

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181513

# 基于模糊下垂控制的 VSC-HVDC 交直流系统潮流计算方法

徐经民, 徐在德, 童超

(国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

**摘要:** 针对传统下垂控制方式无法根据电压与功率偏差的变化调节下垂控制系数大小的问题, 提出了一种运用模糊推理改变下垂控制系数的方法。在分析 VSC 换流站数学模型与控制策略的基础上, 考虑了 VSC 采用下垂控制策略时交直流节点的控制特性, 基于模糊下垂理论确定了 VSC-HVDC 系统潮流模型的计算流程。并进一步提出了 VSC-HVDC 系统模糊下垂控制改进潮流算法, 实现了对 VSC 直流侧电压与有功功率偏差的调节。最后通过算例验证了所提模糊下垂控制算法能够减小 4~5 倍直流系统迭代过程中的功率与电压偏差, 具备更强的收敛性与可行性。

**关键词:** 电压源换流器; 交直流系统; 潮流计算; 下垂控制; 模糊推理

## Power flow algorithm for VSC-HVDC AC/DC system based on fuzzy droop control

XU Jingmin, XU Zaide, TONG Chao

(State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that traditional droop control method can not adjust the droop control coefficient according to the variation of voltage and power deviation, a method of using fuzzy reasoning to change the droop control coefficient is proposed. On the basis of analyzing the mathematical model and control strategy of VSC converter station, the control characteristics of AC and DC nodes when VSC adopts droop control strategy are considered and the calculation process of power flow model of VSC-HVDC system is determined based on the theory of fuzzy droop. Also, an improved power flow algorithm of fuzzy droop control for VSC-HVDC system is proposed, which adjusts the deviation between DC voltage and active power of VSC. Finally, the numerical example shows that the proposed fuzzy droop control algorithm can reduce the power and voltage deviation in the iterative process of 4~5 times DC system, and has stronger convergence and feasibility.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Short-circuit Current Analysis and Treat Measure Research of Jiangxi Power Grid in the Situation of UHVDC" (No. 521820160018).

**Key words:** voltage source converter; AC/DC network; power flow; droop control; fuzzy inference

## 0 引言

随着高压直流输电技术(HVDC)与脉宽调制控制技术(PWM)的发展, 基于电压源换流器(VSC)的柔性直流输电技术由于具有换相方便、系统谐波小、不需交流系统提供无功补偿等特点, 能够更加灵活有效地控制系统潮流反转, 从而实现供电可靠性的稳步提升<sup>[1]</sup>。

包含 VSC-HVDC 系统的潮流计算方法通常有

联立求解法与交替迭代法两种, 而交替迭代法可以分别建立交流与直流系统的独立潮流模型, 系统迭代次数少, 计算也更为简便<sup>[2-3]</sup>。在潮流计算过程中, 基于 VSC 的交直流系统由于需要在考虑换流站之间功率合理分配的同时满足所有直流侧节点电压的稳定, 通常采用下垂控制的方式来实现系统直流侧节点电压与功率的平衡。

目前传统的下垂控制策略是通过给定下垂控制系数来确定直流电压与功率之间的平衡关系, 但是这种电压与功率间的固定逻辑并不适用于复杂且灵活多变的交直流系统<sup>[4-7]</sup>。针对此类问题, 文献[8-11]结合下垂控制方式的种种优势, 考虑了下垂控制方

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(521820160018)“特高压背景下江西电网短路电流分析及治理措施研究”

式的改进策略,提出了调整 VSC 站动态控制裕度和采取自适应下垂控制策略。文献[12-13]针对包含有风电场并网的多端直流输电系统,提出了适用于该系统的下垂变截距电压控制方式,但是无法对电压偏差较大的换流站进行调节。文献[14-16]提出了一种引入功率影响因子的自适应下垂控制策略,实现了对电压-功率曲线的闭环控制,但是没有充分考虑换流站功率的承载能力。文献[17]通过检测换流站直流电压偏差和功率裕度的方式,来减小传输功率变化造成的直流电压偏差,实现了下垂控制系数的动态调节。

本文提出了一种基于模糊推理调整换流站下垂控制系数的潮流算法,能够在满足直流侧电压与功率平衡的基础上减小系统电压与功率的波动,提高系统的稳定性与 VSC 站的控制能力。同时结合算法求解 IEEE57 节点交直流网络潮流模型,将计算结果与传统下垂控制下潮流求解数据进行比较,验证了该算法实现收敛性好、可行性高。

## 1 VSC 换流站数学模型与控制策略

### 1.1 VSC 数学模型

图 1 为 VSC 换流站的拓扑结构,每个换流站内包含的设备有交流变压器、滤波器、换流桥、直流电容以及直流输电线路,在结构示意图中,换流桥由多个全控型器件 IGBT 或 GTO 构成。直角坐标系下, VSC 站交流侧的数学模型为<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} P_s = \frac{U_s U_c}{X_c} \sin \delta \\ Q_s = U_s (U_s - U_c \cos \delta) / X_c + U_s^2 / X_f \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_s$ 、 $Q_s$  分别为交流系统传输到 VSC 站的有功功率与无功功率;  $\delta$  为交流系统联接节点电压  $U_s$  超前 VSC 站交流侧电压  $U_c$  的角度。换流站交流侧有功与无功功率的数值主要受相位角  $\delta$  影响,当相位角  $\delta > 0$  时,有功功率  $P_s$  从 VSC 站的直流侧流向交流侧,此时的 VSC 站为逆变站,反之则为整流站。

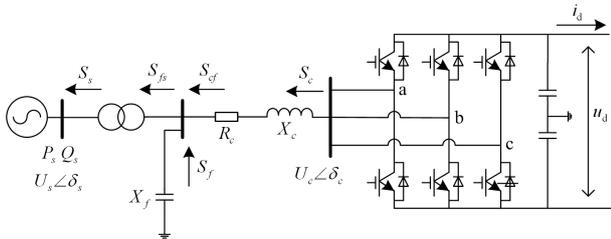


图 1 VSC 站拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of VSC station

### 1.2 VSC 控制策略

在交直流系统中,控制量主要包括 VSC 站交流侧的有功功率和无功功率、交流电压的幅值与相角、换流站的调制比与移相角度以及直流侧的直流电压与电流。每一个 VSC 站都可以任意控制其交流侧电压以及有功和无功功率的输出,但是在实际的系统运行中,至少需要一个 VSC 站来控制直流系统电压的稳定。传统的换流站直流侧电压控制策略包括单点电压控制与电压偏差控制,整个过程中系统内始终只有一个直流电压控制点,因此 VSC 站的调节能力较差。由于下垂控制无需依赖各换流站之间的通信便可控制直流侧电压的大小与功率的输出,故可以用于多端 VSC 构成的交直流网络潮流计算。

下垂控制策略的控制原理如图 2 所示,其中  $\rho$  为下垂控制系数,影响着整个换流站的 P-V 调节能力。当  $\rho$  偏大时, VSC 站有着较好的功率调节能力,但电压的调节能力较差。反之,当  $\rho$  偏小时, VSC 站的电压调节能力较强,功率调节能力较弱,其表达式为<sup>[19]</sup>

$$f = (U_{dc} - U_{dref}) + \rho(P_{dc} - P_{dref}) = 0 \quad (2)$$

式中:  $U_{dref}$  和  $P_{dref}$  分别为换流站潮流初始迭代时直流侧参考节点的电压与有功功率;  $f$  为下垂控制的偏差信号,在 VSC 稳态运行模型下,可以认为偏差信号  $f$  为 0。

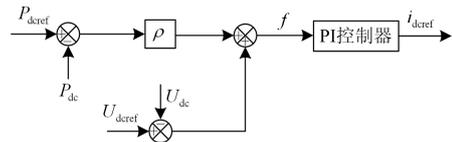


图 2 下垂控制策略原理图

Fig. 2 Schematic diagram of droop control

当多端 VSC 交直流系统中某一下垂控制换流站出现故障时,其余下垂控制 VSC 站会根据直流侧电压的变化来控制功率的平衡。以双端 VSC-HVDC 系统为例,图 3 中 VSC1 作为整流站, VSC2 作为逆变站,共同实现两侧交流系统之间有功功率的交换。对于 VSC1 而言,当其直流侧电压下降(上升)时,其直流侧功率会对应上升(下降);对于 VSC2 而言,当其直流侧电压下降(上升)时,其直流侧功率会对应下降(上升),以此形成一个稳定的直流侧 P-V 平衡体系,如图 4 所示。

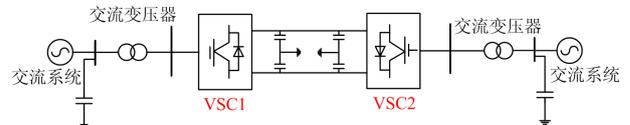


图 3 双端 VSC-HVDC 系统结构图

Fig. 3 Structure of two-terminal VSC-HVDC system

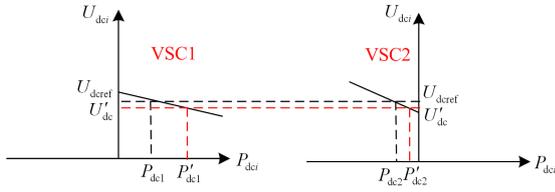


图4 双端 VSC-HVDC 系统下垂控制策略

Fig. 4 Droop control of two-terminal VSC-HVDC

## 2 VSC-HVDC 系统下垂控制潮流计算流程

### 2.1 非下垂控制直流节点的潮流计算

直流网络中的潮流待求量与 VSC 站的控制方式有关, VSC 站为定直流侧电压控制时, 待求的运行变量为直流侧有功功率; 反之 VSC 站为定交流侧功率控制时, 待求量即为直流侧电压。假设直流网络中含有  $n$  个非下垂控制直流节点, 其中第  $i$  个节点为定电压控制, 此时直流网络需要求解的方程为

$$[\Delta P_{dc1}, \Delta P_{dc2}, \Delta P_{dc3}, \dots, \Delta P_{dcn}]^T = J_{DC} \cdot \Delta X \quad (3)$$

式中: 待求量  $\Delta X = [u_{dc1}, \dots, u_{dc(i-1)}, P_{dci}, u_{dc(i+1)}, \dots, u_{dcn}]$ ;

$P_{dci}$  为定电压控制直流节点的待求量, 其迭代初值为其余直流侧节点有功功率之和取负值;  $u_{dci}$  的迭代初值设定为 1.0 p.u.

由于定交流侧功率控制方式下图 1 中  $s$  节点的功率  $S_s(0)$  为已知量, 因此通过简单的潮流计算可以求得各 VSC 直流侧节点有功功率的迭代初值  $P_{dcj}(0)$ , 进而得出待求量  $P_{dci}$  的迭代初值, 计算公式如下。

$$\begin{cases} U_{fj}(0) = U_{sj}(0) + S_{sj}^*(0) \cdot Z_{fj} / U_{sj}^*(0) \\ I_{cj}(0) \approx S_{sj}^*(0) / U_{sj}^*(0) \\ U_{cj}(0) = U_{fj}(0) + S_{sj}^*(0) \cdot Z_{cj} / U_{sj}^*(0) \\ P_{cj}(0) = \frac{U_{cj}(0) \cdot U_{fj}(0) \cdot \sin(\delta_{fj} - \delta_{cj})}{X_{cj}} \\ P_{dcj}(0) = -(P_{cj}(0) + P_{lossj}(0)) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $S_{sj}^*(0)$  和  $U_{sj}^*(0)$  分别表示  $S_{sj}(0)$  和  $U_{sj}(0)$  的共轭数值; 换流桥的有功损耗  $P_{lossj}$  可以通过流经换流桥的电流计算得出, 即

$$\begin{cases} P_{lossj} = -P_{dcj} - P_{c,dcj} \\ P_{lossj}(0) = aI_{cj}(0)^2 + bI_{cj}(0) + c \end{cases} \quad (5)$$

式中: 系数  $a$ 、 $b$  分别为对应和  $I_{cj}$  的损耗系数;  $c$  为固定损耗系数;  $P_{c,dcj}$  为直流节点  $j$  的注入功率。

### 2.2 下垂控制直流节点的潮流计算

假设在整个直流网络中存在  $n_0$  个直流节点, 其

中有  $n_1$  个直流节点采用了下垂控制方式。由于下垂控制 VSC 站的直流侧电压  $u_{dci}$  以及直流侧注入有功功率均为未知数, 因此除下去下垂控制 P-V 方程外还需要建立一个方程, 用于求解两个未知数  $u_{dci}$  与  $P_{dci}$ 。结合直流网络的节点电压方程, 可以得出有功功率的偏差方程, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} \Delta d_{i1} = (U_{dci} - U_{dcrefi}) + \rho_i (P_{dci} - P_{dcrefi}) \\ \Delta d_{i2} = P_{dcis} - \sum_{j=1}^{n_0} Y_{ij} U_{dci} U_{dcj} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $P_{dcis}$  表示直流节点  $i$  给定的有功功率。

通过 Newton-Raphson 法求解由  $\Delta d_{i1}$  和  $\Delta d_{i2}$  构成的非线性方程组, 并略去泰勒级数中的二次及更高次项, 展开后可以得到下垂控制直流节点的修正方程矩阵表达式为

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta d_{i1} \\ \Delta d_{i2} \\ \vdots \end{bmatrix} = -J \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta U_{dci} \\ \Delta P_{dci} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, n_1) \quad (7)$$

算法迭代过程中, 采用下垂控制的直流节点, 其直流侧有功功率与电压的迭代初值与系统参考运行点的变量数值保持一致, 对于不采用下垂控制方式的直流节点而言, 其潮流计算中  $P_{dci}$  与  $U_{dci}$  的迭代初值需要从采用下垂控制的 VSC 站中获取, 即将下垂控制直流节点中潮流迭代完成后的  $P_{dci}$  与  $U_{dci}$  作为其潮流计算的初值。下垂控制直流节点  $P_{dci}$  与  $U_{dci}$  的计算详细流程如图 5 所示。

### 2.3 交流系统的潮流计算

在含 VSC-HVDC 系统的交直流潮流计算, 需要将 VSC 站直流侧节点注入功率的计算值代入交流系统, 因此待直流网络迭代收敛并求得直流网络有功功率  $P_{dc}$  后, 依据式(5)即可求得直流侧节点注入功率  $P_{c,dc}$  和换流桥  $P_{loss}$  的大小, 依次类推进行逆向求解, 即可求得图 1 中 VSC 站交流侧  $s$ 、 $f$ 、 $c$  节点的电压幅值、相角和功率的数值, 并作为交流系统迭代的初值进行潮流计算。交流系统的潮流计算采用 Matlab 的加载库 Matpower 来实现, 详细计算方法在此不再赘述。

## 3 基于模糊推理的下垂控制系数修改策略

由于下垂控制系数  $\rho$  的取值直接影响着整个系统功率和电压之间的平衡, 故在设计下垂控制系数时, 需在满足系统功率波动较小的同时保证系统电压质量的稳定。在此引入模糊控制理论, 运用模糊推理逻辑结合系统功率与直流侧电压差值的变化

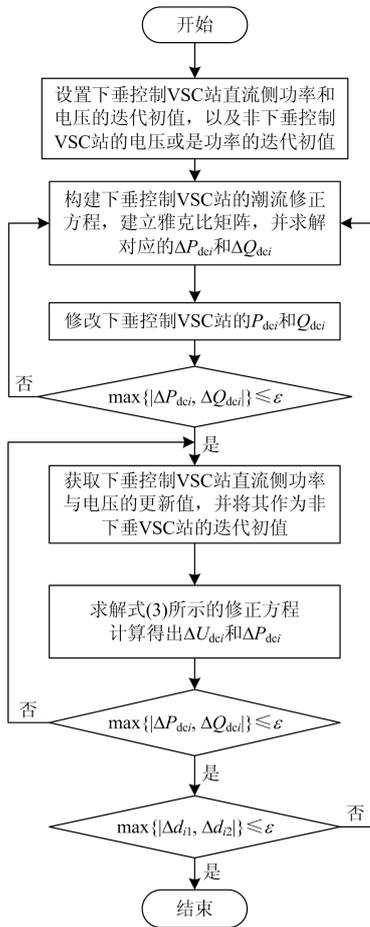


图 5 直流侧下垂控制节点潮流计算流程图

Fig. 5 Flow chart of power flow calculation for droop control DC node

调节下垂控制系数  $\rho$  的大小, 同时满足直流侧功率与电压的数值平衡。

图 6 为引入模糊推理的下垂控制原理图, 在整个控制器中输入的信号为直流侧电压的偏差值 ( $U_{dc} - U_{dref}$ ) 和换流站有功功率的偏差值 ( $P_{dref} - P_{dc}$ ), 输出信号为下垂控制系数  $\rho$ , FIS 模糊推理系统通过对输入信号按照模糊规则进行模糊推理, 得到对应 PI 参数  $K_v$  和  $K_p$  的值, 然后利用模糊规则对 PI 参数进行实时整定, 并使实际下垂控制系数  $\rho$  的数值追踪到设定值。

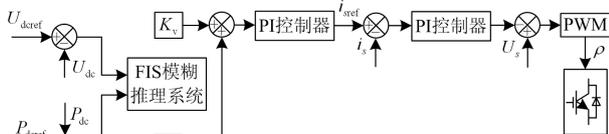


图 6 模糊下垂控制原理图

Fig. 6 Schematic diagram of fuzzy droop control

在模糊推理下垂控制器中, 输入信号的模糊化采用三角形隶属度函数曲线与 Z 形隶属度函数曲线来表示<sup>[20]</sup>, 如图 7 所示。不同的模糊推理规则会直接影响到下垂控制系数  $\rho$  的调整结果, 综合分析 VSC 换流站直流侧电压与功率的调节特性, 可以将 VSC-HVDC 系统潮流模型的下垂控制系数修改策略总结为: 当直流电压偏差较大且功率偏差较小时, 降低 VSC 站的下垂控制系数; 当功率偏差较大时, 增大 VSC 站的下垂控制系数。依据此修改策略可以得出模糊推理规则如表 1 所示。

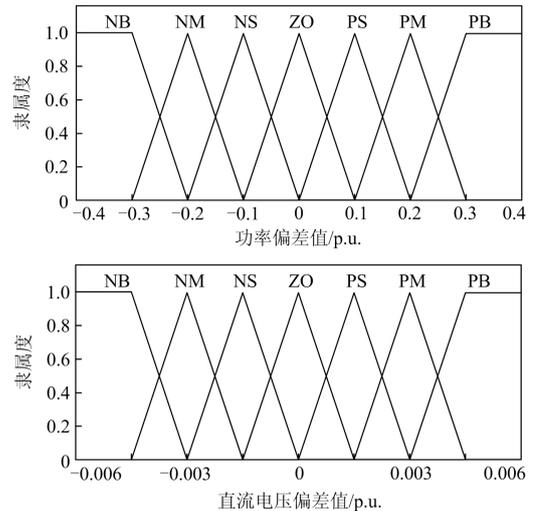


图 7 输入信号隶属函数与模糊化

Fig. 7 Fuzzy membership function of input signal

表 1 下垂控制系数取值的模糊规则

Table 1 Fuzzy rules for droop control coefficient

$\rho$	换流站有功功率偏差						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
直	NB	NB	NB	NB	ZO	ZO	ZO
流	NM	NM	NM	NM	ZO	ZO	ZO
侧	NS	NS	NS	NS	ZO	ZO	ZO
电	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
压	PS	ZO	ZO	NS	ZO	ZO	ZO
偏	PM	ZO	ZO	NM	NS	ZO	ZO
差	PB	ZO	ZO	NB	NM	NS	ZO

以功率偏差取负大(NB), 电压偏差也取负大(NB)为例, 此时换流站的有功功率大于参考值, 且直流侧电压小于参考值。为了防止换流站直流侧电压进一步下降, 下垂控制需减少换流站逆变方向上吸收的功率, 因此需要较大地降低下垂控制系数以保证直流侧电压调节稳定, 故  $\rho$  取负大(NB), 依此可以得出, 下垂控制系数  $\rho$  的模糊推理结果如图 8 所示。

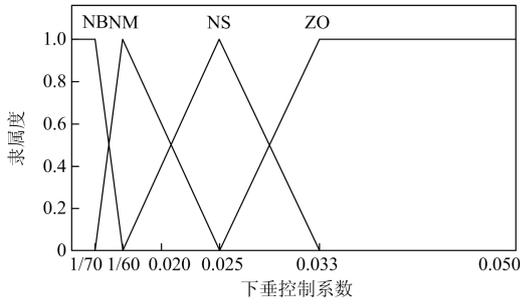


图 8 下垂控制系数隶属函数与模糊化

Fig. 8 Fuzzy membership function of droop control coefficient

### 4 算例分析

为验证基于模糊下垂控制的 VSC-HVDC 交直流系统潮流算法的正确性与适用性，在文献[21] IEEE57 节点稳态潮流模型的基础上，引入一个含 7 端 VSC 的交直流系统，各 VSC 站分别与原系统中 1、12、13、15、16 号交流节点相连，如图 9 所示。对修改后的系统进行 Matlab 仿真模糊下垂控制潮流计算，交直流系统容量的基准值统一设置为 100 MVA，直流网络的基准电压值为 200 kV。所添加的换流站的控制方式及各已知变量的参考值如表 2 所示，换流站内交流变压器阻抗大小以及换流站损耗系数的设定如表 3 所示，IEEE57 节点系统如图 10 所示。

VSC1 和 VSC2 采用下垂控制方式，其下垂控制系数由模糊逻辑推理得出，其余 4 个功率站根据交流侧所接交流节点类型的不同控制着交流功率与电压的稳定。在潮流计算过程中设置下垂控制换流站 VSC1 和 VSC2 的待求量  $[\Delta U_{dc1}, \Delta P_{dc1}, \Delta U_{dc2}, \Delta P_{dc2}]^T$  与交直流网络运行变量的收敛精度均为  $10^{-5}$ 。最终在下垂控制 VSC 站经过 95 次潮流迭代，

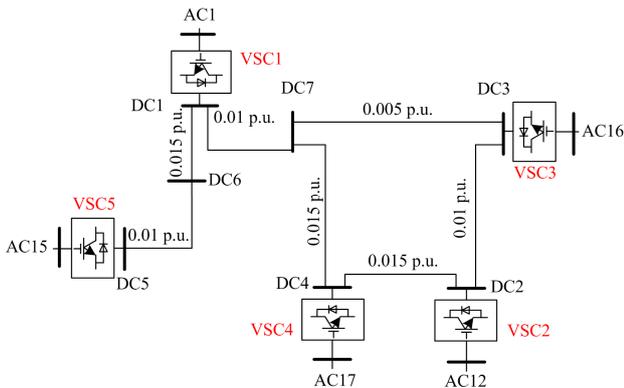


图 9 修改后含 7 端 VSC 的 IEEE57 节点交直流系统

Fig. 9 Modified IEEE57 node AC/DC system

with 7 terminal VSC station

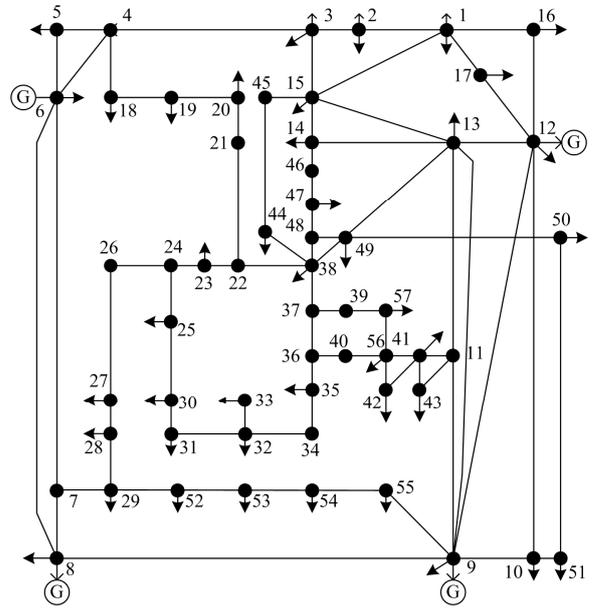


图 10 IEEE57 节点系统

Fig. 10 IEEE57 node system

表 2 换流站的控制类型及变量参考数值

Table 2 Control types and variable reference values of converter stations

换流站	控制变量	交流节点等效	已知变量参考数值	
VSC1	$\rho$	PQ	$u_{dref}=0.995$	$P_{dref}=0.355$
VSC2	$\rho$	PQ	$u_{dref}=1.005$	$P_{dref}=0.98$
VSC3	$P_s, Q_s$	PQ	$P_{sref}=0.4$	$Q_{sref}=0.1$
VSC4	$P_s, U_s$	PV	$P_{sref}=0.6$	$U_{sref}=1.07$
VSC5	$P_s, U_s$	PV	$P_{sref}=0.5$	$U_{sref}=0.99$

表 3 换流站各元件阻抗参数及损耗系数

Table 3 Impedance parameters and loss factor of VSC

换流站	换相电抗器	变压器	损耗系数
	$X_c/p.u.$	等效阻抗 $Z/p.u.$	
VSC1	0.05	$0.001+j0.033$	1,4,12
VSC2	0.15	$0.0015+j0.05$	1,4,8
VSC3	0.15	$0.003+j0.1$	6,12,12
VSC4	0.15	$0.003+j0.1$	2,4,4
VSC5	0.075	$0.003+j0.1$	1,4,8

非下垂控制 VSC 站经过 54 次潮流迭代以及交直流交替迭代 3 次后，整个交直流系统达到收敛条件，总耗时 0.994 66 s，模糊下垂 VSC 站直流侧有功功率/电压的变化曲线如图 11 和图 12 所示。

从图 11 和图 12 的直流侧有功功率/电压变化曲线可以看出，VSC1 直流侧系统在第 19 次潮流迭代后有功率的偏差值大于其额定偏差数值，此时通

过模糊逻辑对下垂控制系数进行及时的矫正, 在保证直流侧电压偏差稳定的情况下, 按照模糊理论有效地降低了直流侧有功功率偏差, 最终在第 37 次潮流迭代之后 VSC1 的有功功率与电压偏差保持稳定; VSC2 直流侧系统在第 25 次潮流迭代后有有功功率偏差同样出现了明显波动, 经过模糊理论调整下垂控制系数之后, 其 P-V 控制特性重新回到了稳定运行状态。

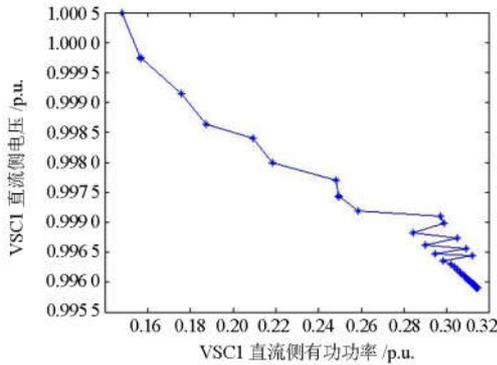


图 11 VSC1 有功功率/电压变化曲线

Fig. 11 Active power/voltage curve of VSC1

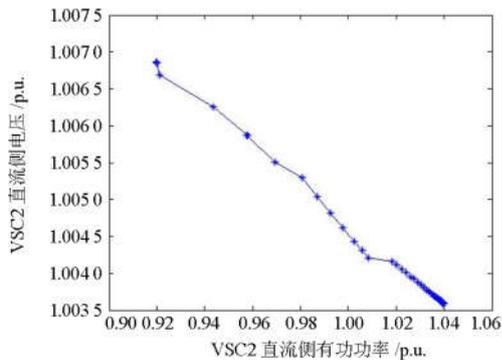


图 12 VSC2 有功功率/电压变化曲线

Fig. 12 Active power/voltage curve of VSC2

采用传统的下垂控制策略, 将 VSC1 和 VSC2 的潮流计算结果与模糊下垂控制进行对比。算法收敛后 VSC1 和 VSC2 直流侧变量的偏差值变化曲线如图 13—图 16 所示, 可以看出在传统下垂控制方式下, 下垂控制 VSC 站经过 105 次潮流迭代后达到收敛条件, 总耗时 2.529 81 s, 相比模糊下垂控制策略其耗时时间更长, 且在潮流计算过程中直流侧变量的偏差值约为模糊下垂控制的 4~5 倍。故采用模糊下垂控制策略可以在提高算法收敛速度的同时有效地改善换流站 P-V 的调节能力。

整个模糊下垂控制潮流计算过程中交流系统的电压幅值、相角和功率均在合理范围内, 其中各直

流母线之间的功率传递情况如图 17 所示。潮流迭代完成后各 VSC 站交直流两侧运行变量与控制变量数值如表 4 所示, 各参数均满足系统要求, 充分验证了本文提出的模糊下垂控制潮流算法的可行性与准确性。

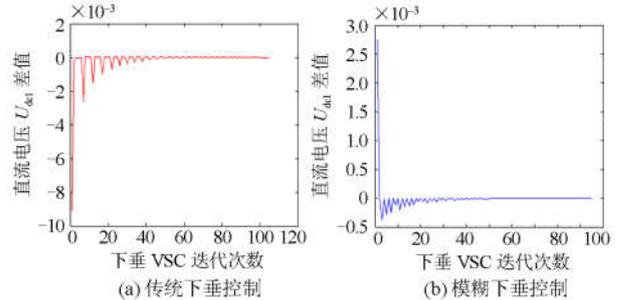


图 13 VSC1 直流侧电压偏差值变化曲线

Fig. 13 Voltage deviation on DC side of VSC1

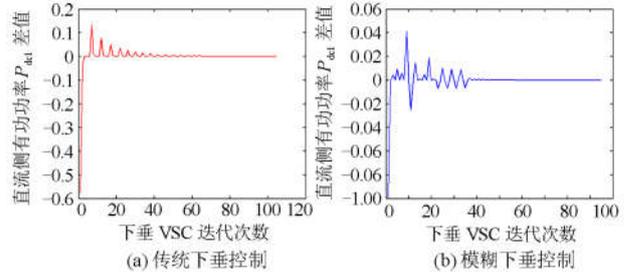


图 14 VSC1 直流侧有功功率偏差值变化曲线

Fig. 14 Active power deviation on DC side of VSC1

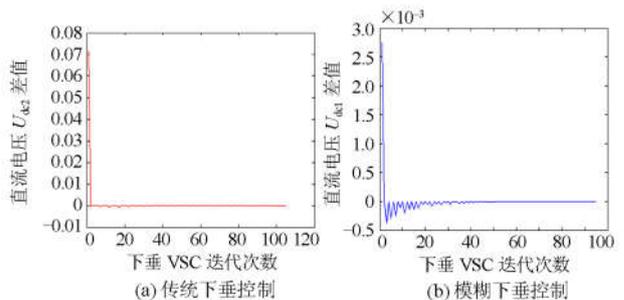


图 15 VSC2 直流侧电压偏差值变化曲线

Fig. 15 Voltage deviation on DC side of VSC2

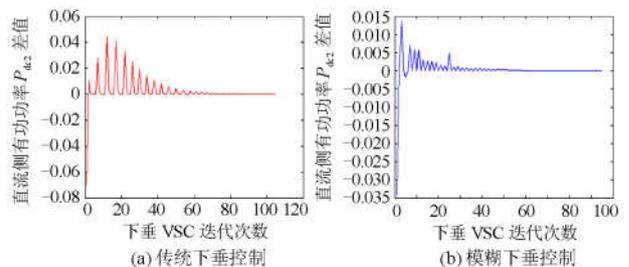


图 16 VSC2 直流侧有功功率偏差值变化曲线

Fig. 16 Active power deviation on DC side of VSC2

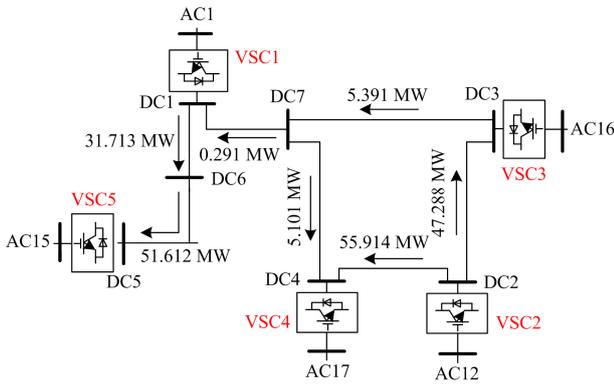


图 17 各 VSC 站及直流母线之间功率的传递情况  
Fig. 17 Transmission of power between VSC stations and DC buses

表 4 各 VSC 站控制变量及交直流侧运行变量的数值  
Table 4 Control types and AC/DC variable reference values of VSC stations

参数	VSC1	VSC2	VSC3	VSC4	VSC5
$U_s/p.u.$	1.040	1.015	1.027 8	1.07	0.99
$\delta/deg$	0	-0.040	-1.809 1	-2.710 9	-2.061 4
$P_s/p.u.$	0.330 4	1.054 9	0.4	0.6	0.5
$P_{dc}/p.u.$	0.314 2	1.040 1	-0.418 9	-0.610 1	-0.512 1
$u_{dc}/p.u.$	0.995 9	1.003 6	0.996 5	0.995 2	0.984 9

## 5 结论

本文在考虑 VSC 传统下垂控制方式的基础上, 采用了模糊下垂控制策略来调整 VSC 站的下垂控制系数。不仅能够减小 VSC 站有功功率波动造成的直流电压偏差, 提高 VSC 站稳定运行特性, 同时不会影响到其他控制方式下 VSC 站交直流变量的控制能力。通过对修改后含 7 端 VSC 的 IEEE57 节点系统算例进行仿真计算, 结果验证了模糊下垂控制潮流算法能够适用于不同的 VSC 站控制方式, 且具备更强的收敛性, 同时能让系统更快降低电压、有功功率偏移从而恢复至额定运行区域内, 有利于提高系统运行的稳定性。

### 参考文献

[1] 汤广福, 罗湘, 魏晓光, 等. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.  
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang, et al. Multi-terminal HVDC transmission and HVDC grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.

[2] 王博, 路俊海, 郭小江, 等. 多 VSC 型换流器电力系统潮流计算方法研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2344-2349.

WANG Bo, LU Junhai, GUO Xiaojiang, et al. Load flow analysis for power system with multi-VSC based converter[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2344-2349.

[3] 陈域, 郝全睿, 张静. 含 VSC-HVDC 的交直流混合网络的动态潮流计算方法[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2892-2899.

CHEN Yu, HAO Quanrui, ZHANG Jing. Dynamic flow algorithm for hybrid AC/DC networks with VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2892-2899.

[4] 阎发友, 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.

[5] 王振浩, 由作宇, 黄亚磊, 等. 基于连续潮流法的含双端 VSC-HVDC 交直流系统负荷裕度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 9-15.

WANG Zhenhao, YOU Zuoyu, HUANG Yalei, et al. Load margin analysis of hybrid AC/DC system with two terminal VSC-HVDC using continuous power flow method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 9-15.

[6] CHAUDHURI N R, CHAUDHURI B. Adaptive droop control for effective power sharing in multi-terminal DC (MTDC) grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 21-29.

[7] DIERCKXSENS C, SRIVASTAVA K, REZA M, et al. A distributed DC voltage control method for VSC MTDC systems[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 82(1): 54-58.

[8] 刘瑜超, 武健, 刘怀远, 等. 基于自适应下垂调节的 VSC-MTDC 功率协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 40-48.

LIU Yuchao, WU Jian, LIU Huaiyuan, et al. Effective power sharing based on adaptive droop control method in VSC multi-terminal DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 40-48.

[9] 于小艳, 李国宁. 基于 VSC-HVDC 并网的光伏电站启动控制及优化方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 55-62.

YU Xiaoyan, LI Guoning. Research on starting control and optimization method of PV power station based on VSC-HVDC grid connection[J]. Power System Protection

- and Control, 2018, 46(21): 55-62.
- [10] LI Xiaoqian, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Protection of nonpermanent faults on DC overhead lines in MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 483-490.
- [11] 张海波, 袁志昌, 赵宇明, 等. VSC-MTDC 系统变截距直流电压下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 60-64.  
ZHANG Haibo, YUAN Zhichang, ZHAO Yuming, et al. Variable intercept DC-voltage droop control for VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 60-64.
- [12] 杨伟, 章慧芸, 仲海波. 基于模糊神经网络的 VSC-HVDC 系统控制器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 115-120.  
YANG Wei, ZHANG Huiyun, ZHONG Haibo. Research on controller of VSC-HVDC system based on fuzzy neural network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 115-120.
- [13] 陈实, 朱瑞可, 李兴源, 等. 基于 VSC-MTDC 的风电场并网控制策略研究[J]. 工程科学与技术, 2014, 46(2): 147-152.  
CHEN Shi, ZHU Ruike, LI Xingyuan, et al. Research on control strategy for interconnection of wind farms by VSC-MTDC[J]. Advanced Engineering Sciences, 2014, 46(2): 147-152.
- [14] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 多端柔性直流输电系统直流电压自适应下垂控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2588-2599.  
LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2588-2599.
- [15] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [16] ABDEL-KHALIK A S, MASSOUD A M, ELSER-OUGI A A, et al. Optimum power transmission-based droop control design for multi-terminal HVDC of offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3401-3409.
- [17] 徐进, 金逸, 胡从川, 等. 适用于海上风电并网的多端柔性直流系统自适应下垂控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 78-85.  
XU Jin, JIN Yi, HU Congchuan, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal HVDC systems for offshore wind farms integration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 78-85.
- [18] BARADAR M, GHANDHARI M. A multi-option unified power flow approach for hybrid AC/DC grids incorporating multi-terminal VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2376-2383.
- [19] 柴润泽, 张保会, 薄志谦. 含电压源型换流器直流电网的交直流网络潮流交替迭代方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 7-13.  
CHAI Runze, ZHANG Baohui, BO Zhiqian. Alternating iterative power flow algorithm for hybrid AC/DC networks containing DC grid based on voltage source converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 7-13.
- [20] 苏海滨, 王光政, 王继东. 基于模糊逻辑双环控制的光伏发电系统最大功率跟踪算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 215-218.  
SU Haibin, WANG Guangzheng, WANG Jidong. The maximum power point tracking algorithm for photovoltaic power system based on fuzzy logic double loop control[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 215-218.
- [21] AKHMATOV V, CALLAVIK M, FRANCK C M, et al. Technical guidelines and pre-standardization work for first HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 327-335.

收稿日期: 2018-12-04; 修回日期: 2019-07-03

作者简介:

徐经民(1994—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统经济运行及配电自动化技术; E-mail: 550483499@qq.com

徐在德(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源并网控制技术。E-mail: 357785024@qq.com

(编辑 许威)