的目标就是系统次同步频率各模态附近的电气阻尼为正,即使 $\Delta \dot{T}_e$ 滞后, $\Delta \dot{\omega}$ 相位在 $\pm 90^\circ$ 区间内。

3 TCSC 同步信号对次同步振荡的影响

以 IEEE 第一标准模型为测试对象,将原系统中的部分固定串联电容补偿采用可控串补替代,线路总串补度取 75%,其中 TCSC 电抗占总串补电抗的 30%,TCSC 采用开环定阻抗控制,TCSC 的主电路特征参数为 2.65,电容 $C = 32.17 \mu\text{F}$ 。在电容电压同步时,TCSC 的基准触发角为 155° ,由于 TCSC 在运行时一般处于容性状态,TCSC 的电压相位滞后电流 90° ,因此在线路电流同步下的触发角为 245° 。选择发电机的运行方式为 $\text{PG} = 0.9$ (p. u.),功率因数为 0.9(滞后)。发电机的轴系由高压缸(HP)、中压缸(IP)、低压缸 A(LPA)、低压缸 B(LPB)以及发电机(GEN)和励磁机(EXC) 6 个集中质量块组成。对应有 5 个扭振模式,分别为: 15.7 Hz、20.2 Hz、25.6 Hz、32.3 Hz 和 47.5 Hz。系统的其他电气和机械参数同文献^[12]。

电气阻尼系数 D_e 数可以通过测试信号法进行获取,具体方法为:在系统稳定运行条件下,对待研究系统发电机的转子施加一系列频率成整数倍的小值脉冲转矩,待系统再次进入稳态,截取脉动转矩一个公共周期上的发电机电磁转矩 T_e 和发电机角频率 ω ,对这两个分量进行傅里叶分解,得到不同频率下的 $\Delta \dot{T}_e$ 、 $\Delta \dot{\omega}$ 进而求得电气阻尼转矩系数 D_e 。同样对 TCSC 的触发角施加一连串的次同步频率下的小

值脉动信号,获取发电机电磁转矩增量后分别对其进行傅里叶分解,即可求得 $G(s)$ 的幅频和相频特性。

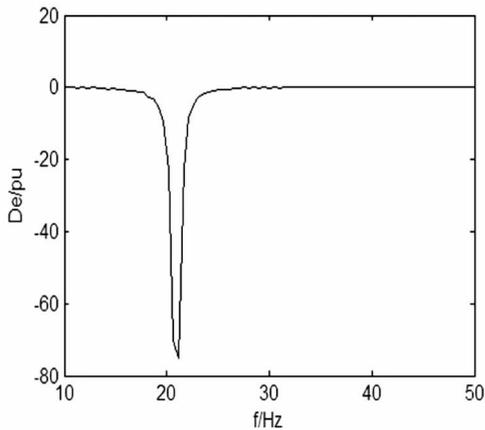


图5 采用固定串补时的电气阻尼曲线

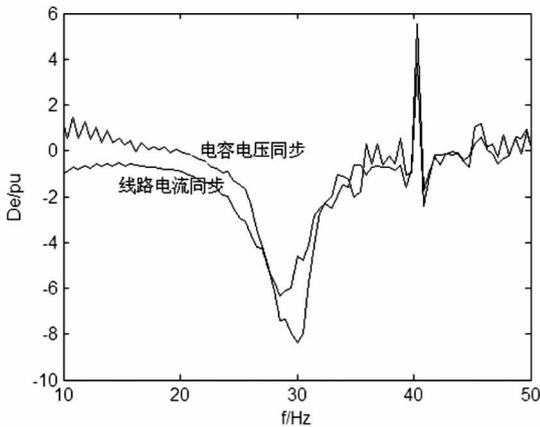


图6 加入 TCSC 的电气阻尼曲线

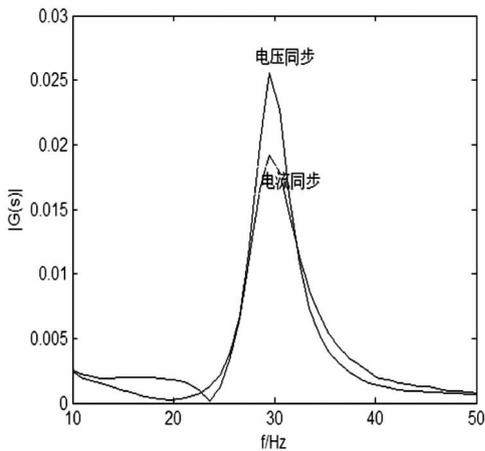


图7 $G(s)$ 的幅频特性

从图5中可以看出系统采用固定串补时在次同步频率范围内的电气阻尼都为负值,保持系统串补度不变,当加入 TCSC 后,TCSC 分别采用电容电压同步和采用线电流同步时的电气阻尼曲线如图6所示,由图可知在不同同步信号下的电气阻尼相差别不是很大,系统加入 TCSC 后的电气阻尼明显得到

提升,但是部分频率下的电气阻尼还处于负值,仍然可能会造成次同步谐振。 $G(s)$ 的幅频和相频特性分别如图7、图8所示。

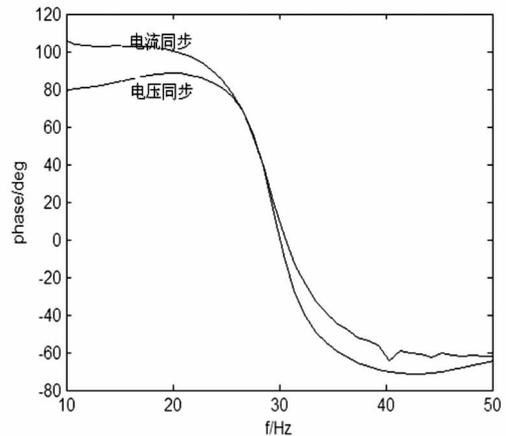


图8 $G(s)$ 的相频特性

4 加入 SSDC 时域仿真分析

选取发电机转速偏差 $\Delta\omega$ 作为输入信号,首先以各扭振模态频率为中心频率的带通滤波器滤除干扰信号,经过放大、相位补偿及限幅环节,输出附加控制信号 $\Delta\alpha$,送到晶闸管的触发极。TCSC 附加 SSDC 控制器结构如图9所示,具体参数整定可以参考文献[13],设计的 SSDC 的控制参数如表1所示。

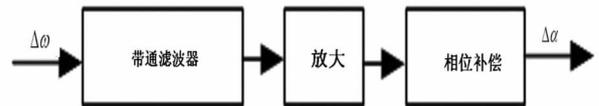


图9 $C(s)$ 控制结构图

$t = 1$ s 时在无穷大母线处设置三相接地故障,故障时间持续 0.075 s。系统的轴系扭振状态响应如图10所示。

表1 SSDC 补偿参数

模式	通带/Hz	补偿相角/ $^{\circ}$	放大倍数
1	12 ~ 20	-45	96 000
2	18 ~ 26	-40	10 000
3	24 ~ 30	-30	10 000
4	28 ~ 37	25	70 000

系统在采用固定串补时,当出现三相故障后轴系的扭矩程发散状态,当加入可控串补时,设计多模态的 SSDC 加入系统后,不论 TCSC 采用电容电压同步还是采用线路电流同步,都能达到抑制次同步振荡的效果。

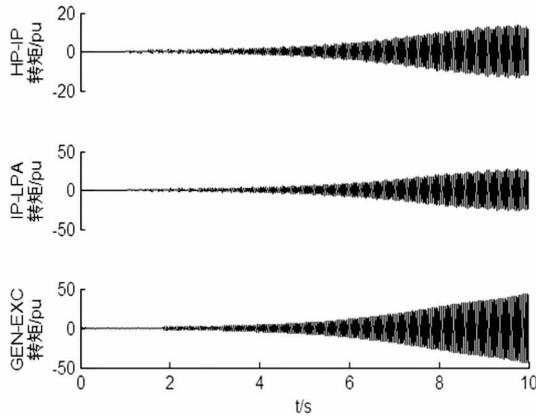


图10 使用固定补偿时的轴系扭振状态响应

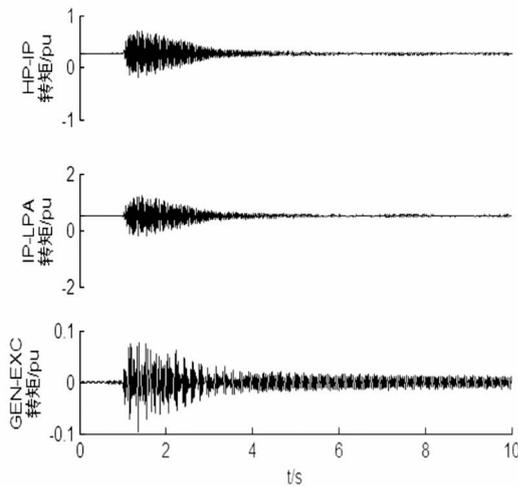


图11 加入SSDC时电压同步下轴系扭振状态响应

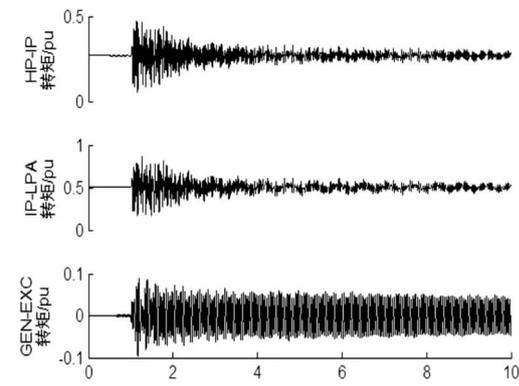


图12 加入SSDC时电流同步下轴系扭振状态响应

5 结 论

TCSC基波电抗分别在电容电压信号同步时,其暂态电抗相应呈现振荡状态;线路电流同步时,暂态电抗相应呈现一阶惯性环节。在次同步频率下,同步信号对于系统的电气阻尼影响作用不大,在所设计的SSDC控制下,TCSC都能达到抑制次同步振荡

的目的。

参考文献

- [1] 程时杰,曹一家,江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 84-93.
- [2] H. Shayeghi a, A. Safari b, H. A. Shayanfar. PSS and TCSC Damping Controller Coordinated Design Using PSO in Multi-machine Power System[J]. Energy Conversion and Management 2010 51: 2930-2937.
- [3] Salman Hameed, Biswarup Das, Vinay Pant. A Self-tuning Fuzzy PI Controller for TCSC to Improve Power System Stability[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(10): 1726-1735
- [4] 韩光,董陆园,葛俊,等. TCSC抑制次同步谐振的机理分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 18-22.
- [5] 林宇锋,徐政,黄莹. TCSC功率振荡阻尼控制器的设计[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 35-39.
- [6] 李伟,李兴源,洪潮,等. 抑制次同步谐振的可控串联线性最优控制器设计[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 10-13.
- [7] S. R. Joshi, A. M. Kulkarni. Analysis of SSR Performance of TCSC Control Schemes Using a Modular High Bandwidth Discrete-time Dynamic Model[J]. IEEE Transactions on Powersystems 2009 24(2): 840-847.
- [8] Luiz A. S. Pilotto, André Bianco, Willis F. Long, Abdel-Aty Edris. Impact of TCSC Control Methodologies on Subsynchronous Oscillations[J]. IEEE transactions on Power Delivery 2003, 18(1): 243-351.
- [9] 闫冬,赵建国,武守远. 考虑电抗器支路电阻影响的TCSC触发特性研究[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 40-41.
- [10] 王敏,康积涛,李康,等. TCSC次同步谐振阻尼控制器设计[J]. 四川电力技术, 2012, 35(3): 49-50.
- [11] 熊萍,李兴源,徐大鹏. 次同步谐振分析方法的研究[J]. 四川电力技术, 2008, 31(5): 14-15.
- [12] 周孝信,郭建波,林集明,等. 电力系统可控串联电容补偿[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 341.
- [13] 郑翔,徐政,张静. TCSC次同步谐振附加阻尼控制器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 181-186.

作者简介:

刘伟波(1986),男,西南交通大学硕士研究生,研究方向为柔性输电的应用与控制;

康积涛(1962),男,教授,主要从事电力调度自动化系统、电力系统无功优化、电压稳定性、嵌入式测控装置和工业监控组态软件的研究。

(收稿日期: 2013-02-03)