

# MMC-UPFC 交叉解耦控制策略研究综述

费骏韬, 罗珊珊

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**介绍了模块化多电平-统一潮流控制器(MMC-UPFC)的基本结构,从3个方面归纳了MMC-UPFC交叉解耦控制策略的研究进展:传统的MMC-UPFC交叉解耦控制策略、结合了智能算法的交叉解耦控制策略以及基于状态反馈的控制策略最后,并比较了这3种控制策略的特点以及优劣,总结了交叉解耦过程需要解决的问题。

**关键词:**MMC-UPFC;控制策略;交叉解耦;智能算法;状态反馈

**中图分类号:**TM761

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2016)01-0045-04

统一潮流控制器(UPFC)是功能最为全面、系统潮流调节能力最为灵活的柔性交流输电系统(FACTS)元件<sup>[1]</sup>。随着电力系统规模日益扩大,对于接入FACTS装置的容量和可靠性有更高的要求,传统的UPFC装置无法满足现实情况下的运行需要。模块化多电平技术(MMC)以其特殊结构和技术优势,满足了系统对大容量、高功率和高可靠性的需求<sup>[2]</sup>。然而,MMC-UPFC是一个强耦合、多变量的FACTS元件,而且具有多种补偿功能,其控制策略复杂且多样,有必要对其进行整理从而在实际应用中可以根据需要选择最合适的控制方案。

## 1 MMC-UPFC 基本结构

世界上第一台UPFC装置是美国电力公司(AEP)、西屋公司(WESTING HOUSE)以及美国电力科学研究院(EPRI)于1998年在KENTUCKY东部的INZE变电站138 kV高压输电线路安装投运的<sup>[3]</sup>,其串联部分为同步静止串联补偿器(SSSC),并联部分为静止同步补偿器(STATCOM)。近年来,UPFC的基本结构得到了统一,其结构如图1所示。

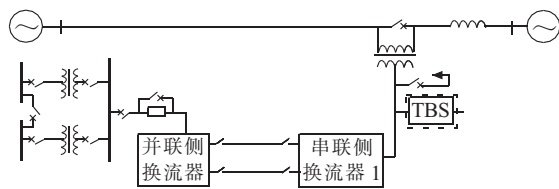


图1 UPFC结构

该装置将1台并联换流器通过并联变压器与线路连接,另1台为串联换流器,通过串联变压器与线路连接,2台换流器通过两条直流母线背靠背连接,实现对线路潮流的控制<sup>[4]</sup>。其中,并联换流器相当于一个受控电流源,向线路注入幅值可控的无功电流以实现无功补偿,同时与系统进行有功交换,维持直流母线的电压;串联换流器相当于受控电压源,通过控制传入线路

的电压幅值以及相角来调节线路的潮流。

UPFC的换流器拓扑大致可分为三类:两电平电压源换流器(VSC)、多电平VSC以及MMC。从性能上看,两电平VSC谐波大、换流器控制复杂、损耗大、体积大,但容量小且串联技术难度大,需要耦合变压器提高容量;多电平VSC体积大,可关断器件串联控制及电容均压控制较为复杂,工程应用中通常不超过5个电平,需要耦合电压器或者开关器件串联技术提高容量。而MMC除了控制较为复杂外,体积较小,谐波小,损耗低,且使用模块化设计,易于扩展。因此,通过MMC技术可更方便地实现对UPFC装置扩容需求。

应用MMC技术使UPFC设备具有更强的系统潮流调节能力,其单侧结构图如图2所示,MMC子模块结构如图3所示。

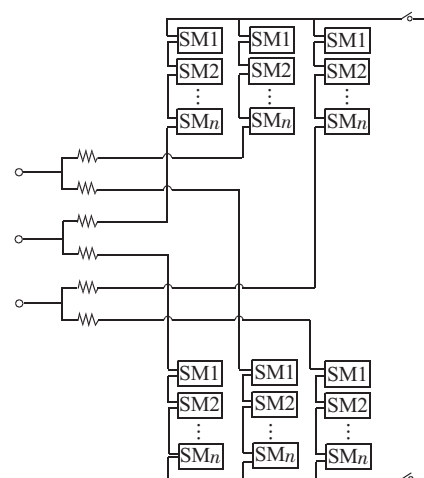


图2 MMC-UPFC单侧结构

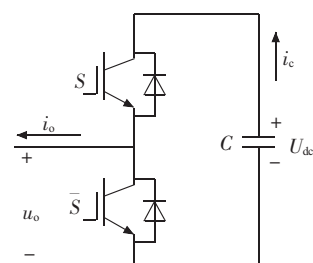


图3 MMC子模块结构

## 2 MMC-UPFC 交叉解耦控制策略研究

传统的 UPFC 控制方法有幅相控制和基于同步转轴  $dq$  坐标系控制。由于 UPFC 设备的强耦合特性,目前工程应用较多的是基于同步转轴  $dq$  坐标系控制。在此基础上,控制方法又通常存在交叉耦合控制策略、交叉解耦控制策略以及协调控制策略。考虑交叉解耦控制应用的广泛性,针对解耦过程中的问题出现了多种控制方式,文中对交叉解耦控制进行进一步研究。

### 2.1 传统交叉解耦控制策略

在 UPFC 控制策略研究初期,出现了多种控制方式,然而实验效果并不理想。随着不断研究,交叉解耦控制策略得到了广泛认可。文献[5]利用瞬时功率理论,建立了控制系统  $dq$  坐标系下的动态模型,对并联换流器和串联换流器分别进行控制。

对 MMC-UPFC 建立合理的动态模型是对其进行控制策略研究的基础。根据图 2 及图 3 可以得到三相静止坐标系下 MMC-UPFC 的数学模型,但是由于其交流侧均为时变的交流量,不利于进行解耦控制。因此利用帕克变换将三相静止坐标系转换成为以电网基波频率同步旋转的  $dq$  坐标系下的数学模型,即:

$$\begin{cases} U_{Shd} = U_{ld} + \omega L_{Sh} i_{Shq} - L_{Sh} di_{Shd}/dt \\ U_{Shq} = U_{lq} + \omega L_{Sh} i_{Shd} - L_{Sh} di_{Shq}/dt \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_{Sed} = L_{Se} di_{SeLd}/dt - \omega L_{Se} i_{SeLq} + U_{12d} \\ U_{Seq} = L_{Sq} di_{SeLq}/dt - \omega L_{Se} i_{SeLd} + U_{12q} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} i_{SeLd} = C_{Se} dU_{12d}/dt - \omega C_{Se} U_{12q} + i_{Seq} \\ i_{SeLq} = C_{Se} dU_{12q}/dt - \omega C_{Se} U_{12d} + i_{Seq} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} U_{2d} = L_R di_{ld}/dt - \omega L_R i_{lq} + U_{Rd} \\ U_{2q} = L_R di_{lq}/dt - \omega L_R i_{ld} + U_{Rq} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $U_{Shd}, U_{Shq}$  表示并联侧电压;  $U_{ld}, U_{lq}$  表示线路电压;  $i_{lq}, i_{ld}$  表示线路电流;  $\omega, L_{Sh}$  表示并联侧电感;  $i_{Shq}, i_{Shd}$  表示并联电流;  $U_{Sed}, U_{Seq}$  表示串联侧电压;  $L_{Se}$  表示串联侧阻抗;  $i_{SeLd}, i_{SeLq}$  表示串联侧电流;  $U_{12d}, U_{12q}$  表示串联变压器电压;  $C_{Se}$  表示串联侧电容;  $U_{2d}, U_{2q}$  表示线路电压;  $L_R$  表示母线阻抗;  $U_{Rd}, U_{Rq}$  表示母线电压。

对并联侧换流器采用双环解耦控制,分别控制直流母线电压和 MMC-UPFC 输入端节点;对串联侧换流器采用三环解耦控制,由外向内分别为功率环、电压环和电流环<sup>[6,7]</sup>。

(1) 串联侧换流器解耦控制策略。针对串联侧控制策略,首先研究其功率外环解耦方法,将潮流指令值转化为电流指令值,通过给定的有功和无功指令值建立串联补偿电压到受端电源的方程,经过等量  $dq$  变换后得到状态方程,而后基于 PI 控制实现。在控制功率

外环的过程中,根据瞬时功率理论可以得到传输线路上的有功和无功功率:

$$\begin{cases} P_{line} = \frac{3}{2} (U_{2d} i_{ld} + U_{2q} i_{lq}) \\ Q_{line} = \frac{3}{2} (U_{2d} i_{lq} - U_{2q} i_{ld}) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_{line}$  表示线路有功功率;  $Q_{line}$  表示线路无功功率。电压内环直接采用 PI 控制即可得到电流内环的指令值。电流内环也在得到非线性状态方程的基础上直接通过 PI 控制阀进行控制。

由于串联侧换流器电压控制环控制的对象为线路电压,结合式(4)、(5)可得串联换流器交叉解耦控制框图如图 4 所示。

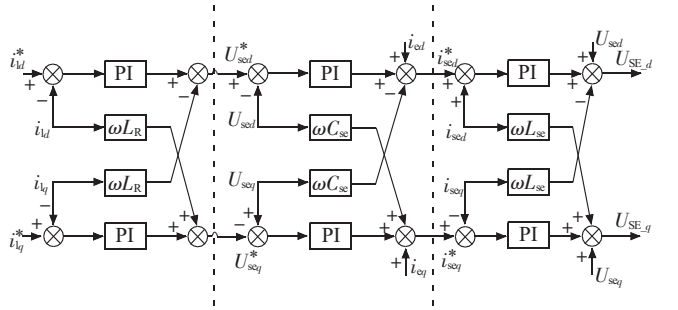


图 4 串联换流器交叉解耦控制

(2) 并联侧换流器解耦控制策略。针对并联侧,可以建立起和串联侧电流内环一样的方程,建立相似的状态方程,实现 PI 控制。由于其采用双环控制,内部控制结构相较串联侧换流器更简单,分为内外环控制,其控制策略结构如图 5 所示。

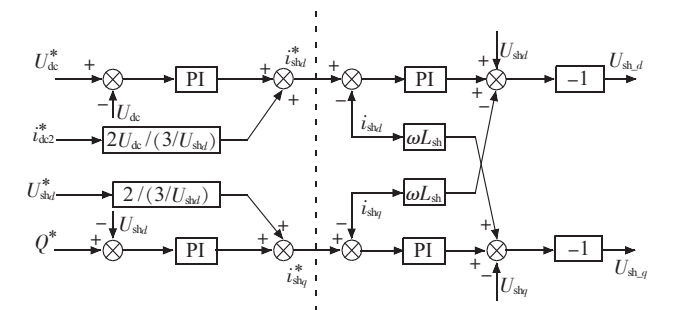


图 5 并联换流器解耦控制策略

相较于其他的控制方法,交叉解耦方法可以较好地实现对 UPFC 系统的解耦控制,实现对线路潮流的稳定控制。但是其参数适用范围有限,而且控制器的反馈系数包含线路阻抗值,导致其鲁棒性不强,当线路参数改变的时候就需要相应地改变控制器的参数。

### 2.2 结合智能算法的传统交叉解耦控制策略

在以上传统的控制策略研究之外,傅仲佳、袁旺等学者还对智能算法在 UPFC 控制策略中的应用进行了研究和尝试。

文献[8]设计了基于模糊算法和遗传算法的 UPFC 控制器。文献在传统 PI 控制的基础上,基于模糊控制

理论设计模糊算法 PI 控制器,它用语言变量描述系统特征,根据系统动态信息和模糊控制规则进行推理从而获得合适的控制量。这种算法适应性好,抗干扰能力强,鲁棒性好,但是其控制精度不高。

在此基础上,为了提高精度,文献研究了基于遗传算法的控制策略。基于模糊 PI 控制法的控制器中,量化因子和比例因子对系统的控制精度影响很大。而模糊控制法中由经验公式确定且是定值,当控制过程比较复杂时该定值无法达到预期的效果。因此,考虑采用遗传算法对基于模糊算法的控制器进行优化<sup>[9,10]</sup>。在模糊控制器的基础上,使用遗传算法以系统的性能指标为评价标准,通过遗传算法计算得到量化因子和比例因子的最优解,从而减少了主观因素对系统控制带来的影响,提高了控制过程的客观性。

文献[11]采用了将遗传算法应用到 PID 控制的策略中,其控制如图 6 所示。UPFC 是具有 2 个输入和输出且强耦合的双变量系统。在实际运行过程中由于电抗的不确定性导致控制解耦过程不能保证精确,从而无法得到精确的有、无功值。通过在 PID 控制器中加入神经网络算法,将采集到的量经过神经网络处理后输出,得到较为精确的值,提高了 UPFC 控制的准确度,通过仿真也验证了该方法的有效性。

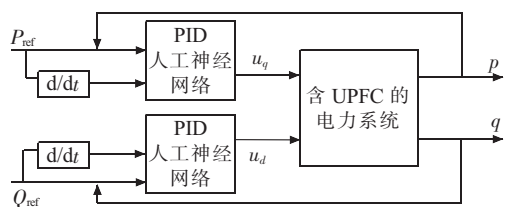


图 6 结合遗传算法的 PID 控制

总的来说,智能算法独立应用于 UPFC 控制时效果不理想,存在计算速度慢,计算结果偏差大的问题。当智能算法与传统经典算法结合后可有效地提高 UPFC 控制的精确性和鲁棒性。但仍然存在一定的局限性。

### 2.3 引入反馈线性化方法的交叉解耦控制

针对传统交叉解耦控制策略鲁棒性较差的问题,文献[12]将反馈线性化和变结构控制方法应用于非线性系统的交叉解耦控制方法中。其基本思路是首先通过反馈线性化方法对非线性系统进行解耦,然后引入变结构控制方法,对并联侧和串联侧分别设计控制器。

特别的,串联侧控制器包括功率外环、电压内环和电流内环。针对功率外环,在得到系统控制方程的基础上,为增强鲁棒性,引入反馈线性化方法进行解耦。选取状态变量  $\mathbf{X}=[x_a \ x_b]^T=[i_{ud} \ i_{uq}]^T$ ,输入变量  $\mathbf{U}=[u_a \ u_b]^T=[u_{std} \ u_{sq}]^T$ 以及输出变量  $\mathbf{Y}=[y_a \ y_b]^T=[h_a(X) \ h_b(X)]^T$ 。代入原方程中,通过计算验证其向量相对阶等于系统

阶数,使系统实现精确反馈线性化,系统实现解耦的同时降阶为一阶线性系统,对其控制成为典型的跟踪问题,同时可得到子系统滑模控制率为:

$$\begin{cases} v_a = -k_1 s_a - \varepsilon_1 Sat(s_a) \\ v_b = -k_2 s_b - \varepsilon_2 Sat(s_b) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Sat(s)$  表示饱和函数。至此,可以得到功率外环的控制输出:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 v_a + R_1 x_a - \omega L_1 x_a - u_{sd} + u_{rd} \\ L_1 v_b + \omega L_1 x_a + R_1 x_b - u_{sq} + u_{rq} \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过引入变结构控制方法优化传统交叉解耦控制鲁棒性弱的问题。针对电压内环,由于其没有三相全桥拓扑中滤波电容参数设定对控制性能的影响,因此采用 PI 控制对其实现控制。针对电流内环,其输出电压方程经 dq 变换后为非线性方程,采用与功率外环类似的设计思路,采用反馈线性化解耦后利用变结构控制方法设计控制器<sup>[10]</sup>。

同时,并联侧的控制目标是稳定直流侧的母线电压并提供无功补偿。其控制方程与串联侧电流内环形式相同,因此也采用类似的方法,首先采用反馈线性化实现系统解耦以及非线性系统的线性化,接着采用指数趋近律设计控制器,实现对并联侧换流器的控制。

反馈线性化控制结构如图 7 所示。通过采用反馈线性化方法,在保证控制系统快速性和解耦性的同时,也大大提高了系统的鲁棒性。

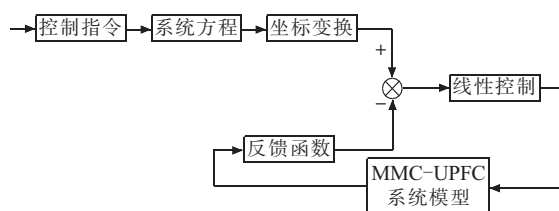


图 7 反馈线性化控制策略

### 2.4 各类交叉解耦控制策略效果对比

在实际工程应用中,交叉解耦控制策略被广泛的用于 UPFC 潮流控制中。通过原理分析可以知道,在 MMC-UPFC 潮流控制中,相对于其他控制方法,其也具有明显优势。然而,针对传统交叉解耦控制策略解耦不完全的问题,在原有控制策略的基础上通过对控制量及变量附加一些额外的控制模块,进一步优化了控制效果。

典型的控制策略如前文所述,在控制效果上,引入反馈线性化方法的交叉解耦控制策略控制速度最快,解耦最完全,同时鲁棒性也最好;结合智能算法的交叉解耦控制策略一定程度上了解了解耦不完全的问题,但是这种控制策略运算速度慢,在实际应用中可能会因为速度太慢、控制结果不稳定造成线路故障。总的来说,反馈线性化方法在工程应用中有较好地应用前景。

### 3 结束语

MMC-UPFC 的拓扑结构统一,其数学模型建立研究较为成熟,在控制策略研究方面也进行了广泛的研究。文中主要介绍了 MMC-UPFC 交叉解耦控制策略研究现状,包括:传统的交叉解耦控制策略,包括 PI 控制和 PID 控制;结合智能算法的传统交叉解耦控制策略以及其它非线性控制方法。从控制效果来看,引入反馈线性化方法的交叉解耦控制策略效果最优,其控制速度快,精度高,鲁棒性好,但精确的解耦算法对电感参数的依赖较强,也是该方法工程实现的难点。在计算机技术及电力电子技术不断发展的过程中会出现更好的控制策略。

#### 参考文献:

- [1] 郑博文. 模块化多电平 UPFC 装置级控制策略研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2013.
- [2] 彭志强, 张小易, 高磊, 等. 智能变电站二次系统双重化配置技术应用分析[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(5): 38-41.
- [3] 陈兵. 统一潮流控制器(UPFC)的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2005.
- [4] 王华雷, 伏祥运, 汤奕, 等. 基于滑模变结构的含多 FACTS 电

- 力系统稳定性协调控制[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(4): 1-4, 9.
- [5] 刘黎明, 康勇, 陈坚, 等. 统一潮流控制器控制策略的研究与实现[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 114-119.
- [6] 韦永忠, 郑爱霞, 袁晓冬, 等. 江苏电网电能质量评估方法及应用[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(5): 1-4.
- [7] 唐爱红. 统一潮流控制器运行特性及其控制的仿真和实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [8] 袁旺. 基于遗传算法的 UPFC 控制器的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [9] 荆平, 周飞, 宋洁莹, 等. 采用模块化结构的统一潮流控制器设计与仿真[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 356-361.
- [10] 杨尚瑾. 统一潮流控制器(UPFC)多目标协调控制及稳定控制策略研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2013.
- [11] 傅仲佳, 席自强, 张佳, 等. 基于 PID 神经网络的 UPFC 潮流控制方法研究[J]. 湖北工业大学学报, 2012, 27(1): 26-29.
- [12] 张振华, 江道灼. 基于 MMC 拓扑的 UPFC 控制策略仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 73-77.

#### 作者简介:

费骏韬(1990), 男, 江苏常州人, 硕士, 从事电能质量及配电自动化方面研究工作;

罗珊珊(1988), 女, 河南商丘人, 硕士, 从事电能质量及配电自动化方面研究工作。

## Review of MMC-UPFC Cross Decoupling Control Strategy

FEI Juntao, LUO Shanshan

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Firstly, this paper introduces the basic structure of MMC-UPFC, and then summarizes the research progress of cross decoupling control strategy of MMC-UPFC from three aspects: the traditional MMC-UPFC cross decoupling control strategy, control strategy combined with intelligent algorithm and control strategy based on state feedback. At last, this paper compares the characteristics of the three kinds of control strategies and summarizes the problems should be solved during cross decoupling.

**Key words:** MMC-UPFC; control strategy; cross decoupling; intelligent algorithm; state feedback

(上接第 19 页)

- [4] 刘传玉, 张婕. 基于协调度函数的碳排放初始权区域分配模型研究[J]. 环境科技, 2015(2): 1-5.
- [5] 陈勇. 电力碳排放权区域分配指标体系研究[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(5): 4-9.
- [6] 陈艳萍, 吴凤平, 吴丹. 基于模糊优选和 TOPSIS 法的流域初始水权分配模型[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(4): 467-471.
- [7] 张婕, 黄舒舒. 基于模糊优选和 CRITIC 法的电力碳排放权区域初始分配[J]. 环境保护科学, 2015, 41(3): 62-67.

- [8] 中华人民共和国统计局. 国家统计年鉴 [EB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/workspace/index?m=fsnd.2005-2013>.

#### 作者简介:

陈勇(1975), 男, 江西遂川人, 高级工程师, 管理学博士, 从事能源资源分配、电力经济与技术研究工作;

黄舒舒(1989), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为资源管理、投资经济与管理。

## Initial Allocation of Carbon Emission Right for East China

CHEN Yong<sup>1</sup>, HUANG Shushu<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

2. Business School of Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** Considering the principle of fair, efficiency and sustainable, this paper proposes the emission right allocation index system of carbon emission right for the east China. The index system includes 3 aspects and 14 indexes. The initial allocation model of carbon emission right is established using CRITIC and fuzzy optimization method. Compared with other proposals, the proposed allocation is more suitable for the east China. Also, the model provides a reference for other regions.

**Key words:** carbon emission right; Initial allocation; CRITIC; fuzzy optimization