

多 FACTS 元件控制变量配对方法与协调投运策略

蒋晨阳,刘 青,梁

(华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003)

摘要:多个灵活交流输电系统(FACTS)元件接入系统中各 FACTS 元件控制器间存在负的交互影响。针对已 有的变量配对方法和交互影响分析方法存在的局限和不足,根据 NI 指数理论,提出适用于大规模、多变量的 基于 NI 指数的多控制变量配对方法,运用该方法找到使得控制器间交互影响最小的控制变量最优配对组合。 通过对最优配对组合进行分析,得到最优配对组合中与交互影响的严重程度关系最大的一组输入-输出变量。 依据这一关系,制定出相应的多 FACTS 元件协调投入控制策略。以第二代串联型 FACTS 元件——静止同步 串联补偿器(SSSC)为例,通过仿真系统的计算与分析,证明了所提出的多控制变量配对方法的可行性;并利 用 PSCAD 搭建了含多个 SSSC 元件的系统进行仿真验证,证明了所制定的协调投运策略是可行、实用的。

关键词:柔性交流输电系统; NI 指数; 多控制变量配对; 静止同步串联补偿器; 协调投运

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.027

引言 0

近年来随着智能电网的快速发展,灵活交流输 电系统 FACTS(Flexible AC Transmission System)技 术[1-2]在电力系统中得到大量应用,在一个电网区域 内多个 FACTS 元件联合投运的情况十分常见。已 有的研究结果表明:同种 FACTS 元件之间和不同 FACTS 元件之间均存在负交互影响,对系统的稳定 运行不利[3-6]。因此,针对多个 FACTS 元件接入系 统的情况,研究多控制变量的配对问题以及对元件 之间交互影响进行分析成为一种必然。

目前,研究中使用的变量配对和交互影响分析 方法包括模态分析方法、相对增益矩阵(RGA)分析 方法、奇异值分解(SVD)方法、基于格兰姆行列式的 分析方法[7-10]等。其中最成熟的方法为 RGA 方法, 该方法根据多控制变量系统的静态传递矩阵计算得 到对应的 RGA. 通过 RGA 中元素的符号和大小分 析交互影响的大小,并判断控制变量的配对是否适 合[8]。但是.RGA 方法本身存在如下不足和局限[11].

a. RGA 中元素的符号很明确地和控制系统的 完整性(控制回路开环时的系统稳定性)相关,而与 系统稳定性的关联关系并不清楚:

b. 一个 RGA 元素仅能提供单一控制回路中交 互影响的估计,对于多控制变量系统,往往会得到多 个符合要求的变量配对选择,最后需要依靠经验进 行选择。

目前对 FACTS 元件间交互影响的分析研究都 是基于双输入-双输出(2×2控制变量)系统进行的, 对 2 个 FACTS 元件均只选取一组主要的控制器进 行分析,而忽略起辅助作用的控制器。在2×2控制

变量系统中.RGA 方法的不足表现得还不明显。但 是.2个 FACTS 元件间产生交互影响的原因也可能 是辅助控制器造成的,那么就需要考虑辅助控制器。 这时,研究的系统会变成四输入-四输出系统,RGA 方法就不再适用,故需要一种新的方法进行变量的 配对和交互影响的分析。

NI 指数是 Niederlinski 在 1971 年提出的[12], NI 指数同 RGA 方法一样都广泛应用于交互影响分析 和变量匹配中。它计算简单,可以仅依靠对象模型 就对控制回路间的耦合严重性做出指示,且它的大 小可作为一个全局的交互测量指标[13]。

本文根据已有的 NI 指数理论,提出了适用于大 规模、多变量的基于NI指数的多控制变量配对方 法,运用该方法找到使得控制器间交互影响最小的 控制变量最优配对组合。通过对最优配对组合进行 分析,得到整个配对组合中一组配对的输入变量与 输出变量间的关联程度与交互影响的程度关系最 大。依据这一关系,制定出相应的多 FACTS 协调投 运控制策略。本文以第二代串联型 FACTS 元 件——静止同步串联补偿器(SSSC)[14]为例,通过模 拟系统的算例计算与分析,说明所提出的多变量配 对方法的可行性和实用性;通过相应的仿真验证,证 明所制定的投入控制策略是可行、有效的。

多控制变量配对方法与多个 FACTS 元件 投入策略

1.1 基于 NI 指数的多控制变量配对方法

当一个系统是对角配对的,并且设计有含积分 环节的对角控制器时,该控制器的每个独立回路可 通过多变量系统 n-1 个开环反馈回路中的任意一 个得到其稳定性。运用稳态增益矩阵 G(0)对 NI 指 数进行定义[12],表达式如下:

$$NI[\mathbf{G}(0)] = \frac{\det(\mathbf{G}(0))}{\det(\mathbf{G}(0))}$$
(1)

其中, $\det(x)$ 表示矩阵x的行列式; $\overline{G}(0)$ 表示G(0)忽略所有非对角元素的矩阵,即 $\overline{G}(0)$ = $\operatorname{diag}[G(0)]$ 。

NI 指数的符号作为对于一个给定的变量匹配组合的稳定性校核指标。NI 指数还可以通过外加一定的措施对交互影响进行表示[15]。

NI 指数的定义为增益矩阵 G(0)的行列式与等效于对角化矩阵 $\overline{G}(0)$ 的行列式的比值,故 NI 指数的值对这 2 个元素的变化十分敏感。对于一个不存在交互影响的系统(即对角系统),NI 指数的值为 1。当 NI 的值越远离 1 时,矩阵 G(0)与其对角化矩阵 $\overline{G}(0)$ 的相似度就越小,系统就会表现出更加严重的交互影响。如果选择一种变量配对组合使得 NI = 1,那么得到的控制系统就相当于一些独立的单输入—单输出(SISO)回路运行在简单的对角系统中,这是变量配对的最优结果,此时系统中也就不存在交互影响。因此,系统中的交互影响可以通过 NI 指数的大小表示。

考虑到 NI 指数还提供了一个判断系统稳定性的充要条件,提出了如下系统多控制变量配对方法。

对于多输入—多输出($n \times n$ 控制变量)系统,共有n! 种变量配对组合。基于 NI 指数的多变量最优配对组合的选择标准为:NI 指数为正,且接近于 1;定义系统整体奇异量 $M = \sum |1 - \lambda_{ij}|$,其中 λ_{ij} 为一种配对组合中每组控制回路对应的 RGA 元素。

配对组合使得系统整体奇异量很小,且配对中 所含有的 RGA 元素均为正数。

这种以 NI 指数为主要判断标准、结合 RGA 方法的多控制变量配对方法定义为基于 NI 指数的新型多变量配对方法。

1.2 多个 FACTS 元件的协调投运策略

根据 1.1 节中计算得到的最优多变量配对组合,找到相对应的 RGA 元素。依据 RGA 方法中对 RGA 元素的要求使得交互影响最小,即 RGA 元素 为正,且接近于 1。这样就可以得到对交互影响影响最大的一组配对,此组配对中输入变量与输出变量间的关联程度与交互影响的程度关系最大。

根据上述分析得到的结果,可制定相应的 FACTS 元件控制器的协调投运策略,从而减弱多个 FACTS 元件间的交互影响。

a. 若是一个 FACTS 元件的 2 组控制器间的关 联程度与交互影响的程度关系最大,则首先调整控 制器的基本控制参数,然后在不损坏元件的前提下, 将辅助控制器滞后投入运行。 **b.** 若是 2 个 FACTS 元件的各一组控制器间的 关联程度与交互影响关系最大,则将第一组控制器 相对于第二组控制器滞后投入运行。

此协调投运策略是通过改变 FACTS 元件控制器的投运时间来减弱 FACTS 元件间的交互影响,策略的制定原理简单,且在实际运行中容易实施。

2 含 2 个 SSSC 的多机电力系统模型的建立

2.1 SSSC 控制系统设计

设计 SSSC 的控制目标是向输电线路注入一个与线路电流垂直的电压,使其呈现电感/电容特性而改变线路的阻抗,从而实现对线路输送功率的调节[16]。为了实现这一目标,在 SSSC 元件中设计了直流侧电容电压控制器和线路传输有功功率控制器 2 组控制器。其中,直流侧电容电压控制器的作用是稳定直流侧电容的电压,来防止投入时直流侧电压突然过大,对器件造成损伤,起稳定辅助的作用;线路传输有功功率控制器通过控制注入线路电压的大小对线路传输的有功功率进行补偿,这也是整个 SSSC 控制中的核心目的。

以 SSSC_A 为例对单个 SSSC 中设计的控制器进行具体说明。

直流侧电容电压控制器:

$$\delta_{\mathbf{A}} = \left(K_{\mathbf{A}\delta\mathbf{P}} + \frac{K_{\mathbf{A}\delta\mathbf{I}}}{s} \right) (U_{\text{dcAref}} - U_{\text{dcA}}) \tag{2}$$

线路传输有功功率控制器.

$$M_{\rm A} = \left(K_{\rm ApP} + \frac{K_{\rm ApI}}{s}\right) (U_{\rm cAqref} - U_{\rm cAq}) \tag{3}$$

其中, K_{AAP} 、 K_{APP} 分别为 $SSSC_A$ 中 2 个控制器对应的比例控制系数; K_{AAI} 、 K_{API} 分别为 $SSSC_A$ 中 2 个控制器对应的积分控制系数; U_{deAref} 、 U_{deA} 分别为 $SSSC_A$ 中直流侧电压的设定值和测量值; U_{eAqref} 、 U_{eAq} 分别为 $SSSC_A$ 中交流侧输出电压的设定值和测量值。

对于多机系统中装设 2 个 SSSC 的控制系统设计,每个 SSSC 设计有 2 组控制器,故整个控制系统为一个四输入—四输出的多控制变量系统,对于系统的每一组输入—输出设计一个单输入单输出控制器。因此,得到系统整体的控制设计如图 1 所示。

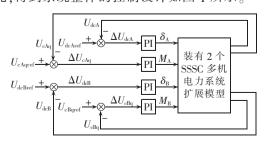


图 1 系统整体控制系统设计图

Fig.1 Control system design for whole system



通过整个控制系统的设计图,可以清晰地看出系统的控制变量、输入变量和输出变量,以及连接输入变量和输出变量的系统扩展模型。因此,为了研究装设2个SSSC系统4个变量之间的交互影响和配对问题,就需要推导出系统的扩展模型,从而得到系统的空间状态方程,为后续的研究提供帮助。

2.2 含 2 个 SSSC 多机系统的空间状态方程

将 SSSC 的动态模型[17]代入多机系统的非线性动态模型,消去多余变量后进行线性化处理,整理得到装设 2 个 SSSC 的多机电力系统扩展模型,如图 2 所示。

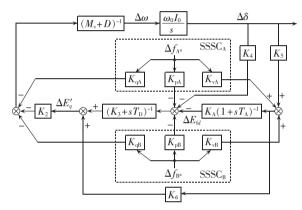


图 2 装设 2 个 SSSC 的多机电力系统扩展模型 Fig.2 Extended model of multi-machine power system with two SSSCs

根据图 2 所示的扩展模型,可以得到装设 2 个 SSSC 的多机电力系统相应的空间状态方程:

$$\begin{vmatrix} \dot{X} = AX + Bu \\ \dot{Y} = CX + Du \end{vmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} \Delta \delta \quad \Delta \omega \quad \Delta E_q' \quad \Delta E_{td} \quad \Delta U_{deA} \quad \Delta U_{deB} \end{bmatrix}^{T}$$

$$u = \begin{bmatrix} \Delta M_A \quad \Delta \delta_A \quad \Delta M_B \quad \Delta \delta_B \end{bmatrix}^{T}$$

$$Y = \begin{bmatrix} \Delta U_{cAq} \quad \Delta U_{cBq} \quad \Delta U_{deA} \quad \Delta U_{deB} \end{bmatrix}^{T}$$
系统数矩阵 $A \setminus B \setminus C \setminus D \setminus B$:

1

1

1

 $-M^{-1}K'_{pA}$ $-M^{-1}K'_{pB}$

A =

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} -T_{d0}^{\prime-1}K_{3} & 0 & -T_{d0}^{\prime-1}K_{4} & -T_{d0}^{\prime-1} & -T_{d0}^{\prime-1}K_{qA}^{\prime} & -T_{d0}^{\prime-1}K_{qB}^{\prime} \\ -T_{A}^{-1}K_{A}K_{5} & 0 & -T_{A}^{-1}K_{A}K_{6} & -T_{A}^{-1} & -T_{A}^{-1}K_{A}K_{vA}^{\prime} & -T_{A}^{-1}K_{A}K_{vB}^{\prime} \\ K_{7A} & 0 & K_{8A} & 0 & -K_{9A} & K_{10A} \\ K_{7B} & 0 & K_{8B} & 0 & K_{10B} & -K_{9B} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -M^{-1}K_{pA} & -M^{-1}K_{pdA} & -M^{-1}K_{pB} & -M^{-1}K_{pdB} \\ -T_{d0}^{\prime-1}K_{qA} & -T_{d0}^{\prime-1}K_{qdA} & -T_{d0}^{\prime-1}K_{qB} & -T_{d0}^{\prime-1}K_{qdB} \\ -T_{A}^{-1}K_{A}K_{vA} & -T_{A}^{-1}K_{A}K_{vdA} & -T_{A}^{-1}K_{A}K_{vB} & -T_{A}^{-1}K_{A}K_{vdB} \\ K_{AA} & K_{\delta AA} & K_{AB} & K_{\delta AB} \\ K_{BA} & K_{\delta BA} & K_{BB} & K_{\delta BB} \end{bmatrix}$$

1

 $-M^{-1}K_1$ $-M^{-1}D$ $-M^{-1}K_2$ 0

$$C = \begin{bmatrix} K_{7A} & 0 & K_{8A} & 0 & -K_{9A} & K_{10A} \\ K_{7B} & 0 & K_{8B} & 0 & K_{10B} & -K_{9B} \\ K_{cA1} & 0 & K_{cA2} & 0 & K_{cA3} & 0 \\ K_{cB1} & 0 & K_{cB2} & 0 & K_{cB3} & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} K_{AA} & K_{\delta AA} & K_{AB} & K_{\delta AB} \\ K_{BA} & K_{\delta BA} & K_{BB} & K_{\delta BB} \\ K_{cA4} & K_{cA5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{cB4} & K_{cB5} \end{bmatrix}$$

得到的空间状态方程与图 1 相对应, u 表示 2 个 SSSC 中 4 组控制器的 4 个输入控制变量所形成的列向量, X 表示控制系统中涉及的多机电力系统参数变量, Y 为 4 个输出变量形成的列向量, 空间状态方程清楚明确地表示出了输入变量和输出变量的关系。

3 实例分析与仿真验证

3.1 仿真系统的搭建与 SSSC 投入仿真情况

为了研究多机电力系统中 2 个 SSSC 多个控制器之间的变量匹配和交互影响,搭建的 4 机 2 区域仿真系统^[18]如图 3 所示。该仿真系统由一条联络线及联络线连接的 2 个近似的区域网络组成。将SSSC_A 装设在线路 L_{4-5} 上,SSSC_B 装设在线路 L_{5-6} 上,此时整个系统产生的振荡就可以通过联络线上的振荡表现出来。

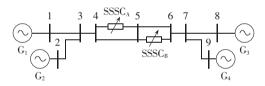
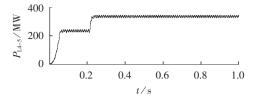


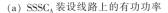
图 3 4 机 2 区域仿真模拟系统

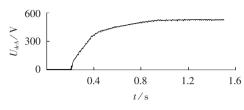
Fig.3 Four-machine two-area simulation system

分别用单输入—单输出系统的控制参数整定方法对 2 台 SSSC 的 4 组控制器分别进行设计。对于 SSSC_A,设定线路传输有功功率控制器参数 U_{cAqref} = 1.35 kV,将设定好主控制参数的 SSSC_A 投入系统,根据测得的直流侧电压数据,设定直流侧电容电压控制器参数 U_{dcAref} = 550 V;同理,对于 SSSC_B,设定线路传输有功功率控制器参数 U_{cBqref} = 1.9 kV,直流侧电容电压控制器参数 U_{dcBref} = 680 V。

图 4、图 5 分别为 $SSSC_A$ 、 $SSSC_B$ 单独投入仿真系统中的仿真波形。从图 4 中可以看出:0.2 s 时投入 $SSSC_A$, $SSSC_A$ 所装设线路 L_{4-5} 的有功功率从 240 MW 上升并稳定在 350 MW;且 0.2 s 投入后, $SSSC_A$ 直流侧电压平缓上升,至 550 V 稳定。由此可见, $SSSC_A$ 的 2 组控制器设计是成功的, $SSSC_A$ 投入具有提升线路传输功率的作用。从图 5 中可看出:0.2 s 时投入 $SSSC_B$, $SSSC_B$ 所装设线路 L_{5-6} 的有功功率从 240 MW

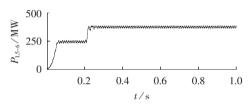




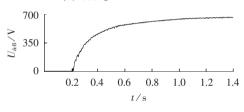


(b) SSSCA 直流侧电压

图 4 单独投运 SSSC_A 时系统的仿真波形 Fig.4 Simulative waveforms when put SSSC_A into operation only



(a) SSSC_B装设线路上的有功功率



(b) SSSC_B 直流侧电压

图 5 单独投运 $\mathrm{SSSC_B}$ 时系统的仿真波形 Fig.5 Simulative waveforms when put $\mathrm{SSSC_B}$ into operation only

上升并稳定在 370 MW; 0.2 s 投入后, $SSSC_B$ 直流侧电压平缓上升, 至 680 V 稳定。可见 $SSSC_B$ 的 2 组控制器设计也是成功的。

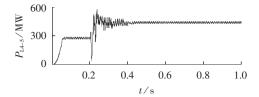
图 6 为 SSSC_A 和 SSSC_B 同时投入仿真系统中的仿真波形,以 SSSC_A 所装设位置的线路潮流和直流侧电压为例。从图 6 中可以看出:0.2 s 同时投入 SSSC_A 和 SSSC_B 时,SSSC_A 装设位置所在线路传输的有功功率出现短时大幅振荡,振荡幅度为±300 MW,直流侧的控制电压也出现较大的不稳定波动,说明 2 个 SSSC 同时投入系统时,2 个 SSSC 的 4 组控制器间存在交互影响,对系统造成不利的影响。

3.2 算例的多控制变量配对分析

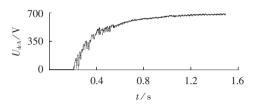
将得到的装设 2 个 SSSC 的多机电力系统相应 空间状态方程(式(4))转化到频域,可以得到系统的 传递函数表示式:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$$
(5)

令式(5)中s=0,即可得到系统的稳态传递函数



(a) SSSCA装设线路上的有功功率



(b) SSSCA 直流侧电压

图 6 同时投运 2 个 SSSC 时系统的仿真波形 Fig.6 Simulative waveforms when put both SSSC_A and SSSC_B into operation

矩阵 G(0)。

根据仿真模拟系统的系统参数,利用上述计算方法可以得到相应的4×4稳态传递函数矩阵:

$$G(0) = \begin{bmatrix} -0.0715 & -5.3876 & -0.3132 & 0.8964 \\ -0.6877 & 16.2820 & -0.9110 & 2.5529 \\ 0.0735 & 2.0651 & -0.0530 & -1.1946 \\ 0.1523 & 14.8859 & -0.7027 & 1.7427 \end{bmatrix}$$

根据公式 $RGA = G(0) \otimes (G^{-1}(0))^T$ 得到系统稳态传递函数矩阵 G(0)所对应的 RGA 如下:

$$RGA = \begin{bmatrix} -0.0200 & 0.4682 & 0.5954 & -0.0436 \\ 0.8187 & 0.2172 & 0.0819 & -0.1179 \\ -0.0175 & -0.0101 & 0.1093 & 0.9183 \\ 0.2188 & 0.3246 & 0.2134 & 0.2432 \end{bmatrix}$$

对于四输入-四输出(4×4 控制变量)系统,共有 4!=24 种变量配对组合。根据配对中所含有的 RGA 元素均为正数,可对 24 种配对组合进行初步的筛 选,得到 5 组符合的配对情况进行计算,结果如表 1 所示。

表 1 基于 NI 指数的多控制变量配对计算结果 Table 1 Calculative results of control variable pairing based on NI index

编号	配对组合	NI 指数值	系统整体 奇异值
1	(1,2)-(2,1)-(3,3)-(4,4)	27.3019	2.3606
2	(1,2)-(2,1)-(3,4)-(4,3)	3.0040	1.5814
3	(1,2)-(2,3)-(3,4)-(4,1)	10.4595	2.3128
4	(1,3)-(2,1)-(3,4)-(4,2)	2.4393	1.3430
5	(1,3)-(2,2)-(3,4)-(4,1)	10.0701	2.0503

表 1 中,配对组合中标号"1"、"2"分别表示 SSSC_A 中的线路传输有功功率控制器和直流侧电容电压控制器;标号"3"、"4"分别表示 SSSC_B 中的线路传输有功功率控制器和直流侧电容电压控制器;"(x,y)"表示控制器x 的输入对控制器y 的输出的传递函数,这里可以理解为x 的输入变量与y 的输出变量间的



关联情况。

由于先利用 RGA 元素的符号对配对组合进行了筛选,故得到的 5 种配对组合的 NI 指数均为正数。根据 1.1 节的配对方法,第 4 个组合的 NI 指数值最小、系统整体奇异值最小,可以判断出第 4 个配对组合是最优的变量配对组合,这种配对情况下控制器间交互影响最小。

3.3 2个 SSSC 的协调投运策略

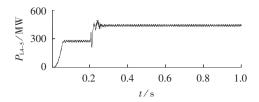
根据表 1 可以得到,最优的配对组合为(1,3)—(2,1)—(3,4)—(4,2),可使得 2 个 SSSC 投入系统时它们之间交互影响最小。其在 RGA 中的对应元素为: λ_{13} =0.595 4, λ_{21} =0.818 7, λ_{34} =0.918 3, λ_{42} =0.218 8。依据 RGA 方法中对 RGA 元素的要求(RGA 元素为正,且接近于 1)使得交互影响最小:则(4,2)为影响最大的一对配对,即控制器 4 的输入变量与控制器 2 的输出变量间的关联程度与交互影响的程度关系最大。

根据上述分析,在最优变量配对组合中,SSSC_B直流侧电容电压控制器的输入控制变量与 SSSC_A 直流侧电容电压控制器的输出控制变量间的关联程度与交互影响的程度关系最大。因此,制定相应的协调投运策略:将 SSSC_A 的 2 组控制器和 SSSC_B 的线路传输有功功率控制器同时投运,将 SSSC_B 的直流侧电容电压控制器滞后投运,从而减弱 2 个 SSSC 间的交互影响。

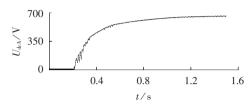
按此投运策略对 2 个 SSSC 投入系统运行进行 仿真,仿真结果如图 7 所示。

从图 7(a)—(c)中可以看出:0.2 s 时同时投入 SSSC_A 的 2 组控制器和 SSSC_B 的线路传输有功功率 控制器,经过 0.2 s 的延时后将 SSSC_B 的直流侧电容 电压控制器投入运行。此时,SSSC_A和 SSSC_B 装设位 置所在线路传输的有功功率均出现小幅振荡后上升稳定,SSSC_A 直流侧电压也仅出现小幅波动,这些较运用协调投运策略前 2 个 SSSC 间的交互影响均要减弱许多。对于滞后投入 SSSC_B 直流侧电容电压控制器,从图 7(d)中可以看出:SSSC_B 直流侧电压在 0.2 s 投运 2 个 SSSC 后出现大幅的振荡,在 0.3 s 时 SSSC_B 直流侧电容电压控制器投入后,SSSC_B 直流侧电压在 0.2 s 投运 2 个 SSSC 后出现大幅的振荡,在 0.3 s 时 SSSC_B 直流侧电容电压控制器投入后,SSSC_B 直流侧电压压控制器投入后,SSSC_B 直流侧电压压速稳定下来。从整个投运过程来看,SSSC_B 直流侧电容电压虽然波动很大,但是电压值均在安全允许的范围内。

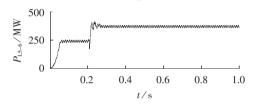
通过仿真和分析发现,利用制定的协调投运策略将2个SSSC投入系统运行,可以有效地减弱2个SSSC间的交互影响。同时,滞后投入的控制器对SSSC元件自身及系统造成的影响很微弱。因此,所制定的协调投运策略是可行、有效的。



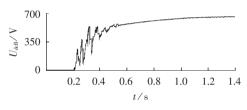




(b) SSSC, 直流侧电压



(c) SSSC_B装设线路上的有功功率



(d) SSSC_B 直流侧电压

图 7 运用协调投运策略,投运 2 个 SSSC 时系统的仿真波形

Fig.7 Simulative waveforms when put both SSSC_A and SSSC_B into operation according to coordinated commissioning strategy

4 结论

本文提出基于 NI 指数的多控制变量配对方法,通过理论推导和算例计算分析,得到该配对方法的特点如下。

a. 对于一个具有 n 组控制器的多控制变量系统,一共有 n! 种变量匹配组合和 n! 个通过运算对应得到的 NI 指数。而对于使用 RGA 方法仅有 $n \times n$ 个 RGA 元素,并且它们之间存在关联性(RGA 中每行和每列元素之和为 1)。随着控制变量个数 n 不断增大,RGA 中的 $n \times n$ 个元素就无法对所有的 n! 种可能的配对提供独立的信息。因此,从信息的角度看,基于 NI 指数的匹配方法更适用于多变量的配对选择。

b. NI 指数在分析中起到了三重作用:NI 指数的符号作为整个系统稳定的必要条件,NI 指数的大小提供了一个交互影响的判断标准,NI 指数本身也包含关于系统完整性的信息。因此,以 NI 指数为主要判断标准,得到使得交互影响最小的变量配对组合,



是解决自动控制技术中的互调问题的一种有效 方法。

通过对得到的多变量最优配对组合进行分析,可以得到整个配对组合中一组配对的输入变量与输出变量间的关联程度与交互影响的程度关系最大。依据此关系,即可制定出相应的协调投入策略,此策略是通过改变控制器的投入时间和顺序来减弱控制器之间的交互影响。利用 PSCAD 搭建模型进行仿真验证,证明所制定的协调投运策略是可行,有效的。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 宁改娣,何世杰,王跃,等. 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,et al. Static synchronous series compensator in damping subsynchronous resonance[J]. Journal of
- Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(2):189-193.
 [3] 祁桂刚, 黎灿兵, 曹一家, 等. SVC 和 TCSC 控制器间动态交互影响分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7):65-69.
 - QI Guigang, LI Canbing, CAO Yijia, et al. Analysis on dynamic interaction between SVC and TCSC controllers [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7):65-69.
- [4] 李亮, 江全元, 邹振宇. 多机电力系统中多台 TCSC 控制器之间的 交互影响研究[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 10-14.
 - LI Liang, JIANG Quanyuan, ZOU Zhenyu. Research on interaction among TCSC controllers in multi-machine power system [J]. Power System Technology, 2005, 29(9):10-14.
- [5] 颜楠楠,江全元,邹振宇. SVC 和 STATCOM 交互影响分析及单神 经元控制器设计[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(3):63-69.
 - YAN Nannan, JIANG Quanyuan, ZOU Zhenyu. Interactions and single neuron controller design of SVC and STATCOM[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(3):63-69.
- [6] 邹振宇,江全元,张鹏翔,等. 基于多目标进化算法的 TCSC 与 SVC 控制器协调设计[J]. 电力系统自动化,2005,29(6):60-65.

 ZOU Zhenyu, JIANG Quanyuan, ZHANG Pengxiang, et al.
 Coordinated design of TCSC and SVC controllers based on multiobjective evolutionary algorithm [J]. Automation of Electric Power
 Systems, 2005, 29(6):60-65.
- [7] LARSEN E V, SANCHEZ-GASCA J J, CHOW J H. Concepts for design of FACTS controllers to damp power swings [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2):948-956.
- [8] 李海琛,董萍,刘明波,等. 基于相对增益矩阵和 Prony 技术的南方电网 FACTS 和 HVDC 之间交互影响分析[J]. 电网技术,2012,36(8):169-174.
 - LI Haichen, DONG Ping, LIU Mingbo, et al. Analysis on interaction between FACTS devices and HVDC power transmission system in China Southern Power Grid based on relative gain array and Prony technology [J]. Power System Technology, 2012, 36(8):169-174.
- [9] 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.
- [10] 杨伟,曲艺,顾明星. 基于 Gramian 的电力系统 FACTS 元件交互 影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(22);30-34. YANG Wei,QU Yi,GU Mingxing. Using Gramian to analyze the mutual influence of power system with FACTS[J]. Power System Protection and Control,2011,39(22);30-34.
- [11] 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 analyze interaction of multifunctional FACTS controllers [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7):13-17.
- [12] CHIU M, ARKUN Y. A new result on relative gain array, niederlinski index and decentralized stability condition: 2×2 plant case[J]. Technical Communique, 1991, 27(2):419-421.
- [13] ZHU Z X, JUTAN A. A new variable pairing criterion based on the Niederlinski index [J]. Chemical Engineering Communications, 1993,121(18):235-250.
- [14] 杜翼,朱克平,江道灼,等. 含有限流式静止同步串联补偿器的直流配电网[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):108-113,121. DU Yi,ZHU Keping,JIANG Daozhuo,et al. DC distribution network containing SSSC-FCL[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):108-113,121.
- [15] 曹一家,陶佳,王光增,等. FACTS 控制器间交互影响及协调控制研究进展[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(1):1-8. CAO Yijia,TAO Jia,WANG Guangzeng, et al. Research progress on interaction and coordinated control among FACTS controllers [J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2008,20(1):1-8.
- [16] 彭飞进,陈金富,戴堂云. FACTS 元件的动态特性分析[J]. 电力自动化设备,2010,20(5):11-14.
 - PENG Feijin, CHEN Jinfu, DAI Tangyun. Dynamic performance analysis of FACTS devices [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 20(5):11-14.
- [17] 吴杰康,蒋程,张建华,等. 一种优化系统动态性能的新型 SSSC 控制策略[J]. 电工技术学报,2011,26(12):156-161.
 WU Jiekang,JIANG Cheng,ZHANG Jianhua, et al. A novel static synchronous series compensator control strategy for improving the dynamic performance of power system[J]. Transactions of China
- Electrotechnical Society, 2011, 26(12):156-161.
 [18] 刘震, 汪令祥. 基于神经网络的风力发电系统风速软测量[J].
 中国电力, 2010, 43(11):87-91.
 - LIU Zhen, WANG Lingxiang. Study on wind speed soft sensing based on neural networks for wind power generators [J]. Electric Power, 2010, 43(11):87-91.

作者简介:



蒋晨阳

蒋晨阳(1992—),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事电力系统分析、运行与控制及电力系统继电保护等方面的研究(E-mail;jcy19920415@163.com);

刘 青(1974—),女,河北无极人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统分析、运行与控制及电力系统继电保护等(E-mail:hddl liuqing781@163.com);

梁 宵(1991—),女,吉林四平人,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护等方面的研究(E-mail:liangxiaohuadian@163.com)。

(下转第 196 页 continued on page 196)



- [16] LAMING R,PAYNE D. Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(12): 2048-2094.
- [17] 钱景仁,李陆燊. 用于电流传感器的高线性双折射高扭转光纤[J]. 中国科学 A 辑,1989(6):637-643.
 QIAN Jingren,LI Lushen. Spun highly birefringent optical

QIAN Jingren, LI Lushen. Spun highly biretringent optical fibers for current sensors [J]. Scientia Sinica (Series A), 1989 (6): 637-643.

- [18] SUN Feng, WANG Lihui, WANG Gang. Study on the drift of modulated phase in interference fiber optic gyroscope [J]. Journal of Computers, 2010, 5(3):394-400.
- [19] 张朝阳,张春熹,王夏宵,等. 数字闭环全光纤电流互感器信号处理方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(30):42-46.
 - ZHANG Chaoyang, ZHANG Chunxi, WANG Xiaxiao, et al. Signal processing system for digital closed-loop fiber optic current sensor [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (30): 42-46.

[20] 余春雨,叶国雄,王晓琪,等. 电子式互感器的校准方法与技术 [J]. 高电压技术,2004,30(4);20-24.

YU Chunyu, YE Guoxiong, WANG Xiaoqi, et al. Calibration technique of electronic instrument transducers [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4): 20-24.

作者简介:



阎嫦玲

阎嫦玲(1981—),女,湖北罗田人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统中的光纤传感技术(E-mail:yancl@nrec.com);

王 耀(1980—),男,安徽合肥人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统中的光纤传感技术(E-mail:wangy@nrec.com);

罗苏南(1966—),男,江苏泰兴人,高级 工程师,博士,主要研究方向为电子式互感

器以及光纤传感技术(E-mail:luosn@nrec.com)。

FFOCT for generator protection

YAN Changling, WANG Yao, LUO Sunan, XU Lei, ZHAO Jun, DING Ye, LI Quanwei (NR Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The structure and working principle of FFOCT (Flexible Fiber Optical Current Transducer) as well as the overall scheme and system structure of generator protection adopting FFOCT are introduced. The key technical issues of FFOCT are introduced in detail and corresponding solutions are given. Spun Hi-bi (Spun Highly-birefringent) fiber is used to manufacture the sensing optical cable, which can wind around the conductor in field. The current detection sensitivity and anti-interference ability of FFOCT using Spun Hi-bi fiber are analyzed. The all digital dual close-loop demodulation scheme with four-state bias modulation and digital ramp feedback is adopted to enhance the dynamic range, measurement accuracy and long-term stability of FFOCT. The test results show the developed FFOCT meets IEC accuracy class 0.2 and 5TPE. The site installation and application of FFOCT for the generator protection of Guanyinyan hydropower station are briefly introduced.

Key words: electric generators; relay protection; generator protection; flexible fiber optical current transducer; spun highly-birefringent fiber; close-loop demodulation

(上接第 184 页 continued from page 184)

Control variable pairing and coordinated commissioning for multiple FACTS components

JIANG Chenyang, LIU Oing, LIANG Xiao

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: There are negative interactions among the controllers of multiple FACTS components in a system. Aiming at the limitations and deficiencies of existing variable pairing methods and interaction analysis methods, a pairing method suitable for large-scale and multiple control variables is proposed based on the existing NI index theory, which is used to find the optimal pair combination for making the interactions among multiple controllers minimal. The optimal pair combination is then analyzed to obtain a group of input-output variables, which is mostly related to the severity of interactions, and a corresponding control strategy is set accordingly for the coordinated commissioning of multiple FACTS components. With the second-generation series FACTS devices, SSSC (Static Synchronous Series Compensator), as an example, the simulative calculation and analysis prove the proposed control variable pairing method feasible. A simulation system including multiple SSSCs is built with PSCAD and results show the proposed coordinated commissioning strategy feasible and practical.

Key words: flexible AC transmission system; NI index; multiple control variable pairing; static synchronous series compensator; coordinated commissioning