

含 VSC-MTDC 的交直流系统潮流算法

周涛, 陈中*, 戴中坚, 孙可慧, 刘艺

(东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096)

An AC/DC System Power Flow Algorithm With VSC-MTDC

ZHOU Tao, CHEN Zhong*, DAI Zhongjian, SUN Kehui, LIU Yi

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Voltage source converter based multi-terminal direct current system (VSC-MTDC), which develops from two-terminal DC transmission system, has a high reliability and is appropriate for offshore wind power grid connection. The control strategies of VSC-MTDC are multifarious and corresponding power flow models are more complicated. This paper studied the steady-state model of VSC station and MTDC and deduces the power flow model of MTDC which is appropriate for different DC topologies and connection types. Then control strategies of VSC-MTDC and their differences of power models were analyzed. On this basis, an AC/DC power flow algorithm with VSC-MTDC was proposed, which contains the advantages of the unified iterative method and alternating iterative method and can be applied to different DC topologies and AC systems. In addition, the calculation method of initial values and boundary conditions were given in this paper. Finally, the validity and convergence of the algorithm were demonstrated in two practical cases. The results indicate that the algorithm can converge steadily and rapidly under different control modes, scenes and DC topologies.

KEY WORDS: VSC-MTDC; AC/DC system; power flow calculation; master-slave control; DC voltage droop control

摘要: 多端柔性直流输电系统(voltage source converter based multi-terminal direct current system, VSC-MTDC)是在两端直流输电基础上发展而来的直流输电系统,可靠性高、适用于海上风电并网等场景,相应的控制策略更加多样,其潮流模型也更加复杂。该文分析 VSC 换流站和 MTDC 的稳态模型,研究可适用于 VSC-MTDC 的不同拓扑和连接方式的潮流模型;研究多端直流各种控制策略潮流计算模型的不同点并推导出其方程。在此基础上,提出一种兼具统一迭代法和交替迭代法优点的含 VSC-MTDC 交直流系统潮流算法,给出初值和边界条件求解方法,对于不同直流拓扑和交流系统都

能够进行求解。最后通过 2 个实际算例验证该文潮流模型的有效性和收敛性,对于不同控制方式、不同运行场景和直流拓扑都能够迅速、稳定收敛。

关键词: 多端柔性直流输电; 交直流系统; 潮流计算; 主从控制; 直流电压下垂控制

0 引言

随着海上风电、光伏等可再生能源的快速发展,大规模可再生能源并网问题成为研究热点^[1-2]。基于电压源型换流器(voltage source converter, VSC)的柔性直流输电系统是解决大规模可再生能源接入电网的关键技术之一^[3-4]。多端柔性直流输电系统是由 3 个及以上 VSC 换流站通过串联、并联或混联方式连接起来的直流输电系统。与传统的两端直流输电系统相比,多端直流输电系统(multi-terminal direct current system, MTDC)能够通过协调控制各个换流站之间的功率,具有更高的灵活性和可靠性,更适用于海上风电并网、城市供电和交流系统非同步互联等场景^[5-6]。

交直流系统的潮流计算是研究交直流系统机理的基础。已有的交直流系统的潮流计算方法有两种:统一迭代法和交替迭代法。统一迭代法具有良好的收敛特性,对不同结构、参数的系统都能得到可靠的结果^[7]。文献[8]提出增广直角坐标下的交直流潮流统一迭代模型,使得雅克比矩阵非常稀疏,采用牛顿法进行统一求解提高计算效率。交替迭代法由于其灵活性好、效率高和对现有交流潮流算法的良好继承性,得到较多的应用。文献[9-10]在 VSC 稳态模型的基础上,推出 VSC-HVDC 适用于牛顿法潮流计算的数学模型,提出一种 VSC-HVDC 的系统潮流交替算法。文献[11]分析在计算基于柔性直流输电的风电场并网时,传统混合潮流计算

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900600); 国家电网公司科技项目(52094017000W)。

National Key R&D Program of China (2016YFB0900600); Science and Technology Projects of State Grid Corporation (52094017000W)。

方法存在的问题，并提出了一种含 VSC 的交直流系统的潮流解耦算法。然而，交替迭代法仅具有一阶收敛性质，对于弱交流系统易出现迭代次数明显增加甚至不收敛的现象^[12]。

MTDC 的各换流站间需要通过协调控制来实现系统的功率平衡，相应的控制策略更为复杂。目前 VSC-MTDC 的控制策略主要分为主从控制和直流电压下垂控制及其改进算法 2 类^[13]，现有文献主要针对主从控制的潮流模型展开研究。文献[14]研究不同控制方式直流电网的控制原理，推导功率特性(V-P)直流电压下垂控制方式的潮流求解模型。随着 MTDC 技术的发展，其结构愈加复杂，传统的两端直流系统潮流模型已不再适用，对于已出现和未来可能出现的多端直流系统和放射式并联、环网式并联等新的直流拓扑和连接方式^[6]，无法进行潮流求解。

本文首先介绍 VSC 换流站的稳态模型和多端直流网络模型，指出多端直流输电系统中可能存在的直流公共连接点(direct current point of common coupling, DC-PCC)的情况，并将其加入到潮流模型中；其次，研究 MTDC 不同的控制策略及原理，推导多端直流的各种控制策略潮流计算模型的不同潮流方程。在此基础上，提出含 VSC-MTDC 的交直流系统潮流算法，可以求解不同直流拓扑形式和交直流连接方式的潮流问题。对于区域电网通过 VSC-MTDC 互联、海上风电并网和直流系统内嵌于交流电网等情况，能够保持算法的收敛性和效率性，不受交流系统强弱的影响。

1 VSC-MTDC 稳态模型

1.1 VSC 换流站稳态模型

目前，柔性直流输电工程中采用的 VSC 换流站主要有 3 种：两电平换流器、二极管钳位型三电平换流器和模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)^[15]。本文以两电平换流器为例进行说明，直流侧采用双极接线。VSC 换流站由换流桥、换流电抗器、直流电容器和交流滤波器组成，通过公共连接点(PCC)接入交流系统。本文基于文献[9]建立 VSC 的稳态和基础潮流模型(式(1)一(9))，稳态运行时可忽略电压电流中的谐波分量，仅考虑基本分量，其等效稳态模型如图 1 所示。

图中， \dot{U}_s 为 VSC 相连的交流母线电压基波相量， $\dot{U}_c = U_c \angle \delta_c$ ； \dot{U}_c 为换流桥输出线电压基波相量， $\dot{U}_c = U_c \angle \delta_c$ ； δ 为 \dot{U}_c 滞后 \dot{U}_s 的角度， X_1 和 X_c 分别

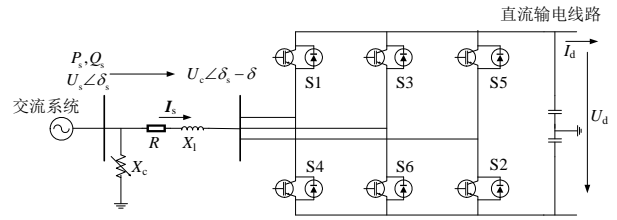


图 1 VSC 换流站稳态模型

Fig. 1 Steady-state model of VSC station

为换流电抗器和交流滤波器的基波电抗。 R 为计及交流侧传输电阻和换流损耗的等效电阻，两电平和三电平换流器的额定运行损耗一般在 3% 左右，MMC 换流站则约为 1%^[14]。 U_d 、 I_d 为 VSC 直流侧电压和电流，VSC 换流站通过直流线路和其它换流站相连，进行功率传输。根据 PWM 调制原理，换流站交流侧和直流侧电压有如下关系：

$$U_c = \mu M U_d / \sqrt{2} \quad (1)$$

式中： μ 和 M 为 PWM 相关参数； μ 为直流电压利用率； M 为 PWM 的调制度($0 \leq M \leq 1$)即正弦调制峰值与三角载波幅值的比值。可以得到

$$\dot{U}_c = (\mu M U_d / \sqrt{2}) \angle (\delta_s - \delta) \quad (2)$$

令 $Y = 1 / \sqrt{R^2 + X_1^2}$ ， $\alpha = \arctan(R / X_1)$ ，按照图 1 中所示的物理量参考方向，可得到 VSC 换流站与交流系统之间传输的有功和无功功率分别为：

$$P_s = U_s Y (U_s \sin \alpha + U_c \sin(\delta - \alpha)) \quad (3)$$

$$Q_s = U_s Y [U_s \cos \alpha - U_c \cos(\delta - \alpha)] + U_s^2 / X_c \quad (4)$$

1.2 多端直流网络模型

MTDC 是由 3 个及以上的换流站，通过串联、并联或混联方式连接起来的输电系统，能够实现多电源供电和多落点受电。MTDC 的拓扑复杂多样，如串联、混联、放射式和环网式等，可能会出现直流公共连接点。DC-PCC 的节点注入电流为 0，节点电压需要通过潮流计算得到。假设直流线路中存在 N_{VSC} 个 VSC 换流站和 N_{DC-PCC} 个 DC-PCC，此直流电网的直流节点个数 $N_d = N_{VSC} + N_{DC-PCC}$ 。通过直流导纳阵形成直流网络方程，如式(5)所示。

$$\mathbf{I}_{dc} = \mathbf{Y}_{dc} \mathbf{U}_{dc} \quad (5)$$

式中： N_d 为向量和矩阵的维数； $\mathbf{I}_{dc} = [I_{d1}, I_{d2}, \dots, I_{N_{VSC}}, 0, \dots, 0]^T$ ，为直流节点注入电流相量； $\mathbf{U}_{dc} = [U_{d1}, \dots, U_{DC-PCC1}, \dots]^T$ ，为直流节点电压向量； \mathbf{Y}_{dc} 为直流线路的导纳阵，由于直网络为纯电阻线性网络； \mathbf{Y}_{dc} 本质为电导矩阵。

1.3 MTDC 控制方式

MTDC 的稳定运行需要多个换流站之间进行

协调控制来实现直流系统的功率平衡和直流电压稳定。目前，多端柔性直流输电系统的控制方式有主从控制(master-slave control)、电压裕度控制(voltage margin control)、直流电压下垂控制(DC voltage droop control)等。主从控制设定一个主换流站作为定直流电压节点来实现直流网络的功率平衡，其它换流站设定为定交流有功功率控制^[16]。对 VSC 换流站还需进行无功功率的控制，包括定交流无功功率 Q_s 和交流电压幅值 U_s 。那么，主从控制中存在 4 种节点类型，其详细控制方式和交流节点类型见 表 1。电压裕度控制是主从控制的一种扩展，相当于一种改进的具有多个可选择功率平衡节点的定直流电压控制，对于某个稳态，其潮流模型与主从控制相同。

表 1 主从控制换流站控制方式及节点类型

Tab. 1 Control modes and bus types of VSC stations of master-slave control

节点类型	有功功率控制类	无功功率控制类	交流节点潮流类型	分类
1	定直流电压	定交流无功功率	PQ 节点	主站点
2	定直流电压	定交流电压幅值	PV 节点	
3	定交流有功功率	定交流无功功率	PQ 节点	从站点
4	定交流有功功率	定交流电压幅值	PV 节点	

电压下垂控制的基本思想是基于电压下垂特性，各个下垂控制的换流站共同承担功率平衡，系统剩余部分通过调整各个换流站功率分配和直流电压参考值来维持直流网络电压稳定^[17]。根据控制量的不同，分为电流特性(V-I)和功率特性(V-P)。下垂控制的工作特性曲线如图 2 所示。

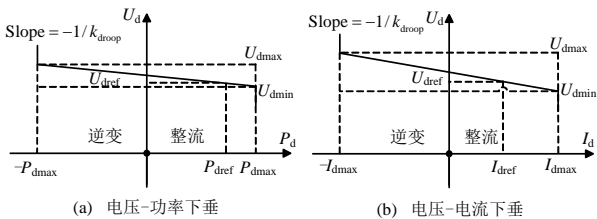


图 2 直流电压下垂控制工作特性曲线
Fig. 2 Working characteristic curves of DC voltage droop control

图 2 中， k_{droop} 为下垂控制的下垂系数，V-P 曲线可以表示为 $U_{di} = -(1/k_{droop})P_{di} + U_{0i}$ ， P_{di} 为直流功率， U_{0i} 为 V-P 曲线与纵轴交点值，V-I 控制与此类似。直流电压下垂控制的控制方式和节点类型见表 2。

2 含 VSC-MTDC 的交直流系统潮流计算

交替迭代法将交流系统和直流系统进行分开迭代，分开迭代时，将另一个系统当作边界条件，

表 2 直流电压下垂控制换流站控制方式及节点类型

Tab. 2 Control modes and bus types of VSC stations of DC droop control

节点类型	有功功率控制类	无功功率控制类	交流节点潮流类型
5	V-P 下垂控制	定交流无功功率	PQ 节点
6	V-P 下垂控制	定交流电压幅值	PV 节点
7	V-I 下垂控制	定交流无功功率	PQ 节点
8	V-I 下垂控制	定交流电压幅值	PV 节点

迭代至收敛后通过接口变量传递迭代结果。这种方法效率高、计算速度快，但是仅具有一阶收敛性，对弱交流系统收敛性较差。传统交替迭代法针对弱系统收敛性差的主要原因是弱交流系统有很大的等值电抗，所以换流母线电压对注入无功功率的变化非常敏感，在交替迭代法的求解过程中，将交直流系统的分界线上的电压和无功功率近似看成恒定，忽略了彼此的耦合，因此影响收敛性。

本文提出的含 VSC-MTDC 的交直流系统潮流算法有别于传统的交替迭代法，在交、直流系统分开迭代时仅进行一次迭代，不必迭代至收敛，将一次交流潮流迭代和一次直流潮流迭代视作整个交直流系统的一次迭代，其原理类似于交流潮流的 PQ 分解法，忽略交直流系统间的繁琐的耦合关系和不够准确的边界条件，令其在每一次系统的整个迭代中不断更新，并在每次交、直流系统交互时更新边界条件，使得节点电压和无功功率能够不断、快速更新，不会使得误差扩大或陷入某个系统的迭代中，保证了其灵活性和算法的收敛性。由此既保持了统一迭代法的收敛性，又提高了算法效率。以交流和直流迭代的修正量作为整个交直流系统潮流迭代的收敛判据，计算结果更为精确。

2.1 直流修正方程和雅克比矩阵

含 VSC-MTDC 的交直流系统潮流计算的最终结果除了求解出各个交流母线的节点电压幅值和相角之外，还要计算出各个 VSC 换流站的直流电压、电流和 2 个控制参数 δ 和 M 以及可能存在的 DC-PCC 的直流电压。因此，每个 VSC 换流站有 4 个不平衡量，分别为交流节点有功功率和无功功率的不平衡量、换流器两端功率守恒和直流网络方程。对于图 1 所示的第 i 个 VSC 站，根据式(1)–(5)可以得到直流潮流迭代的不平衡量为

$$\Delta d_{i1} = P_{refi} - (\mu_i M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \sin(\delta_i - \alpha_i) - U_s^2 Y_i \sin \alpha_i = 0 \tag{6}$$

$$\Delta d_{i2} = Q_{refi} + (\mu_i M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \cos(\delta_i - \alpha_i) - U_s^2 Y_i \cos \alpha_i - U_s^2 / X_{ci} = 0 \tag{7}$$

$$\Delta d_{i3} = (2/3)U_{di}I_{di} - (\mu_i M_i / \sqrt{2})U_{si}U_{di} \cdot Y_i \sin(\delta_i + \alpha_i) + (\mu_i^2 M_i^2 / 2)U_{di}^2 Y_i \sin \alpha_i = 0 \quad (8)$$

$$\Delta d_{i4} = I_{di} - \sum_{j=1}^{N_d} Y_{dcij} U_{dcj} = 0 \quad (9)$$

式中: P_{refi} 、 Q_{refi} 为第 i 个 VSC 站交流节点的有功、无功给定值; 由于交流系统为三相, 式(8)中直流功率需乘以系数 2/3; U_{dc} 为直流电压组成的列向量, 包括换流站和 DC-PCC 的直流电压。

对于不同控制类型的 VSC 换流站, 不平衡量 Δd_{i2} – Δd_{i4} 方程相同。无功控制方式包括定交流电压和定交流无功控制, 对直流不平衡量方程没有影响。有功控制类型中, 对于定交流有功节点, 其 Δd_{i1} 为式(6)所示; 对于定直流电压节点, 即主从控制中的主站点, 其直流电压给定, 待求量只有 3 个, Δd_{i1} 不参与迭代; 对于 V-P 下垂控制节点, 由其数学模型可以得到 V-P 下垂控制节点的 Δd_{i1} 方程为

$$\Delta d_{i1} = U_{di} - k_{droopi}(U_{0i} - U_{di}) / I_{di} = 0 \quad (10)$$

同样的, V-I 下垂控制节点的 Δd_{i1} 方程为

$$\Delta d_{i1} = U_{di} + (1/k_{droopi})I_{di} - U_{0i} = 0 \quad (11)$$

DC-PCC 的电压也是待求量, 需要参与直流潮流迭代。设第 m 个 DC-PCC 对应 Y_d 中第 m_{PCC} 号直流节点, 那么 DC-PCC 的不平衡量方程为

$$\Delta d_{DC-PCC_m} = -\sum_{j=1}^{N_d} Y_{dcmpccj} U_{dcj} = 0 \quad (12)$$

对上述方程组展开成泰勒级数, 略去二次及以上各项, 可以得到直流潮流的牛顿-拉夫逊法的修正方程为

$$\Delta \mathbf{D} = -\mathbf{J}_d \Delta \mathbf{X}_d \quad (13)$$

$$\Delta \mathbf{D} = [\Delta d_{i1}, \Delta d_{i2}, \Delta d_{i3}, \Delta d_{i4}, \dots, \Delta d_{i1}, \Delta d_{i2}, \Delta d_{i3}, \Delta d_{i4}, \dots, \Delta d_{DC-PCC_k}, \dots]^T \quad (14)$$

$$\Delta \mathbf{X}_d = [\Delta U_{d1}, \Delta I_{d1}, \Delta \delta_1, \Delta M_1, \dots, \Delta U_{di}, \Delta I_{di}, \Delta \delta_i, \Delta M_i, \dots, \Delta U_{DC-PCC_k}, \dots]^T \quad (15)$$

式中 \mathbf{J}_d 为直流潮流的雅克比矩阵。主从控制的潮流修正方程(14)中的向量和矩阵维数为 $4N_{VSC} + N_{DC-PCC} - 1$, 下垂控制的维数则为 $4N_{VSC} + N_{DC-PCC}$ 。

2.2 初值和边界条件计算

初次进行交流系统潮流迭代时, 换流站交流母线类型由 VSC 换流站控制方式设定为 PQ 或者 PV 节点。定交流有功节点的交流有功功率由设定值给出, 定直流电压节点的交流有功未知。忽略直流线路和 VSC 换流站交流线路等的损耗, 定直流电压

节点的交流有功初值通过其他从站的有功求解。

$$P_{M(0)} = -\sum_{i \in N_p} P_{srefi} \quad (16)$$

式中: N_p 为定交流有功节点的集合; P_{srefi} 为该节点交流有功功率设定值。下垂控制的节点交流有功同样未给定, 且系统中可能有多个下垂控制节点。假设下垂节点的交流有功初值的绝对值相等, 即整流站为 $P_{DC(0)}$ 、逆变站为 $-P_{DC(0)}$, 根据直流线路的功率守恒求得各个下垂控制节点的交流有功初值。本方法对于主从控制和一般的水下控制均可适用。若下垂控制中整流站数量和逆变站数量相同, 则无法应用。对于这种情况, 可根据换流站额定容量, 对各下垂节点求解其潮流有功初值。

初次进行直流潮流迭代时, 如果是定直流电压节点, 其直流电压初值直接给定, 否则采用额定值, 其它变量的初值计算公式如下:

$$\begin{cases} U_{di(0)} = U_{drefi} \text{ or } U_{dNi} \\ I_{di(0)} = P_{si} / U_{di(0)} \\ \delta_{i(0)} = \arctan[P_{si} / (U_{si}^2 / X_{li} + U_{si}^2 / X_{li} - Q_{si})] \\ M_{i(0)} = \sqrt{2} P_{si} X_{li} / (\mu_i U_{si} U_{di(0)} \sin \delta_{i(0)}) \end{cases} \quad (17)$$

每次交流潮流迭代后, 需要将更新的边界条件提供给直流系统, 包括定交流无功节点的交流电压幅值 $|U_s|$ 和定交流电压节点的交流无功 Q_s 。需要注意的是, 对于定交流电压节点, 式(7)中的 Q_{refi} 不是由控制方式给定, 而是由交流潮流提供, 每次迭代时不断更新。同样的, 每次直流潮流迭代后, 对于定直流电压和下垂控制节点, 要根据式(3)将更新的交流有功功率值 P_s 提供给交流系统。而交流无功功率不用提供给交流系统, 这是因为如果无功控制类是定交流无功控制, 其无功功率值为给定值, 不用更新; 如果为定交流电压控制, 对应的交流节点为 PV 节点, 交流潮流时不需要无功功率值。

直流变量更新后可能会出现直流电压、电流和功率以及 M 越界 ($M > 1$) 的情况, 若 U_d 、 I_d 和 P_d 超出允许范围, 应当调整定直流电压的电压设定值或下垂控制参数; 若 M 越界, 则令 $M=1$ 并在后续计算中去掉该 VSC 节点的无功功率修正方程式。

2.3 含 VSC-MTDC 交直流潮流算法流程

本文潮流算法的详细过程如下:

1) 输入交流网络数据和直流网络数据, 计算潮流迭代初值, 令潮流迭代次数 $k=0$ 。

2) 进行一次交流潮流计算, 得到结果并更新各节点数据提供给直流系统。

3) 计算直流不平衡量 $\Delta D_{(k)}$ 和直流雅克比矩阵 $J_{d(k)}$, 根据 $\Delta X_{d(k)} = -J_{d(k)}^{-1}\Delta D_{(k)}$ 求解直流潮流修正量 $\Delta X_{d(k)}$ 。

4) 进行收敛判定, 如果本次直流潮流和交流潮流的修正量 $\Delta X_{d(k)}$ 和 $\Delta X_{a(k)}$ 绝对值最大值均小于设定值 ε , 则含 VSC-MTDC 的交直流系统潮流计算收敛并输出潮流结果。

5) 不满足则令 $k=k+1$, 再进行判断 k 是否大于设定的最大迭代次数, 满足条件则系统潮流不收敛, 计算结束; 不满足, 更新直流变量后进行越界判断并处理, 接着返回步骤 2), 继续潮流计算。

详细计算流程图见图 3。

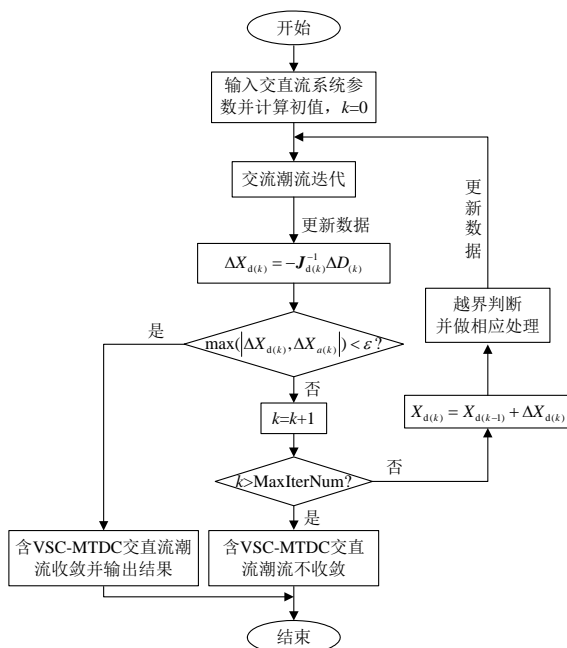


图 3 含 VSC-MTDC 交直流潮流计算流程图

Fig. 3 Flow chart of AC/DC power flow algorithm with VSC-MTDC

3 算例分析

3.1 算例 1

本文首先以图 4 所示的交直流系统为例, 验证本文潮流算法的正确性和有效性。该算例以 2 区 4 机系统为基础, 向孤岛进行送电, 构成三端直流输电网络。系统额定功率为 100MVA, 交流母线额定电压为 110kV, 其他参数见文献[18]。一般认为交流系统短路比(short circuit ratio, SCR)大于 3 为强交流系统、小于 2 为弱交流系统^[19-20]。算例 1 中系统 SCR 为 1.54, 为弱交流系统。3 个 VSC 换流站均采用正弦波脉宽调制, 且参数相同。换流站参数标幺值如下: $R=0.0029$, $X_1=0.0571$, $X_c=-11.429$; 直流电压额定值 $U_{dN}=2$, 允许范围设为 $1.8 < U_d < 2$,

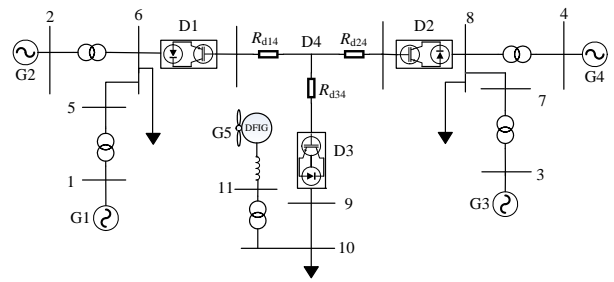


图 4 算例 1 系统接线图

Fig. 4 Connection diagram of Case 1

直流线路电阻 $R_{d1}=R_{d2}=R_{d3}=0.1512$, 收敛精度 $\varepsilon=10^{-6}$ 。

首先, 采用主从控制策略, 各个换流站控制方式及参数见表 3。使用本文潮流模型进行求解, 经过 4 次迭代后潮流收敛。潮流迭代中交直流潮流修正量变化情况见附录表 A1、A2, 各换流站最终潮流结果见表 4。

表 3 主从控制时各换流站控制方式及参数

Tab. 3 Control modes and parameters of VSC stations of master-slave control

直流站点	换流类型	节点类型	有功功率控制类	无功功率控制类	分类
D1	整流	1	$U_d=2.1$	$Q_s=0.3$	主站点
D2	整流	4	$P_s=0.7$	$U_s=1.03$	从站点
D3	逆变	3	$P_s=-1$	$Q_s=-0.6$	从站点
D4	DC-PCC	—	—	—	—

表 4 主从控制潮流计算结果

Tab. 4 Power flow results of master-slave control

直流站点	P_s/pu	Q_s/pu	U_d/pu	I_d/pu	δ/rad	M
D1	0.3990	0.3	2.1	0.2844	0.0209	0.6781
D2	0.7	0.2273	2.1313	0.4915	0.0375	0.6708
D3	-1	-0.6	1.9397	-0.7759	-0.0491	0.7875
D4	—	—	2.057	—	—	—

VSC 具有潮流反转而电压极性不变的优点, 调整各换流站控制方式使得直流潮流反转, 实现风电并网。D1 和 D2 采用 V-P 下垂控制, D3 采用定交流有功控制, 详细参数见表 5; 经过 6 次迭代达到收敛条件, 迭代情况见附录表 A3、A4, 各换流站最终潮流结果见表 6。

表 5 下垂控制时各换流站控制方式及参数

Tab. 5 Control modes and parameters of VSC stations of droop control

直流站点	换流类型	节点类型	有功功率控制类	无功功率控制类
D1	逆变	5	$k_{\text{droop}}=0.04$ $U_0=-13.8257$	$Q_s=-0.3$
D2	逆变	6	$k_{\text{droop}}=0.04$ $U_0=-16.7889$	$U_s=1.035$
D3	整流	3	$P_s=1$	$Q_s=0.6$
D4	DC-PCC	—	—	—

表 6 下垂控制潮流计算结果

Tab. 6 Power flow results of droop control

直流站点	P_s/pu	Q_s/pu	U_d/pu	I_d/pu	δ/rad	M
D1	-0.4214	0.3	2.0076	-0.3165	-0.0217	0.7407
D2	-0.5001	-0.3139	1.9908	-0.3773	-0.0257	0.7451
D3	1	0.6	2.1528	0.6938	0.0566	0.6354
D4	—	—	2.0479	—	—	—

3.2 算例 2

算例 2 在图 5 所示系统中进行,该系统由 NYPS 和 NETS 通过四端柔性直流输电线路连接而成,实现 2 个非同步交流系统的互联。系统包含 16 台发

电机、3 台风机和 68 个节点,详细参数见文献[21]。NYPS 和 NETS 两个区域系统的 SCR 分别为 4.68、5.12,均为强交流系统。D1-D4 换流站参数相同,标么值为: $R=0.0015$, $X_1=0.0343$, $X_c=-11.274$; 直流线路电阻 $R_{d12}=R_{d34}=0.0438$, $R_{d13}=R_{d24}=0.0982$ 。直流电压额定值 $U_{dN}=2$,允许范围 $1.8 < U_d < 2$,收敛精度 $\varepsilon=10^{-6}$ 。D1、D2 采取 V-I 下垂控制, D3、D4 为定交流有功控制,具体控制参数见表 7。潮流经过 5 次迭代收敛,具体迭代过程见附录表 A5,潮流计算结果见表 8。

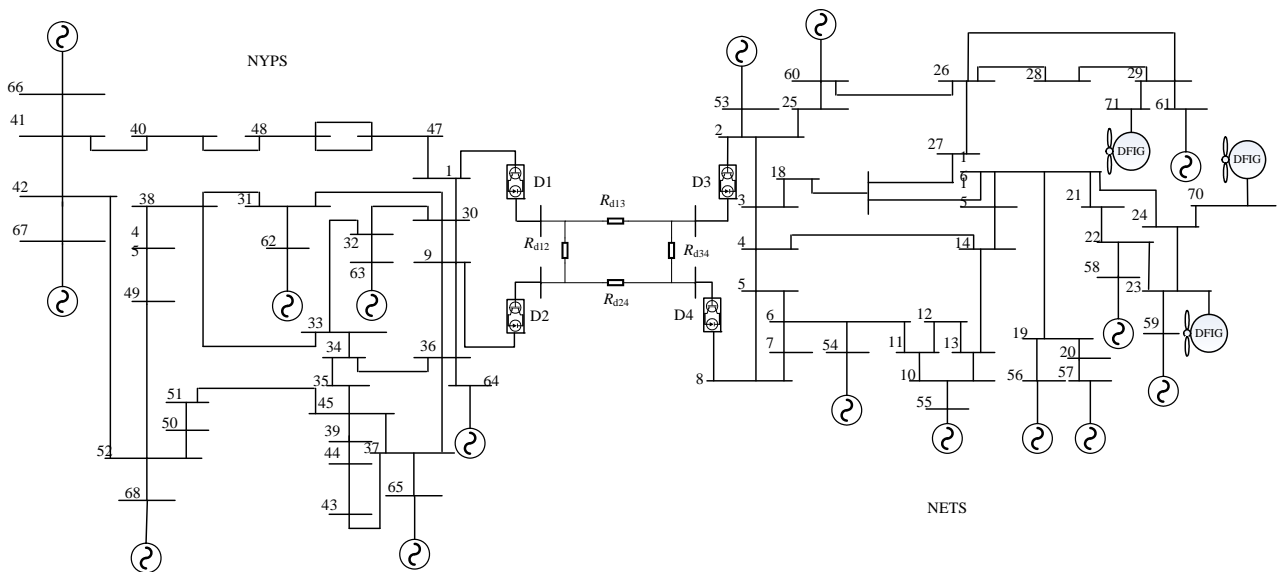


图 5 算例 2 系统接线图

Fig. 5 Connection diagram of Case 2

表 7 算例 2 各换流站控制方式及参数

Tab. 7 Control modes and parameters of VSC stations of Case 2

直流站点	换流类型	节点类型	有功功率控制类	无功功率控制类
D1	逆变	8	$k_{droop}=0.03$ $U_0=-10$	$U_s=0.998$
D2	逆变	7	$k_{droop}=0.03$ $U_0=-10.514$	$Q_s=-0.3$
D3	整流	4	$P_s=0.5$	$U_s=0.972$
D4	整流	3	$P_s=0.5$	$Q_s=0.3$

表 8 算例 2 潮流计算结果

Tab. 8 Power flow results of Case 2

直流站点	P_s/pu	Q_s/pu	U_d/pu	I_d/pu	δ/rad	M
D1	-0.4798	-0.3995	2.0009	-0.3600	-0.0159	0.7135
D2	-0.5003	-0.3	2.0007	-0.3754	-0.0176	0.6937
D3	0.5	0.1132	2.0369	0.3679	0.0180	0.6696
D4	0.5	0.3	2.0369	0.3676	0.0242	0.5704

由以上算例结果可知,本文潮流算法具有较好

的收敛性和迭代效率,一般经过 5 次左右迭代即可收敛。对于不同系统规模、不同交流系统强弱和不同运行场景如风电并网、非同步电网互联等都能够稳定、迅速收敛。与传统交流潮流算法相似,以交流直流修正量作为收敛判据,计算结果精确。

另外,在应用本文算法进行潮流计算时发现,对于不同算例可能会出现直流修正量已经满足收敛要求而交流修正量仍然较大或者交流修正量很小直流修正量较大的情况,这是由于算例中交流系统强弱不同导致的。另外,由于下垂系数较小,直流电压对有功功率的变化非常敏感,这也会造成直流系统收敛较慢的情况。因此需要把交流修正量和直流修正量同时作为收敛条件,以保证计算结果的准确性和收敛性。

3.3 与传统算法比较

分别应用两种传统交直流潮流算法和本文算法对算例 2 进行求解,结果如表 9 所示。

由表可 9 知,对于算例 2,3 种方法均可收敛,

表9 算例2与传统算法比较结果

Tab. 9 Comparisons results with conventional algorithms of Case 2

内容	统一迭代法	交替迭代法	本文算法
收敛精度	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
迭代次数	4次	5次交流、4次直流	5次
计算时间/s	1.89s	2.25s	1.03s

在相同收敛精度下,迭代次数略有不同,其中交替迭代法需要5次交流、4次直流迭代。计算时间上,由于本文算法没有繁琐的交直流耦合关系、也不用每次迭代至收敛,计算时间只用1.03s,低于统一迭代法和交替迭代法。由此可以得到本文算法与传统方法的定性比较结果,如表10所示。

表10 与传统算法比较

Tab. 10 Comparison with conventional algorithms

内容	统一迭代法	交替迭代法	本文算法
收敛性	好,对不同系统均可收敛	差,弱交流系统收敛性差	好,对不同系统均可收敛
编程要求	高	低	低
占用内存	多	少	少
计算时间	较长	较长	短

如表10所示,本文潮流算法将一次交流潮流迭代和一次直流潮流迭代视作整个交直流系统的一次迭代,并在每次交、直流系统交互时更新边界条件,使其能够兼顾统一迭代法的收敛性和交替迭代法的效率性。在整体迭代次数相近的情况下,本文模型在每次迭代时不需像交替迭代法那样迭代至收敛,也没有统一迭代法复杂的交直流系统耦合关系,计算时间较短,能够快速得到潮流结果。

4 结论

交直流系统的潮流计算是研究交直流系统机理的基础。本文对MTDC和不同控制方式的潮流模型进行分析,提出了含VSC-MTDC的交直流系统潮流算法,该算法能够兼顾统一迭代法的收敛性以及交替迭代法的有效性,满足了多端直流网络发展和先进控制策略的要求。对于海上风电并网、向孤岛送电、非同步交直流电网互联等情况,都能够迅速收敛,不受交流系统强弱和运行场景限制。

与传统算法的比较显示,本文算法和传统算法到最终收敛所需要的迭代次数差不多,但由于不需要形成庞大的交直流统一雅可比矩阵以及多次的迭代,从而节省了计算时间,提高了算法效率。另外,在应用本文算法进行潮流计算时发现,需要把直流修正量和交流修正量同时作为收敛条件,以适

应不同交流系统强弱的算例,保证计算的收敛性和结果的准确性。

参考文献

- [1] 陈海荣, 徐政. 向无源网络供电的VSC-HVDC系统的控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 42-48. Chen Hairong, Xu Zheng. Control design for VSC-HVDC supplying passive network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 42-48(in Chinese).
- [2] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12. Wen Jialiang, Wu Rui, Peng Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12(in Chinese).
- [3] 汤广福. 2004年国际大电网会议系列报道——高压直流输电和电力电子技术发展现状及展望[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 1-5. Tang Guangfu. A review of 2004 CIGRE on application status and perspective in HVDC and power electronics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 1-5(in Chinese).
- [4] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 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. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17(in Chinese).
- [5] 陈树勇, 徐林岩, 孙栩, 等. 基于多端柔性直流输电的风电并网控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(S1): 32-38. Chen Shuyong, Xu Linyan, Sun Xu, et al. The control of wind power integration based on multi-terminal high voltage DC transmission with voltage source converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 32-38(in Chinese).
- [6] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771. Tang Guangfu, Pang Hui, He Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771(in Chinese).
- [7] 吴志远, 殷正刚, 唐西胜. 混合电网的交直流解耦潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 937-944. Wu Zhiyuan, Yin Zhenggang, Tang Xisheng. An AC/DC decoupled hybrid power flow algorithm for hybrid power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 937-944(in Chinese).
- [8] 雷婧婷, 安婷, 杜正春, 等. 含直流配电网的交直流潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 911-918. Lei Jingting, An Ting, Du Zhengchun. A unified AC/DC

- power flow algorithm with DC distribution [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 911-918(in Chinese).
- [9] 郑超, 周孝信, 李若梅, 等. VSC-HVDC 稳态特性与潮流算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 1-5.
Zheng Chao, Zhou Xiaoxin, Li Ruomei, et al. Study on the steady characteristic and algorithm of power flow for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 1-5(in Chinese).
- [10] Beerten J, Cole S, Belmans R. Generalized steady-state VSC MTDC model for sequential AC/DC power flow algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 821-829.
- [11] 牛博彦, 胡林献, 张众. 基于 VSC-HVDC 的风电场并网系统潮流算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 6-11.
Niu Boyan, Hu Linxian, Zhang Zhong. Research on power flow of wind farm grid-connected system based on VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 6-11(in Chinese).
- [12] Baradar M, Ghandhari M, Hertem D V. The modeling multi-terminal VSC-HVDC in power flow calculation using unified methodology[C]//Proceedings of the 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. Manchester: IEEE, 2011.
- [13] 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(in Chinese).
- [14] 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(in Chinese).
- [15] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [16] 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(in Chinese).
- [17] Bu S Q, Du W, Wang H F, et al. Investigation on economic and reliable operation of meshed MTDC/AC Grid as impacted by offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3901-3911.
- [18] 周涛, 陈中, 郭瑞兴. 基于闭环阻尼转矩分析法的电力系统稳定器参数整定[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 56-60.
Zhou Tao, Chen Zhong, Guo Ruixing. Power system stabilizer parameter tuning based on closed-loop damping torque analysis method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 56-60(in Chinese).
- [19] Taylor C W. Power system voltage stability[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [20] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 7-12.
Lin Weifang, Tang Yong, Bu Guangquan. Study on voltage stability of multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 7-12(in Chinese).
- [21] Rogers G. Power system oscillations[M]. Norwell: Kluwer, 2000.

附录 A

主从控制下迭代过程中交流修正量变化情况, 如表 A1 所示。

表 A1 主从控制下迭代过程中交流修正量变化情况

Tab. A1 Variation of AC corrections during iteration of master-slave control

交流修正量	第 1 次迭代	第 2 次迭代	第 3 次迭代/ 10^{-3}	第 4 次迭代/ 10^{-4}
$\Delta\theta_2$	-0.0573	0.0032	0.9454	0.3064
$\Delta\theta_4$	0.0843	-0.0066	-0.0340	0.0000
$\Delta\theta_5$	0.0211	0.0006	0.3765	0.1228
ΔV_5	0.0540	0.0003	0.9357	0.3077
$\Delta\theta_6$	0.1516	-0.0061	-0.0419	0.0000
ΔV_6	0.1923	-0.0064	-0.0340	0.0000
$\Delta\theta_7$	-0.1197	0.0074	0.0764	0.0001
ΔV_7	-0.1033	0.0064	0.0622	0.0001
$\Delta\theta_8$	-0.0345	0.0033	0.0207	0.0024
$\Delta\theta_9$	-0.0358	0.0059	0.0694	0.0116
ΔV_9	-0.0397	0.008	0.0758	0.0001
$\Delta\theta_{10}$	-0.0358	0.0074	0.0858	0.0001
ΔV_{10}	-0.0474	0.0078	0.0892	0.0001

注: 交流节点 1、3、11 为平衡节点, 2、4、8 为 PV 节点, 5、6、7、9、10 为 PQ 节点。

主从控制下迭代过程中直流修正量变化情况, 如表 A2 所示。

下垂控制下迭代过程中交流修正量变化情况, 如表 A3 所示。

下垂控制下迭代过程中直流修正量变化情况, 如表 A4

所示。

表 A2 主从控制下迭代过程中直流修正量变化情况

Tab. A2 Variation of DC corrections during iteration of master-slave control

直流修正量	第1次迭代	第2次迭代	第3次迭代/10 ⁻³	第4次迭代/10 ⁻⁶
ΔI_{d1}	-0.1242	-0.0169	-0.4023	-0.0573
$\Delta \delta_1$	-0.0030	-0.0015	-0.0456	-0.0579
ΔM_1	0.0007	0.0042	0.0485	0.8112
ΔU_{d2}	-0.1351	0.0037	0.1098	0.0153
ΔI_{d2}	-0.1495	0.0076	0.3238	0.0437
$\Delta \delta_2$	0.0018	-0.0003	0.0035	-0.0010
ΔM_2	0.0489	-0.0166	-0.1820	-0.0242
ΔU_{d3}	0.0563	0.0040	0.0727	0.0107
ΔI_{d3}	0.2665	0.0093	0.0785	0.0136
$\Delta \delta_3$	-0.0014	0.0007	0.0123	0.0021
ΔM_3	-0.0235	0.0032	0.0396	0.0047
ΔU_{d4}	-0.0596	0.0026	0.0608	0.0087

表 A3 下垂控制下迭代过程中交流修正量变化情况

Tab. A3 Variation of AC corrections during iteration of droop control

交流修正量	第1次迭代	第2次迭代	第3次迭代/10 ⁻³	第4次迭代/10 ⁻⁷	第5次迭代/10 ⁻¹⁵	第6次迭代/10 ⁻¹⁵
$\Delta \theta_2$	-0.0073	-0.0016	-0.0288	-0.0319	-0.0966	0.0259
$\Delta \theta_4$	0.1177	-0.0079	-0.0455	-0.0149	-0.1129	0.0281
$\Delta \theta_5$	0.0405	-0.0011	-0.0020	0.0020	-0.0311	0.0078
ΔV_5	0.1041	-0.0052	-0.0468	-0.0379	-0.1207	0.0194
$\Delta \theta_6$	0.1651	-0.0069	-0.0559	-0.0475	-0.0860	0.0284
ΔV_6	0.2253	-0.0077	-0.0455	-0.0149	-0.1678	0.0281
$\Delta \theta_7$	-0.0821	0.0039	0.0373	0.0326	0.0514	-0.0407
ΔV_7	-0.0985	0.004	0.0372	0.0314	0.0276	-0.0191
$\Delta \theta_8$	-0.0384	0.0048	0.0373	0.0266	-0.0891	-0.0424
$\Delta \theta_9$	-0.0423	0.0071	0.0610	0.0443	-0.2226	0.0666
ΔV_9	-0.0436	0.0097	0.1104	0.1314	0.2805	-0.002
$\Delta \theta_{10}$	0.0047	0.0075	0.0693	0.0578	0.2412	-0.2739
ΔV_{10}	-0.025	0.0071	0.0653	0.0544	0.2235	-0.1651

注：交流节点 1、3、11 为平衡节点，2、4、8 为 PV 节点，5、6、7、9、10 为 PQ 节点。

表 A4 下垂控制下迭代过程中直流修正量变化情况

Tab. A4 Variation of DC corrections during iteration of droop control

直流修正量	第1次迭代	第2次迭代	第3次迭代	第4次迭代	第5次迭代/10 ⁻³	第6次迭代/10 ⁻⁶
ΔU_{d1}	0.3878	0.1153	0.0513	0.0084	0.2550	0.2337
ΔI_{d1}	0.0289	0.0148	0.0058	0.0010	0.0305	0.0280
$\Delta \delta_1$	-0.0039	-0.0001	-0.0001	-0.000	-0.0004	-0.0003
ΔM_1	-0.0727	-0.0390	-0.0156	-0.0027	-0.0818	-0.0751
ΔU_{d2}	0.3889	0.1158	0.0515	0.0084	0.2561	0.2347
ΔI_{d2}	0.0367	0.0184	0.0072	0.0012	0.0376	0.0345

直流修正量	第1次迭代	第2次迭代	第3次迭代	第4次迭代	第5次迭代/10 ⁻³	第6次迭代/10 ⁻⁶
$\Delta \delta_2$	-0.0027	-0.0001	-0.0001	-0.0000	-0.0004	-0.0003
ΔM_2	-0.0701	-0.0382	-0.0154	-0.0027	-0.0807	-0.0740
ΔU_{d3}	0.3735	0.1080	0.0484	0.0079	0.2401	0.2200
ΔI_{d3}	-0.0656	-0.0332	-0.0130	-0.0022	-0.0681	-0.0625
$\Delta \delta_3$	0.0018	0.0001	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000
ΔM_3	-0.0575	-0.0300	-0.0120	-0.0021	-0.0625	-0.0573
ΔU_{d4}	0.3834	0.1131	0.0504	0.0082	0.2504	0.2295

算例 2 迭代过程中直流修正量变化情况如表 A5 所示。

表 A5 算例 2 迭代过程中直流修正量变化情况

Tab. A5 Variation of DC corrections during iteration in Case 2

直流修正量	第1次迭代	第2次迭代	第3次迭代	第4次迭代/10 ⁻³	第5次迭代/10 ⁻⁷
ΔU_{d1}	-0.0005	-0.0120	0.0116	0.0412	0.0843
ΔI_{d1}	0.1100	0.0004	-0.0003	-0.0012	-0.0025
$\Delta \delta_1$	0.0057	-0.0098	-0.0002	-0.0076	-0.0108
ΔM_1	-0.0004	-0.1018	-0.0106	-0.1427	-0.1703
ΔU_{d2}	-0.0002	-0.0120	0.0116	0.0412	0.0842
ΔI_{d2}	0.1254	0.0004	-0.0003	-0.0012	-0.0025
$\Delta \delta_2$	-0.0003	0.0008	-0.0001	-0.0001	-0.0004
ΔM_2	-0.0004	0.0171	-0.0034	-0.0272	-0.0228
ΔU_{d3}	-0.0365	-0.0121	0.0116	0.0414	0.0848
ΔI_{d3}	-0.1156	-0.0035	0.0012	0.0050	0.0195
$\Delta \delta_3$	0.0033	-0.0018	0.0000	-0.0005	0.0001
ΔM_3	0.0122	-0.0378	-0.0055	-0.0553	-0.0440
ΔU_{d4}	-0.0365	-0.0120	0.0116	0.0412	0.0842
ΔU_{d1}	-0.1199	0.0028	-0.0005	-0.0026	-0.0144
ΔI_{d1}	0.0007	-0.0021	-0.0003	-0.0023	-0.0010
$\Delta \delta_1$	0.0118	0.0320	-0.0012	-0.0035	-0.0165



周涛

收稿日期：2018-05-28。

作者简介：

周涛(1991)，男，博士研究生，主要研究方向为多端柔性直流输电， zhou tao guo1908@163.com;

*通信作者：陈中(1975)，男，博士，博士生导师，主要研究方向为柔性直流输电，电力系统稳定与控制， chenzhong_seu@163.com;

戴中坚(1995)，男，硕士研究生，主要研究方向为柔性直流输电；

孙可慧(1995)，女，硕士研究生，主要研究方向为柔性直流输电；

刘艺(1994)，女，硕士研究生，主要研究方向为柔性直流输电。

(责任编辑 邱丽萍)

An AC/DC System Power Flow Algorithm with VSC-MTDC

ZHOU Tao, CHEN Zhong, DAI Zhongjian, SUN Kehui, LIU Yi

(Southeast University)

KEY WORDS: VSC-MTDC; AC/DC system; power flow calculation; master-slave control; DC voltage droop control

VSC-MTDC (voltage source converter based multi-terminal direct current system), which develops from two-terminal DC transmission system, has a high reliability and is appropriate for offshore wind power grid connection. The control strategies of VSC-MTDC are multifarious and corresponding power flow models are more complicated.

In order to adapt the development of VSC-MTDC, an AC/DC power flow algorithm is proposed, which is applicable to different DC topologies and control strategies and contains the advantages of unified iterative method and alternating iterative method. Regular equations of DC power flow unbalance quantities are given as follows:

$$\begin{cases} \Delta d_{i1} = P_{ref_i} - (\mu_i M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \sin(\delta_i - \alpha_i) - U_s^2 Y_i \sin \alpha_i = 0 \\ \Delta d_{i2} = Q_{ref_i} + (\mu_i M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \cos(\delta_i - \alpha_i) - U_s^2 Y_i \cos \alpha_i - U_s^2 / X_{ci} = 0 \\ \Delta d_{i3} = (2/3) U_{di} I_{di} - (\mu_i M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} \cdot Y_i \sin(\delta_i + \alpha_i) + (\mu_i^2 M_i^2 / 2) U_{di}^2 Y_i \sin \alpha_i = 0 \\ \Delta d_{i4} = I_{di} - \sum_{j=1}^{N_i} Y_{dcij} U_{dcj} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

For different control modes, equations of Δd_{i2} to Δd_{i4} are the same. For constant DC voltage control, U_{di} is given and constant. Thus Δd_{i1} needn't participate in the iteration. For constant AC active power control, the equation of Δd_{i1} is given above. For V-P droop control, the equation can be obtained according to its mathematical model:

$$\Delta d_{i1} = U_{di} - k_{droopi} (U_{oi} - U_{di}) / I_{di} = 0 \quad (2)$$

Similarly, the equation for V-I droop control can be deduced as well:

$$\Delta d_{i1} = U_{di} + (1/k_{droopi}) I_{di} - U_{oi} = 0 \quad (3)$$

Before the primary DC iteration, the original values of all variables should be calculated. For constant AC active power control, the AC voltage is given. Otherwise, the rated value should be adopted. The original value equations of other variables are shown as follows:

$$\begin{cases} U_{di(0)} = U_{dref_i} \text{ or } U_{dN_i} \\ I_{di(0)} = P_{si} / U_{di(0)} \\ \delta_{i(0)} = \arctan[P_{si} / (U_{si}^2 / X_{li} + U_{si}^2 / X_{li} - Q_{si})] \\ M_{i(0)} = \sqrt{2} P_{si} X_{li} / (\mu_i U_{si} U_{di(0)} \sin \delta_{i(0)}) \end{cases} \quad (4)$$

In the proposed AC/DC power flow algorithm, one AC power iteration and one DC iteration is regarded as one power flow iteration of the whole AC/DC system. Each AC or DC iteration needn't iterate to convergent and the complex coupling relationships are ignored which make the variables and boundary conditions keep updating rapidly. Thus, the error of one system will not expand or transmit to the other system which enhances the flexibility and astringency of the algorithm. The correction quantities of both AC and Dc systems are selected to be convergence criterion and it guarantees the precision of power flow results.

Method of this paper and conventional methods are applied to the same case. Comparative results are shown as show in Tab. 1

Tab. 1 Comparisons with conventional algorithms

	Unified iterative method	Alternating iterative method	Method of this paper
Astringency	Strong and applicable to various AC systems	Weak and not applicable to weak AC systems	Strong and applicable to various AC systems
Programming demand	High	Low	Low
Storage occupation	Large	Little	Little
Calculation time	Long	Long	Short

The calculation and comparison results reveal the proposed method owns the advantages of both the unified iterative method and alternating iterative method. It has a strong astringency as unified iterative method and is applicable to weak AC systems. In addition, for each AC or DC iteration needn't iterate to convergent and the complex coupling relationships are ignored, the algorithm efficiency is increased and the calculation time is reduced as a result.