

TCSC 在次同步谐振中的借阻尼现象

吴 熙, 蒋 平

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 采用了基于时域仿真的复转矩系数法研究电力系统的电气阻尼特性。在 IEEE 次同步谐振第一标准模型的基础上, 分别将其 25%, 50%, 100% 容量的固定串补替换为 TCSC 后进行仿真分析。分析结果表明, 在串补度相同的情况下, 系统总阻尼近似守恒, TCSC 基本不提供正阻尼, 但 TCSC 由于其高度非线性, 使系统不同频率间发生了能量交互, 从而增加了某些频率的阻尼, 同时也降低了另外一些频率处的阻尼, 出现了借阻尼现象。讨论了借阻尼现象对 SSR 的正反两方面影响, 并利用仿真实验验证了 TCSC 抑制和引起 SSR 的可能性。该现象的发现对 TCSC 的实际运行具有一定的参考价值。

关键词: 可控串联补偿 (TCSC); 次同步谐振 (SSR); 复转矩系数法; 借阻尼

Borrow damping phenomena of TCSC to subsynchronous resonance

WU Xi, JIANG Ping

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The complex torque approach realized by frequency time domain simulation is adopted to study the electrical damping characteristics. The study is based on the IEEE first benchmark model. The subsynchronous resonance(SSR) damping characteristics of the model is studied in three cases of changing 25%, 50%, and 100% of the fixed series capacitor to thyristor-controlled series capacitor(TCSC). The results show that the total damping of the system is conserved under the condition of the same compensation degree, and TCSC can not provide damping for the system. But TCSC causes energy interactions between different frequencies because of its nonlinear behavior. The results also show that TCSC increases electrical damping of some frequencies while reduces electrical damping of others, that is the borrow damping phenomena. Finally, this paper discusses the negative and positive impact of the borrow damping phenomena on SSR, and uses time domain simulation to verify the possibility of mitigating and stimulating SSR. The finding of this phenomena offers a useful reference for the actual operation of TCSC.

Key words: TCSC; SSR; complex torque approach; borrow damping

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)03-0034-05

0 引言

固定串联补偿可能会在电力系统中造成次同步谐振 (SSR)^[1], 这可能引起一系列的问题, 如损坏发电机机轴。然而, 人们已注意到 TCSC 技术在调节模式下对 SSR 的抑制作用。利用 TCSC 抑制电力系统次同步谐振 (SSR) 的研究一直得到学术界和工程界的重视, 但目前关于 TCSC 对 SSR 所表现的特性说法不一: 文献[2]通过现场实验及实验结果分析指出 TCSC 对次同步振荡免疫, 即加入了 TCSC 后, 系统的阻尼特性和未加串联补偿前完全相同, 但文中并没有给出机理解释。文献[3]从 TCSC 的物

理模型触发, 经过较为严格的理论推导, 指出 TCSC 所提供的阻尼随运行条件的不同而不同, 在一定条件下对系统次同步谐振起正阻尼作用, 而在另一些条件下起负阻尼作用。文献[4]通过分析 TCSC 在次频下的阻抗特性, 指出了 TCSC 在次频下表现出电阻和电抗特性, 因而从不同程度上缓解或抑制了 SSR。

本文在 IEEE 次同步谐振第一标准模型上, 将系统的部分固定电容替换为 TCSC, 采用基于时域仿真的复转矩系数法^[5]分析了三种不同情况下的系统阻尼特性。结果显示, TCSC 对次同步谐振呈中性, 系统的总阻尼基本守恒, TCSC 提高了某些频率处的阻尼, 同时也降低了另外一些频率处的阻尼, 出现了借阻尼现象。随后, 分析了借阻尼现象对次同步谐振的影响, 验证了 TCSC 抑制和引发次同步

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划重大项目 (2008BAA13B07)

振荡的可能性, 为 TCSC 的设计和实际投用提供了参考。

1 IEEE SSR 第一标准模型分析

1.1 复转矩系数法

复转矩系数判别法^[6]是 Canay 于 1982 年提出的一种用于电力系统次同步谐振的分析方法, 其基本思想是: 令 $\Delta\delta$ 在轴系自然扭振频率附近作等幅振荡, 分别求出机械部分和电气部分的转矩对这一振荡的响应(表现为复转矩系数), 通过在次同步频率范围内对机械和电气复转矩系数进行频率扫描, 根据使得机械和电气弹性系数之和为零的频率下, 机械和电气阻尼之和的正负来判别 $\Delta\delta$ 的振荡是否被阻尼, 从而判断系统是否会发生次同步谐振。

随着电力系统中越来越多的 FACTS 和 HVDC 等非线性装置的加入, 传统的复转矩系数法遇到了一定的困难。文献[5]中提出了基于时域仿真的复转矩系数法, 该方法可以合理避开非线性器件的小扰动数学模型, 使得分析复杂系统的电气阻尼特性成为可能。而且由于时域仿真可采用非线性数学模型, 该方法比采用近似数学模型的分析方法更为精确。

复转矩系数法的具体实现时, 机械部分采用基于扫频方法的复转矩系数法^[6], 电气部分采用基于时域仿真的复转矩系数法^[5], 在具体操作时需要注意以下问题: (1) 由于加入了 FACTS 器件, 进行仿真的时候, 积分步长应该取得足够小, 否则结果将受到很大的影响。(2) 在用测试信号法求取电气阻尼特性时, 仅在加过扰动的频率点处得到的信息是正确的, 其余均为不可信点。

1.2 IEEE SSR 第一标准模型分析

本文的主要研究对象是 IEEE SSR 第一标准模型^[7], 系统结构如图 1。轴系固有的振荡频率为: 1.51 Hz, 15.7 Hz, 20.2 Hz, 25.7 Hz, 32.3 Hz, 47.5 Hz。

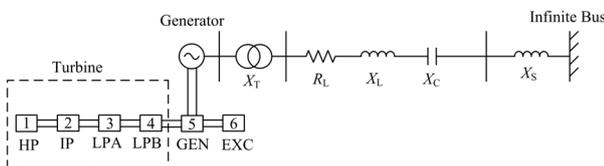


图 1 IEEE 次同步谐振第一标准模型

Fig.1 IEEE first benchmark model

采用复转矩系数法对系统进行分析, 得到 IEEE 第一标准系统的阻尼特性如图 2。

图 2 显示了 IEEE 第一标准模型的机械阻尼和电气阻尼, 为了便于分析比较, 将机械阻尼全部取反。在固有振荡频率处, 当电气阻尼特性曲线低于机械

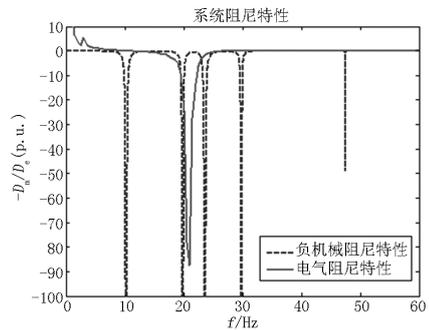


图 2 系统阻尼特性

Fig.2 Damping coefficient of the system

阻尼特性曲线, 系统将有可能产生次同步谐振。通过比较可以看出, 在频率为 20.21 Hz 处, 系统机械和电气阻尼之和小于 0, 该系统发生次同步谐振的风险较大。15.7 Hz, 25.7 Hz, 32.3 Hz 处阻尼较弱, 47.5 Hz 处, 机械阻尼很大, 该模式不参与振荡。加入持续时间为 0.075 s 的三相短路故障, 对该系统进行时域仿真, 结果如图 3, 各质块之间的扭振非常明显, 而且发散速度很快, 系统对次同步谐振的阻尼较小。GEN-EXC 间的扭矩频域分析结果如图 4 所示, 可以看出, 在 20.21 Hz 的扭矩分量最大, 这与前述复转矩系数分析的结果相吻合。

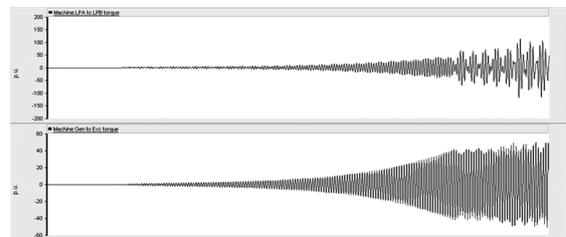


图 3 系统的扭矩时域相应

Fig.3 Torque vs time of the system

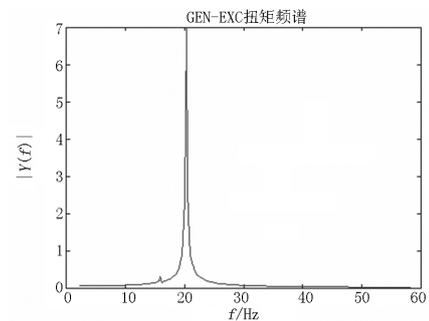


图 4 扭矩的频域分析

Fig.4 Torque vs f of the system

2 TCSC 在 SSR 中的借阻尼现象

2.1 TCSC 的借阻尼现象

文献[8]指出, PSS 提供给机电振荡模式的阻尼是从非机电模式转移来的, 称这种现象为借阻尼现象。同时指出 PSS 的负阻尼效应: 即 PSS 在增加一些机电振荡模式阻尼的同时, 将减少另一些机电振荡模式阻尼。那么对于 TCSC, 是否存在类似的现象呢? 本节将重点研究 TCSC 的借阻尼现象。

在 IEEE 第一标准模型的基础上, 保证其工频串补容量不变, 将部分或全部固定串补替换为 TCSC, 在 PSCAD 软件下对以下 3 种情况进行仿真分析 (TCSC 采用器件级模型, 底层控制为恒阻抗闭环控制):

1) 将 25%容量的固定串补电容以 TCSC 代替, 选择 TCSC 电容器为 $C=101.855 \mu\text{F}$, 电感器为 $L=0.0111 \text{H}$, $k=2.5$, 额定运行模式为导通角 $\sigma=40^\circ$, TCSC 容抗为 30.17Ω 。

2) 将 50%容量的固定串补电容以 TCSC 代替, 选择 TCSC 电容器为 $C=50.927 \mu\text{F}$, 电感器为 $L=0.022 \text{H}$, $k=2.5$, 额定运行模式为导通角 $\sigma=40^\circ$, TCSC 容抗为 60.35Ω 。

3) 将全部固定串补电容以 TCSC 代替, 选择 TCSC 电容器为 $C=25.464 \mu\text{F}$, 电感器为 $L=0.044 \text{H}$, $k=2.5$, 额定运行模式为导通角 $\sigma=40^\circ$, TCSC 容抗为 120.70Ω 。

采用测试信号法分别对上述情况进行分析, 即加入小扰动后取出发机电磁转矩和角速度变化, 进行 Fourier 分解后按式 $D_e = re(\Delta \dot{T}_e / \Delta \dot{\omega})$ 求出电气阻尼特性。实验 1~3 的结果如图 5。

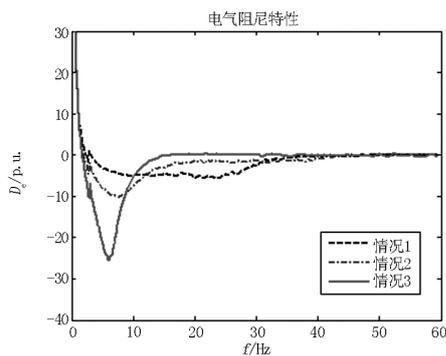


图 5 三种情况下的电气阻尼特性

Fig.5 Electrical damping coefficient for these 3 cases

图 5 显示了分别把 25%、50%、100%容量的固定串补替换为 TCSC 后系统发电机侧的电气阻尼特性, 可以看出, 系统的谐振中心发生了偏移。再比较图 2 中只含有固定串补的电气阻尼特性, 不难发现, 系统的谐振中心随着置换容量的增大而渐渐地

从 20 Hz 处向 5 Hz 处发生着偏移。

另外, 通过观察图 5 明显可以看出, 系统的总阻尼, 即电气阻尼特性曲线和零阻尼直线所围成的面积相等。下面, 在 0.2~59.5 Hz 频率范围内对这四种情况进行数值积分, 结果如表 1。

表 1 不同情况下的系统总阻尼

Tab.1 Total damping for different cases

串补形式	0.2~59.5 Hz 总阻尼
100%FSC	74.559 5
75%FSC+25%TCSC	74.323 0
50%FSC+50%TCSC	74.103 5
100%TCSC	73.892 0

需要指出的是, 上面所述的四种情况, 在 0~0.5, 以及 50 Hz 以上的电气阻尼特性是完全相同的, 因此可以在 0.2~59.5 Hz 范围内进行积分比较其总阻尼的变化。计算结果表明, 这四种情况下的总阻尼非常接近。在 PSCAD 中, 晶闸管的开关电阻取其默认值, 实际上, 晶闸管的开关电阻也非常小, 这种电阻给系统增加的阻尼可忽略不计。

2.2 TCSC 对 SSR 的影响分析

通过上一节的仿真实验, 清楚地观测到了 TCSC 在 SSR 中的借阻尼现象, 即 TCSC 使某些振荡频率下的阻尼减小, 会造成其他模式 (包括非振荡模式) 下阻尼的增大, 也就是说, TCSC 对某个频率增加的阻尼是“借”来的。于是, 更客观地讲, TCSC 对次同步谐振抑制作用也是相对的, TCSC 抑制了某一振荡频率的同时有可能增加另一模式发生次同步谐振的危险。但另一方面, TCSC 能抑制次同步谐振也是一个不争的事实, 关键在于合理配置 TCSC 在系统中的容量、大小、运行状态, 以使系统机电振荡模式能从非机电振荡模式中“借”来更多的阻尼, 以保证系统的稳定性。

在本文所做的三个实验中, 当把全部固定串补以 TCSC 代替时, 系统的电气振荡中心完全偏移到了 5 Hz 左右, 6 个振荡模式处的阻尼均为大于 0, 所以, 对于 IEEE 第一标准模型来说, 将固定串补全部替换为 TCSC 是最为合适的。

在 3 s 时加入 3 相短路故障, 持续时间为 0.075 s, 对以上 3 种情况进行时域仿真, 结果如图 6~8, 每张图中分别显示了低压缸 A (LPA) 和低压缸 B (LPB) 之间的转矩, 低压缸 B (LPB) 和发电机 (GEN), 以及发电机 (GEN) 和励磁机 (EXC) 之间的转矩。

可以看出, 将 25%和 50%固定串补容量替换为 TCSC 时系统仍是不稳定的, 当取实验 3 的参数时,

系统保持稳定, 文中所取机械自阻尼系数 0.01, 互阻尼系数为 0, 结果是比较保守的。

应该指出, 虽然在本例中, TCSC 很好地抑制了次同步谐振, 但 2~5 Hz 处的电气阻尼为负, 这点是比较危险的, 不排除引起低频振荡的可能, 因为该发电机共振频率为 1.57 Hz, 所以没有发生低频振荡。因此, 配置 TCSC 参数以及运行状态时一定要联系实际网络, 注意各振荡模式之间的关系, 此外, 与 PSS 等器件联合运行的研究也是非常有意义的。

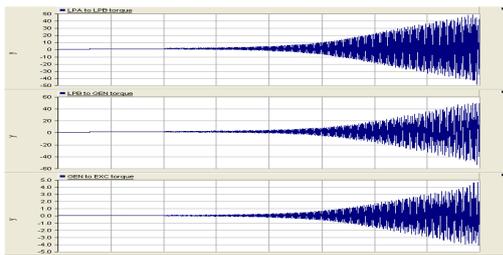


图 6 第一种情况下的系统扭矩变化

Fig.6 Torque vs time of the system for case 1

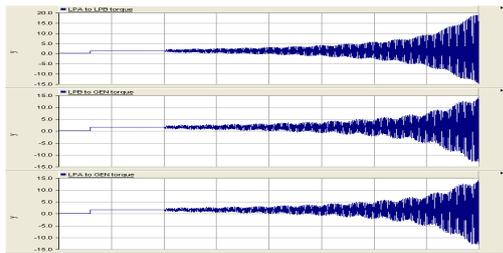


图 7 第二种情况下的系统扭矩变化

Fig.7 Torque vs time of the system for case 2

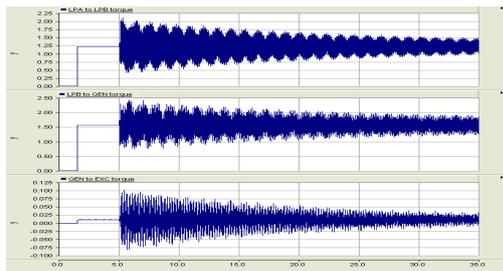


图 8 第三种情况下的系统扭矩变化

Fig.8 Torque vs time of the system for case 3

在实际运行中, 除了考虑 TCSC 的额定工作状态以外, 还应考虑 TCSC 对 SSR 的安全工作范围, 下面选择实验 3 的 TCSC 参数, 观测 TCSC 在导通角不同情况下的表现。

改变 TCSC 的触发角, 进行大量的仿真实验, 观察 TCSC 运行在不同导通角下的电气阻尼特性, 实验结果表明, 当 TCSC 工作在容性区时, 随着导通角的减小, 串补度减小, 系统的总电气负阻尼变小, 谐振中心向右偏移, 当触发角减小到 38° 时,

15.7 Hz 处的电气阻尼已处于临界值, 触发角再减小系统将不稳定; 当 TCSC 工作在感性区时, 系统总阻尼为正, 系统稳定。这进一步验证了系统的总阻尼是与基频串补度有关, 而 TCSC 仅具有借阻尼作用, 而并不能提供正阻尼。限于篇幅, 图 9 给出了几组有代表性的电气阻尼特性曲线, 具体说明见表 2。

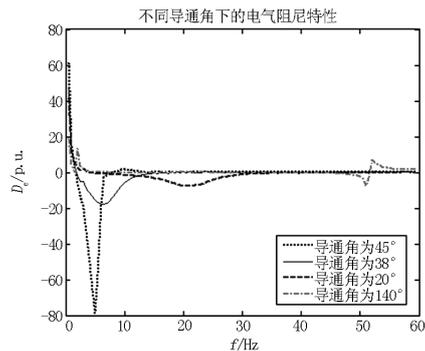


图 9 不同导通角下的电气阻尼特性

Fig.9 Electrical damping coefficient for different firing angle

表 2 不同导通角下的运行状态

Tab.2 Running status for different firing angles

导通角 $\sigma / (^\circ)$	TCSC 工作状态	系统稳定性
45	容性	稳定
38	容性	临界稳定
20	容性	不稳定
140	感性	稳定

3 借阻尼现象的进一步分析

在电路运行状态相同的情况下, TCSC 使系统不同频率间发生了能量交互, 从而出现了借阻尼现象, 这说明 TCSC 对次同步振荡并不是免疫的, 而且在一定的条件下可能引起次同步振荡。这也正为文献[9]所观测到的实验现象提供了一定的理论解释。文献[9]以实际 TCSC 工程为参照, 建立了相应的动态模拟装置, 观测到了 TCSC 在不同补偿度上激发 SSR 的现象。

下面以仿真实验验证 TCSC 引发次同步谐振的可能性。将 IEEE 第一标准模型的固定串补调整为 35.5 μF , 并将发电机自阻尼系数改为 0.05, 在这种情况下, 系统不发生发生次同步振荡, 时域仿真结果如图 10。

设计等容量的 TCSC 替换该串补电容, 参数为 $C=37.512 \mu\text{F}$, $L=0.03 \text{ H}$, $\sigma=40^\circ$, TCSC 容抗为 74.72 Ω , 时域仿真结果如图 11。

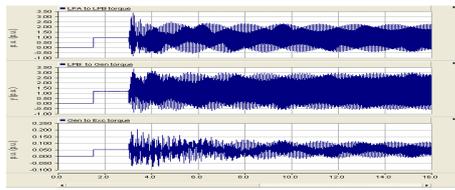


图 10 串补容量为 35.5 μF 时的系统扭矩变化
Fig.10 Torque vs time of the system for C=35.5 μF

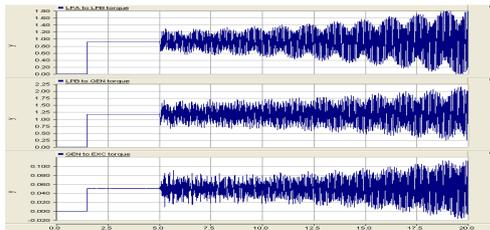


图 11 替换为 TCSC 后的系统扭矩变化
Fig.11 Torque vs time of the system for TCSC

用复转矩系数法对这两种情况进行分析, 结果如图 12, 可见当采用 35.5 μF 的固定串补时, 系统谐振中心为 29 Hz 左右, 在轴系谐振频率处的电气阻尼均非常小, 而采用 TCSC 以后, 虽然显著增强了 29 Hz 处的电气阻尼, 但由于借阻尼现象的作用, 使系统 3~35 Hz 频段内均出现了负阻尼, 在机械阻尼较小的情况下, 很容易引起次同步振荡。

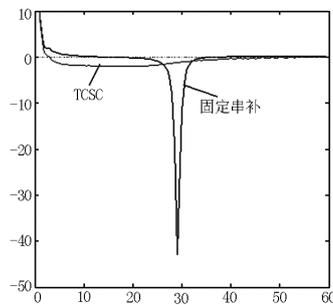


图 12 两种情况下的电气阻尼特性
Fig.12 Electrical damping coefficient for TCSC and FSC

4 结论

本文采用基于扫频和时域仿真相结合的复转矩系数法, 对待研系统的机械阻尼和电气阻尼作了详细的分析, 得出结论如下:

a) 在相同串补度的情况下, 系统的阻尼近似守恒, TCSC 基本不为系统提供阻尼, 某些频段体现出的正阻尼主要是通过能量交换的形式从其他频段“借”来的。

b) TCSC 运行在不同导通角时对系统的阻尼影响较大, 因此在调节 TCSC 的导通角时必须考虑 TCSC 对 SSR 的安全工作范围。

c) 由于存在借阻尼现象, TCSC 可能“借”走

振荡模式的阻尼, 从而激发次同步谐振。

参考文献

- [1] 傅惟惠, 孙德昌, 骆远志, 等. 具有串联补偿的大型电力系统中次同步谐振(SSR)的分析[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(9): 21-25.
FU Wei-hui, SUN De-chang, LUO Yuan-zhi, et al. The Analysis of Subsynchronous Resonance in a Large Power System with Seriescompensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(9): 21-25(in Chinese).
- [2] Piwko R J, Wegner C A, Kinney S J, et al. Subsynchronous Resonance Performance Tests of the SLATT Thyristor-Controlled Series Capacitor [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(6):1112-1119.
- [3] 江振华, 程时杰, 傅予力, 等. 含有可控串联补偿电容的电力系统次同步谐振研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6):47-52.
JIANG Zhen-hua, CHENG Shi-jie, FU Yu-li, et al. Analysis of Subsynchronous Resonance of Power System with TCSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 47-52.
- [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):18-21.
HAN Guang, TONG Lu-yuan, GE Jun, et al. Mechanism Analysis of Mitigating Subsynchronous Resonance by TCSC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2):18-21.
- [5] 徐政. 复转矩系数法的实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.
XU Zheng. The Complex Torque Coefficient Approach's Applicability Analysis and Its Realization by Time Domain Simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 1-4.
- [6] Canay I M. A Novel Approach to the Torsional Interaction and Electrical Damping of the Synchronous Machine Part I: Theory[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10): 3630-3638.
- [7] IEEE Subsynchronous Resonance Task Froce. First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance[J]. IEEE Trans on PAS, 1997, 96(5): 1565-1572.
- [8] 赵书强, 常鲜戎, 贺仁睦, 等. PSS 控制过程中的借阻尼现象与负阻尼效应[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 7-11.
ZHAO Shu-qiang, CHANG Xian-rong, HE Ren-mu, et al. Borrow Damping Phenomena and Negative Damping Effect of PSS Control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 7-11.
- [9] 唐勇, 李乃湖, 田立军, 等. 可控串联电容次同步谐振现象的动态模拟研究[J]. 电网技术, 1998, 22 (11): 22-26.
TANG Yong, LI Nai-hu, TIAN Li-jun, et al. Dynamic Simulation of Thyristor Comtrolled Series Capacitor and Sbusynchronous Resonance[J]. Power System Technology, 1998, 22 (11): 22-26.

收稿日期: 2009-03-03; 修回日期: 2009-03-21

作者简介:

吴 熙 (1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统运行控制; E-mail:wuxi112233@163.com

蒋 平 (1954-), 男, 教授, 从事电力系统运行控制和电力电子在电力系统中的应用方面的研究。