

分布式静止同步串联补偿器 抑制次同步谐振机理研究

王颖博, 宁改娣, 王跃

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对柔性交流输电 (FACTS) 领域中的一种新装置——分布式静止同步串联补偿器 (DSSC), 在实现其潮流调节功能的基础上, 首次从频域的角度研究了 DSSC 特性, 得到了 DSSC 的频率-阻抗分布曲线, 既为 DSSC 影响次同步谐振的机理研究提供了理论依据, 也为其他 FACTS 装置的研究提供了新的思路. 进一步, 采用测试信号法, 研究了 DSSC 对一个串联电容补偿系统的电气阻尼特性的影响, 结果表明, DSSC 的串入使得系统的谐振点频率发生偏移, 电气负阻尼绝对值显著减小, 证明 DSSC 对于次同步谐振具有抑制作用.

关键词: 柔性交流输电技术; 串联补偿器; 次同步谐振; 测试信号法; 电气负阻尼

中图分类号: TM712; TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)08-0102-06

Mechanism of Damping Sub-Synchronous Resonance with Distributed Static Synchronous Series Compensator

WANG Yingbo, NING Gaidi, WANG Yue

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new type of flexible AC transmission system (FACTS) devices—distributed static synchronous series compensator (DSSC), which enables to realize grid power flow control, is proposed. The DSSC is investigated from the view point of frequency domain and the impedance characteristics of the DSSC in sub-synchronous frequencies range are analyzed to provide the theoretical support for the sub-synchronous resonance (SSR) mechanism research. By means of test signal detection, the IEEE second benchmark model (system 1) is adopted and the system SSR damping characteristics are revealed. The results show that the resonant point of the combined system is shifted and the electric negative damping around the resonant point is reduced greatly.

Keywords: flexible AC transmission system; series compensator; sub-synchronous resonance; test signal method; electrical un-damping

自 20 世纪 70 年代美国 Mohave 电站发生由于线路串联电容补偿而引发次同步谐振 (SSR)、导致发电机组转子轴系损坏的严重事故之后, 国内外相继出现了多起类似事故^[1-4]. 为此, 次同步谐振问题得到了研究人员的普遍关注, 人们不断探索各种分析方法和抑制措施.

基于电力电子的柔性交流输电技术 (FACTS) 的出现, 为电力系统提供了更快速、更柔性化的控制手段, 也为次同步谐振问题的解决带来新的途径, 像 NGH 阻尼器、可控串联电容补偿器等基于晶闸管的 FACTS 装置已经应用于抑制 SSR 的工程实践之中. 随着电力电子技术的进一步发展, 基于电压源

收稿日期: 2011-02-18. 作者简介: 王颖博(1985—), 女, 硕士生; 宁改娣(联系人), 女, 副教授. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50707025); 台达电力电子科教发展基金资助项目(DREG2010002).

网络出版时间: 2011-07-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110718.1730.006.html>

逆变器的新一代 FACTS 装置开始登上历史舞台, 静止同步串联补偿器 (SSSC) 作为其中最重要的串联补偿装置, 受到了愈来愈多的关注, 有关 SSSC 对 SSR 的影响问题逐渐成为了研究的热点^[5-11].

在工程实践中,由于 SSSC 为单点集中式 FACTS,存在功率大、电压等级高、设计周期长、投资大、维护成本高等诸多问题^[12],极大地限制了其工程应用和推广。分布式静止同步串联补偿器(DSSC)采用分布式结构,具有功率小、制造技术成熟、便于安装维护、可分散投资、冗余度高等优势,很好地解决了 SSSC 的工程实践问题^[13-14]。同时,在 SSSC 影响 SSR 的机理问题上,目前研究很不充分,学术界仍存在很大的分歧:有学者认为 SSSC 不可能与线路电感发生谐振,因此不会引起 SSR^[5-6];也有学者提出,串有 SSSC 的线路阻抗有与电容器类似的谐振特性,因此有引起 SSR 的可能性^[7-8]。有关 DSSC 影响 SSR 的研究尚无文献报道,因此有必要对该问题展开探讨。

本文以 DSSC 为研究对象,在实现其潮流调节功能的基础上,研究其频率特性,得到了 DSSC 的阻抗特性,为 DSSC 影响 SSR 研究提供了理论支持.进一步,采用测试信号法研究了 DSSC 对 SSR 阻尼特性的影响,结果表明 DSSC 对 SSR 具有一定的抑制作用.

1 DSSC 潮流控制仿真与阻抗特性分析

1.1 DSSC 结构与控制

DSSC 采用分布式实现方案,将 SSSC 的大容量串补作用“化整为零”,即通过多个 DSSC 协同工作来实现单个 SSSC 的作用.这样,单个 DSSC 的容量便大大减小,利于批量生产,降低了成本,同时具有电压等级低、技术成熟等优势,多个 DSSC 的协同工作还有利于实现线路的多目标控制^[12].DSSC 对并行线进行潮流控制的示意图如图 1 所示.

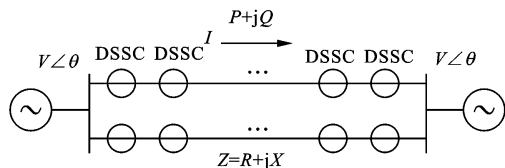


图 1 DSSC 调节并行线潮流示意图

如图 2 所示,DSSC 主电路主要由单相逆变器、直流母线电容以及滤波器、单匝变压器组成,其中单

向逆变器是能量转化的核心,其输出的脉冲电压经滤波环节滤除后,再通过耦合变压器串联在输电线路中. DSSC 最独特的结构在于单匝变压器,单匝变压器使 DSSC 可以悬挂在已投入运行的线路上工作,不用将线路截断,正是这一独特结构使 DSSC 具有安装灵活、易于维护的优势.

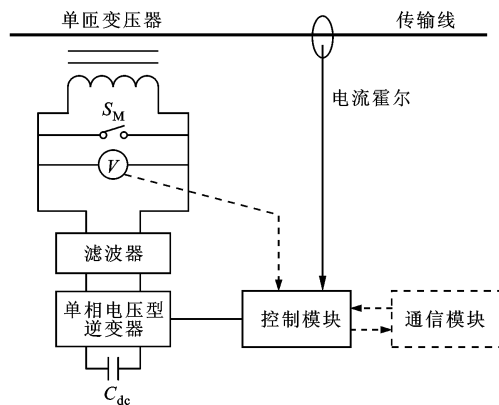


图 2 DSSC 结构

DSSC 的工作原理为,通过向传输线注入一无功电压来等效改变输电线路阻抗,进而达到控制线路潮流的目的.通过控制注入电压的相位便可使其进行感性或容性补偿,当注入电压相位超前输电电流 90° ,DSSC 可以实现感性补偿;当注入电压相位滞后 90° 时,可实现容性补偿. DSSC 控制框图如图 3 所示.

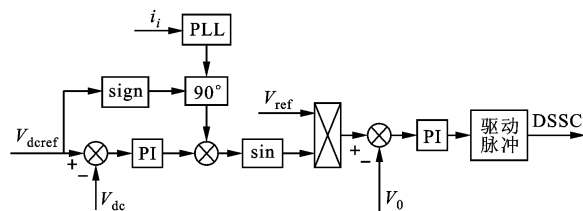


图 3 DSSC 控制框图

1.2 DSSC 容性补偿仿真

利用 MATLAB 仿真工具,根据图 2 结构搭建 DSSC 的详细模型,采用图 3 所示的控制策略,通过时域仿真,实现 DSSC 的潮流控制功能.由于在实际系统中,串联补偿装置多进行容性补偿,所以本文仅分析 DSSC 容性补偿模式时的情况.

仿真系统如图 4 所示,两个电压源分别模拟系统电源,线路以阻抗来代表.系统参数:电源电压为 1 kV,频率为 60 Hz,线路阻抗为 $(0.03+0.12j) \Omega$,变压器变比为 1 : 10. DSSC 参数:直流侧电容为 3.3 mF, LC 滤波器 $L=0.6$ mH, $C=22 \mu\text{F}$, L 寄生电阻 $r=0.8 \Omega$,开关频率 $f=8$ kHz.

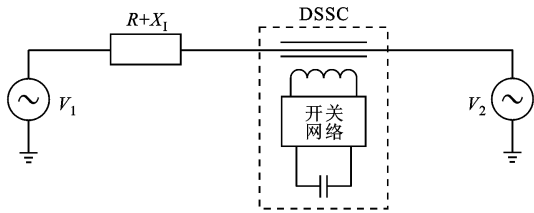
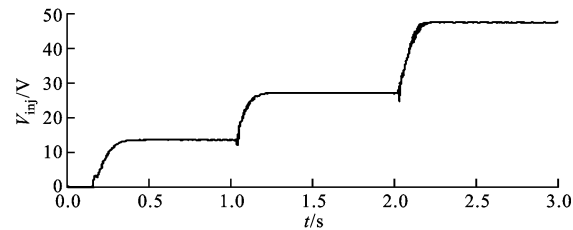
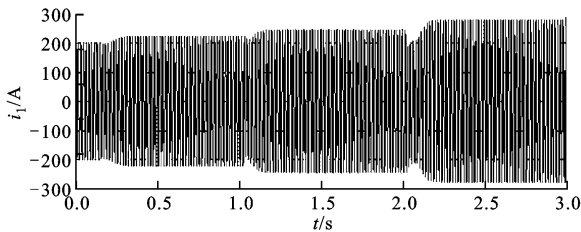


图 4 仿真系统示意图

仿真时,DSSC 在 0.2 s 时投入运行,交流侧电压给定值为 14 V,1 s 之后升至 28 V,再经过 1 s,升至 48 V,仿真结果如图 5~图 7 所示.由图 5 可见,交流侧电压电流能够很快地响应指令变化,过渡时间约为 100 ms,且随着注入电压的升高,线路电流也相应的增加;图 6 表明线路传输的功率也随指令而增加;由图 7 可以发现注入电压滞后线路电流 90°,表明 DSSC 进行的是容性补偿.



(a)电压



(b)电流

图 5 容性补偿下交流侧电压、电流波形

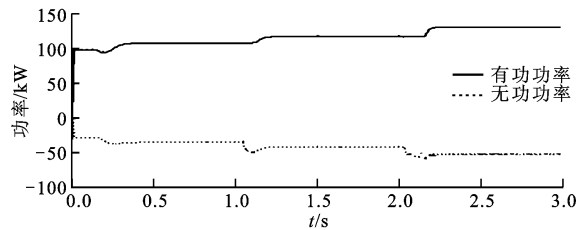


图 6 线路传输功率图

1.3 DSSC 阻抗特性分析

研究表明,DSSC 在相应的控制策略下,可以在

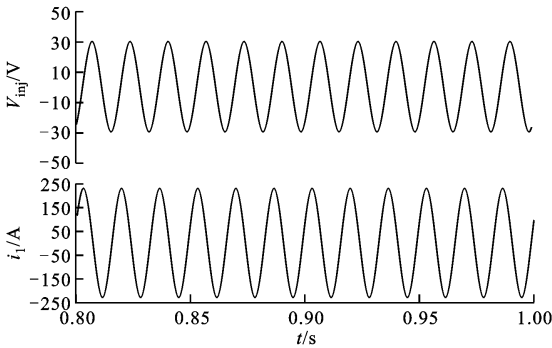


图 7 电压电流相位关系图

原有线路的基础上增加线路传输功率,对系统潮流进行灵活快速的控制.然而,DSSC 的上述功能和优势,反映的仅仅是基频处的特性,是在时域内观察得到的结果,而研究 SSR 问题时,需要的是一段频率区间内的特性.因此,本节将基于 MATLAB 仿真工具,研究 DSSC 在次同步频率区间(基频为 60 Hz 时,对应的频率范围约为 10~55 Hz)的阻抗特性.

需要特别说明的是,由于 MATLAB 中的 Z-f(阻抗扫描)模块的应用范围具有局限性,不适用于含开关器件的 FACTS 装置,因此作者根据阻抗计算的原理,搭建相应的模块来实现 Z-f 模块的功能

$$Z_f = \dot{U}_f / \dot{I}_f \tag{1}$$

式中: $\dot{U}_f$ 、 $\dot{I}_f$ 为各个频率下的电压、电流分量,均是频率 f 的函数.

在待测模型所在支路与地之间并联一个测试电流源,该电流源由一系列频率成分的电流叠加而成,本文取频率范围 5~55 Hz,间隔 0.5 Hz,当仿真至 DSSC 稳定工作,测取 DSSC 两端的电压、电流分量,并分别进行傅里叶分析.最后,根据式(1),便可以计算得到各个频率下的阻抗,进行频率阻抗分析.

采用上述仿真方法得到的 DSSC 阻抗特性如图 8 所示.由图 8 可以发现,容性补偿时,DSSC 阻抗特性与电容的阻抗特性相差很大.图 8a 中电阻分量在次同步频率范围内恒为正值,而电容理论上没有电阻性分量.图 8b 表明,DSSC 电抗随频率的增大而增大,而电容恰恰相反.

2 电气阻尼特性分析

2.1 系统仿真模型

以 IEEE 次同步谐振第二标准模型(系统 1)为研究对象^[15],其系统结构如图 9 所示.该系统为一单机无穷大网络,升压变压器采用 Δ/Y 接法,传输

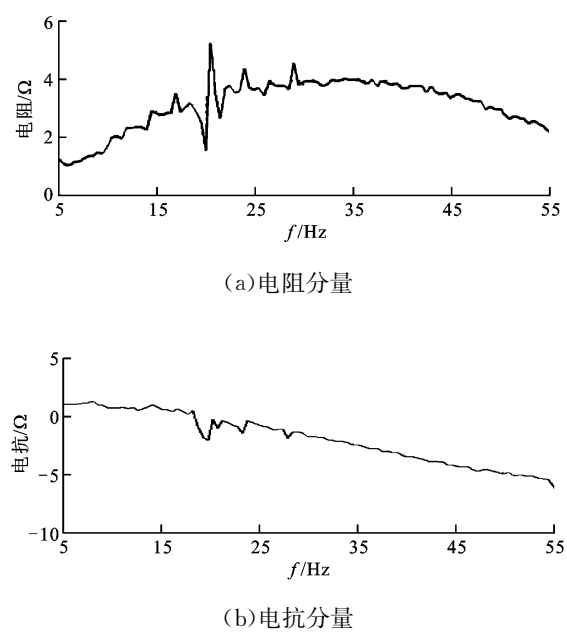


图 8 DSSC 次同步频率下的阻抗特性

网络为双回线传输,其中线路 1 采用串联补偿装置,线路 2 不加串联补偿.

按图 9 所示,在 MATLAB 平台上建立仿真模型,同步发电机作为系统能量源,以一个理想电压源模拟无穷大网络,图中各量均为标么值,其基准容量 $S_B=100\text{ MV}\cdot\text{A}$, $V_B=500\text{ kV}$,线路阻抗采用集中参数. 仿真分析时设定初始条件如下:机组功率因数为 0.9,机组励磁调节和调速系统简化为恒定输出.

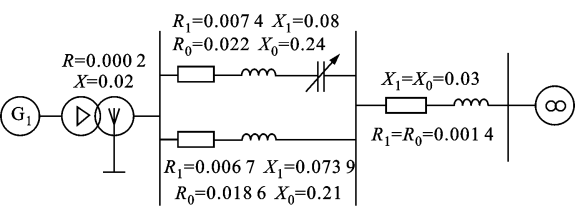


图 9 IEEE 次同步谐振第二标准模型系统 1 接线图

以下将分两种补偿方案研究发电机组次同步振荡阻尼特性:①只含固定串联补偿电容;②固定电容和 DSSC 混合串联补偿.

2.2 固定串联补偿系统的电气阻尼特性

改变图 9 系统中线路的串联补偿电容值,研究不同串联补偿度条件下发电机组的电气阻尼特性. 这里主要考虑 3 种情况:串联补偿分别为 35%、55%、75%. 对于每种串联补偿,都在相同的初始运行条件下,采用测试信号法^[16]进行分析,得到各个串联补偿下的电气阻尼系数,其结果如图 10 所示.

由图 10 可以发现,串联补偿为 55%时约在频率 24.5 Hz 处有明显的电气负阻尼,该频率与 55%

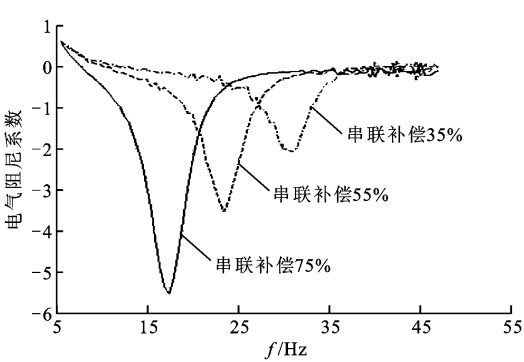


图 10 3 种串联补偿度下系统的电气阻尼特性

串联补偿下的电气谐振频率(折算到转子侧)相对应,同样的规律也可以在串联补偿为 35%和 75%中发现. 可见在采用固定串联补偿的系统中,会在系统谐振频率处产生显著的电气负阻尼,说明在谐振频率处产生次同步振荡的可能性最大,这一点与文献[15]中关于系统发生次同步振荡条件的判断相一致. 纵观 3 种串联补偿下的电气阻尼曲线可以发现,随着补偿度的增加,系统的谐振频率(折算到转子侧)向低频方向移动,而且补偿度越高,谐振频率处的最大负阻尼值也越大,表明串联补偿度越高,系统发生次同步振荡的可能性就越大. 这一点与固定串补实际工程中通常限制串补度的做法不谋而合.

2.3 DSSC 对电气阻尼特性的影响

对于图 9 所示系统,在线路 1 中加入 DSSC,由 DSSC 与固定电容共同承担补偿度,考虑混合串联补偿 55%的情形,其中固定电容补偿与 DSSC 补偿的分配比例为 90%:10%,此时固定电容约串联补偿系统感抗的 49%(55% $\times$ 90%).

对于上述混合串补系统,系统初始值设置同电容串补系统,待 DSSC 进入稳态之后,采用测试信号法,研究 DSSC 的加入对于发电机组电气阻尼特性的影响. 为了便于观察分析,本文给出两个对比图,图 11 为固定串联补偿 55%与混合串联补偿 55%时的电气阻尼特性对比,图 12 为固定电容串联补偿 49%与混合串联补偿 55%时的电气阻尼特性对比.

由图 11 可以发现,在串联补偿均为 55%的情况下,混合串补时的电气负阻尼值较固定电容有显著减小,绝对值上减少了约 1.5 个单位,约占固定电容电气阻尼峰值的 40%,表明采用混合串联补偿在同样满足补偿度的条件下,可以大幅减小系统发生次同步振荡的可能性.

由图 12 可以发现,在加入 DSSC 前后,有两个明显的变化:一方面电气谐振频率向高频方向偏移,

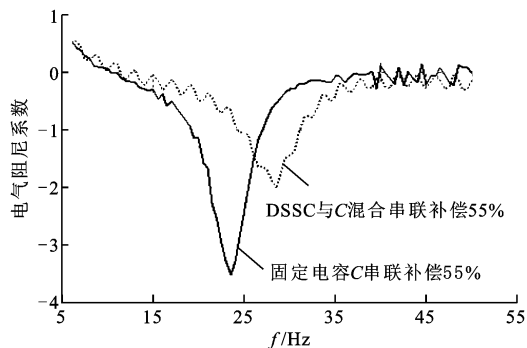


图11 串联补偿均为55%时的电气阻尼对比

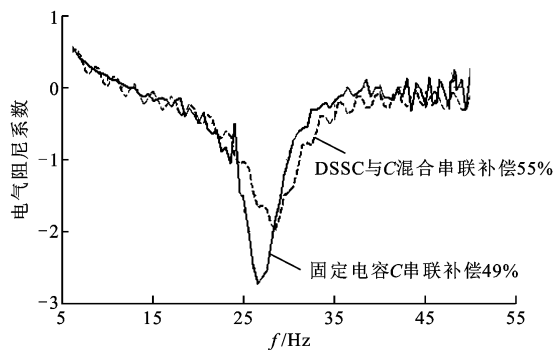


图12 混合串联补偿55%时加入DSSC的电气阻尼对比

这一特点与DSSC阻抗频率关系中的电抗部分相对应;另一方面电气负阻尼值减小,说明DSSC对次同步振荡有一定的抑制作用,也验证了DSSC阻抗频率分析中的正电阻特性。

3 结 论

本文在时域仿真DSSC的基础上,首次分析了DSSC的阻抗特性,研究表明,DSSC在次同步频率范围内电阻分量恒为正,且对外呈现出容性。DSSC的阻抗特性为其抑制次同步谐振的机理研究提供了理论支持,同时本文所采用的方法也为其他FACTS装置的研究提供了一种借鉴。

采用测试信号法研究了DSSC对电气阻尼特性的影响,结果表明,DSSC串入系统时,系统谐振点会向高频方向偏移(折算到转子侧),而且谐振点附近的电气负阻尼有明显减小,说明DSSC可以显著减小系统发生次同步谐振发生的可能性,抑制次同步谐振。

本文仅针对DSSC常电压模式下的频率阻抗特性进行了研究,后续研究将涉及DSSC常电抗模式以及各模式下控制器参数对系统频域特性的影响。

参考文献:

- [1] BALLANCE J W, GOLDBERG S. Subsynchronous resonance in series compensated transmission-lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1973, 92 (5): 1649-1658.
- [2] WALKER D N, BOWLER C E J, JACKSON R L, et al. Results of subsynchronous resonance test at Mohave[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94 (5): 1878-1889.
- [3] SUZUKI H, FUJIWARA R, UEMURA K. Analysis and control for subsynchronous resonance problem[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95 (6): 1766-1766.
- [4] TANG J, ACHILLES R, AGRAWAL B, et al. Readers guide to subsynchronous resonance: IEEE committee report[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7 (1): 150-157.
- [5] PILLAI G N, GHOSH A, JOSHI A. Torsional interaction studies on a power system compensated by SSSC and fixed capacitor [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18 (3): 988-993.
- [6] GYUGYI L, SCHAUDER C D, SEN K K. Static synchronous series compensator: a solid-state approach to the series compensation of transmission lines [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(1): 406-417.
- [7] PRADHAN A C, LEHN P W. Frequency-domain analysis of the static synchronous series compensator [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 406-417.
- [8] RIGBY B S, HARLEY R G. Resonant characteristics of inverter based transmission line series compensators [C]//Proc of 30th Annu IEEE Power Electronics Specialist Conf. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 412-417.
- [9] 张帆, 徐政. 静止同步串联补偿器控制方式及特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 75-80. ZHANG Fan, XU Zheng. Study on control and characteristics of static synchronous series compensator [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 75-80.
- [10] BONGIORNO M, ANGQUIST L, SVENSSON J. A novel control strategy for subsynchronous resonance mitigation using SSSC[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23 (2): 1033-1041.
- [11] 宁改娣, 何世杰, 王跃. 静止同步串联补偿器抑制次同步谐振研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (2): 189-193. NING Gaidi, HE Shijie, WANG Yue. Study on static synchronous series compensator used in damping sub-

- synchronous resonance[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42 (2): 189-193.
- [12] DIVAN D, JOHAL H. Distributed FACTS: a new concept for realizing grid power flow control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22 (6): 2253-2260.
- [13] 宁改娣, 王跃, 何世杰, 等. 一种新型柔性交流输电技术的研究[J]. 电力电子技术, 2006, 40(6): 140-142. NING Gaidi, WANG Yue, HE Shijie. A novel flexible AC transmission system[J]. Power Electronics, 2006, 40(6): 140-142.
- [14] 宁改娣, 王跃, 王兆安, 等. 分布式柔性交流输电系统静止串行补偿器的研究[J]. 电工电能新技术, 2005, 24 (4): 55-58. NING Gaidi, WANG Yue, WANG Zhao'an. Research on static series compensator of distributed flexible AC transmission systems [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2005, 24 (4): 55-58.
- [15] IEEE Subsynchronous Resonance Task Force. Second benchmark model for computer-simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104 (5): 1057-1066.
- [16] 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. 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.

(编辑 杜秀杰)