

# TCSC 动态模型的精确性验证

周文俊<sup>1</sup>, 吴 熙<sup>2</sup>

(1.江苏省电力公司调度中心, 江苏 南京 210024; 2.东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 由于电力系统次同步振荡(SSO)问题要分析的是既非工频又非低频的成分, 故不能采用工频准稳态模型或认为工频电量上有低频调制来进行分析, 使用的 TCSC 等强非线性电力装置的模型必须在整个次同步振荡范围内都有效, 因此 TCSC 动态模型精确性验证的工作非常重要。本文提出通过对比含 TCSC 系统在整个次同步频域内的阻尼特性来验证 TCSC 动态模型的精确性, 一方面, TCSC 采用采样-数据模型, 运用小扰动分析法建立系统的状态空间矩阵, 并通过一系列的矩阵变换直接求取系统的电气阻尼特性; 另一方面, 在 PSCAD 中搭建系统时域仿真模型, TCSC 模型精确到器件级, 然后采用测试信号法获取系统的电气阻尼特性; 最后, 将两种方法获得的电气阻尼进行对比。结果表明: 基于 TCSC 采样-数据模型较为精确, 适用于次同步振荡问题的分析。

**关键词:** 次同步振荡; TCSC; 动态模型; 精确性

## 0 引言

基于小扰动信号稳定分析的特征值分析方法是一种理论上较为严格的方法, 可对串联补偿系统进行次同步振荡 (Sub-Synchronous Oscillation, SSO) 分析<sup>[1]</sup>。但在处理 HVDC、FACTS 等强非线性装置时, 该方法遇到了困难, 由于次同步振荡问题的特殊性, 不能采用工频准稳态模型或认为工频电量上有低频调制来进行分析, 所使用的模型必须在整个次同步振荡范围内都有效。因此在分析含可控串补 (TCSC) 等非线性装置的电力系统的次同步振荡问题时, 往往采用测试信号法<sup>[2-5]</sup>, 该方法基于时域仿真, 可以考虑电力电子开关元件的开关过程, 但该方法仅能获得系统的电气阻尼特性, 难以从根本上揭示 TCSC 对次同步振荡的影响机理, 而且应用到控制器设计方面也有不小的困难。所以, 基于小扰动理论建立含 TCSC 等 FACTS 设备的状态空间方程, 并采用特征值分析还是非常有必要的。

目前, 通过学术界的不断努力, 已经建立了一些 TCSC 的动态数学模型, 其中 Othman 提出的采样-数据模型<sup>[6,7]</sup>最为严格, 该模型基于 Poincare 映射的数学方法, 理论上的有效范围为 0~2 倍工频, 但该模型并未有过比较精确的验证。

本文提出通过对比含 TCSC 系统的整个次同步振荡频域内的电气阻尼特性来验证 TCSC 动态模型的精确性。首先通过小扰动理论简历含 TCSC 系统

的状态空间方程, 并通过一系列的矩阵变化直接求解系统的电气阻尼特性。然后采用测试信号法, 基于时域仿真信号获得系统的电气阻尼特性。最后, 对这两种方法获得的电气阻尼特性进行了比较, 结果表明, 采用-数据模型在整个次同步振荡范围内均比较精确, 适用于次同步振荡问题的分析。

## 1 系统模型

本文以 IEEE SSR 第一标准模型<sup>[8]</sup>为例进行研究, 将 25%固定串补电容以 TCSC 代替, 固定串补电容  $C_0=29.303$  F, TCSC 电容  $C=101.85$  F, 电感  $L=0.0111$  H,  $k=2.5$ 。系统模型如图 1 所示。

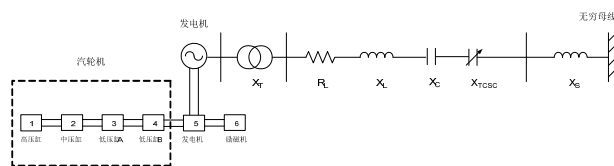


图 1 待研系统

发电机轴系采用 6 质块模型, 电磁回路考虑 d, q, f, D, Q, g 六个绕组的过渡过程, 系统参数如下(时间常数单位为 s, 其余单位均为标么值)。

轴系惯性时间常数和弹性系数:  $H_1=0.092897$ ,  $H_2=0.155589$ ,  $H_3=0.858670$ ,  $H_4=0.884215$ ,  $H_5=0.868495$ ,  $H_6=0.0342165$ ;  $k_{12}=7277$ ,  $k_{23}=13168$ ,  $k_{34}=19618$ ,  $k_{45}=26713$ ,  $k_{56}=1064$ ;  $D_{11}=0.925$ ,  $D_{22}=0.925$ ,  $D_{33}=0.925$ ,  $D_{44}=0.925$ ,  $D_{55}=0.925$ ,  $D_{66}=0.925$ ,  $D_{12}=D_{23}=D_{34}=D_{45}=D_{56}=0$ 。

同步发电机参数:  $R_a=0.0015$ ,  $X_L=0.13$ ,  $X_d=1.79$ ,  $X_d'=0.169$ ,  $X_d''=0.135$ ,  $X_q=1.71$ ,  $X_q'=0.237$ ,  $X_q''=0.2$ ;  $T_{d0}'=4.3$ ,  $T_{d0}''=0.032$ ,  $T_{q0}'=0.85$ ,  $T_{q0}''=0.05$ 。

励磁机和电压调节器:  $K_E=50$ ,  $T_E=0.002$ ,  $T_A=0.01$ 。

变压器、输电线路及无穷大母线内电抗:  $X_L=0.14$ ,  $R_L=0.02$ ,  $X_L=0.50$ ,  $X_S=0.06$ 。

同步电机初始运行条件:  $P_e=0.9$ ,  $V_f=1.05$ ,  $\cos\phi=0.9$ (滞后)。

该系统的轴系固有的振荡频率为:  $TM_1(15.71\text{Hz})$ ,  $TM_2(20.21\text{Hz})$ ,  $TM_3(25.55\text{Hz})$ ,  $TM_4(32.28\text{Hz})$ ,  $TM_5(47.75\text{Hz})$ , 此外, 该系统还存在一个低频振荡模式  $LFM$ , 约为  $1.5\text{Hz}$ 。

## 2 阻尼特性的解析求解方法

### 2.1 TCSC 动态模型

TCSC 采用采样-数据模型, 该模型基于庞加莱映射理论, 具有较为严格的理论推导, 理论上其有效范围是 0~2 倍工频。

首先, 根据庞加莱映射理论, 采样周期取  $T/2$  ( $T$  为线电流周期), TCSC 采用开环控制, 建立 TCSC 的 a、b、c 三相离散数学模型, 并在运行点附近线性化, 可得:

$$\Delta \mathbf{V}_{abc}(k+1/2) = \mathbf{F}_{abc} \Delta \mathbf{V}_{abc}(k) + \mathbf{G}_{abc} \Delta \mathbf{I}_{abc}(k) \quad (1)$$

式中,  $\Delta \mathbf{V}_{abc}(k)$  表示当前时刻 TCSC 三相电容电压的变化量,  $\Delta \mathbf{I}_{abc}(k)$  表示当前时刻三相线路电流的变化量,  $\Delta \mathbf{V}_{abc}(k+1/2)$  表示半个周期后 TCSC 的电容电压的变化量。

经过 Park 变换, 并忽略零轴分量, 可得到 dq 轴坐标下的 TCSC 离散模型:

$$\Delta \mathbf{V}_{DQ}(k+1/2) = \mathbf{F}_{DQ} \Delta \mathbf{V}_{DQ}(k) + \mathbf{G}_{DQ} \Delta \mathbf{I}_{DQ}(k) \quad (2)$$

构造一个连续的微分方程, 使其解为式(2)

$$\dot{\Delta \mathbf{V}}_{DQ} = \mathbf{A}_{DQ} \Delta \mathbf{V}_{DQ} + \mathbf{B}_{DQ} \Delta \mathbf{I}_{DQ} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{A}_{dq}$ 、 $\mathbf{B}_{dq}$  采用如下变换公式求得:

$$\mathbf{A}_{DQ} = \frac{2}{T} \ln(\mathbf{F}_{DQ}), \quad \mathbf{B}_{DQ} = (\mathbf{F}_{DQ} - \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}_{DQ} \mathbf{G}_{DQ} \quad (4)$$

由于系统方程采用发电机的 dq 坐标, 而此处的 TCSC 方程基于线路电流的 DQ 坐标, 故必须进行坐标变换。转换完坐标后, TCSC 的状态空间方程可表示为:

$$\dot{\Delta \mathbf{V}}_{dq} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{V}_{dq} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{I}_{dq} + \mathbf{C} \tilde{\mathbf{I}}_{dq} \Delta \delta + \mathbf{D} \tilde{\mathbf{V}}_{dq} \Delta \omega \quad (5)$$

式中,  $\Delta \mathbf{V}_{dq}$  表示 TCSC 的电容电压增量,  $\Delta \mathbf{I}_{dq}$  为线路电流增量,  $\Delta \delta$  为发电机功角增量,  $\Delta \omega$  为发电机转速增量,  $\tilde{\mathbf{I}}_{dq}$  和  $\tilde{\mathbf{V}}_{dq}$  分别代表线路电流、TCSC 电容电压稳态值。该方程可直接并入系统的状态空间方程, 状态空间矩阵增加 2 阶。

### 2.2 基于矩阵变换的电气阻尼特性求解方法

根据线性化理论列出系统的全部状态空间方程, (发电机和网络状态方程具体推导可参考文献 [9]), 共 24 阶, 其中状态变量为:

$$\Delta \mathbf{x} = [\Delta \omega_1, \Delta \omega_2, \Delta \omega_3, \Delta \omega_4, \Delta \omega_5, \Delta \omega_6, \Delta \delta_1, \Delta \delta_2, \Delta \delta_3, \Delta \delta_4, \Delta \delta_5, \Delta \delta_6, \Delta i_d, \Delta i_f, \Delta i_D, \Delta i_q, \Delta i_g, \Delta i_Q, \Delta u_R, \Delta E_{fd}, \Delta u_{Cd}, \Delta u_{Cq}, \Delta V_d, \Delta V_q]。$$

其中, 记  $\Delta \omega = [\Delta \omega_1, \Delta \omega_2, \Delta \omega_3, \Delta \omega_4, \Delta \omega_5, \Delta \omega_6]$  为发电机转速变量,  $\Delta \delta = [\Delta \delta_1, \Delta \delta_2, \Delta \delta_3, \Delta \delta_4, \Delta \delta_5, \Delta \delta_6]$  为发电机转子角变量。  $\Delta \mathbf{Z} = [\Delta i_d, \Delta i_f, \Delta i_D, \Delta i_q, \Delta i_g, \Delta i_Q, \Delta u_R, \Delta E_{fd}, \Delta u_{Cd}, \Delta u_{Cq}, \Delta V_d, \Delta V_q]$  为其他变量, 包括发电机六个绕组的电流变量, 电压调节器输出电压变量, 励磁机输出电压变量, 固定串补电压变量和 TCSC 的电容电压变量。

全网的线性化方程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta \mathbf{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} & 0 \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} & \mathbf{A}_{23} \\ \mathbf{A}_{31} & \mathbf{A}_{32} & \mathbf{A}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta \mathbf{Z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

对上式进行变化, 得:

$$\begin{aligned} p \Delta \mathbf{Z} &= \mathbf{A}_{31} \Delta \delta + \mathbf{A}_{32} \Delta \omega + \mathbf{A}_{33} \Delta \mathbf{Z} \\ &= \mathbf{A}_{31} \Delta \delta + \mathbf{A}_{32} p \Delta \delta + \mathbf{A}_{33} \Delta \mathbf{Z} \\ &= (\mathbf{A}_{31} + \mathbf{A}_{32} p) \Delta \delta + \mathbf{A}_{33} \Delta \mathbf{Z} \end{aligned} \quad (7)$$

经过线性化处理的发电机电磁转矩方程为

$$\Delta T_e = i_{q0} \Delta \psi_d + \psi_{d0} \Delta i_q - i_{d0} \Delta \psi_q - \psi_{q0} \Delta i_d \quad (8)$$

磁链方程为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \psi_d \\ \Delta \psi_f \\ \Delta \psi_D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \chi_d & \chi_{ad} & \chi_{ad} \\ \chi_{ad} & \chi_f & \chi_{ad} \\ \chi_{ad} & \chi_{ad} & \chi_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta i_d \\ \Delta i_f \\ \Delta i_D \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta \psi_q \\ \Delta \psi_g \\ \Delta \psi_Q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \chi_q & \chi_{aq} & \chi_{aq} \\ \chi_{aq} & \chi_g & \chi_{aq} \\ \chi_{aq} & \chi_{aq} & \chi_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta i_q \\ \Delta i_g \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $\chi$  表示各个绕组间的感抗。

对(8)(9)两式进行整理, 可以将电磁转矩变量  $\Delta T_e$  用  $\Delta Z$  表示, 记为:

$$\Delta T_\rho = \mathbf{A}_T \Delta \mathbf{Z} \quad (10)$$

将(7)代入(10), 整理得:

$$\begin{aligned}\Delta T_e &= \mathbf{A}_T(p\mathbf{I} - \mathbf{A}_{33})^{-1}(\mathbf{A}_{31} + \mathbf{A}_{32}p)\Delta\boldsymbol{\delta} \\ &= K_F(p)\Delta\boldsymbol{\delta}\end{aligned}\quad (11)$$

为了得到在次同步频率范围系统的电气阻尼特性, 将  $p=j\zeta$  代入式(11), 可以得到电磁转矩表达式:

$$\Delta T_{\mathcal{E}} = K_F(j\xi)\Delta\mathcal{E} \quad (12)$$

式中,  $K_E(j\zeta)$  就是电气复转拒系数, 将其实部和虚部分开, 令:

$$K_F(j\lambda) = K_o(\lambda) + j\lambda D_o(\lambda) \quad (13)$$

式中,  $K_e(\xi)$  和  $D_e(\xi)$  分别为电气弹性系数和电气阻尼系数, 都是  $\xi$  的函数。当  $\xi$  从 2.5Hz 变化到 60Hz 时, 就能画出系统在次同步频内的电气阻尼特性。

### 3 阻尼特性的测试信号法求取

测试信号法是目前分析含 TCSC 系统次同步振荡问题的重要分析方法,由于其基于时域仿真实现,可以考虑晶闸管的开关过程,一般认为这种方法得到的结果是非常精确的。首先,需要在 PSCAD 软件中搭建图 1 所示的系统模型,TCSC 精确到器件级,搭建好的 PSCAD 仿真模型如图 2 所示。

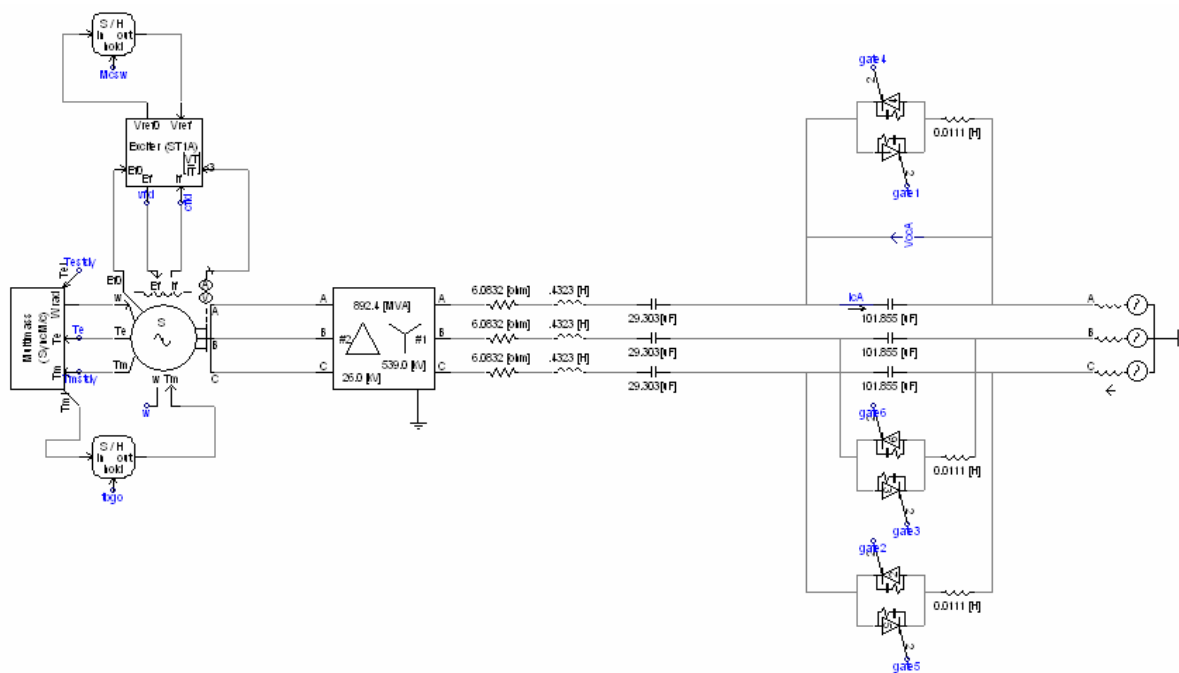


图 2 PSACD 软件中建立的仿真模型

搭建好系统模型后, 可通过如下步骤获取系统的电气阻尼特性:

① 发电机轴系采用单刚体模型。对确定的运行工作点,待系统进入稳态运行后,在待研究发电机转子上施加一串的小值脉动转矩:

$$\Delta T_m = \sum_{\lambda} T_{\lambda} \cos(\lambda \omega_0 t + \varphi_{\lambda}) \quad (14)$$

式中,  $\lambda < 1$ ,  $T_\lambda$ 、 $\varphi_\lambda$  分别是频率为  $\lambda\omega_0$  的脉动转矩的幅值和初相位。要求  $T_\lambda$  较小, 以使  $\Delta T_m$  的值不至于破坏系统可线性化的假设条件。

注：由于 TCSC 装置的非线性特性，一次加入多个频率的小值脉动转矩时有可能使各频率值之间相互干扰，因此稳妥的办法是对含 TCSC 的系统一次只加入一个频率的小值脉动转矩。

② 施加脉动转矩后,一直仿真到系统再次进入稳态(30s),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  $\omega$ 。

③ 将上述 2 个量进行 Fourier 分解,得出不同频率下的  $\Delta T_e$  和  $\Delta \omega$

④ 由于

$$\frac{\Delta T_e}{\Delta \omega} = D_e(\lambda) - j \frac{1}{\lambda} K_e(\lambda) \quad (15)$$

可求出电气阻尼系数  $D_e(\lambda)$ :

$$D_e(\lambda) = \operatorname{Re}\left(\frac{\Delta T_e}{\Delta \omega}\right) \quad (16)$$

#### 4 阻尼特性对比

分别才用解析方法和测试信号法求取 TCSC 导通角为  $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$  时的电气阻尼特性,分别如图 3-5 所示。

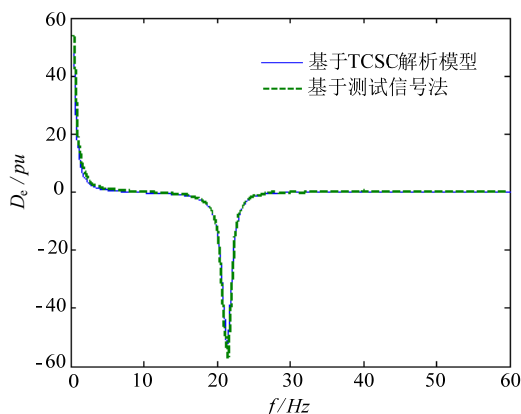


图 3 TCSC 导通角为  $10^\circ$  时的电气阻尼特性

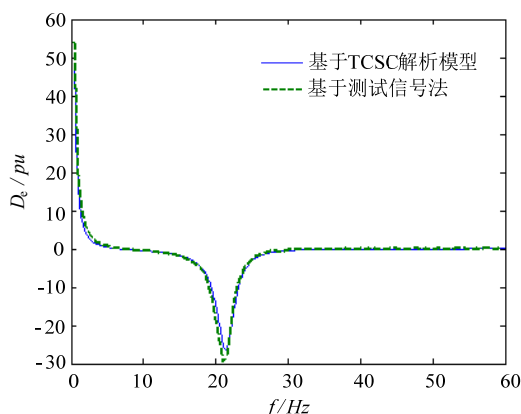


图 4 TCSC 导通角为  $20^\circ$  时的电气阻尼特性

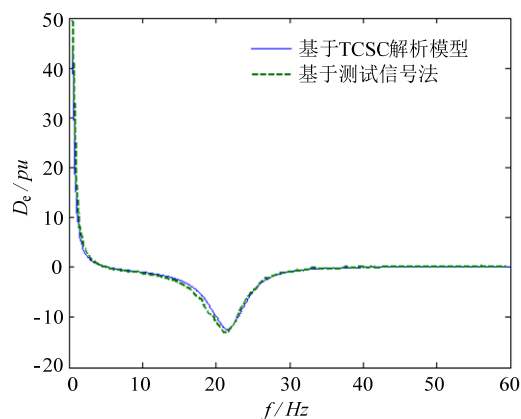


图 5 TCSC 导通角为  $30^\circ$  时的电气阻尼特性

由图 3-5 可以看出,当 TCSC 工作于不同导通角时,基于解析法得到的电气阻尼特性和基于测试信号法得到的电气阻尼特性均能较好的吻合,说明 TCSC 的采样-数据模型适用于次同步振荡分析。

#### 5 结论

为了验证 TCSC 动态模型是否适用于次同步振荡分析,本文将 TCSC 模型加入到 IEEE SSR 第一标准模型中,提出通过系统在整个次同步频域内的阻尼特性来验证 TCSC 动态模型的精确性。首先,TCSC 采用采样-数据模型,通过线性化理论列出系统的全部状态空间方程,给出了基于矩阵变换的电气阻尼特性求解方法;然后,在 PSCAD 中搭建系统时域仿真模型,并采用测试信号法获取系统的电气阻尼特性;最后,对这两种方法获取的电气阻尼特性进行了对比。结果表明:基于解析法得到的电气阻尼特性和基于测试信号法得到的电气阻尼特性均能较好的吻合,TCSC 的采样-数据模型适用于次同步振荡分析。

#### 参考文献:

- [1] Xiaorong Xie, Xijiu Guo, and Yingduo Han, Mitigation of Multimodal SSR Using SEDC in the Shangdu Series-Compensated Power System[J]. IEEE Transactions on Power Systemss, 2011, 26(1): 384-391.
- [2] 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]. Proceeding of the CSEE, 2000, 20(6):1-4.

- [3] 吴熙, 蒋平, 胡弢[J]. 电力系统稳定器对次同步振荡的影响及其机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 57-63.  
Wu Xi, Jiang Ping, Hu Tao. [J]. Impact of Power System Stabilizer on Subsynchronous Oscillation and Its Mechanism. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 57-63.
- [4] 张帆, 徐政. TCSC 对发电机组次同步谐振阻尼特性影响研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 68-70.  
Zhang Fan, Xu Zheng. Study of SSR damping on a generator connected to TCSC[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(3): 68-70. (in Chinese).
- [5] 吴熙, 蒋平. SEDC 与 TCSC 联合抑制次同步振荡的研究[J]. 电工技术学报, 2011, 27(4): 179-184.  
Wu Xi, Jiang Ping. Research on Sub-Synchronous Oscillation Mitigation Using Supplementary Excitation Damping Controller and Thyristor Controlled Series Capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 27(4): 179-184 (in Chinese).
- [6] Othman H A, Angquist L. Analytical Modeling of Thyristor Controlled Series Capacitors for SSR Studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(1): 119-127.
- [7] 刘晓冬, 杨煜, 陈陈. 基于采样-数据模型方法的可控串联补偿系统对次同步振荡抑制作用的计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 1-5.  
Liu Xiaodong, Yang Yu, Chen Chen. SSR Computational Analysis in TCSC system Based on Sample-Data Model [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 1-5.
- [8] IEEE Subsynchronous Resonance Task Force. First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.
- [9] 程时杰, 曹一家, 江全元, 等. 电力系统次同步振荡的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
Cheng Shijie, Cao Yijia, Jiang Quanyuan. Theories and methods of Subsynchronous Oscillation [J]. Beijing: Science Press, 1999.

---

#### 作者简介:

周文俊(1986—), 男, 江苏常州人, 从事电力系统调度运行, E-mail: zwj16004110@yahoo.com.cn;

吴熙(1987—), 男, 江苏靖江人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行控制, E-mail: wuxi112233@163.com。