基于改进交互影响指标的多 FACTS 间交互影响分析

程子霞[1,2],吴西博[1],金 阳[1]

1. 郑州大学电气工程学院,郑州 450001
2. 清华大学电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室,北京 100084

摘要 随着柔性交流输电(FACTS)技术理论和工程应用的逐渐深化与推广,FACTS 装置大幅度提高线路的功率传输水平、提高电力系统稳定性的能力逐渐得到体现。然而,随着 FACTS 装置应用数量的不断增多,FACTS 装置间的交互影响问题日益突出,规范形方法为研究电力系统嵌入多 FACTS 装置的动态特性提供了一种解决方案。然而如何确定系统危险运行方式及该方式下对 FACTS 装置间交互影响的程度,成为研究 FACTS 装置间交互影响问题中的关键环节之一。由于系统运行状态空间庞大,搜索不同运行状态下的 FACTS 装置间交互影响信息成为限制计算速度和计算效率的关键因素。本文针对高阶规范形方法计算 FACTS 装置间交互影响时危险运行方式确定的问题,提出一种改进的交互影响衡量指标,该指标能够将 FACTS 装置间的交互影响程度分析与危险运行方式确定同时计及,且在计算过程中引入了电磁暂态仿真手段,以辅助验证所提方法的效果。以静止无功补偿器(SVC)和可控串联补偿器(TCSC)为例,应用 IEEE 9 节点系统进行算例分析,验证了该方法的可行性。

关键词 规范形方法;电磁仿真;静止无功补偿器;可控串联补偿器;交互影响

中图分类号 TM712　　**文献标识码** A　　**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.31.003

Interaction Analysis for Multiple FACTS Based on Improved Interaction Index

CHENG Zixia[1,2], WU Xibo[1], JIN Yang[1]

1. *School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*
2. *State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

Abstract According to the theory and the applications of the Flexible AC Transmission System (FACTS) technology, the FACTS devices can improve the level of the power transmission and the power system stability. With the growing applications of FACTS devices, the interaction between the FACTS devices becomes increasingly an important issue. The normal form method provides a solution of the dynamic analysis of the power system embedded with the multiple FACTS devices. How to determine the critical operation mode of the power system, and the degree of the interaction of multiple FACTS devices in the critical operation mode become a key problem. The operating state of a power system has many modes. The interaction of the FACTS devices in different operating states is a key factor in increasing the computation speed and the computation efficiency. This paper, based on the high order normal form method, proposes an improved interaction index to analyze the degree of interaction between the FACTS devices. The improved interaction index also considers the determination of the critical operation mode of the power system. The electromagnetic transient simulation is used for the verification of the proposed method. Finally, taking the Static Var Compensator (SVC) and the Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC) on the IEEE 9-bus power system as examples, the feasibility of the proposed improved interaction index is shown.

Keywords normal form method; electromagnetic transient simulation; static var compensator; controlled series compensation; interaction

收稿日期:2012-03-26;修回日期:2012-08-23

基金项目:国家自然科学基金项目(60974005);高等学校博士点专项科研基金项目(20094101120008)

作者简介:程子霞,讲师,研究方向为电力系统稳定分析、高电压与绝缘技术等,电子信箱:chzx@zzu.edu.cn

0　引言

柔性交流输电(FACTS)技术是随着电力需求的增加,电网规模扩大的同时,电网运行条件的复杂化和难度加大而对控制技术提出更高要求的情况下产生的。FACTS 的概念是由美国著名电力专家 N. G. Hingorani 于 1986 年首先提出的[1-2]。FACTS 技术为交流输电网提供了快速、连续和精确的控制手段以及输送优化潮流功率的能力，同时保证了系统稳定性。然而随着电力系统中 FACTS 装置的日益增多，多个 FACTS 装置之间会产生交互影响,严重时甚至有可能破坏电力系统稳定性[3-7]。

近年来，规范形方法作为一种有效的数学分析工具,被广泛用于电力系统相关领域。规范形方法是简化常微分方程的重要手段，主要用于研究非线性动力学问题，这为分析 FACTS 装置间交互影响问题提供了重要途径。Barocio 等[8]采用规范形方法分析了静止无功补偿器(SVC)对系统振荡的影响,并采用时域仿真定性地分析了结果,最后利用二阶近似解的信息对系统阻尼和模式交互作用进行了分析[8]。有研究采用规范形方法,分析说明单个可控串联补偿器(TCSC)可提高系统区域振荡的阻尼,同时时域仿真也显示它可以减少系统中非线性的影响[9]。对电力系统中装设多台 SVC 时的研究表明[10-11],系统中装设的多个 SVC 电压控制器间可能存在交互影响,文中还引入一个非线性交互指标用以定量评价多个 SVC 控制器间交互影响的强烈程度。然而,如何确定系统危险运行方式及该方式下对 FACTS 装置间交互影响的程度,成为研究 FACTS 装置间交互影响问题中的关键环节之一。由于系统运行状态空间庞大,搜索不同运行状态下的 FACTS 装置间交互影响信息成为了限制计算速度和计算效率的关键因素。本文采用高阶规范形方法,针对危险运行方式确定的问题,提出一种改进交互影响衡量指标,以定量分析 FACTS 装置间的交互影响程度，并以静止无功补偿器和可控串联补偿器为例,应用 IEEE 9 节点系统,通过机电仿真的方法进行算例分析,验证了该方法的可行性。同时在计算过程中引入了电磁暂态仿真手段,以辅助验证所提方法的效果。

1　规范形基本理论和系统模型

1.1　动力系统的 2 阶展开

电力系统的模型在数学上常采用微分-代数方程组,其状态空间模型为

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{X}}{\mathrm{d}t}=f(\boldsymbol{X}) \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_n]^{\mathrm{T}}\in R^n$ 为 n 维状态向量,$f(\boldsymbol{X})=[f_1(\boldsymbol{X}),f_2(\boldsymbol{X}),\cdots,f_n(\boldsymbol{X})]^{\mathrm{T}}$。

对式(1)在稳定平衡点 X_{S} 附近用泰勒级数展开,并保留至 2 阶项,

$$\frac{\mathrm{d}X_i}{\mathrm{d}t}=A_i\boldsymbol{X}+\frac{1}{2}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}^i\boldsymbol{X} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{A}=[\partial f/\partial X]_{X_{\mathrm{S}}}$ 为 Jacobi 矩阵,$\boldsymbol{H}^i=[\partial^2F_i/\partial X_jX_k]_{X_{\mathrm{S}}}$ 为 Hessian 矩阵,其中 i,j,k 的取值范围均为$[1,2,\cdots,n]$。

用 $\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{VX}$ 对上式进行相似变换为

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{Y}}{\mathrm{d}t}=\Lambda\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{C}(\boldsymbol{Y}) \tag{3}$$

则第 j 个 Jordan 型变量的状态方程为

$$\frac{\mathrm{d}y_i}{\mathrm{d}t}=\lambda_jy_j+\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}C_{kl}^jy_ky_l+\cdots \tag{4}$$

式中,$\boldsymbol{C}_j=[C_{kl}^j]=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}v_{ji}\ [\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}^i\boldsymbol{U}]$;$v_{ji}$ 为矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的左特征行向量矩阵 $\boldsymbol{V}$ 的第 j 行第 i 列元素,l 的取值范围为$[1,2,\cdots,n]$;$\boldsymbol{U}$ 为 $\boldsymbol{A}$ 的右特征向量矩阵,且满足 $\boldsymbol{VU}=\boldsymbol{I}$。

根据规范型理论,条件 $\lambda_k+\lambda_l\neq\lambda_j$ 满足时,可采用 2 阶变换式

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{Z}+h_2(\boldsymbol{Z}) \tag{5}$$

$$h_2^j(\boldsymbol{Z})=\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=1}^{N}h2_{kl}^jz_kz_l \tag{6}$$

$$h2_{kl}^j=\frac{C_{kl}^j}{\lambda_k+\lambda_l-\lambda_j} \tag{7}$$

这样即可得到一系列线性微分方程如下:

$$\frac{\mathrm{d}z_j}{\mathrm{d}t}=\lambda_jz_j\qquad j=1,2,\cdots,n \tag{8}$$

从而得到时域近似解析解为

$$z_j(t)=z_{j0}\mathrm{e}^{\lambda_jt} \tag{9}$$

将上式带入式(5),得到

$$y_j=z_{j0}\mathrm{e}^{\lambda_jt}+\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}h2_{kl}^jz_{k0}z_{l0}\mathrm{e}^{(\lambda_k+\lambda_l)t}+\cdots \tag{10}$$

最后,用 $\boldsymbol{X}=\boldsymbol{UY}$ 相似变换得到

$$x_i(t)=\sum_{j=1}^{n}u_{ij}z_{j0}\mathrm{e}^{\lambda_jt}+\sum_{j=1}^{n}u_{ij}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}h2_{kl}^jz_{k0}z_{l0}\mathrm{e}^{(\lambda_k+\lambda_l)t} \tag{11}$$

式中,初始值 Z_0 可以通过求解方程组 $Z_0-Y_0+h_2(Z_0)=0$ 获得。

1.2　系统元件动态方程模型

发电机动态方程采用 3 阶模型，并安装 1 阶静止励磁系统。动态方程为

$$\dot{\delta}_k=w_0w_k \tag{12}$$

$$\dot{w}_k=\frac{1}{M_k}[P_{m_k}-E'_{qk}I_{qk}-(X_{qk}-X'_{d_k})I_{d_k}I_{q_k}-D_kw_k] \tag{13}$$

$$\dot{E}'_{qk}=\frac{1}{T'_{d0_k}}[E_{fd_k}-(x_{d_k}-x'_{d_k})I_{d_k}-E'_{qk}] \tag{14}$$

$$\dot{E}_{fdk}=\frac{1}{T_A}[-E_{fd_k}+K_A(V_{\mathrm{ref}_k}-V_k)] \tag{15}$$

式中,$V_k^2=V_{d_k}^2+V_{q_k}^2$;$V_{d_k}=X_{q_k}I_{q_k}$;$V_{q_k}=E'_{q_k}-X'_{d_k}I_{d_k}$;各电气量的物理意义参照文献[12]。

SVC 常用于控制节点电压,以保证节点电压在合理的范围内,结构框图如图 1,其动态表达式如下:

$$\dot{\beta}_{\mathrm{SVC}}=\frac{1}{T_{\mathrm{A}}}[-\beta_{\mathrm{SVC}}+K_{\mathrm{A}}(V_{\mathrm{ref}}-V_{\mathrm{SVC}})] \tag{16}$$

式中,β_{SVC} 为 SVC 等效输出电纳值;K_{A} 和 T_{A} 分别为 SVC 控制

器增益及其时间常数。SVC 的逻辑框图见图 1。

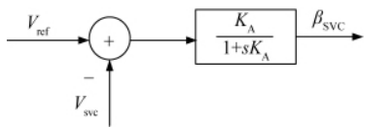


图 1　静止无功补偿器

Fig. 1　Static VAR compensation

TCSC 可以改善线路功率的传输水平,动态表达式为

$$\dot{X}_{TCSC}=-\frac{1}{T_B}[-X_{TCSC}+X_{ref}+K_B(P_{ref}-UI)] \tag{17}$$

其中,X_{TCSC} 为 TCSC 等效输出电抗值;T_B 为动态环节时间常数;K_B 为比例常数;X_{ref} 为基准电抗;P_{ref} 为基准输出功率。

TCSC 逻辑框图见图 2。

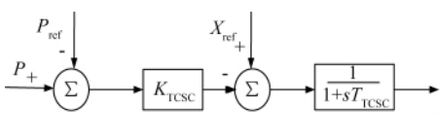


图 2　选取的 TCSC 结构

Fig. 2　Selection of TCSC structure

2　基于高阶规范形的计算分析方法

高阶规范形方法计算步骤如下。

先通过潮流计算得到初始的潮流计算结果,并求出状态方程初始解;然后收缩电网络方程到状态方程中,通过符号矩阵计算得出规范形 2 阶近似解的符号矩阵形式;最后带入初始数值,求得近似解。具体过程如图 3。

由高阶规范形方法计算结果可知,装置间的非线性交互作用体现在以下 2 个方面:第一部分为源自初始条件的线性部分 Z_0;第二部分为表征 2 阶模态交互(模态 λ_k 与 λ_l 之间)作用的 $\sum_{j=1}^{n} u_{ij} \sum_{k=1}^{n} \sum_{l=1}^{n} h2_{kl}^{j} z_{k0} z_{l0}$。Thapar 等[13-14]研究中提出了非线性交互指标的定义如下:

$$T(j)=\frac{\max\limits_{kl}(|(h2_{kl}^{j} z_{k0} z_{l0})|)}{|z_{j0}|} \tag{18}$$

然而,这种非线性指标定义仅考虑到解析解的非线性特性,在实际运行中,只有在系统运行在距离电压崩溃点附近时,负交互影响的危害性才能够显现出来,因此在距离电压崩溃点较远地区,即使负交互影响的某些指标较大,也不会对系统运行构成很大危险。因此,本文定义一种改进非线性交互指标,在定量分析系统受干扰后模态交互作用影响程度的同时,考查系统距离电压崩溃点的距离。具体见图 3。

$$T1(j)=\frac{\max\limits_{kl}(|(h2_{kl}^{j} z_{k0} z_{l0})|)}{|z_{j0}|}\cdot\frac{1}{D(\min(|real(\lambda)|))} \tag{19}$$

其中,D 为相空间欧氏距离,$\min(|real(\lambda)|)$为系统状态方程特征值实部的绝对值最小值。该指标在系统接近危险运行状态时表现出较大值,而在系统距离危险运行状态较远时,即使 2 阶模态表现出的交互影响强烈,也不会表现出较大的数值。

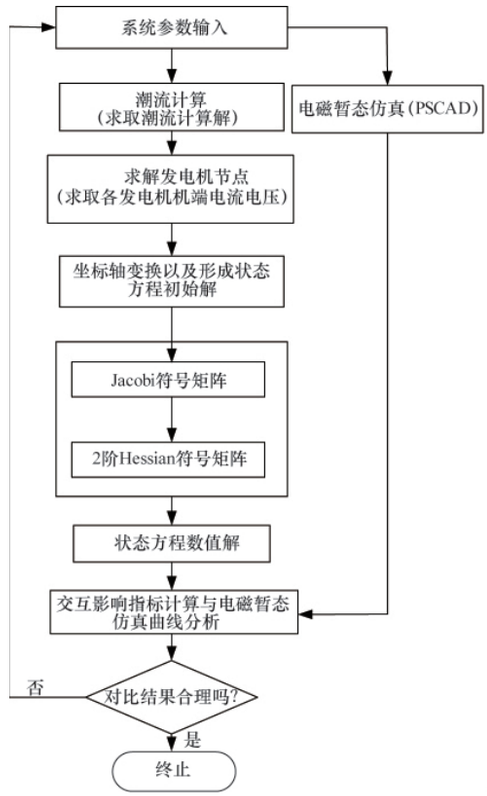


图 3　2 阶规范型分析流程图

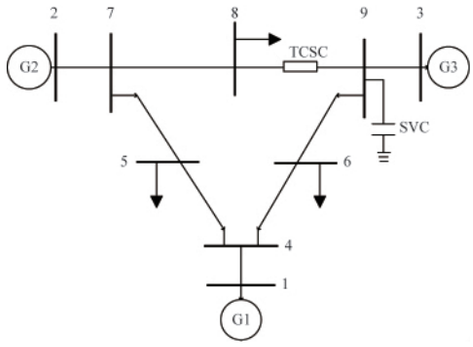
Fig. 3　Flowchart of 2 order normal form analysis

3　算例

IEEE 9 节点系统单线图和电磁暂态仿真示意图如图 4 所示。发电机采用 3 阶模型,励磁系统采用 1 阶模型,节点 9 处安装一个 SVC,用于稳定节点电压,节点 8 与节点 9 之间处安装了一个 TCSC,用以提高线路传输功率。设定干扰为母线 7 处 3 相短路,且故障清除时间为 0.1s。

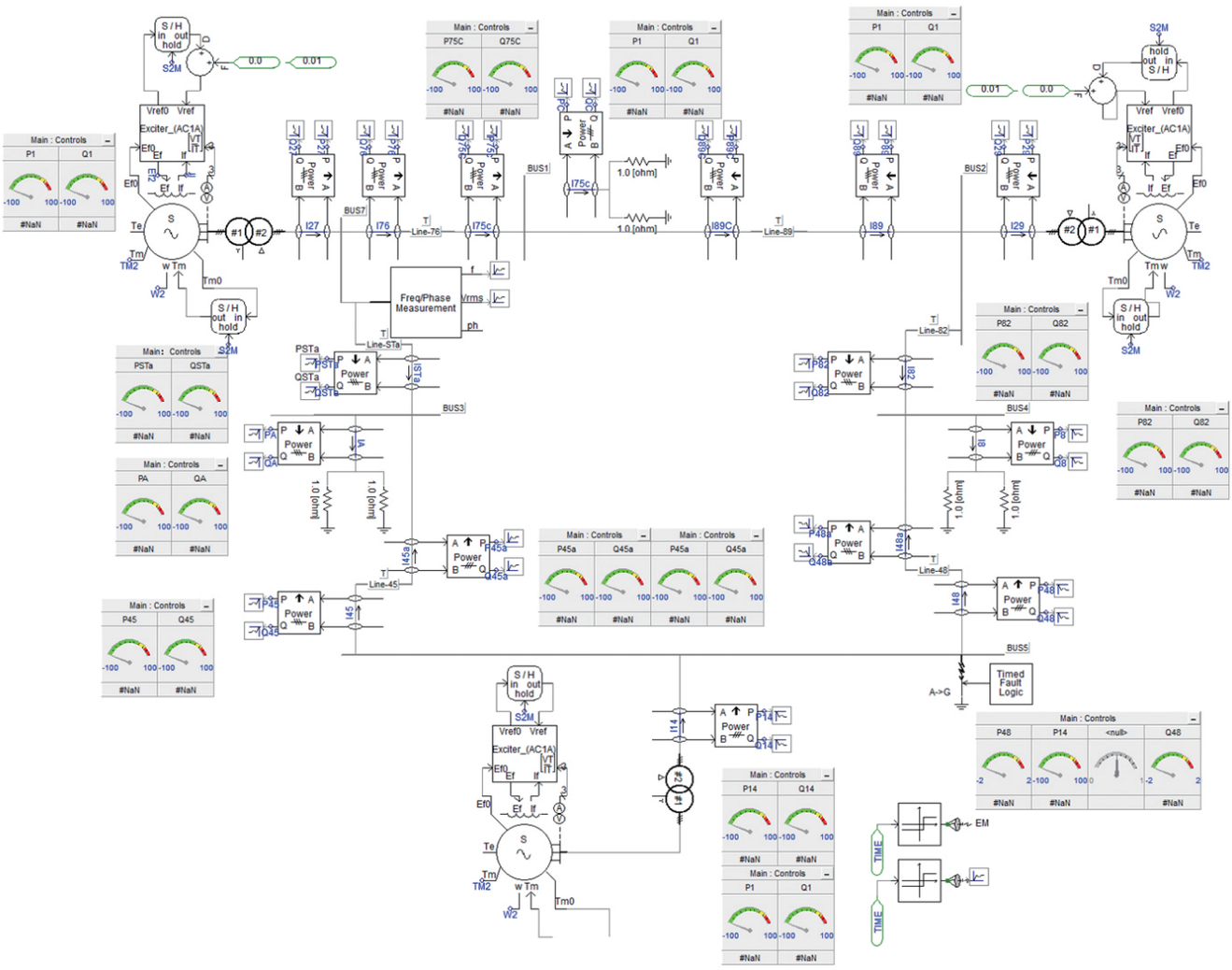
根据规范形分析方法所得结果,选取两种区域间振荡模态,即 2(3)、4(5),相关结果如表 1 所示。

Thapar 等[13]研究中提出的非线性交互指标考虑到解析解的非线性特性,从表 1 给出的 2 种模态交互影响结果看来,系统中只安装单个 TCSC 和单个 SVC 时,模态间交互指标值有减小趋势,阻尼比略有提高。但当 TCSC 和 SVC 同时接入系统时,虽然阻尼比有所提高,但模态间交互指标值显著增大。但该指标未考虑实际运行中,只有在系统运行在距离电压崩溃点附近时,负交互影响的危害性才能明显显现出来的问题,因此本文对原指标进行了改进,提出一种改进的交互影响指标,该指标除考虑到解析解的非线性特性外,还考虑系统距离电压崩溃点距离的影响,从表 1 中数据看来,文中所提指标与原指标相比,在系统中加入 TCSC 和 SVC 时,模态间交互指标值变化明显,可以非常明显看出,系统中只安装单个 TCSC 和单个 SVC 时,模态间交互指标值减小。但当 TCSC 和 SVC 同时接入系统时,模态间交互指标值显著增大,



(a) 测试系统单线图

(a) Line diagram of the test system



(b) 测试系统电磁暂态仿真接线图

(b) Line diagram of the electromagnetic transient simulation

图 4　测试系统接线图

Fig. 4　Line diagram of the test system

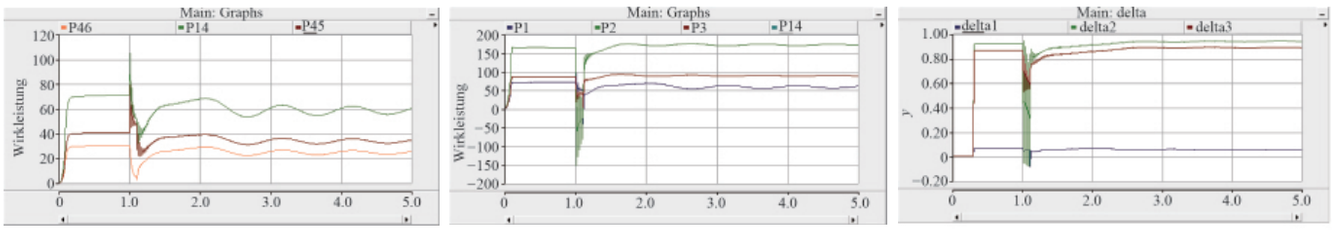
存在较强的交互影响。与原指标相比,数值变化明显,而且距离电压崩溃点越近,其值越大。

图 5 给出了加 TCSC 和 SVC 之后的电磁暂态仿真平台上波形图。

表 1　受到干扰后不同的系统模态作用交互指标值

Table 1　Indices of interference modal states of different systems

模态	未安装 TCSC 和 SVC			只安装单个 TCSC			只安装单个 SVC			同时安装 TCSC 与 SVC		
	阻尼比	T	$T1$	阻尼比	T	$T1$	阻尼比	T	$T1$	阻尼比	T	$T1$
2(3)	0.472 3	1.352 3	17.72	0.477 9	1.352 6	15.56	0.494 7	1.245 7	14.11	0.495 3	1.897 6	20.97
4(5)	0.164 2	0.765 2	10.02	0.168 2	0.764 7	8.85	0.175 6	0.725 6	8.22	0.178 9	0.987 2	10.91



(a) 线路传输功率
(a) Line transmission power

(b) 发电机有功波动
(b) Fluctuations of generator active power

(c) 发电机功角波动
(c) Fluctuations of generator power angle

图 5　电磁暂态仿真波形

Fig. 5　Waveforms of electromagnetic transient simulation

4　结论

随着柔性交流输电技术理论和工程应用的逐渐深化与推广,FACTS 装置大幅度提高线路的功率传输水平、提高电力系统稳定性的能力逐渐得到体现。然而随着电力系统中 FACTS 装置的日益增多,多个 FACTS 装置之间会产生交互影响。如何确定系统危险运行方式及该方式下对 FACTS 装置间交互影响的程度,成为研究 FACTS 装置间交互影响问题中的关键环节之一。本文研究了电力系统中装设 TCSC 与 SVC 即两种不同种类 FACTS 装置时,FACTS 装置间可能存在的交互影响问题。文中采用高阶规范形分析方法,提出一种改进交互影响衡量指标,定量分析系统受干扰后模态交互作用的影响程度。该指标可同时计及 FACTS 装置间的交互影响程度分析与危险运行方式确定。同时在计算过程中引入了电磁暂态仿真手段,以辅助验证该方法的效果。最后,通过 IEEE 9 节点系统进行算例分析。结果表明, 系统中同时装有 TCSC 与 SVC 时,可能存在着较强的交互影响。

参考文献(References)

[1] 何大愚. 柔性交流输电技术的定义?机遇及局限性[J]. 电网技术, 1996, 20(6): 18–24.
He Dayu. *Power System Technology*, 1996, 20(6): 18–24.

[2] 何大愚. 我国电力系统及其所需 FACTS 技术的新发展[J]. 变流技术与电力牵引, 2006(2): 9–12, 30.
He Dayu. *Converter Technology & Electric Traction*, 2006(2): 9–12, 30.

[3] 江全元, 邹振宇, 吴昊, 等. 基于相对增益矩阵原理的柔性交流输电系统控制器交互影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 23–28.
Jiang Quanyuan, Zou Zhenyu, Wu Hao, *et al*. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(11): 23–28.

[4] 张琳, 曹一家. 基于奇异值分解方法的 FACTS 交互影响分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 20–23.
Zhang Lin, Cao Yijia. *Automation of Electric Power System*, 2008, 32(5): 20–23.

[5] 李亮, 邹振宇, 江全元, 等. SVC 和 TCSC 控制器间交互分析[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2006, 5(1): 78–81.
Li Liang, Zou Zhenyu, Jiang Quanyuan, *et al*. *Journal of Southern Yangtze University: Natural Science Edition*, 2006, 5(1): 78–81.

[6] 董萍, 李海琛. FACTS 装置间多个控制器之间的交互影响分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2011, 25(1): 59–63.
Dong Ping, Li Haichen. *Journal of Hunan University of Technology*, 2011, 25(1): 59–63.

[7] 杨伟, 曲艺, 顾明星. 基于 Gramian 的电力系统 FACTS 元件交互影分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 30–34.
Li Wei, Qu Yi, Gu Mingxing. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(22): 30–34.

[8] Barocio E, Messina A R. Normal form analysis of stressed power systems: Incorporation of SVC models [J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2002, 25(2003): 79–90.

[9] Domingues A F, Kopcak I, da Costa V F, *et al*. Analysis of inter-area mode oscillations in power systems with TCSC controller using normal forms[C]//Proceedings of the Fourth IASTED International Conference on Power and Energy System, 2004: 539–543.

[10] 邹振宇, 江全元, 曹一家, 等. 基于规范形方法的多台 SVC 交互影响分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(8): 12–17.
Zou Zhenyu, Jiang Quanyuan, Cao Yijia, *et al*. *Transactions of China Electro-Technical Society*, 2005, 20(8): 12–17.

[11] 熊浩清, 汤涌, 张晓华, 等. 计及运行方式变换条件的多 SVC 布点方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 44–51.
Xiong Haoqing, Tang Yong, Zhang Xiaohua, *et al*. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(13): 44–51.

[12] 昆德 P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
Kunder P. Stability and control of power system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

[13] Thapar J, Vittal V, Kliemam W, *et al*. Application of the normal form of vector fields to predict interarea separation in power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1997, 12(2): 844–850.

[14] Jang G, Vittal V, Kliemann W. Effect of nonlinear modal interaction on control performance: Use of normal forms technique in control design part II: case studies [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1998, 13 (2): 408–413.

(责任编辑　岳臣)