

· 直流输电 ·

## 多端柔性直流输电系统直流电压模糊控制策略

刘志江, 夏成军, 杜兆斌

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 直流电压斜率控制适用于潮流经常变化的多端柔性直流输电系统, 但现有的直流电压斜率控制不能很好地兼顾不同运行工况对斜率参数的要求。文中提出一种基于模糊控制的直流电压变斜率控制策略。该控制策略应用模糊控制理论, 把常规的直流电压斜率控制由原来难以整定参数的固定斜率控制变为控制参数根据运行工况变化的变斜率控制。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建四端柔性直流输电系统模型, 并与 MATLAB 互联仿真。仿真结果验证了文中设计的直流电压模糊控制策略能有效维持系统稳定运行和加快系统故障恢复。

**关键词:** 柔性直流输电; 多端柔性直流输电; 直流电压控制; 直流电压斜率控制; 模糊控制

**中图分类号:** TM721.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)02-0021-06

### 0 引言

目前基于电压源换流器的高压直流输电系统 (voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC), 由于其可以独立控制有功与无功功率、不存在换相失败、可以作为黑启动电源的众多优点, 成为学术界与工程界的焦点<sup>[1,2]</sup>。应用电压源换流器构建的多端直流输电系统能灵活控制潮流, 在电压极性不变下改变潮流方向, 使得电压源换流器非常适合构建多端柔性直流系统<sup>[3,4]</sup>。目前世界上已投运的多端柔性直流输电系统 (voltage source converter based multi-terminal HVDC, VSC-MTDC) 工程有舟山海岛供电工程和南澳接入示范工程<sup>[5-8]</sup>。

VSC-MTDC 中由于换流站的增加, 使站间协调控制变得更加复杂, 如何实现直流换流站之间的协调控制是 VSC-MTDC 是否能稳定运行的关键。VSC-MTDC 稳定运行的条件是系统的电压能保持在允许的运行区间内<sup>[9,10]</sup>。

文献[11-16]提出了适用于 VSC-MTDC 的直流电压斜率控制, 该控制策略不依赖于站间通讯, 能够根据每个换流站设定好的直流功率与直流电压  $P-U$  曲线来分配系统的不平衡功率, 使系统电压达到稳定。文献[17]提出的控制策略结合了直流电压偏差控制和直流电压斜率控制的优点, 但换流站在切换控制方式时将会对系统造成额外的扰动。文献[18]在直流电压斜率控制策略的基础上考虑了换流站的直流功率的调节上限, 提出了一种自适应的斜率控制策略, 合理分配系统的不平衡功率给

各个换流站, 但是这种策略需要频繁地对控制器作出调整, 并且没有考虑系统故障后恢复的工况。

国内外研究设计 VSC-MTDC 的直流电压控制较少都考虑到直流系统运行时的各种状态所需的控制参数。本文以直流电压斜率控制的原理为依据, 考虑了 VSC-MTDC 受扰动和故障时电气量的变化, 基于模糊控制提出一种直流电压变斜率控制策略。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台中搭建 VSC-MTDC 模型, 并与 MATLAB 软件互联进行仿真, 在稳态和故障的情况下测试本文设计的基于模糊控制的直流电压变斜率控制, 仿真结果表明该控制策略与直流电压固定斜率控制相比能加快系统的恢复速度和有效维持系统的稳定运行。

### 1 直流电压斜率控制

以图 1 所示的四端柔性直流输电系统为例, 换流站 1, 2, 3, 4 都采用直流电压斜率控制。

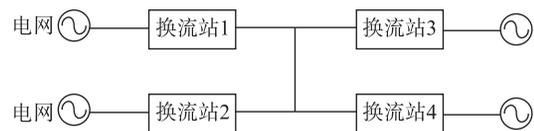


图 1 四端柔性直流输电系统拓扑结构

Fig.1 Four terminal VSC-MTDC topology

直流电压斜率控制器结合了直流功率控制器和直流电压控制器, 其控制框图如图 2 所示。

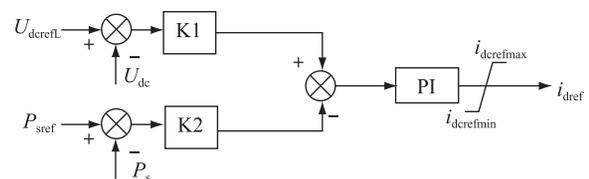


图 2 直流电压斜率控制控制框图

Fig.2 Control block diagram of DC voltage droop control

收稿日期: 2016-11-03; 修回日期: 2016-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(51577071)和广东省自然科学基金(2015 A030313202)

当系统所需要的直流功率发生变化时,换流站会根据设定好的  $P-V$  曲线来寻找满足系统有功需求的平衡点。采用直流电压固定斜率控制明显有缺点,即对于不同的运行工况适应力较差。系统发生故障或者稳定运行受扰动后,其恢复时间会受斜率的影响。当设置的斜率较大,表现为图 3 的  $P-V$  曲线斜率更大,在系统寻找有功需求平衡点时,直流电压的恢复时间会更短,但是在稳态时,有功功率稍有扰动将会导致直流电压波动比较大,容易造成系统的不稳定。而设置的斜率过小会造成故障后电压恢复缓慢,直流功率波动较大的风险。

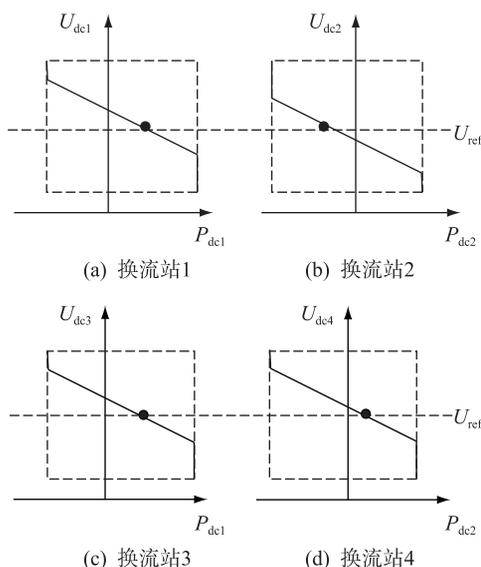


图3 直流电压斜率控制器稳态运行工况

Fig.3 Steady-state operation of DC voltage droop control

直流电压斜率控制设计难点是针对不同的电压水平和电压变化率来确定控制  $P-V$  曲线不同的斜率,以此来维持系统的电压和有功功率水平保持或尽快恢复到允许的区间。确定该控制参数比较困难,已有的经验和理论只能给出大概的参数,并且其抗干扰的能力较差,不能适应不同的运行工况。模糊控制优势在于不需要被控对象有详细、定量的数学模型,正好解决了直流电压斜率控制设计的难点,故将其引入控制策略设计中。本文提出一种基于模糊控制的直流电压变斜率控制方法,其能根据系统的运行工况来调整斜率参数,对系统稳定运行和故障后恢复进行有效调控。

## 2 模糊控制器设计

### 2.1 模糊控制器结构

模糊控制不需要像常规控制器一样建立精确的控制模型,只需要将人们手动控制经验用语言加以描述,构成一系列条件语句,即控制规则,再利用

模糊理论、模糊语言变量和模糊逻辑推理,模拟人的近似推理与决策过程<sup>[19]</sup>。本文设计的直流电压模糊控制策略采用二维控制,因为直流电压斜率控制参数不仅需要直流电压值,还需要直流电压变化率来决定。图 4 为其二维控制器的模型框图。

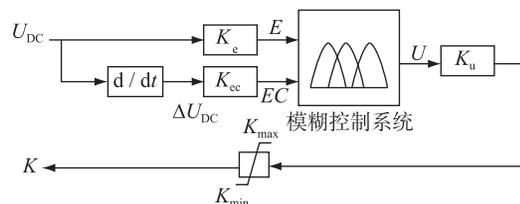


图4 直流电压模糊控制模糊推理过程框图

Fig.4 Control block diagram of DC voltage fuzzy control

在这个模糊控制器中,直流电压  $U_{DC}$  和直流电压变化率  $\Delta U_{DC}$  为输入,输出为各换流站  $P-V$  曲线斜率  $K$ ,  $K_e$  及  $K_{ec}$  为量化因子,  $K_u$  为比例因子,并且防止斜率过大而影响系统的稳定性设置了限幅环节。

### 2.2 模糊控制器参数设计

由于模糊控制器输入的是模糊量,所以必须要对输入进行模糊化。每种运行工况对应的参数不同,因此本文对不同的运行工况分别设置模糊控制器的参数,在实际运行中根据不同的运行工况调用。设输入量在模糊集上的基本论域:

$$E, EC = (-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3) \quad (1)$$

式(1)中:  $E$  为  $U_{DC}$  进行模糊化的输入值;  $EC$  为  $\Delta U_{DC}$  进行模糊化的输入值。

因此输入量  $U_{DC}$  的量化因子:

$$K_e = \frac{2m}{e_H - e_L} \quad (2)$$

式(2)中:  $m$  为输入量  $U_{DC}$  在模糊集上的基本论域的最大值;  $e_H$  为  $U_{DC}$  取值的最大值;  $e_L$  为  $U_{DC}$  取值的最小值。

同理输入量  $\Delta U_{DC}$  的量化因子:

$$K_{ec} = \frac{2m}{ec_H - ec_L} \quad (3)$$

式(3)中:  $m$  为输入量  $\Delta U_{DC}$  在模糊集上的基本论域的最大值;  $ec_H$  为  $\Delta U_{DC}$  取值的最大值;  $ec_L$  为  $U_{DC}$  取值的最小值。

设输出量在模糊集上的基本论域:

$$U = (-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3) \quad (4)$$

式(4)中:  $U$  为输出量  $K$  进行反模糊化的输入值。

因此输出量  $K$  的比例因子:

$$K_u = \frac{u_H - u_L}{2n} \quad (5)$$

式(5)中:  $n$  为输出量  $K$  在模糊集上的基本论域的最大值;  $u_H$  为  $K$  取值的最大值;  $u_L$  为  $K$  取值的最小值。

确定了量化因子和比例因子后,直流电压  $U_{DC}$  和直流电压变化率  $\Delta U_{DC}$  可通过式(6、7)转换为模糊控制器的输入:

$$E = K_e(U_{DC} - \frac{e_H + e_L}{2}) \quad (6)$$

$$EC = K_{ec}(\Delta U_{DC} - \frac{ec_H + ec_L}{2}) \quad (7)$$

模糊控制器的输出可以用式(8)转换为实际的斜率输出值  $K$ :

$$K = K_U U + \frac{u_H + u_L}{2} \quad (8)$$

将输入量和输出量模糊集的基本论域分为7个等级,分别为:“正大(PB)”,“正中(PM)”,“正小(PS)”,“零(ZO)”,“负小(NS)”,“负中(NM)”,“负大(NB)”,并且采取了三角形的隶属函数:

$$u_{A_i}(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}(x-a), & a \leq x \leq b \\ \frac{1}{b-c}(x-c), & b \leq x \leq c \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

根据选取的输入量和输出量在模糊集上的基本论域和式(9)可以得到其各自的隶属函数,由于输入量  $U_{DC}$ ,  $\Delta U_{DC}$  和输出量  $K$  的模糊集上的基本论域是相同的,所以它们的隶属函数相同,如图5所示。

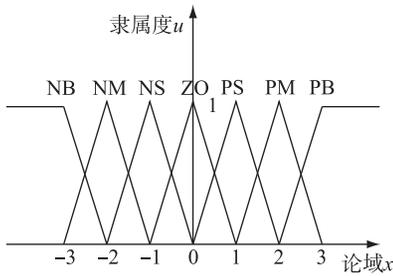


图5  $U_{DC}$ ,  $\Delta U_{DC}$ ,  $K$  的隶属函数

Fig.5 Membership function of  $U_{DC}$ ,  $\Delta U_{DC}$ ,  $K$

模糊推理规则是模糊控制参数设计的核心,需要不断试验修正才能达到理想效果。模糊推理规则修正的基本原则就是在较低电压水平和较大的反向变化率时采用较大的斜率控制,以保证系统能更快地调整直流电压和维持一定的直流有功功率。同理当电压水平较高时和正向变化率较大时,也必须采用较大斜率。当电压水平不断向额定值靠近或者电压变化率绝对值减少时,可以考虑将斜率减少,以减少在稳态的扰动时造成不必要的直流电压震荡和尽快恢复有功功率水平。电压在额定电压附近时,并且变化率绝对值不大时,可以采用较低

的斜率,保证系统的电压稳定。

### 2.3 模糊推理计算和去模糊化

本文采用的是 Mamdani 模糊推理算法<sup>[20]</sup>,去模糊化选择区域重心法(centroid)<sup>[21]</sup>。

#### 2.3.1 Mamdani 模糊推理算法

Mamdani 是最常用的模糊推理算法,其常用的合成规则是“极大—极小”合成规则,对于规则“IF  $X=A$  AND  $Y=B$  THEN  $Z=C$ ”。按照“极大—极小”的规则进行推理,其模糊蕴含关系  $R_i$  可以表示为:

$$R_i = (A_i \times B_i) \rightarrow C_i \quad (10)$$

其隶属函数为:

$$\mu_{R_i} = \mu_{(A_i \text{ and } B_i) \rightarrow C_i}(x, y, z) = [\mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y)] \rightarrow \mu_{C_i}(z) \quad (11)$$

式(10,11)中:“ $\times$ ”为模糊直积运算符;“ $\rightarrow$ ”为模糊蕴含运算符。

所有模糊推理规则的全部模糊蕴含关系为:

$$R = \bigcup_{i=1}^n R_i \quad (12)$$

#### 2.3.2 选择区域重心法

选择区域重心法进行反模糊化就是对通过模糊推理后的输出量中的元素与其相对应的隶属度求加权平均值,四舍五入取整后得到精确的值:

$$U^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{C_i^*}(U_i) U_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{C_i^*}(U_i)} \quad (13)$$

## 3 仿真实验

在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上,根据 Cigre 标准测试模型改造的四端柔性直流输电模型进行仿真验证,如图1所示。各换流站参数设定值如表1所示。仿真采用 MATLAB 的 Fuzzy 工具箱编写模糊控制算法,通过 PSCAD/EMTDC 与 MATLAB 的接口,实现 MATLAB 与 PSCAD/EMTDC 的交互仿真,来验证本文设计的基于模糊控制的直流电压变斜率控制算法。

表1 各换流站参数

Table 1 The parameters of converter station				
系统参数	换流站1	换流站2	换流站3	换流站4
交流电压额定值/kV	230	230	230	230
基波频率/Hz	50	50	50	50
变压器变比	220/380	220/380	220/380	220/380
变压器接线	Y/ $\Delta$	Y/ $\Delta$	Y/ $\Delta$	Y/ $\Delta$
子模块电容/ $\mu$ F	10 000	10 000	10 000	10 000
直流电压参考值/kV	400	400	400	400
有功功率参考值/MW	400	-800	100	300

### 3.1 稳态仿真

在  $t=1.4\text{ s}$  时,使换流站 2 的有功功率输出指令从  $-800\text{ MW}$  减少到  $-400\text{ MW}$ ,观察本文设计控制策略在系统稳态运行时接收到功率阶跃信号后的反应,检验系统的抗干扰能力。系统在稳定运行时,设模糊控制输入量  $U_{\text{DC}}$  的基本论域为  $[0.925\ 1.075]$ ,  $\Delta U_{\text{DC}}$  的基本论域为  $[-0.015\ 0.015]$ , 输出量  $K$  基本论域为  $[17]$ , 根据式(2)、式(3)、式(5)计算得  $K_e=40, K_{ec}=200, K_u=1$ , 模糊规则如表 2 所示。仿真结果如图 6 所示。

表 2 稳态运行模糊控制规则表

Table 2 Fuzzy control rule table for steady state operation

EC/E	在不同 E 和 EC 下的对应输出 U						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PB	PB	PB	NM	NM
NM	PM	PM	PB	PM	PM	NM	NM
NS	ZE	ZE	PB	PS	PS	NS	NS
ZE	ZE	ZE	NS	NB	NS	ZE	ZE
PS	NS	NS	PS	PS	PB	ZE	ZE
PM	NM	NM	PM	PM	PB	PM	PM
PB	NM	NM	PB	PB	PB	PM	PB

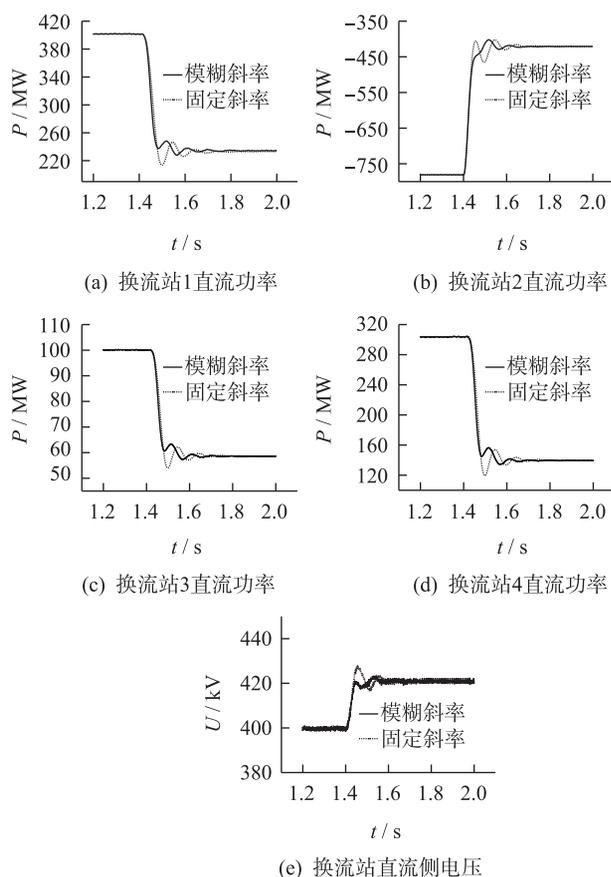


图 6 阶跃响应各换流站直流功率和直流电压波形

Fig.6 The DC power and DC voltage waveform for step response

图 6 设置了模糊电压控制的系统中换流站与设置固定斜率电压控制系统中的换流站对比,模糊电压控制系统直流有功功率输出的跟踪表现良好,恢复曲线较平滑,恢复时间较快。以换流站 1 的直流功率为例,模糊斜率控制的超调量只有 3%,固定斜率控制有 9%。对于直流电压,模糊斜率控制超调量为 0.5%,而固定斜率控制为 3%。说明直流电压模糊控制策略相比于固定斜率控制在直流输电系统受阶跃信号扰动情况下,系统直流侧功率和直流电压恢复特性较好,其稳态运行性能良好。

### 3.2 三相接地故障暂态仿真

在  $t=1.4\text{ s}$  时,在换流站 2 交流侧发生三相短路接地故障,故障持续时间为  $0.5\text{ s}$ ,随后故障自动切除。系统在三相接地故障工况时,设模糊控制输入量  $U_{\text{DC}}$  的基本论域为  $[0.95\ 1.1]$ ,  $\Delta U_{\text{DC}}$  的基本论域为  $[-0.06\ 0.04]$ , 输出量  $K$  基本论域为  $[17]$ , 根据式(2)、式(3)、式(5)计算得  $K_e=40, K_{ec}=60, K_u=1$ , 模糊规则如表 3 所示。仿真结果如图 7 所示。

表 3 三相接地故障模糊控制规则表

Table 3 Fuzzy control rule table for the three-phase line-to-ground fault

EC/E	在不同 E 和 EC 下的对应输出 U						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PS	ZE	PB	PB	NM
NM	PM	PM	ZE	ZE	PM	PB	NM
NS	ZE	ZE	ZE	ZE	NS	PM	NS
ZE	ZE	ZE	NB	PS	NS	ZE	ZE
PS	NS	NS	ZE	PB	NS	PM	PS
PM	NM	NM	PS	PB	PM	PM	PM
PB	NM	NM	PM	PB	PB	PB	PB

由图 7 可知,在  $1.4\text{ s}$  时换流站 2 交流侧发生三相接地故障时,直流电压模糊控制的系统相比于直流电压固定斜率控制的系统在故障未消除时系统的波动相对较小,直流电压的超调量与故障稳态值相比仅超出 1%。且故障消失后的恢复过程中模糊斜率控制的直流电压和直流有功功率恢复曲线更为平滑,不会出现激烈震荡,且恢复时间大大缩短。

### 3.3 换流站故障闭锁暂态仿真

在  $1.4\text{ s}$  时,对换流站 4 进行闭锁操作,换流站 4 的有功功率输出从  $300\text{ MW}$  减少到  $0\text{ MW}$ 。系统在换流器故障闭锁工况时,设模糊控制输入量  $U_{\text{DC}}$  的基本论域为  $[0.951]$ ,  $\Delta U_{\text{DC}}$  的基本论域为  $[-0.02\ 0.02]$ , 输出量  $K$  基本论域为  $[17]$ , 根据式(2)、式(3)、式(5)计算得  $K_e=120, K_{ec}=150, K_u=1$ , 模糊规则如表 4 所示。仿真结果如图 8 所示。

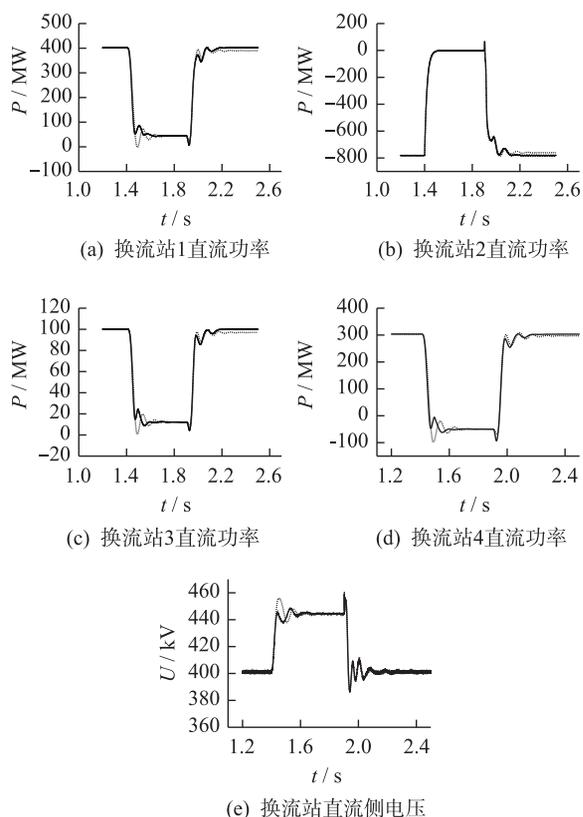


图7 三相接地故障各换流站直流功率和直流电压波形

Fig.7 The DC power and DC voltage waveform for three-phase line-to-ground fault

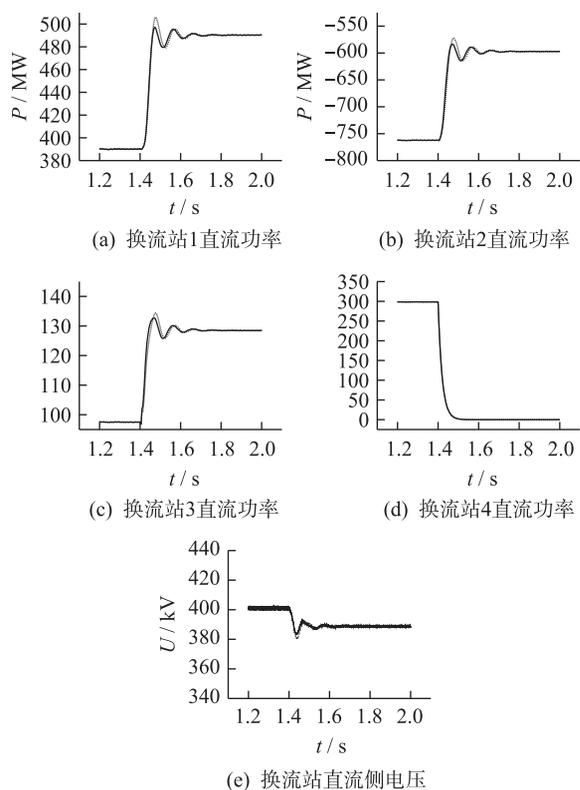


图8 换流站4闭锁后各换流站直流功率和直流电压波形

Fig.8 The DC power and DC voltage waveform for the converter 4 blocking

表4 换流站故障闭锁模糊控制规则表

Table 4 Fuzzy control rule table for the converter blocking

EC/ E	在不同 E 和 EC 下的对应输出 U						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PS	PS	PB	PB
NM	PM	PM	PM	ZE	PM	PB	PB
NS	PS	PS	PS	ZE	PB	ZE	ZE
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	PB	ZE	ZE
PS	PS	PS	PS	ZE	PB	ZE	ZE
PM	PM	PM	PM	ZE	PM	PS	PB
PB	PB	PB	PB	PS	PS	PS	PB

由图8可知,闭锁换流站4后,采用直流电压模糊斜率控制策略的各换流站直流功率的超调量要比固定斜率平均少2%,采用模糊斜率控制的直流电压超调量仅为1%。由此可见,模糊斜率控制能使恢复过程更加平滑,且能有效地加快系统的恢复速度。

#### 4 结语

本文介绍了直流电压斜率控制策略的直流电压控制原理,并且分析了直流电压固定斜率控制的弊端。提出了基于模糊控制的直流电压变斜率控制的控制策略,根据系统有功功率与指令值的差值和有功功率的变化率,通过模糊器、模糊推理、反模糊器后,得到VSC-MTDC所需要的直流电压控制斜率参数。在PSCAD/EMTDC和MATLAB互联的仿真平台进行了仿真验证,仿真结果显示:设计的控制策略具有良好的稳态运行以及暂态运行性能,能有效加速系统在稳态时受扰动后和故障后的恢复速度,并且在恢复时能减少直流有功功率和直流电压的震荡。

#### 参考文献:

[1] 徐政,屠卿瑞,裘鹏. 从2010国际大电网会议看直流输电技术的发展方向[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3070-3077.  
 XU Zheng, TU Qingrui, QIU Peng. New trends in HVDC technology viewed through CIGRE 2010 [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3070-3077.

[2] 张广明, 田炜. 海上风电场VSC-HVDC并网不对称故障负序电流控制[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(6): 7-11.  
 ZHANG Guangming, TIAN Wei. Negative current control of VSC-HVDC for offshore wind farm under grid asymmetrical fault [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(6): 7-11.

[3] 黄曙, 何桦, 卫志农, 等. 基于改进牛顿法的VSC-HVDC潮流计算[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(1): 18-22.  
 HUANG Shu, HE Ye, WEI Zhihong. Power flow calculation of VSC-HVDC based on improved newton method [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(1): 18-22.

- [4] 吴金龙, 刘欣和, 王先为, 等. 多端柔性直流输电系统直流电压混合控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1593-1599.  
WU Jinlong, LIU Xinhe, WANG Xianwei, et al. Research of DC voltage hybrid control strategy for VSC-MTDC system[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1593-1599.
- [5] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.  
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [6] 陈名, 饶宏, 李立涅, 等. 南澳柔性直流输电系统主接线分析[J]. 南方电网技术, 2012, 06(6): 1-5.  
CHEN Ming, RAO Hong, LI Licheng, et al. Analysis on the main wiring of nan'ao VSC-HVDC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2012, 06(6): 1-5.
- [7] 周浩, 沈扬, 李敏, 等. 舟山多端柔性直流输电工程换流站绝缘配合[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 879-890.  
ZHOU Hao, SHEN Yang, LI Min, et al. Research on insulation coordination for converter stations of zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 879-890.
- [8] 吴方劼, 马玉龙, 梅念, 等. 舟山多端柔性直流输电工程主接线方案设计[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2652-2657.  
WU Fangjie, MA Yunlong, MEI Nian, et al. Research on insulation coordination for converter stations of zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2652-2657.
- [9] XU L, YAO L Z. DC voltage control and power dispatch of a multi-terminal HVDC system for integrating large offshore wind farms[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 05(3): 223-233.
- [10] BELLMUNT O G, LIANG J, EKANAYAKE J, et al. Topologies of multiterminal HVDC-VSC transmission for large offshore wind farms[J]. Electric Power System Research, 2011(81): 271-281.
- [11] VASQUEZ J C, GUEERERD J M, LUNA A, et al. Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4088-4096.
- [12] JOHNSON B K, LASSETER R H, ALVARADO F L, et al. Expandable multi-terminal DC systems based on voltage droop[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 08(4): 1926-1932.
- [13] BIANCHI F D, GOMIS-BELLMUNT O. Droop control design for multi-terminal VSC-HVDC grids based on LMI optimization[C]//IEEE Decision and Control and European Control Conference, Orlando, FL. 2011: 4823-4828.
- [14] PRIETO-ARAUJO E, BIANCHI F D, JUNYENT-FERRÉ A, et al. Methodology for droop control dynamic analysis of multi-terminal VSC-HVDC grids for offshore wind farms[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(4): 2476-2485.
- [15] HAILESELASSIE T M, UHLEN K. Impact of DC line voltage drops on power flow of MTDC using droop control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(3): 1441-1449.
- [16] 闫发友, 汤广福, 贺之渊, 等. 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 397-404.  
YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. An improved droop control strategy for MMC-based VSC-MTDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 397-404.
- [17] 唐庚, 徐政, 刘昇, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 125-132.  
TANG Geng, XU Zheng, LIU Sheng, et al. A novel DC voltage control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 125-132.
- [18] 朱瑞可, 王渝红, 李兴源, 等. VSC-MTDC 系统直流电压自适应斜率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015(4): 63-68.  
ZHU Ruike, WANG Yuhong, LI Yingyuan, et al. An adaptive DC voltage droop control strategy for the VSC-MTDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(4): 63-68.
- [19] 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.  
LI Guoyong. Intelligent control and its MATLAB implementation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [20] 陈阳, 王涛, 刘玉航. 二型模糊集下的推理模型及 Mamdani 推理算法[J]. 模糊系统与数学, 2008, 22(3): 41-48.  
CHEN Yang, WANG Tao, LIU Yuhang. Fuzzy reasoning model and mamdani algorithms under type-2 fuzzy sets[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2008, 22(3): 41-48.
- [21] KRISTMUNDSSO G M, CARROLL D P. The effect of AC system frequency spectrum on commutation failure in HVDC inverters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 05(2): 1121-1128.

## 作者简介:



刘志江

刘志江(1992—),男,广东佛山人,硕士研究生,研究方向为柔性直流输电系统;

夏成军(1974—),男,湖北黄冈人,博士,研究方向为电力系统稳定分析与控制、HVDC 与 FACTS;

杜兆斌(1977—),男,广东佛山人,博士,从事电力系统运行与稳定、电网规划研究工作。

(下转第 87 页)

- [16] VAINIO O, OVASKA S J. A class of predictive analog filters for sensor signal processing and control instrumentation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(4): 565-570.
- [17] LUO Pandian, LI Hongbin, LI Zhenhua. Two high accuracy digital integrators for rogowski current transducers[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(1).
- [18] 范洁, 程含渺, 季欣荣, 等. 基于时间数字转换器的数字输出电子式互感器校验系统[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 164-168.  
FAN Jie, CHENG Hanmiao, JI Xinrong, et al. TDC-based calibration system of electronic transformer with digital output[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 164-168.
- [19] CHENG Hanmiao, LI Hongbin. An improved calibration system with phase correction for electronic transformers with digital output[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(8).

作者简介:



程含渺

程含渺(1988—),男,湖北汉川人,博士,从事数字电能计量与设备状态监测技术研究工作;

徐晴(1973—),女,江苏南京人,教授级高级工程师,从事电力计量检测与管理工

程,从事电能表实验室检定研究工作;

穆小星(1963—),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力计量测试及技术研究工作;

陈刚(1985—),男,湖北黄梅人,高级工程师,从事用电信息采集技术研究工作;

田正其(1986—),男,江苏南通人,工程师,从事电能表室内检定技术研究工作;

胡琛(1986—),男,江西南昌人,博士研究生,从事电子式互感器及数字电能计量研究工作。

## A Digital Phase-shift Method for Phase Compensation of Electronic Instrument Transformers

CHENG Hanmiao<sup>1</sup>, XU Qing<sup>1</sup>, JI Feng<sup>1</sup>, MU Xiaoxing<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>, TIAN Zhengqi<sup>1</sup>, HU Chen<sup>2</sup>

(1. State Grid Key Laboratory of Electrical Power Metering (State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute), Nanjing 210019, China; 2. SSEE Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A fixed phase displacement exists when electronic instrument transformers sample analog signals, which affects the measurement accuracy, and needs to be corrected using phase shift method. This paper proposes a digital phase-shift method based on least-square fitting algorithm. The digital phase shifting recurrence formula is deduced, and the performance of phase shifting algorithm is simulated and analyzed. The results show that the method has a relatively high resolution and precision in phase-shifting, furthermore, it can guarantee the amplitude measurement accuracy. The algorithm is applied to the Rogowski coil based electronic instrument transformers, and the feasibility and validity of the algorithm are verified by accuracy comparison test.

**Key words:** electronic instrument transformer; phase displacement; digital phase-shift; least-square fitting

(编辑 徐林菊)

(上接第 26 页)

## Research of DC Voltage Fuzzy Control Strategy for VSC-MTDC Systems

LIU Zhijiang, XIA Chengjun, DU Zhaobin

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** The DC voltage droop control strategy is often used for the voltage source converter based multi-terminal HVDC which power flow is changed frequently. But the existing DC voltage droop control can not meet the requirements of different operating conditions on the droop parameters. This paper presents a DC voltage droop control strategy based on fuzzy control. By using the fuzzy control theory, the conventional DC voltage droop control strategy is converted to the variable droop control which is changed according to operating conditions. Finally, a four terminal VSC-HVDC is built and simulated in PSCAD/EMTDC which is connected with Matlab. The simulation results demonstrate that the DC voltage fuzzy control strategy can maintain the stability of the system and accelerate system's recovery speed effectively.

**Key words:** VSC-HVDC; multi-terminal DC transmission; DC voltage control; DC voltage droop control; fuzzy control

(编辑 徐林菊)