

TCSC+FSC 抑制电力系统次同步谐振的研究

袁 强, 危韧勇

(中南大学 电气工程研究所, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 根据输电线路的有关数据, 对 TCSC 电容器和电抗器的取值进行了深入分析和设计; 并以此为基础, 分别建立了 FSC 和 TCSC+FSC 电力系统仿真模型。并着重对 FSC 和 TCSC+FSC 系统进行了比较研究, 研究结果表明, TCSC+FSC 相对 FSC 能够更加有效地抑制电力系统次同步谐振 (SSR)。

关键词: 可控串补; 固定串补; TCSC+FSC; 次同步谐振

中图分类号: TM715

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)01-0073-05

Analysis on SSR of Restraining Power System with TCSC+FSC

Yuan Qiang, Wei Renyong

(Institute of Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract : In the application of TCSC (thyristor controlled series compensation), the parameters of TCSC are very important for its characteristics. According to the data of transmission lines, the parameters of the TCSC are correctly designed. Then based on that, it established the models of FSC (fixed series compensation) and TCSC+FSC power system separately. With the presented study of FSC and TCSC+FSC power system, the results indicated that the TCSC+FSC power system is more efficiency than FSC power system on damping SSR(sub-synchronous resonance).

Key words: TCSC; FSC; TCSC+FSC; SSR

1970年12月和1971年10月, 美国Mohave电厂先后发生了2次次同步谐振(SSR)导致发电机组轴系断裂事故^[1, 2], 此后, 电力系统次同步谐振一直受到国内外电力专家的高度重视。其中对TCSC抑制次同步谐振机理的研究尤受关注, 已有的研究表明^[3], TCSC次同步频率等效电阻和等效电抗对抑制次同步谐振起不同作用, TCSC次同步频率等效电阻只能削弱次同步谐振, 本质上是一个能量转换过程; TCSC次同步频率等效电抗对抑制次同步谐振起主导作用。已有文献中, 文献[4]的研究成果相对比较突出, 该文深入分析了TCSC抑制次同步谐振的机理, 并在此基础上讨论了TCSC主电路参数的设计原则, 但没有验证该设计原则的合理性和检验其抑制次同步谐振的效果。再者, 目

前国内外对电力系统次同步谐振的研究, 都是单纯地考虑FSC或TCSC的抑制效果, 而忽视了实际运行的TCSC装置是由FSC和TCSC两个部分组成的。^[3-5]对此, 本文模拟一个实际的电力系统, 根据输电线路总感抗和线路补偿度, 通过对 k 值的计算给出了3组TCSC主电路参数, 并结合仿真讨论了TCSC的参数选取。同时, 将设计出的TCSC模块运用到电力系统仿真模型中, 合理地分配FSC和TCSC所占百分比, 并对FSC和TCSC+FSC系统作了对比研究, 从而分析了TCSC+FSC相对FSC抑制电力系统次同步谐振的优越性。

1 TCSC的基本结构和原理

TCSC主要由电容器 C 、双向晶闸管SCR、旁路电

收稿日期: 2007-11-12

作者简介: 袁 强 (1982-), 男, 江西井冈山人, 中南大学硕士生, 主要从事柔性交流输电技术方面的研究;

危韧勇 (1962-), 男, 江西南昌人, 中南大学教授, 主要从事电力系统自动化方面的研究。

感 L_s 、金属氧化可变电容器 MOV 和旁路断路器 CB 组成, 它的结构如图 1 所示。^[6] TCSC 本质上是一个可控的串联容性电抗, 通过改变双向晶闸管 SCR 的触发角, 改变旁路电感 L_s 的有效值, 实现 TCSC 电抗值随触发角的连续调节。根据晶闸管的导通程度不同, 可将其运行方式分为如下 4 种:

1) 晶闸管闭锁模式: 触发角 $\alpha=180^\circ$, TCSC 装置等同于一个固定电容器 C 。

2) 晶闸管旁通模式: 晶闸管处于全导通状态, 该模式可看作固定电容器 C 和电抗器 L_s 的并联电路。

3) 晶闸管容性微调模式: 触发角限制在 $\alpha_{\text{scrt}} \leq \alpha \leq 180^\circ$, 此时, TCSC 上存在一个相当于增大了等效容性电抗的循环电流, 当 α 从 180° 逐渐减小到 α_{scrt} 时, 循环电流不断增大。

4) 晶闸管感性微调模式: 触发角限制在 $90^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\text{scrt}}$, 循环电流的方向和容性微调模式下的循环电流方向正好相反, 且导通角越大电抗越小。

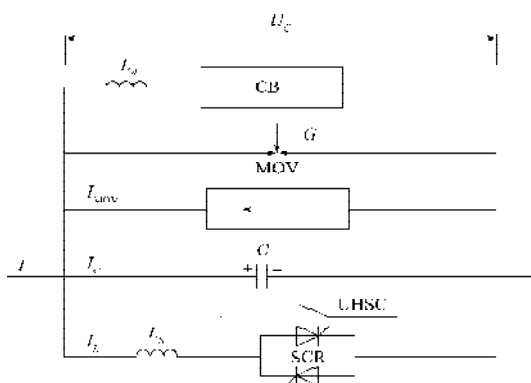


图 1 TCSC 的基本结构

Fig.1 The basic structure of TCSC

2 TCSC 参数的设计

为了更好地研究电力系统中次同步谐振的特性, 本文将模拟一个实际运行的电力系统作为研究对象, 该系统总装机容量为 $6 \times 350\,000$ kW, 发电机组出线电压为 13.8 kV, 频率为 60 Hz (国内外研究次同步谐振一般以 IEEE First Benchmark 为原型, 而该系统频率为 60 Hz, 为了方便与国内外研究工作者交流, 本文采用的系统频率也是 60 Hz); 电力变压器容量为 $6 \times 350\,000$ kVA, 电压变比为 13.8/500; 系统输电距离总长为 140 km, 其中线路电感 $L = 0.933\,7$ mH/km, $R = 0.012\,7$ Ω /km; 系统的最后连接一个无穷大系统。

输电线路的总感抗为:

$$X_L = \omega L = 2 \times \pi \times 60 \text{ Hz} \times 140 \text{ km} \times 0.933\,7 \text{ mH/km} + 1\,000 = 49.25 \, \Omega,$$

系统的串联补偿度取 30.44%, 则电容器的容抗为:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = 49.25 \, \Omega \times 30.44\% = 14.99 \, \Omega,$$

$$\text{由此可得 } C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2 \times \pi \times 60 \text{ Hz} \times 14.99 \, \Omega} = 177 \, \mu\text{F}.$$

TCSC 的电容器 C 确定后, 其运行特性主要取决于 TCR 电路的电抗器 L_s 和 TCR 电路晶闸管的触发角 α , 而触发角 α 是 TCSC 在运行中根据实际情况调整的一个变量, 可见电容器 $C=177 \, \mu\text{F}$ 时, TCSC 参数的设计主要是针对电抗器 L_s 的取值。

在设计电抗器 L_s 的取值之前, 我们先分析 TCSC 基频特性, 当 TCSC 处于微调模式时, 可以将双向晶闸管 SCR 等效为一个开关, 并设一个开关变量 $n=0$ 或 1, 分别表示 SCR 截止和导通。由此, 可以将 TCSC 微调模式用下列微分方程组表示:

$$C \frac{dV_c}{dt} = i(t) - i_L(t)n, \quad L_s \frac{di_L}{dt} = V_c n,$$

其中, $i(t)$ 为线路电流, 且 $i(t) = I_m \cos \omega t$; $i_L(t)$ 为电感支路电流。双向晶闸管 SCR 在线电流的每个周期内导通 2 次, 易知其导通时刻为: $t_1 = -\frac{\beta}{\omega}$, $t_3 = \frac{\pi - \beta}{\omega}$; 关断时刻

为: $t_2 = t_1 + \frac{\sigma}{\omega}$, $t_4 = t_3 + \frac{\sigma}{\omega}$; 其中, $\alpha + \beta = \pi$, $\sigma = 2\beta$ 。

由以上各式, 可得电感支路电流 i_L 表达式如下:

$$i_L(t) = \frac{k^2}{k^2 - 2} I_m \left[\cos \omega t - \frac{\cos \beta}{\cos k\beta} \cos \omega_0 t \right], \quad (1)$$

其中, $-\beta \leq \omega t \leq \beta$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C}}$;

$$k = \frac{\omega_0}{\omega} = \sqrt{\frac{1}{\omega^2 L_s C}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}. \quad (2)$$

在 $\omega t = -\beta$ 和 $\omega t = \beta$ 时刻, $i_L = 0$, 电容电压分别为:

$$V_{C1} = V_c(\omega t = -\beta) = \frac{I_m X_C}{k^2 - 1} (\sin \beta - k \cos \beta \tan k\beta);$$

$$V_{C2} = V_c(\omega t = \beta) = -V_{C1} = -\frac{I_m X_C}{k^2 - 1} (\sin \beta - k \cos \beta \tan k\beta).$$

可得电容器电压表达式为:

$$V_c(t) = \frac{I_m X_C}{k^2 - 1} (-\sin \omega t + k \frac{\cos \beta}{\cos k\beta} \sin \omega_0 t), \quad -\beta \leq \omega t \leq \beta;$$

$$V_c(t) = V_{C2} + I_m X_C (\sin \omega t - \sin \beta), \quad \beta < \omega t < \pi - \beta.$$

由于电容电压 V_c 关于 $\omega t = 0$ 奇对称, 用傅立叶公式展开可得电容电压基波分量为:

$$V_{c0} = \frac{4}{\pi} \int_0^\pi V_c(t) \sin \omega t d(\omega t),$$

由此, 可得 TCSC 的基波阻抗表达式为:

$$X_{\text{TCSC}} = \frac{V_{c0}}{I_m} = X_C - \frac{X_C^2}{(X_C - X_L)} \cdot \frac{2\beta + \sin 2\beta}{\pi} + \frac{4 X_C^2 \cos^2 \beta}{(k^2 - 1)(X_C - X_L)} \cdot \frac{(k \tan k\beta - \tan \beta)}{\pi}, \quad (3)$$

将式 (2) 代入式 (3) 得:

$$X_{TCSC} = X_c - \frac{k^2 X_c}{(k^2 - 1)} \cdot \frac{2\beta + \sin 2\beta}{\pi} + \frac{4k^2 X_c \cos^2 \beta (k \tan k\beta - \tan \beta)}{(k^2 - 1)^2 \pi}。$$

由此可见, 电容器 C 确定后, TCSC 的基频特性取决于变量 k 。因此, 对电抗器 L_s 的设计可以转换成对 k 值的设计。根据国内外实际运行情况 k 值在 2.2~2.7 范围内最为合适。以该取值范围为参考, 假定电抗器 L_s 取值分别为: 1.0 mH、7.0 mH、12 mH, 则其对应的 k 值如表 1 所示。由计算结果易知, 只有 $L_s=7.0$ mH 时, $k=2.38$ 在取值范围内。

表 1 L_s 取不同值时对应的 k 值

Table 1 The corresponding k values with different L_s values

L_s/mH	1.0	7.0	12.0
$k = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}}$	6.31	2.38	1.82

注: 数据条件为 $C=177 \mu\text{F}$, 频率为 60 Hz。

上文通过计算分析了电抗器 L_s 的取值, 下面通过仿真来验证其正确性。假设系统三相是完全对称的, 那么只需研究 A 相电路的情况就可反映系统中整个 TCSC 模块的工作情况。在 MATLAB 软件中, 建立一个单相 TCSC 的仿真模型, 以交流电流源 $i=100\sin(2\pi \times 60 \times t)$ 作为同步信号, 触发角 α 分别为 120° (感性微调模式) 和 160° (容性微调模式), 对电抗器 L_s 取不同值的 TCSC 分别进行仿真。当 $\alpha=120^\circ$ 时, TCSC 处在感性微调模式下的端电压和电容器电流的波形如图 2~4 所示。

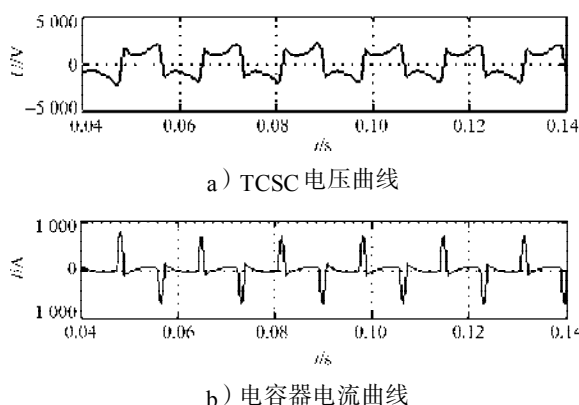
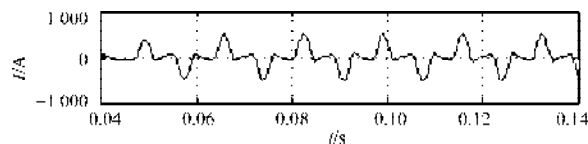
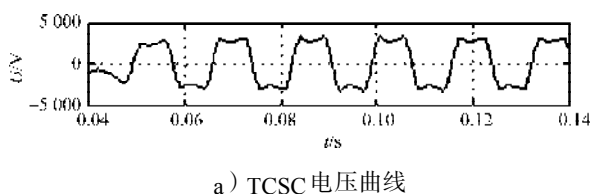


图 2 $C=177 \mu\text{F}$, $L_s=1.0$ mH 时 TCSC 稳态特性曲线

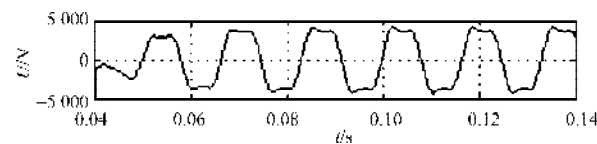
Fig. 2 Stable curves of TCSC with $C=177 \mu\text{F}$, $L_s=1.0$ mH



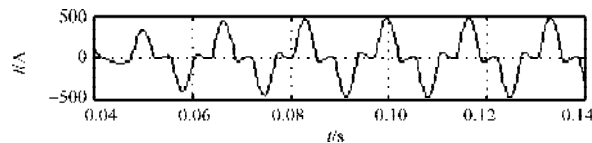
b) 电容器电流曲线

图 3 $C=177 \mu\text{F}$, $L_s=7.0$ mH 时 TCSC 稳态特性曲线

Fig. 3 Stable curves of TCSC with $C=177 \mu\text{F}$, $L_s=7.0$ mH



a) TCSC 电压曲线



b) 电容器电流曲线

图 4 $C=177 \mu\text{F}$, $L_s=12$ mH 时 TCSC 稳态特性曲线

Fig. 4 Stable curves of TCSC with $C=177 \mu\text{F}$, $L_s=12$ mH

分析仿真结果可知, $L_s=1.0$ mH 时, TCSC 电压不对称, 电容器电流存在严重的尖峰现象, 这容易导致 TCSC 装置过热, 对运行中的 TCSC 非常不利; $L_s=7.0$ mH 时, TCSC 电压对称, 电容器电流波形稳定; $L_s=12$ mH 时, TCSC 电压出现不对称现象, 存在尖峰。当触发角 $\alpha=160^\circ$ 、TCSC 处在容性微调模式时, 分析仿真波形可以得到相同的结论。由此可见, 当 $C=177 \mu\text{F}$ 时, 选择 $L_s=7.0$ mH 作为 TCR 支路的电抗器是比较合适的, 这与上文计算分析的结果是一致的。

3 TCSC+FSC 抑制电力系统次同步谐振的研究

为了研究 TCSC + FSC 抑制电力系统次同步谐振的特性, 我们首先研究 FSC 对电力系统次同步谐振的影响, 继而分析 TCSC + FSC 对电力系统次同步谐振的影响。在不影响研究结果的前提下, 通过适当的简化, 在 MATLAB 中建立电力系统仿真模型。

3.1 FSC 对电力系统次同步谐振的影响

以上文讲述的电力系统为研究对象, 系统输电距离总长为 140 km, 线路电感 $L=0.9337$ mH/km, 考虑系统串联补偿度 30.44%, 则 FSC 电容器 $C=177 \mu\text{F}$ 。系统等效电路如图 5 所示。

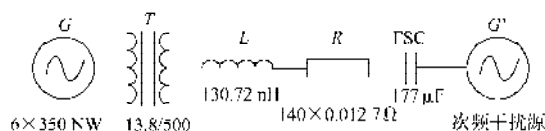
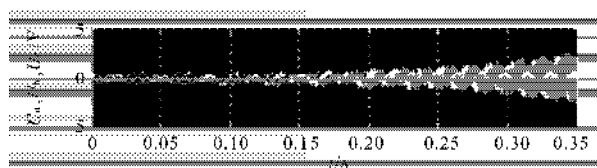


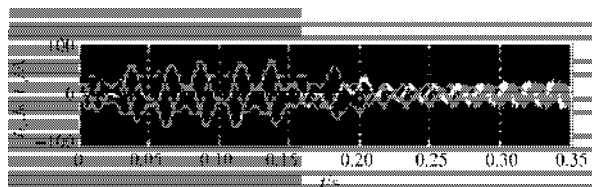
图 5 FSC 电力系统等效图

Fig. 5 The equivalent diagram of FSC power system

在 MATLAB 中建立对应的系统仿真模型, 在系统中加入一个次同步信号源, 次同步信号频率分别为 20 Hz 和 30 Hz, 次同步信号源从系统一开始运行就向系统中注入次同步干扰信号, 在 0.2 s 时系统保护动作将次同步干扰信号隔离。仿真主要是测量次同步干扰信号隔离前后, 系统中的输电线路三相电压、电流波形。其中三相电压、电流均采用标么值, 三相电压基准值为 500 kV, 三相电流以 100 000 kVA 的计算电流为基准值。仿真时间设置为 [0 s, 0.35 s], 仿真结果如图 6 和图 7 所示。



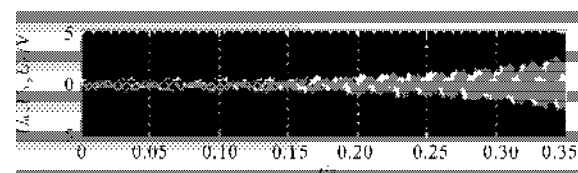
a) 输电线路三相电压曲线



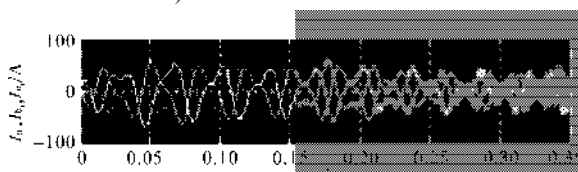
b) 输电线路三相电流曲线

图 6 FSC 对 20 Hz 次同步谐振的影响

Fig. 6 The effect of FSC on damping 20 Hz SSR



a) 输电线路三相电压曲线



b) 输电线路三相电流曲线

图 7 FSC 对 30 Hz 次同步谐振的影响

Fig. 7 The effect of FSC on damping 30 Hz SSR

从仿真结果可知, 无论是次同步信号为 20 Hz 还是 30 Hz, 系统开始运行时都是 60 Hz 基波和次同步信号相互作用; 0.2 s 系统将次同步干扰信号隔离后, 2 种次同步频率下的电压、电流都出现了不同程度的发散。可见, 就该系统而言, 采用 FSC 不能有效抑制系统次同步干扰信号产生的振荡。

3.2 TCSC+FSC 对电力系统次同步谐振的影响

以上研究表明, 就我们研究的系统而言, 采用 FSC 不能很好地抑制其次同步谐振。正是基于上述原因, 各国投入大量时间和精力去研究 TCSC 的工程应用,

并将已有的 FSC 改造成 TCSC。目前, 实际运行的 TCSC 系统很大部分都是从已有的 FSC 系统改造而来的, 其结构一般包括 FSC 和 TCSC 两部分。本文综合考虑了国内外几个典型的 TCSC 工程, 对图 5 所示的 FSC 电力系统进行改造, 根据一般的经验值最终确定 TCSC 占电容器总容量的 66 %, FSC 占 34 %, 保持电力系统中总电容 $C=177 \mu\text{F}$ 不变, 计算可得, $C_{\text{TCSC}}=117 \mu\text{F}$, $C_{\text{FSC}}=60 \mu\text{F}$, 系统的其他参数都保持不变。变换后的系统如图 8 所示。同样以次同步分别为 20 Hz、30 Hz 的信号源作用于系统, 0.2 s 时系统将次同步信号隔离, 仿真主要是观察输电线路三相电压、电流及 TCSC+FSC 模块出线三相电压、电流, 且三相电压、电流也采用标么值, 三相电压基准值为 500 kV, 三相电流以 100 000 kVA 的计算电流为基准值。系统仿真的设置时间为 [0 s, 0.4 s], TCSC 的触发角都设定为 $\alpha=160^\circ$, 系统的仿真结果如图 9 和图 10 所示。

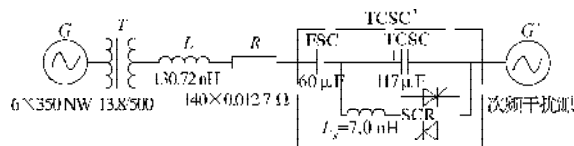


图 8 TCSC+FSC 电力系统等效图

Fig. 8 The equivalent diagram of TCSC+FSC power system



a) 输电线路三相电压曲线



b) 输电线路三相电流曲线



c) TCSC + FSC 模块出线三相电压曲线



d) TCSC + FSC 模块出线三相电流曲线

图 9 TCSC+FSC 对 20 Hz 次同步谐振的影响

Fig. 9 The effect of TCSC+FSC on damping 20 Hz SSR

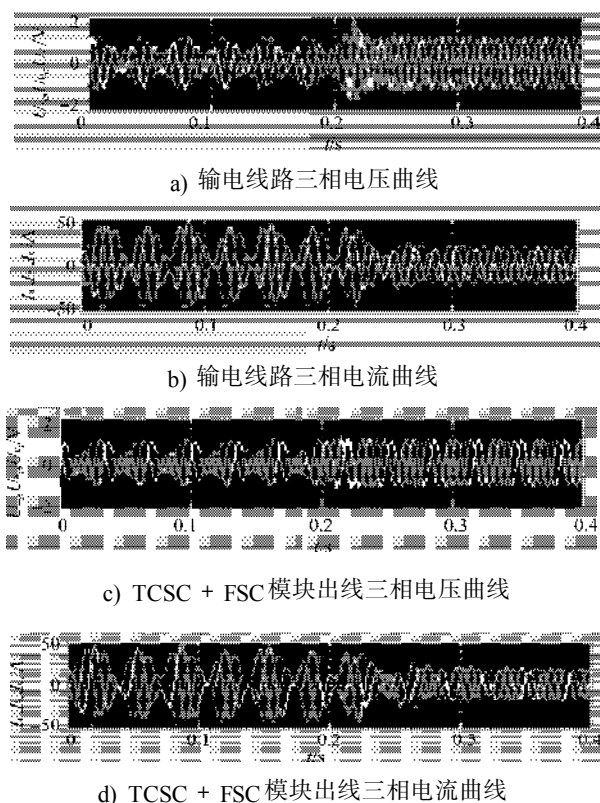


图 10 TCSC+FSC 对 30 Hz 次同步谐振的影响

Fig. 10 The effect of TCSC+FSC on damping 30 Hz SSR

从图 9 和图 10 中易知, 在 0.2 s 之前, 无论次同步为 20 Hz 还是 30 Hz, 系统的三相电压和电流都出现了非常明显的振荡现象; 而当系统保护发出信号, 将次同步信号隔离后, 仅在 0.25 s 时刻 TCSC+FSC 就基本上把系统三相电压和电流中的次同步谐振有效地抑制了。就本系统而言, 结合图 6、图 7 比较其仿真结果, 不难发现对同一电力系统, 当系统中发生次同步谐振后, 在保持串联补偿度不变的情况下, TCSC + FSC 的抑制次同步谐振的效果比 FSC 的抑制效果更有效。

4 结论

本文通过以计算分析和系统仿真相结合的方式对 TCSC+FSC 抑制电力系统次同步谐振进行了深入研究, 并得出以下结论:

1) 根据研究系统输电线路总电抗和串联补偿度 30.44 %, 可以确定系统总的补偿电容 $C=177 \mu\text{F}$, 结

合计算和仿真两种方法完成了 TCSC 参数的设计。同时, 通过比较研究发现, 当电抗器太小时, 电容器电流存在严重的尖峰现象; 太大时, TCSC 电压出现严重不对称现象。

2) 以同一系统为对象, 分别对 FSC 和 TCSC+FSC 电力系统次同步谐振的特性进行了对比研究。研究表明, 就我们研究的系统而言, 采用 FSC 不能有效抑制电力系统次同步谐振, 而改造后的 TCSC+FSC 能够有效抑制系统中的次同步谐振, 并可在相当短的时间内建立新的稳态, 以此验证了 TCSC + FSC 参数设计的合理性。

3) 实际运行的 TCSC 装置包括固定串补和可控串补两个部分, 本文充分考虑了这一实际情况, 根据一般经验值对电容器容量进行了合理分配, 建立了 TCSC+FSC 的系统仿真模型, 并以此为基础进行了相应的仿真, 为 TCSC 的研究工作开辟了一条新思路。

4) 本文是在假定三相对称的条件下研究得出的结果, 而且在 TCSC 和 FSC 所占百分比的分配上是根据一般经验值完成的。可见, 如何设计其分配原则及最优百分比还有很大的研究空间。

希望本文的研究成果, 能够为后续研究工作者提供一点参考, 从而促进国内外 TCSC 技术的发展。

参考文献:

- [1] 赵学强, 刘建新. 次同步谐振的频域分析法[J]. 华东电力, 1999(4): 1-4.
- [2] 徐 政, 罗惠群, 祝瑞金. 电力系统次同步谐振问题的分析方法概述[J]. 电网技术, 1999, 23(6): 36-39.
- [3] 韩 光, 葛 俊, 童陆园, 等. TCSC 抑制次同步谐振的机理分析[J]. 学术研究, 2002, 26(2): 18-21.
- [4] 葛 俊, 童陆园, 耿俊成, 等. TCSC 抑制次同步谐振的机理研究及其参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 25-29.
- [5] 吕世荣, 刘晓鹏, 郭 强, 等. TCSC 对抑制次同步谐振的机理分析[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 14-18.
- [6] 胡玉峰, 尹项根, 陈德树, 等. 可控串补 (TCSC) 本体保护原理、配置及实现研究[J]. 继电器, 2003, 31(7): 28-32.

(责任编辑: 廖友媛)