

SVC 和 TCSC 控制器间动态交互影响分析

祁桂刚¹, 黎灿兵¹, 曹一家¹, 李欣然¹, 周 炼¹, 曾 龙²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 在考虑电力系统传递函数元素的稳态增益和动态特性的影响下, 利用有效相对能量矩阵(EREA)的方法分析了 2 种典型柔性交流输电系统(FACTS)控制器间交互影响问题。对多 FACTS 控制器间的交互影响进行定量分析, 为 FACTS 控制器的变量配对、选址等研究提供参考。通过含 SVC 和可控串联补偿器(TCSC)装置的新英格兰系统验证了在不同电气距离下交互影响的强弱程度, 并采用时域仿真验证了所提分析方法的可行性和有效性。

关键词: 柔性交流输电系统; 静止无功补偿器; 可控串联补偿器; 有效相对能量矩阵; 交互影响

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.011

0 引言

柔性交流输电系统(FACTS)将在未来的智能电网中得到广泛应用。由于 FACTS 装置一般基于各自目标单独制定控制策略, 因此可能导致同一个 FACTS 装置的多个控制通道间或不同 FACTS 装置的控制器通道间产生负的交互影响。这种交互作用会影响到控制器的性能, 甚至可能破坏电力系统的稳定性^[1-5]。

目前, 学术界已对多 FACTS 装置交互影响进行了大量的研究。从 FACTS 装置分类看, 如多台静止无功补偿器(SVC)中的电压控制器间、静止同步补偿器(STATCOM)中的交流和直流控制回路之间、SVC 和 STATCOM 控制器间均存在负交互影响^[1-4], 严重时甚至可致系统失稳; 从分析方法看, 主要有规范形方法^[1]、奇异值分解方法^[6]、相对增益矩阵 RGA(Relative Gain Array)方法^[7-9]等; 从研究系统规模看, 文献[3]介绍单机无穷大系统中 2 个 FACTS 控制器间的负交互影响, 文献[6]分析了新英格兰系统中同时装设可控串联补偿器(TCSC)和 SVC 时的交互影响, 文献[9]研究了四机两区域系统中 2 台 SVC 控制器间的交互影响作用。

RGA 方法由 Bristol 提出, 是分析多变量控制系统交互影响的有效方法, 已被广泛地应用于控制系统的设计^[10]。文献[7-9]基于 RGA 方法定量分析了 FACTS 装置不同通道之间负交互影响的强烈程度。基于稳态运行点的 RGA 指标有时会出现错误的交互影响分析^[11], 不利于 FACTS 装置选址、FACTS 控制器变量配对、阻尼控制信号选取^[12]等研究。于是文献[11, 13]提出用传递函数模型代替稳态增益矩

阵的动态 RGA(DRGA)方法; 文献[14]提出另一种 DRGA 分析方法; 文献[15]结合 RGA 和 DRGA 方法的优点, 基于系统开环传递函数元素的稳态增益矩阵和带宽信息, 提出有效相对增益矩阵(ERGA)方法。文献[16]认为 ERGA 方法中稳态增益和带宽信息的等权重关系也会导致错误的交互影响分析, 从而出现不合适的变量配对, 因此提出有效相对能量矩阵(EREA)方法。可见, 稳态增益和动态信息结合的分析方法已成功应用于普通控制器间交互影响判断来进行控制器设计等。但目前 FACTS 控制器相关研究主要是基于稳态增益, 缺少动态交互影响分析。

本文利用 EREA 方法分析多机电力系统中 SVC 和 TCSC 控制器间负交互影响问题, 并用定量指标评价了新英格兰电力系统中 SVC 和 TCSC 控制器在不同电气距离下交互影响的强弱程度。时域仿真验证了本文方法的可行性和有效性, 同时算例也说明 RGA 方法在判断控制器间交互影响时会存在不足。

1 系统数学模型

以同时装设 m_1 台 SVC 和 m_2 台 TCSC 的多机电力系统为例, 其结构简图如图 1 所示。图中, G_k 为发电机; U_{gk} 为发电机端点电压; I_{gk} 为注入的电流; U_j 为节点电压; $k=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m_1, m_1+1, \dots, m_1+2m_2$ 。

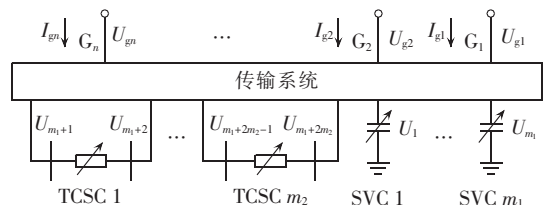


图 1 装设多台 SVC 和 TCSC 装置的多机电力系统结构
Fig.1 Configuration of power system with multiple SVCs and TCSCs

收稿日期: 2013-05-20; 修回日期: 2014-03-18

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2010BAE-00816)

Project supported by the “12th Five-Year Plan” National Science and Technology Support Program(2010BAE00816)

同步发电机采用三阶实用模型,并安装一阶静止励磁补偿器。第 k 台同步发电机的数学模型描述为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_k = \omega_0 \omega_k \\ \dot{\omega}_k = [P_{mk} - E'_{qk} I_{qk} - (X_{qk} - X'_{dk}) I_{dk} I_{qk} - D_k \omega_k] / M \\ \dot{E}'_{qk} = [E_{fdk} - E'_{qk} - (X_{dk} - X'_{dk}) I_{dk}] / T'_{d0k} \\ \dot{E}_{fdk} = [K_A (U_{\text{trfdk}} - U_{tk}) - E_{fdk}] / T_A \end{cases} \quad (1)$$

其中, $U_{tk}^2 = U_{vdk}^2 + U_{vqk}^2$; $U_{vdk} = X_{qk} I_{qk}$; $U_{vqk} = E'_{qk} - X'_{dk} I_{dk}$; 各电气量的物理意义及说明详见文献[6]。

TCSC 可等效为变化的阻抗 X_{TCSC} , 是通过快速、连续地改变所补偿线路的阻抗来控制线路的有功功率, 提高线路的稳定性。图 2 给出了比例积分 (PI) 型潮流控制器的实现框图。

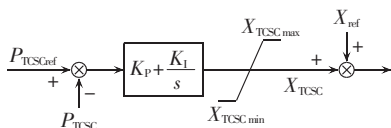


图 2 TCSC 功率控制框图

Fig.2 Block diagram of TCSC power control

TCSC 控制器的动态特性^[6]可以用式(2)来描述:

$$X_{\text{TCSC}} = \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right) (P_{\text{TCSCreff}} - P_{\text{TSC}}) \quad (2)$$

其中, P_{TCSCreff} 为给定的参考传输功率值; P_{TSC} 为线路上传输的有功功率; K_P 、 K_I 分别为比例和积分环节系数。

SVC 具有良好的动、静态特性, 可以支撑所补偿点的电压, 以控制节点电压接近于常数。图 3 为 SVC 电压调节器结构框图。

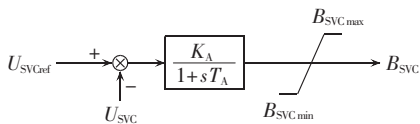


图 3 SVC 的动态模型

Fig.3 Dynamic model of SVC

由上可知 SVC 控制器的动态表达式^[6]为:

$$\dot{B}_{\text{SVC}} = \frac{K_A (U_{\text{SVCref}} - U_{\text{SVC}}) - B_{\text{SVC}}}{T_A} \quad (3)$$

其中, B_{SVC} 为等效导纳; U_{SVCref} 为给定参数; U_{SVC} 为安装 SVC 的节点电压幅值; K_A 、 T_A 分别为控制器的增益和时间常数。

同步发电机、励磁系统以及上述 2 种 FACTS 装置组成的系统动态过程可以用微分方程组(4)描述, 式(5)为发电机定子电流方程组, 式(6)为系统的输出方程组。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \quad (4)$$

$$0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \quad (5)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{r}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \quad (6)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为状态变量向量, 包含发电机的转子角、转子

转速、 q 轴暂态电压、励磁电压; $\mathbf{y}$ 为代数变量向量, 包含发电机定子电流; $\mathbf{u}$ 为控制变量向量, 包含 SVC 的等效导纳和 TCSC 的阻抗; $\mathbf{Y}$ 为输出变量向量, 包含 SVC 的节点电压和 TCSC 线路的有功功率。

对式(4)~(6)分别进行线性化处理, 消去中间变量 $\Delta \mathbf{y}$, 得到装设多台 FACTS 装置电力系统的状态空间表达式:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{Y} = \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (7)$$

通过式(7)可以求出系统的开环传递函数:

$$\mathbf{G}(s) = \frac{\mathbf{Y}(s)}{\mathbf{U}(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (8)$$

系统的传递函数见式(9), 其稳态增益矩阵表示为 $\mathbf{G}(0)$ 。

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & \cdots & g_{1n}(s) \\ \vdots & & \vdots \\ g_{m1}(s) & \cdots & g_{mn}(s) \end{bmatrix} \quad (9)$$

2 EREA 分析方法

2.1 EREA 理论介绍

交互影响是研究多变量系统中输入变量对输出变量的影响, 而系统范数能够表达一个系统的输入和输出变量间的相互关系, 故下文利用表示系统脉冲响应能量的 2-范数来研究多变量间的交互关系^[16]。

一个传递函数的 2-范数如式(10)所示:

$$\|\mathbf{G}(s)\|_2^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\mathbf{G}(j\omega)|^2 d\omega \quad (10)$$

利用一个矩形面积逼近上式的积分环节得:

$$\|\mathbf{G}(s)\|_2^2 = \frac{1}{\pi} \mathbf{G}^2(0) \omega_c \quad (11)$$

其中, ω_c 为传递函数 $\mathbf{G}(j\omega)$ 的临界频率, 本文取相角交界频率, 当相角交界频率不存在时, 可取相频特性曲线初次达峰值时所对应的频率值。因为相关频率可反映输入变量到输出变量的响应速度及抵抗其他闭环回路影响的能力, 所以它能体现系统动态性能。

式(11)能反映出一个子系统的有效能量, 因此, 传递函数元素的有效能量定义为:

$$e_{ij} = g_{ij}^2(0) \omega_{c,ij} \quad (12)$$

有效能量幅值可以用来判断控制器变量间的交互影响程度, 但是有效能量定义式忽略了 $\mathbf{G}(0)$ 的符号信息, 因此式(12)可以修改为:

$$e_{ij} = |g_{ij}(0)| |g_{ij}(0) \omega_{c,ij}| \quad (13)$$

因此, 考虑稳态增益和动态信息的有效能量矩阵如式(14)所示:

$$\mathbf{E} = |\mathbf{G}(0)| \otimes \mathbf{G}(0) \otimes \mathbf{\Omega} \quad (14)$$

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} \omega_{c,11} & \cdots & \omega_{c,1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \omega_{c,n1} & \cdots & \omega_{c,nn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $|G(0)|$ 表示矩阵 $G(0)$ 中的每个元素取绝对值;
 $\otimes$ 表示 2 个矩阵对应的元素相乘,即矩阵的 Hadamard 乘积。

参考 RGA 定义方法, EREA 如式(16)所示:

$$E^* = E \otimes E^{-T} \tag{16}$$

$$ERE A = \begin{bmatrix} \frac{1}{e_{11}^*} - 1 & \cdots & \frac{1}{e_{1n}^*} - 1 \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{1}{e_{n1}^*} - 1 & \cdots & \frac{1}{e_{nn}^*} - 1 \end{bmatrix} \tag{17}$$

其中, e_{ij}^* 表示矩阵 E^* 的元素。可以利用该矩阵元素作为指标来衡量交互影响。

2.2 EREA 分析的特点

EREA 分析方法的性质如下:

- a. RGA 的近 1 规则存在不连续性, 而 EREA 的近 0 规则指标可以连续性地表征交互影响的程度;
- b. RGA 指标值的绝对值远大于 0 时表示控制器间存在大的负交互影响, 但是接近 0 时会出现更严重的交互影响, 这样的近 1 规则不能通过距离 1 的程度真实地判断交互影响的强烈程度, EREA 指标值可以用远离 0 的程度直观地描述交互影响的程度;
- c. RGA 只考虑稳态交互影响, EREA 分析指标还考虑系统函数的动态信息。

2.3 EREA 在交互影响分析中的应用

基于 EREA 方法分析 SVC 和 TCSC 控制器间交互影响的步骤如下:

- a. 确定电力系统结构, 并根据系统特性为 SVC 和 TCSC 装置选择合适的安装位置;
 - b. 建立含 SVC 和 TCSC 控制器的电力系统数学模型, 即微分代数方程组;
 - c. 线性化微分代数方程组求出系统的开环传递函数;
 - d. 利用公式分别计算出交互影响指标;
 - e. 改变 FACTS 装置间电气距离, 分析交互指标的变化, 研究电气距离对控制器间交互影响的作用。
- 基于 MATLAB 软件计算定量指标的流程见图 4。

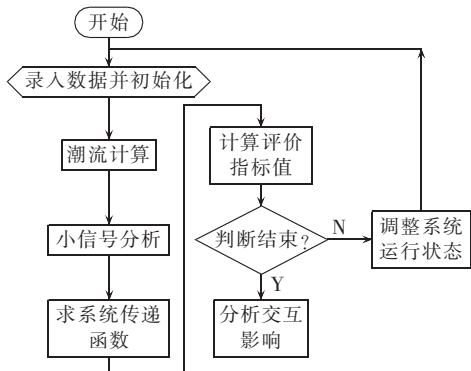


图 4 程序流程图
Fig.4 Flowchart of program

3 算例分析

本节研究新英格兰系统(见图 5)^[6]中 SVC 和 TCSC 控制器间的交互作用情况。在两区域联络线 L24 上安装一台 TCSC, 它可以快速地连续改变线路电抗值以控制线路有功功率; 另外一种 FACTS 装置是 SVC, 它的主要功能是维持装设点电压恒定和电网的无功功率平衡。首先将 SVC 安装于母线 15, 对 TCSC 和 SVC 控制器依次单独设计, 控制参数整定为: $K_P=0.7, K_I=10, K_A=100(T_A=0.05\text{ s})$ 。

在 TCSC 和 SVC 控制器都是闭环运行的情况下, 本文将在 2 种场景下研究 SVC 和 TCSC 装置间电气距离(即线路阻抗或安装位置)对其控制器间交互作用的影响。

3.1 场景 1

在测试系统中, 选择将 SVC 安装在不同的母线上。由近到远选择 SVC 的安装母线, 计算分析指标如表 1 所示。

因为控制系统为对角控制, 所以取对角元素作为分析指标值。分析表 1 可知, 随着 SVC 和 TCSC 控制器安装距离逐渐变大, 控制器间的交互影响明显减小, 但是 RGA 指标的近 1 规则反映得不明显。

时域仿真验证: 在 0.2 s 时, SVC 的母线电压(标幺值)发生阶跃上升扰动, 如图 6 所示。当 SVC 安装在母线 16 处时, 母线电压发生扰动后会出现强烈振荡, 与大的动态分析指标值相对应, 而 RGA 指标值不能明显地比较交互影响强烈程度。

系统的 RGA 频域分析(见图 7, 幅值为标幺值)显示不同频率下系统控制回路间交互影响的大小。比较整个低频范围, 系统在大概 0.5 Hz 的位置存在很大的交互影响, 而且 2 台 FACTS 控制器安装的地点越近, 交互影响越大。但是不能仅仅根据稳态运行点来判断交互影响的变化情况, 这说明 RGA 分析方法存在不足, 因此利用动态分析方法来判断交互影响强烈程度是必要的。

3.2 场景 2

在测试系统中, 当分别选择在母线 16、19 和 20 处安装 SVC 装置时, 指标计算结果如表 2 所示。

分析表 2: 由 EREA 指标可知随着 SVC 和 TCSC 控制器之间的距离(电气距离)逐渐变大, 控制器间的交互影响随之减小, 并且能明显、直观地比较出母线 16 处的交互影响很强烈; 但是 RGA 指标值不能得出动态指标的结论。

当 SVC 分别安装在母线 16、19 和 20 处时, SVC 母线电压(标幺值)发生阶跃上升扰动, 见图 8。可以看出: 当安装在母线 16 处时, 会出现近似的等幅振荡; 而安装在母线 20 处, 虽未能实现平滑的过渡且

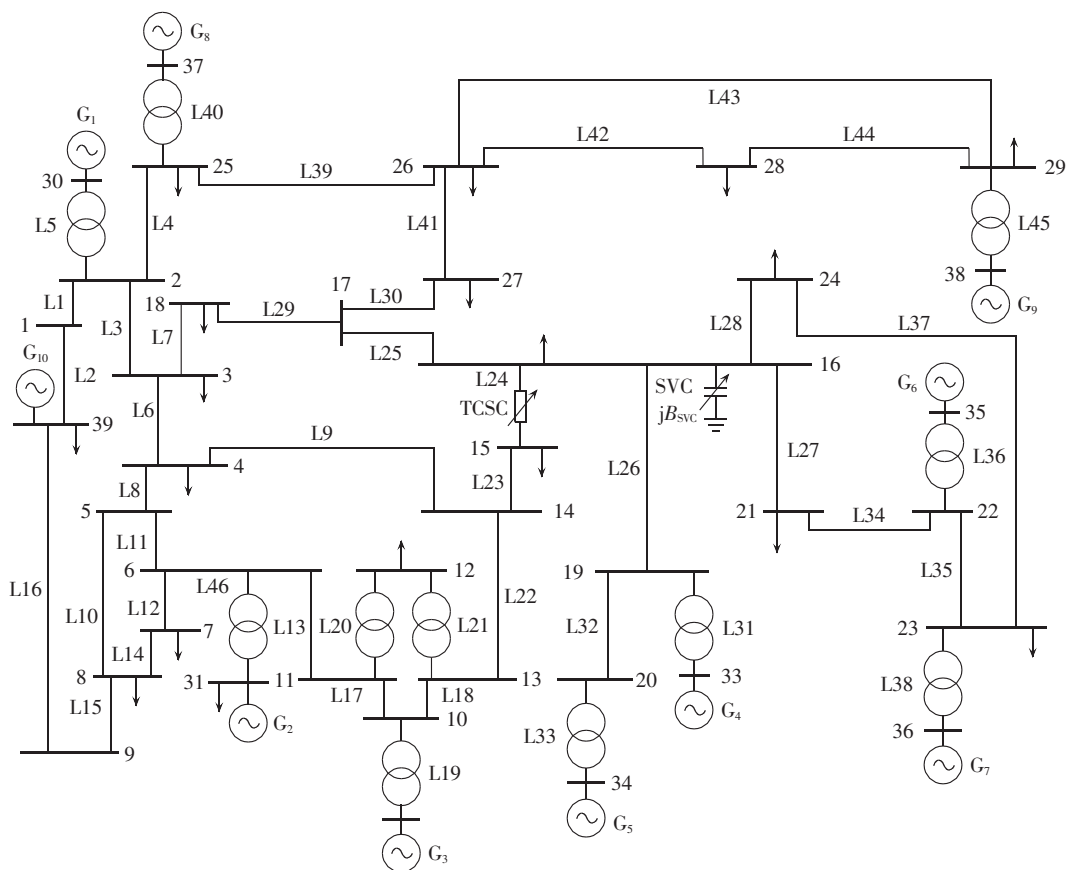


图 5 装设 SVC 和 TCSC 的新英格兰系统
Fig.5 New England system with SVC and TCSC

表 1 交互指标计算结果 (1)

Tab.1 Results of interaction index calculation(1)

SVC 安装母线	指标值	
	RGA	EREA
16	0.8978	3.4620
18	0.9726	1.6621
2	1.0038	-0.0475

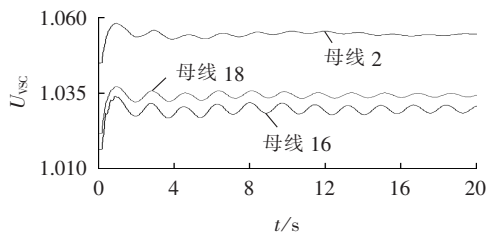


图 6 SVC 安装在不同母线时的电压 (1)
Fig.6 Bus voltage when SVC is installed on different buses(1)

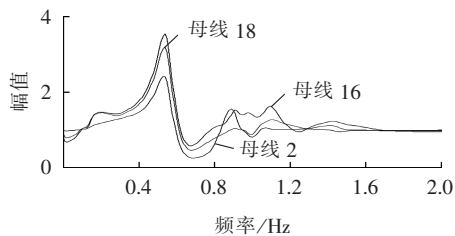


图 7 RGA 频域分析图
Fig.7 Frequency analysis of RGA

表 2 交互指标计算结果 (2)

Tab.2 Results of interaction index calculation(2)

SVC 安装母线	指标值	
	RGA	EREA
16	0.8978	3.4620
19	0.9136	0.0077
20	0.8954	0.0013

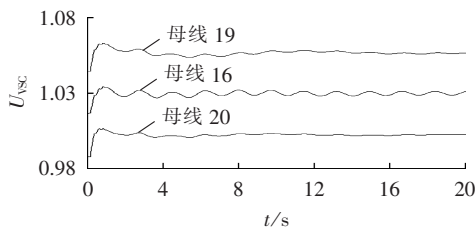


图 8 SVC 安装在不同母线时的电压 (2)
Fig.8 Bus voltage when SVC is installed on different buses(2)

有稍微的电压波动,但明显能判断出控制器间的交互影响已很弱,这与较高的 EREA 指标值一致。但 RGA 指标分析认为当 SVC 安装在母线 20 处时交互影响最强烈,所以该方法出现了错误的交互影响分析。

4 结论

研究结果表明:基于稳态增益的 RGA 交互影响分析存在不足,而 EREA 方法可准确分析不同运行状

况下 SVC 和 TCSC 控制器间交互影响的强烈程度。非线性时域仿真验证了本文方法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] ZOU Z Y,JIANG Q Y,CAO Y J,et al. Normal form analysis of the interactions among multiple SVC controllers in power systems[J]. IEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution, 2005,152(4):469-474.
- [2] WANG H F. Interactions and multivariable design of STATCOM AC and DC voltage control[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2003,25(5):387-394.
- [3] 吴昊,叶彬,曹一家. 装有 SVC 和 STATCOM 的电力系统线性模型及控制器交互影响[J]. 江南大学学报:自然科学版,2004,3(2):134-139.
WU Hao, YE Bin, CAO Yijia. Phillips-Heffron model of power system installed with SVC and STATCOM and analysis of interaction[J]. Journal of Southern Yangtze University: Natural Science Edition, 2004, 3(2): 134-139.
- [4] 刘青,李丽英,王增平. 基于模糊混合进化算法的多个 FACTS 元件协调控制[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):18-21,27.
LIU Qing, LI Liying, WANG Zengping. Multi-FACTS coordinated control based on fuzzy hybrid evolutionary algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 18-21, 27.
- [5] 黄柳强,郭剑波,孙华东,等. 多 FACTS 广域抗时滞协调控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):37-42.
HUANG Liuqiang, GUO Jianbo, SUN Huadong, et al. Wide-area anti-delay coordinated control among FACTS controllers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 37-42.
- [6] 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. Analysis on the interaction of FACTS controllers based on the SVD method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 20-23.
- [7] ZHANG L,ZHANG P X,WANG H F,et al. Interaction assessment of FACTS control by RGA for the effective design of FACTS damping controllers[J]. IEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution, 2006,153(5):610-616.
- [8] 张鹏翔,曹一家,王海风,等. 相对增益矩阵方法在柔性交流输电系统多变量控制器交互影响分析中的应用[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):13-17.
ZHANG Pengxiang, CAO Yijia, WANG Haifeng, et al. Application of relative gain array method to analysis interaction of multi-

fuctional FACTS controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7):13-17.

- [9] 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. Interaction analysis of FACTS controllers based on RGA principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 23-28.
- [10] BRISTOL E. On a new measure of interaction for multivariable process control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1996, 11(1):133-134.
- [11] AVOY T M, ARKUN Y, CHEN R, et al. A new approach to defining a dynamic relative gain[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(8):907-914.
- [12] LI Yong, REHTANZ B C, RÜBERG S, et al. Assessment and choice of input signals for multiple HVDC and FACTS wide-area damping controllers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2):1-9.
- [13] WITCHER M F, MCAVOY T J. Interacting control systems: steady state and dynamic measurement of interaction[J]. ISA Transactions, 1977, 16(3):35-41.
- [14] TUNG T, EDGAR T. Analysis of control-output interactions in dynamic systems[J]. AIChE Journal, 1981, 27(4):690-693.
- [15] XIONG Qiang, CAI Wenjian, HE Maojun. A practical loop pairing criterion for multivariable processes[J]. Journal of Process Control, 2005, 15(7):741-747.
- [16] MONSHIZADEH-NAINI N, FETHEI A, KHAKI-SESIGH A. Input-output pairing using effective relative energy array[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(15):7137-7144.

作者简介:



祁桂刚

祁桂刚(1985-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定及控制(E-mail: qiguigang@hnu.edu.cn);

黎灿兵(1979-),男,湖南益阳人,副教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统综合节能、电网分析与控制;

曹一家(1969-),男,湖南益阳人,副校长,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统稳定与控制、电力市场与信息技术

(IT)、复杂系统的智能控制。

Analysis on dynamic interaction between SVC and TCSC controllers

QI Guigang¹, LI Canbing¹, CAO Yijia¹, LI Xinran¹, ZHOU Lian¹, ZENG Long²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The EREA(Effective Relative Energy Array) method is applied to analyze the interaction between two typical kinds of FACTS(Flexible AC Transmission System) controller, which is influenced by the steady-state gain and dynamic characteristics of the elements of its transfer function. The interaction among multiple FACTS controllers is quantitatively analyzed, which can be used as a reference during the variables matching and allocation of FACTS controller. The interaction among FACTS controller is verified with the New England system with SVC(Static Var Compensator) and TCSC(Thyristor-Controlled Series Compensator) for different electrical distances and the time-domain simulation validates the feasibility and effectiveness of the proposed analysis method.

Key words: flexible AC transmission system; static var compensator; thyristor-controlled series compensator; effective relative energy array; interaction