

文章编号:1671-6833(2005)02-0043-04

# 多变量统一潮流控制器最佳变量配对选择的研究

张 芳, 房大中, 宋文南

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

**摘 要:**统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)是一个具有多个控制输入和输出变量的多变量控制器,因此交连与耦合就不可避免地存在于这些输入和输出变量所形成的多个控制通道之间.由控制理论可知,变量配对选择与多变量统一潮流控制系统的耦合程度密切相关.利用控制理论中的相对增益分析方法为 UPFC 确定了最佳变量配对关系,在此变量配对控制方案下 UPFC 各控制通道之间的耦合非常薄弱,从而不需要采取解耦措施,使得控制器设计简化.在新英格兰系统上的仿真结果表明:在最佳变量配对控制方案下,UPFC 具有良好的稳态控制性能。

**关键词:**统一潮流控制器;多变量控制器;最佳变量配对;相对增益分析

**中图分类号:**TM 712 **文献标识码:**A

## 0 引言

统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)作为 FACTS 家族中的一员,能按系统的需要快速灵活地控制线路潮流和母线电压,对提高电网输电能力,改善系统稳定性和阻尼系统振荡提供了新的手段.因此对 UPFC 控制方法的研究具有重要的现实意义.

文献[1,2]对 UPFC 的并联侧采用并联换流器的电压比和触发角信号,分别控制母线电压和电容电压;串联侧通过将 UPFC 串联电压源分解,并采用与端电压同相和正交的分量分别控制线路的无功和有功.文献[3]忽略了 UPFC 直流电容器的动态过程,对 UPFC 的并联侧采用输出电流的横向分量控制母线电压,串联侧采用同文献[1,2]类似的方案.文献[4,5]在电力系统稳态下的 UPFC 多变量控制设计方面做了有益的工作.文献[3~5]均以单机无穷大系统为模型设计 UPFC 控制器并验证其性能.文献[6]指出由于单机一无穷大系统模型的局限性,提出用多机系统检验 FACTS 控制器的效果.

从 UPFC 的工作原理和它的多种控制功能可以明显看出:通过调节 UPFC 的多个输入信号,可以实现对线路潮流和母线电压的控制,因而 UPFC

是一个具有多个控制输入和输出变量的多变量控制器,那么对 UPFC 就理所应当按照多变量控制器进行设计.UPFC 作为多变量控制器,它的多个输入和输出变量之间势必会形成多个控制通道并且控制通道之间会不可避免地存在着交连与耦合[4].根据控制理论[7],对一个多变量控制系统进行设计之前,应当对这个控制系统的耦合程度有一个定量的分析,并根据耦合程度决定是否需要进行解耦设计.而利用变量配对分析可以判断一个系统的耦合程度,并且耦合程度与变量配对关系的选择密切相关.因此对于多变量控制器 UPFC,针对它的多个输入和输出变量,首先需要考虑如何为其选择最佳变量配对关系.适当的变量配对关系能大大减少耦合程度,甚至在某些情况下可不必采取解耦设计.目前研究多变量控制器 UPFC 最佳变量配对关系,并为其提供充分理论依据的文章鲜见报道.鉴于变量配对分析在多变量控制器设计中的重要意义,本文作者利用控制理论中的相对增益分析方法[7](Relative Gain Analysis, RGA)为 UPFC 确定了最佳变量配对关系,这种配对关系的确定具有坚实的理论基础.分析结果表明,在最佳变量配对方案下 UPFC 控制系统的耦合程度非常薄弱,从而不需采取解耦措施,使得控制器设计大大简化.仿真结果显示,在最佳变量

收稿日期:2005-01-06;修订日期:2005-02-17

作者简介:张 芳(1972-),女,内蒙古自治区呼和浩特市人,天津大学讲师,博士研究生,主要从事电力系统稳定性控制方面的研究.

配对方案下设计的 UPFC 稳态控制器性能良好,验证了本文方法的合理性和有效性.

1 UPFC 的基本结构及其数学模型

UPFC 的基本结构和等效电路分别如图 1 和图 2 所示.图 1 中  $P_1, Q_1$  分别是 UPFC 所在线路的有功和无功;  $V_s, V_{dc}$  分别是交流母线电压和直流电容电压;  $m_1, m_2, \phi_1, \phi_2$  分别是两个逆变器的脉宽调制比信号和相位信号,由控制系统给出. UPFC 的数学模型由 5 个一阶微分方程和 2 个代数方程表示,同时考虑了直流电容器和两个逆变器的相角和幅值调制的动态过程. UPFC 的数学模型由式(1)表示:

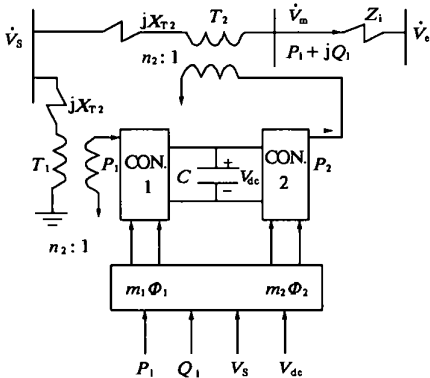


图 1 UPFC 的基本结构

Fig. 1 Basic structure of UPFC

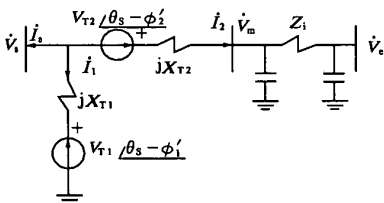


图 2 UPFC 的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of UPFC

$$\begin{cases} CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = (P_1 - P_2) S_B \\ T_{m1} \frac{dm_1}{dt} = -m_1' + m_1 \\ T_{\phi1} \frac{d\phi_1'}{dt} = -\phi_1' + \phi_1 \\ T_{m2} \frac{dm_2}{dt} = -m_2' + m_2 \\ T_{\phi2} \frac{d\phi_2'}{dt} = -\phi_2' + \phi_2 \\ V_s = V_{T1} + jX_{T1} I_1 \\ V_m = V_m + jX_{T2} I_2 - V_{T2} \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} P_1 = R_e[V_T I] ; \\ P_2 = R_e[V_T I] , \\ V_{T1} = \begin{cases} m_1' V_{dc} n_1 / V_B e^{j(\theta_s - \phi_1')} , 0 \leq m_1' \leq 1 ; \\ V_{T2} = \begin{cases} m_2' V_{dc} n_2 / V_B e^{j(\theta_s - \phi_2')} , 0 \leq m_2' \leq 1 . \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

式中:  $T_{m1}, T_{m2}, T_{\phi1}, T_{\phi2}$  分别是两个逆变器控制信号的惯性时间常数;  $m_1', m_2', \phi_1', \phi_2'$  分别是脉宽调制比信号和相位信号经惯性时间延迟后的输出值;  $S_B, V_B$  分别为系统的基准容量和 UPFC 所在母线的基准电压;  $n_1, n_2$  分别是串并联侧变压器的变比.

2 确定 UPFC 最佳变量配对关系的理论基础

多变量控制器 UPFC 的多个控制通道之间存在着交连和耦合,对这个多变量控制器进行设计之前应当首先判定这个系统的耦合程度.耦合程度与变量配对关系的选择密切相关,适当的变量配对关系能大大减少耦合程度,甚至在某些情况下可不必进行解耦设计,因而正确的变量配对是进行良好控制的必要条件.控制理论中的相对增益分析方法(Relative Gain Analysis, RGA)<sup>[7]</sup>是确定 UPFC 最佳变量配对关系的理论基础.

根据相对增益理论,相对增益系数  $\lambda_j$  定义如下:

$$\lambda_j = \left( \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_{u_r = \text{const}} \left/ \left( \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_{y_r = \text{const}} \right. \quad (2)$$

式(2)中的分子和分母分别表示当其它控制回路均开环和均闭环时,  $u_j \rightarrow y_i$  通道的增益,其中  $u_j$  和  $y_i$  分别表示第  $j$  个控制输入变量和第  $i$  个输出变量;  $u_r$  和  $y_r$  分别表示其余控制输入变量和输出变量( $r$  为).对于 UPFC 控制器,  $u_j$  与  $y_i$  分别代表  $m_1, m_2, \phi_1, \phi_2$  与  $P_1, Q_1, V_s, V_{dc}$ .

对于一个有  $n$  个控制输入和  $n$  个输出变量的系统,输入变量的增量与输出变量的增量之间的关系可由如下的矩阵形式表示:

$$\Delta Y = K \Delta U \quad (3)$$

其中,矩阵  $K$  中的元素  $k_{ij} = \left( \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_{u_r = \text{const}}$ .

对式(3)两端左乘以  $K^{-1}$ ,得到式(4):

$$\Delta U = K^{-1} \Delta Y = L \Delta Y \quad (4)$$

将式(4)写成元素表示形式如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ M \\ \Delta u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & \Lambda & l_{1n} \\ M & M & M \\ l_{n1} & \Lambda & l_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ M \\ \Delta y_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

因为

$$\Delta u_j = \frac{\partial u_j}{\partial y_1} \Delta y_1 + \Lambda + \frac{\partial u_j}{\partial y_n} \Delta y_n \quad (6)$$

所以

$$l_{ji} = \frac{\partial u_j}{\partial y_i} \Big|_{y_r = \text{const}}$$

令  $M = (K^{-1})^T = L^T$ , 则

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & L & m_{1n} \\ M & M & M \\ m_{n1} & L & m_{nn} \end{bmatrix} \tag{8}$$

其中,

$$m_{ij} = l_{ji} = \frac{\partial u_j}{\partial y_i} \Big|_{y_r = \text{const}}$$

式(2)又可表示为如下形式:

$$\lambda_j = \begin{pmatrix} \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \end{pmatrix}_{u_r = \text{const}} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial u_j}{\partial y_i} \end{pmatrix}_{y_r = \text{const}} \tag{10}$$

由式(10)可见:相对增益矩阵中的各个元素可由矩阵  $K$  与矩阵  $M$  的对应元素相乘得到. 根据相对增益系数的物理意义, 选择最佳变量配对的原则可归纳如下<sup>[7]</sup>:

- (1)  $\lambda_j = 1$ , 意味着其它回路与  $u_j \rightarrow y_i$  组成的回路无关联, 所以应选择正的  $\lambda_j$  中最接近 1 的变量配对构成控制通道.
- (2)  $\lambda_j = 0$ , 意味着其它回路由闭环变为开环, 将使  $u_j \rightarrow y_i$  回路由能控变为不能控, 所以其它回路与  $u_j \rightarrow y_i$  组成的回路关联严重.
- (3)  $\lambda_j < 0$ , 意味着当其它回路由开环变闭环或由闭环变开环时, 通道的增益符号相反, 使得控制系统不稳定, 因而其它回路与  $u_j \rightarrow y_i$  组成的回路关联严重.

因此, 通过 RGA 方法可以选择使控制回路间关联程度最为薄弱的输入和输出变量配对构成控制通道. 本文作者用 RGA 方法对含有 UPFC 的新英格兰系统(如图 3 所示)作耦合程度定量分析, 然后在定量分析的基础上为 UPFC 确定最佳输入输出变量配对关系.

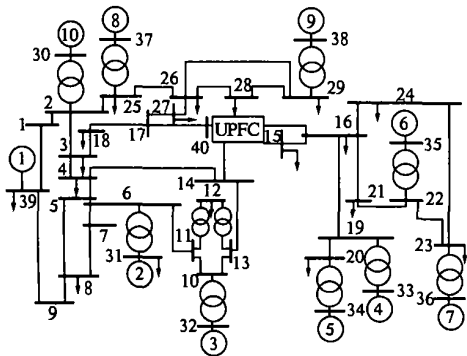


图 3 含有 UPFC 的新英格兰系统

Fig. 3 The New England system with a UPFC installed

将该系统在稳态运行点线性化, 易得该系统的静态传递函数矩阵如式(11)所示:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_s \\ \Delta P_1 \\ \Delta V_{dc} \\ \Delta Q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.005\ 3 & -0.141\ 6 & 0.0000 & 0 \\ 0.007\ 4 & 3.211\ 8 & 0.0000 & 0 \\ 36.876\ 9 & -1.897\ 3 & -4.0298 & 0 \\ 0.145\ 3 & 11.669\ 6 & 0.0000 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \phi_1 \\ \Delta m_2 \\ \Delta m_1 \\ \Delta \phi_2 \end{bmatrix} \tag{11}$$

由式(11)看到:静态传递函数矩阵的第 4 列全部为零, 这表明控制信号  $\phi_2$  的增量对所有输出变量的增量均没有贡献. 因此考虑将  $\phi_2$  从输入变量中去掉, 同时为保持输入和输出变量个数相等, 将  $Q_1$  从输出变量中去掉. 去掉  $\phi_2$  和  $Q_1$  后, 相对增益矩阵的计算结果如下:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0.9391 & 0.0583 & 0.0025 \\ 0.0579 & 0.9417 & 0.0004 \\ 0.0030 & -0.0000 & 0.9970 \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中:  $u_{1,2,3} = \phi_1, m_2, m_1$ ;  $y_{1,2,3} = V_s, P_1, V_{dc}$ .

根据上述变量配对原则, 可以得出结论: 对于图 3 所示的含有 UPFC 的测试系统,  $\phi_1 \rightarrow V_s, m_2 \rightarrow P_1, m_1 \rightarrow V_{dc}$  是最佳变量配对. 由于这 3 个变量配对所对应的相对增益系数均介于 0.8 与 1.0 之间, 这表明这 3 个通道之间的交互影响很小, 所以这 3 个通道可以由其本通道调节器闭合, 而不需要采取解耦设计. 本文对选定的每个通道均采用闭环控制.

3 多变量控制器 UPFC 稳态控制仿真结果

对图 3 所示的含有 UPFC 的测试系统, UPFC 控制目标的稳态运行值及其参考设定值如表 1 所示. 功率以标么值表示. 其中,  $V_{dc}$  和  $V_{16}$  均维持其稳态运行值不变.

表 1 UPFC 控制目标的稳态值及参考设定值

Tab. 1 Steady-state values and reference values of UPFC control objectives

$t/s$	$P_{40-17}, (P_{40-17ref})$	$V_{dc}, (V_{dcref})$	$V_{16}, (V_{16ref})$
0	2.045	2.04	1.03
1	2.15	2.04	1.03
5	2.25	2.04	1.03

线路 40—17 输送的有功、电容电压以及 16 号母线电压的仿真结果分别如图 4 所示. 各物理量均以标么值表示. 由图 4 可见: 在最佳变量配对方案

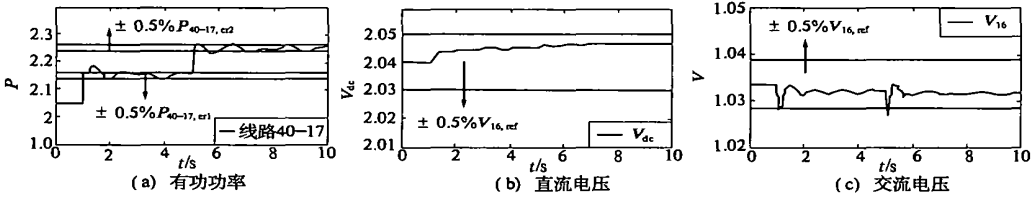


图 4 UPFC 所控制的有功功率、交、直流电压的动态过程

Fig.4 Variations of real power ,AC and DC voltages controlled by UPFC versus time

下,各控制通道之间的耦合非常薄弱,因而对  $P_{40-17}$ ,  $V_{dc}$  和  $V_{16}$  同时做到了协调控制,其控制精度均在 0.5%之内;调节时间均在 1s 以内;超调量分别为  $2.19-2.14)/2.14=2.3\%$ ,  $0.5\%$ ,  $0.5\%$ 。

图 3 中,线路 40—17 和 16—15 构成了一个输送端面.由图 5(a) 看出,当线路 40—17 输送的有功增加时,线路 16—15 输送的有功是减少的,然而这两条线路总的输送功率仅较 UPFC 不作用时的稳态输送功率增加了  $((2.25+2.82)-(2.04+2.90))/(2.04+2.90)=2.6\%$ ,因而可以认为这两条联络线总的输送功率在 UPFC 作用前后基本保持不变,从而验证了 UPFC 调节联络线潮流分布的能力.图 5(b) 表明,当电容电压保持恒定时,UPFC 装置两侧线路输送的有功功率是相等的,间接验证了仿真结果的正确性。

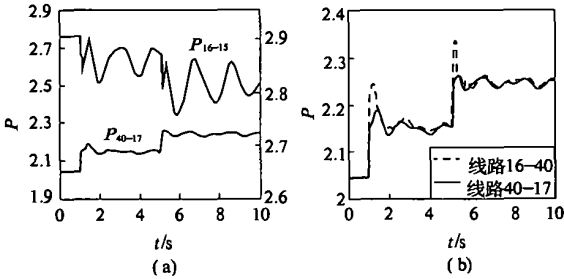


图 5 联络线功率随时间变化曲线

Fig.5 Variations of tie-line real power versus time

4 结论

(1) 多变量控制器 UPFC 的多个控制通道之间的耦合程度与变量配对关系的选择密切相关.本文作者提出最佳变量配对关系的选择是进行多变量控制器 UPFC 设计时首先需要考虑的问题。

(2) 利用控制理论中的相对增益分析方法为多变量控制器 UPFC 确定了最佳变量配对关系,

这种配对关系的确定具有坚实的理论基础;在此变量配对方案下 UPFC 控制系统的耦合程度非常薄弱,从而不需要采取解耦措施,使得控制器设计大大简化。

(3) 在新英格兰测试系统上的仿真结果验证了本文作者所确定的 UPFC 最佳变量配对关系的合理性和有效性。

参考文献:

[1] 黄振宇,倪以信,陈寿孙,等. UPFC 动态模型在电力系统动态分析中的实现[J]. 电力系统自动化,1999, 23(6):26~30.

[2] 黄振宇,刁勤华,倪以信,等. 统一潮流控制器的控制系统分析及控制策略设计[J]. 电网技术,1999, 23(7):3~9.

[3] 颜伟,朱继忠,孙洪波,等. 统一潮流控制器的控制器设计与暂态仿真研究[J]. 电网技术,1999, 23(7):15~23.

[4] 王海风,李敏,陈珩. 统一潮流控制器的多变量控制设计[J]. 中国电机工程学报,2000, 20(8):51~55.

[5] 王海风,李帆,房大中. 基于电力系统非参数化模型设计统一潮流控制器[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7):62~65.

[6] 朱慧瑜,童陆园,郭春林,等. FACTS 暂态稳定控制的系统模型的研究[J]. 电力系统自动化,2000, 24(16):13~16.

[7] 刘晨晖. 多变量过程控制系统解耦理论[M]. 北京: 水利电力出版社,1984.

附录

UPFC 参数:  
 $V_B=345\text{ kV}$ ,  $S_B=100\text{ MVA}$ ,  $n_1=16$ ,  $n_2=4$ ,  $C=0.5$ ,  $X_{T1}=0.045(\text{p.u.})$ ,  $X_{T2}=0.0002(\text{p.u.})$ ,  $V_{dc\text{ref}}=44\text{ kV}$ ,  $T_{m1}=T_{m2}=T_{\phi1}=T_{\phi2}=0.02\text{ s}$  (下转第 59 页)

参考文献:

[ 1 ]

WANG K W, TSE C T, TSANG K M. Algorithm for power system dynamic stability studies taking account of the variation of load power[J]. Electric Power Systems Research, 1998, 46( 3) : 221~227.

[ 2 ]

王克文, 钟志勇, 谢志棠, 等. 混合使用中心矩与累加量的电力系统概率特征根分析方法. 中国电机工程学报, 2000, 20( 5) : 37~41.

[ 3 ]

王克文, 谢志棠, 史述红, 等. 基于概率特征根分析的电力系统稳定器参数设计[J]. 电力系统自动化, 2001, 25( 11) : 20~23.

[ 4 ]

TSE C T, WANG K W, CHUNG C Y, et al. Parameter optimization of robust power system stabilisers by probabilistic approach[J]. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., 2000, 147( 2) : 69~75.

[ 5 ]

张建芬, 王克文, 宗秀红, 等. 几种概率潮型的准确性比较分析. 郑州大学学报( 工学版), 2003, 24( 4) : 32~36.

[ 6 ]

ZHANG Jian - fen, TSE C T, WANG Ke - wen, et al. Studies of the computational error in the probabilistic eigenvalue analysis[ R]. Hong Kong: The 2nd International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004.

[ 7 ]

方思立, 朱 方. 电力系统稳定器的原理及其应用[ M]. 中国电力出版社, 1996.

Coordination of Power System Stabilizers

GUO Jian - feng, ZHANG Jian - fen, WANG Ke - wen

(College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract** : Under deterministic system operating condition, PSS parameters are designed by using the eigenvalue sensitivity approach to investigate the feasibility of parameters optimization using the nonlinear programming technique. With multi - operation conditions considered the parameters optimization by the nonlinear programming technique is tested in which the initial parameters are determined by the nonlinear programming. Testing computation on an eight - machine system indicates that the controller parameters can be further optimized.

**Key words** : eigenvalue sensitivity ; power system stabilizer (PSS) ; nonlinear programming

( 上接第 46 页)

Study on Best Variable Pairs Selection of Multivariable Unified Power Flow Controller

ZHANG Fang, FANG Da - zhong, SONG Wen - nan

(School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** : Unified Power Flow Controller (UPFC) is a multivariable controller with multiple control input and output variables, therefore interactions inevitably exist among multiple control channels, which are formed between these input and output variables. According to control theory, the degree of interactions of a multivariable control system has a close relationship with selections of variable pairs. This paper applies the relative gain analysis (RGA) method in control theory to select the best input/output pairs for UPFC controller; hence the selection of the best variable pairs is based on firm theory foundation. The well selected input/output pairs make the interactions among UPFC multiple control channels very weak, therefore there is no need to take decoupling measures in the design of UPFC controller, which makes the controller design simplified greatly. Simulation results on the New England test system show that UPFC has the perfect steady state control performance under the control scheme of the best variable pairs.

**Key words** : UPFC ; multivariable controller ; best variable pairs ; relative gain analysis (RGA)