

TCSC 与 SVC 在电力系统 SSR 中应用及经济性比较

吴小刚,袁义桃,康积涛

(西南交通大学电气工程学院,四川成都 610031)

摘要: 针对电力系统远距离、大容量输电中的串联补偿技术容易引起系统次同步谐振(SSR)问题,基于IEEE次同步谐振第一标准测试系统,在PSCAD/EMTDC中搭建晶闸管控制串联电容器(TCSC)和静止无功补偿器(SVC)模型,利用测试信号法从电气阻尼和经济性两方面讨论TCSC与SVC抑制SSR效果。研究发现:在实测容量下,SVC较TCSC投资偏多,但在整个次频段内(尤其是在主导模式下)SVC提升电气阻尼较TCSC更多;时域仿真表明加入SVC较TCSC而言,扭矩收敛速度更快,抑制效果更好。

关键词: 次同步谐振;可控串补;静止无功补偿器;测试信号法;经济性

Abstract: Aiming at the problem of sub-synchronous resonance (SSR) caused by the series compensation technology used in the long-distance and high-capacity transmission power system, the models of thyristor controlled series capacitor (TCSC) and static var compensator (SVC) are built in PSCAD/EMTDC based on the first standard IEEE sub-synchronous resonance test system. The suppression effect is discussed from the two aspects of electrical damping and economy with the test signal method. The study shows that the investment of SVC is much bigger than TCSC at the measured capacity, but the electrical damping enhanced by the SVC is more than TCSC in all sub-frequency. The time domain simulation shows that compared with TCSC, the convergence rate of torque is faster and the suppression effect is better when adding SVC.

Key words: sub-synchronous resonance; thyristor controlled series capacitor; static var compensator; test signal method; economy

中图分类号: TM76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)05-0041-04

0 引言

中国能源分布不均以及随着用电负荷的日益增大,电力系统大容量、远距离输电势在必行;采用串联电容补偿是提高交流输电线路输送能力、控制并行线路之间的功率分配和增强电力系统暂态稳定性的一种十分经济有效的方法^[1]。但串联电容补偿可能引发电力系统次同步谐振(sub-synchronous resonance, SSR)^[2],进而造成汽轮发电机组轴系扭振,产生疲劳积累,甚至断裂,导致系统的振荡失稳,危及电力系统的安全运行^[3]。

近年来迅速发展并逐渐成熟的灵活交流输电技术(flexible alternating current transmission systems, FACTS),不断被运用到电力系统中^[4-5]。基于IEEE次同步谐振第一标准测试系统,在PSCAD/EMTDC中搭建TCSC和SVC模型,利用测试信号法分析系统电气阻尼;从经济性的角度出发,探讨实际

抑制SSR工程应用中TCSC与SVC的选择。

1 系统模型及参数

在IEEE次同步谐振第一标准测试系统的基础上,改变其串补度,并分别加入TCSC和SVC作为待研究的系统模型如图1所示。

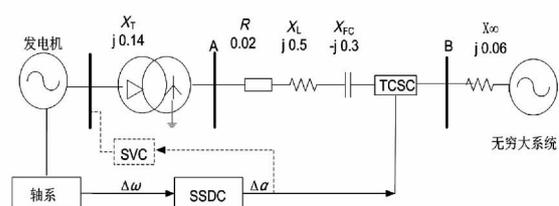


图1 待研系统

发电机轴系采用6质块模型,含有高压缸HP、中压缸IP、低压缸(LPA和LPB)、发电机GEN、励磁机EXC6个轴段。通过解耦分析^[6]可以得到IEEE次同步第一标准测试模型发电机轴系的自然扭振频

率分别为 15.71、20.21、25.55、32.28、47.45 Hz。模型的其他参数与文献 [7] 相同。

基于复转矩系数法的时域仿真实现——测试信号法,可以得出系统的电气阻尼;其基本思想就是对线性系统施加一定的输入将会激发相应的输出响应,输入输出之间的关系成为该线性系统的动态特性,因而可以用来辨识出系统的模态参数;具体实现方法见文献 [8]。

取系统串补度为 60% ,TCSC 特征参数 $k=2.5$,稳态触发角 $\alpha_{TCSC}=157.6^\circ$,SVC 稳态触发角 $\alpha_{SVC}=135^\circ$;发电机运行状态为满载,功率因数等于 0.9 (滞后)。

2 复转矩系数法及测试信号法实现 [8]

复转矩系数法自 1982 年由 I. M. Canay 提出以来,被广泛地应用于电力系统次同步振荡的研究中。

对待研究的发电机施加小扰动,其电磁转矩增量可以表示为

$$\Delta T_e = K_e \Delta \delta + D_e \Delta \omega \quad (1)$$

式中 $K_e \Delta \delta$ 是同步转矩; $D_e \Delta \omega$ 是阻尼转矩。 K_e 和 D_e 分别为同步转矩系数和自拟转矩系数; $\Delta \delta$ 和 $\Delta \omega$ 分别为功角增量和角速度增量。且二者之间有下式关系成立。

$$\Delta \omega = \frac{1}{\omega_0} \times \frac{d\Delta \delta}{dt} \quad (2)$$

ω_0 为同步转速,当发电机转子作频率为 $\lambda \omega_0$ 的稳态小值振荡时,各量用相量表示如下。

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{\omega_0} (j\lambda \omega_0) \Delta \dot{\delta} \quad (3)$$

$$\Delta \dot{T}_e = K_e(\lambda) \Delta \dot{\delta} + D_e(\lambda) \Delta \dot{\omega} \quad (4)$$

故而有

$$\frac{\Delta \dot{T}_e}{\Delta \dot{\omega}} = K_e(\lambda) + D_e(\lambda) \quad (5)$$

或者

$$\frac{\Delta \dot{T}_e}{\Delta \dot{\omega}} = D_e(\lambda) - j \frac{1}{\lambda} K_e(\lambda) \quad (6)$$

测试信号法即是对复转矩系数法进行时域仿真,对发电机施加小值脉动转矩待其再次进入稳态之后,截取脉动转矩一个公共周期上的发电机电磁转矩 T_e 和角频率 ω 并进行傅里叶分解得出不同频率下的 $\Delta \dot{T}_e$ 和 $\Delta \dot{\omega}$,进而可以得到系统电气阻尼。

3 系统电气阻尼分析

基于测试信号法,针对 IEEE 次同步研究第一标准系统模型,在 3 种工况下,即:①仅有固定串联电容补偿(FSC)即没有加入 TCSC、SVC;②加入 TCSC;③加入 SVC;得出其电气阻尼如图 2 所示。

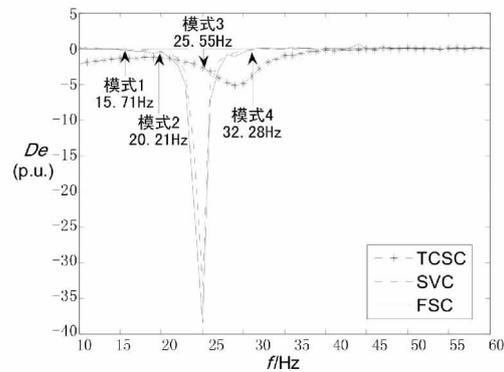


图 2 系统电气阻尼(没有 SSDC)

由图 2 可以看出:在没有加入 TCSC 和 SVC 即系统仅有固定串联电容补偿(FSC)系统在各个模式下电气阻尼均为负(其中模式 5 由于其模态阻尼非常大,一般不会发生机网扭振相互作用,这里不予考虑),且在扭振模式 3 附近的电气阻尼最大,约为 -40(模式 3 为主导模式),在假设系统机械阻尼为零的情况下(偏保守估计),易知采用全固定串联电容补偿时,容易引起系统模式 3 不稳定。

当加入 SVC 之后,系统电气阻尼有所上升,在主导模式下标么值约为 -35,加入 TCSC 之后系统电气阻尼约为 -5,可见加入 TCSC 能够在更大程度上提升系统电气阻尼,但是主导模式下电气阻尼仍然为负值,根据复转矩系数法判据可知系统 SSR 不稳定 [9]。

针对加入 TCSC 和 SVC 并不能够将系统在低频段内的电气阻尼全部提升为正值的情况 [10],分别为 TCSC 和 SVC 设计附加次同步阻尼控制器(SSDC),系统仿真参数不变,得到加入 SSDC 之后的系统电气阻尼如图 3 所示。

从图 3 可以看出:分别为 TCSC 和 SVC 设计附加次同步阻尼控制器 SSDC 之后,在低频段内各个轴系扭振固有频率点处的电气阻尼均提升到了正值;在整个次频段内,TCSC 提升系统阻尼的效果要优于 SVC,在 TCSC 的控制下系统整个此频段内电气阻尼得到较大的改善;而且在主导模式频率点

(25.55 Hz) 处 SVC 较 TCSC 提升电气阻尼更大,有效抑制系统的主导模式下发生 SSR 的可能性。

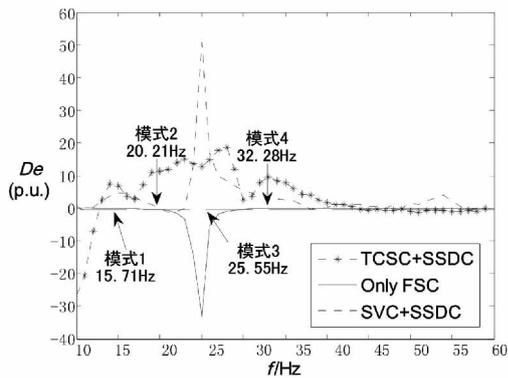


图3 系统电气阻尼(附加SSDC)

4 时域仿真分析

为了验证前述分析的正确性,在 PSCAD/EMT-DC 中对分别加入 TCSC 和 SVC 后系统各轴段扭矩进行时域仿真;TCSC 和 SVC 参数设置不变,在 2.5 s 系统 26 kV 母线 B 处发生三相短路故障 0.05 s 后故障切除;发电机满载,功率因数为 0.9(滞后)。

SVC 没有附加 SSDC 和附加 SSDC 扭矩仿真如图 4、图 5 所示。

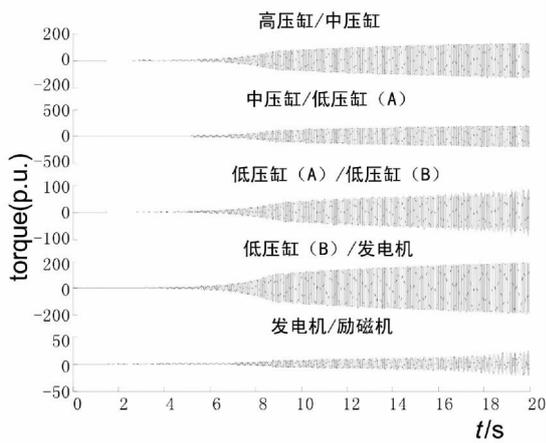


图4 接入 SVC 各轴段扭矩(没有附加SSDC)

系统加入 TCSC 和 SVC 后,针对分别附加 SSDC 前后各轴段扭矩仿真发现:仅靠 TCSC 或者 SVC 均不能有效抑制 SSR,轴系扭矩在三项故障扰动下均呈发散趋势,且接入 SVC 时故障后各轴段扭矩发散较 TCSC 快,分别为其设计附加次同步阻尼控制器 SSDC 之后,系统在大扰动下,轴系扭矩仍然能够很快收敛,且 SVC 较之 TCSC 有更快的收敛速度,验证了前述电气阻尼分析的正确性。

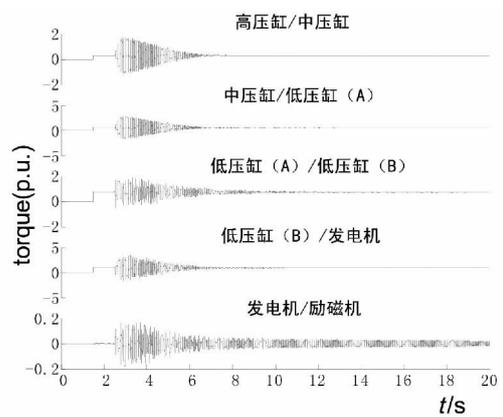


图5 接入 SVC 各轴段扭矩(附加SSDC)

TCSC 没有附加 SSDC 和附加 SSDC 扭矩仿真如图 6、图 7 所示。

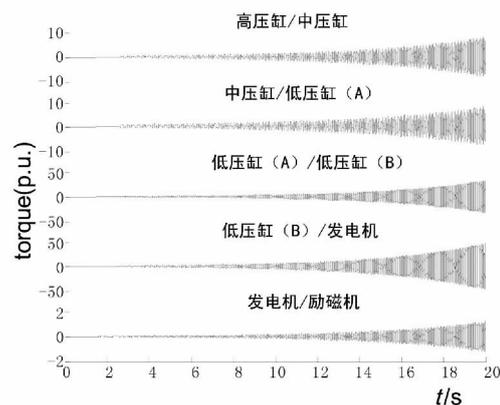


图6 接入 TCSC 各轴段扭矩(没有附加SSDC)

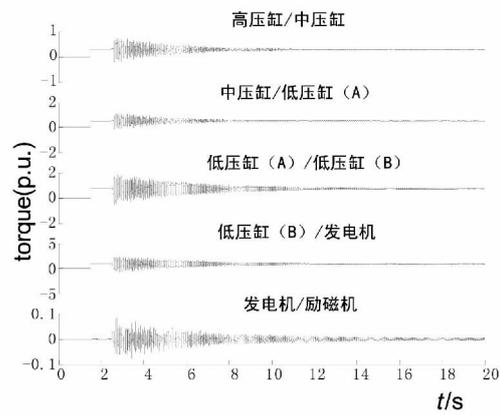


图7 接入 TCSC 各轴段扭矩(附加SSDC)

5 TCSC 和 SVC 经济性比较

对于实际的工程应用,安全性和经济性是首要考虑的问题,即在保证系统安全运行并留有一定裕度条件下最大限度地减少投资。FACTS 装置的成本由于受到生产厂家、选材、安装、维护成本等影响,

一直以来都难以量化。文献[11]导出了 FACTS 装置成本费用的公式,其中 TCSC 和 SVC 的成本函数为

$$C_{TCSC} = 0.0015S_{TCSC}^2 - 0.713S_{TCSC} + 153.75 \quad (7)$$

$$C_{SVC} = 0.0003S_{SVC}^2 - 0.3057S_{SVC} + 127.38 \quad (8)$$

其中 C_{TCSC} 和 C_{SVC} 分别是 TCSC 和 SVC 的单位容量成本,单位为 US \$ /kvar;

S_{TCSC} 和 S_{SVC} 分别是 TCSC 和 SVC 的额定容量,单位为 Mvar。

文献[12]给出了 TCSC 的工作范围成本费用曲线。从曲线可知:运行在工作范围的右侧时与系统交换大量无功,相应地与系统交换单位无功费用减少;而在 TCSC 工作范围左侧,成本费用较高,故实际应用中的 FACTS 装置,应当尽量让其工作在额定容量附近。

基于安装地点实测的无功容量作为 TCSC 和 SVC 经济性分析的计算容量为

$$S_{SVC \text{ 实测}} = 19 \text{ Mvar} \quad S_{TCSC \text{ 实测}} = 61 \text{ Mvar}$$

根据公式(7)、(8)可以计算出对应实际容量下的装置总成本费用,分别为

$$Y_{SVC} = C_{SVC} \times S_{SVC \text{ 实测}} \times 1000 = 121680 (\$)$$

$$Y_{TCSC} = C_{TCSC} \times S_{TCSC \text{ 实测}} \times 1000 = 115838.5 (\$)$$

其中 Y_{SVC} 和 Y_{TCSC} 分别是 SVC 和 TCSC 装置总成本费用,单位为美元(\$)。

通过计算发现:在实测容量分别为 $S_{SVC \text{ 实测}} = 19 \text{ Mvar}$, $S_{TCSC \text{ 实测}} = 61 \text{ Mvar}$ 下, SVC 较 TCSC 装置成本偏多,约为 5841.5(\$);但从电气阻尼曲线可看出,加入 SVC 并为其附加 SSDC 之后,在整个次频段内(尤其是在主导模式下)其电气阻尼较 TCSC 提升更多;后面的时域仿真也证实加入 SVC 较 TCSC 而言,扭矩收敛速度更快,抑制效果更好。

6 结 语

(1) 系统中仅装设 TCSC 或者 SVC,只是在一定程度上提升电气阻尼,但主导模式下电气阻尼仍然为负值,均不能有效抑制系统发生次同步谐振。分别为其设计 SSDC 之后,低频段内电气阻尼全部提升为正值,且主导模式下 SVC 对电气阻尼的改善效果较 TCSC 更好。

(2) 通过实测 TCSC 和 SVC 发出无功容量,计算表明 SVC 较 TCSC 装置成本费用稍微偏高,但其控制效果好于 TCSC,扭矩收敛速度更快,确保系统 SSR 稳定。

参考文献

- [1] 徐政. 交直流电力系统行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] R. G. Framer, C. E. J. Bowler, C. V. Childers et al. IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Proposed Terms and Definitions for Subsynchronous Oscillations [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(2): 506-511.
- [3] 文劲宇, 孙海顺, 程时杰. 电力系统的次同步振荡问题 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 1-4.
- [4] 喻新强, 梁旭明, 邱宇峰, 等. 灵活交流输电技术在国家骨干电网中的工程应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [5] Mathur R M, Varma R K. Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems [M]. New York: IEEE Press and Wiley Interscience, 2002.
- [6] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [7] IEEE SSR Working Group. First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.
- [8] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 1-4.
- [9] Canay I M. A Novel Approach to the Torsional Interaction and Electrical Damping of the Synchronous Machine, Part I and Part II [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10): 3630-3647.
- [10] 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): 182-186.
- [11] Cai L J, Erlich I, Stamtis G. Optimal Choice and Allocation of FACTS Devices Using Genetic Algorithms [C]. Power Systems Conference and Exposition, Anaheim, California: 2004(1): 201-207.
- [12] 吴英俊, 汤奕, 李扬. 基于电气剖分方法的 TCSC 成本费用分摊 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 138-139.

(收稿日期: 2013-06-11)