

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.03.019

含 VSC-MTDC 的交直流混合系统的改进潮流算法

叶 芳 ,卫志农 ,孙国强

(河海大学能源与电气学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :在基于电压源换流器的多端直流(VSC-MTDC)输电的稳态模型的基础上 ,导出了含 VSC-MTDC 的交直流混合系统潮流计算的数学模型 ,并针对统一迭代求解法和交替迭代求解法这 2 种算法存在的不足 ,提出了改进交替迭代求解法 .该算法从数学表达形式上严格解除了交流变量和直流变量之间的耦合关系 ,同时还可以高效利用已有的纯交流系统潮流求解程序 ,保证了算法的精度和收敛性 .IEEE-14 ,IEEE-30 ,IEEE-57 节点标准算例的仿真结果表明该算法是有效的 .

关键词 :直流输电 ;电压源换流器 ;多端直流 ;潮流算法

中图分类号 : 文献标志码 :A 文章编号 :1000-1980(2011)03-0338-06

随着电网建设的发展 ,直流输电在电力系统的研究和电网的实际运行中扮演着越来越重要的角色^[1-2] .以全控型开关器件和电压源换流器(voltage source converter ,VSC)为基础的新一代高压直流(high voltage direct current ,HVDC)输电 ,相比于基于晶闸管的直流输电 ,具有直接向孤立的远距离负荷供电、更经济地向负荷中心送电、运行控制方式灵活多变等优点 .因此基于 VSC 的 HVDC(VSC-HVDC)的研究成为近年的研究热点^[3-6] .与两端直流输电相比 ,多端直流(multi-terminal direct current ,MTDC)输电的输电能力更强 ,运行方式也更灵活 ,是今后直流输电的一个发展方向^[7-8] .含 VSC-MTDC 的交直流混合系统的潮流计算是分析 VSC-MTDC 的稳态特性以及研究其稳态控制运行方式的必要条件 ,也是分析其暂态特性和相应的控制保护技术的重要基础 .因此含 VSC-MTDC 的交直流混合系统的潮流计算研究具有重要的理论价值和实际意义 .

目前采用的交直流混合系统的潮流计算方法大部分是在交流潮流计算方法的基础上扩展形成的 ,主要分为统一迭代求解法(简称统一法)和交替迭代求解法(简称交替法)两类^[9-13] .统一法是以极坐标形式下的牛顿-拉夫逊法为基础 ,将交流系统中的节点电压的幅值和相位与直流系统中的直流电流、直流电压以及脉宽调制(pulse width modulation ,PWM)的控制变量进行统一迭代求解 .该算法收敛性好 ,但对原有的纯交流程序继承性差 ,代码编制工作量大 .交替法是在迭代计算过程中通过假设条件 ,对交直流系统方程分别进行处理 ,实现了交流潮流解和直流潮流解的分开迭代 ,对原有纯交流程序具有较好的继承性 ,但正是由于迭代过程中没有考虑交流变量和直流变量之间的耦合 ,因此收敛性不佳 ,精度低 .

本文首先确定 VSC-MTDC 的稳态模型 ,然后导出含 VSC-MTDC 的交直流混合系统潮流计算的数学模型 ,在此基础上针对统一法和交替法存在的不足 ,提出改进交替迭代求解法 ,最后通过算例验证所提模型和算法的有效性 .

1 VSC-MTDC 潮流计算的数学模型

1.1 VSC-MTDC 的稳态模型

在 VSC-MTDC 输电系统中 ,各 VSC 之间通过直流输电网络连接 ,对于第 i 个 VSC ,其单相示意图如图 1 所示 .

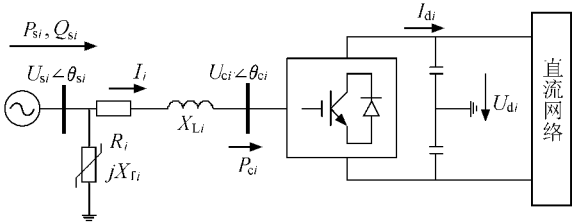


图 1 单相 VSC-MTDC 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-phase VSC-MTDC

收稿日期 :2010-05-24

基金项目 :国家自然科学基金(50877024) ;河海大学自然科学基金(2009421411) ;中央高校基本科研业务费专项(2010B05914)

作者简介 :叶芳(1985—) ,女 ,江苏昆山人 ,硕士研究生 ,主要从事电力系统运行分析与控制研究 .E-mail :yefang87@126.com

假设第 i 个 VSC 输出基波电压的相量为 $U_{ci} \angle \theta_{ci}$ 与交流系统连接处的电压相量为 $U_{si} \angle \theta_{si}$ 直流电压为 U_{di} 直流电流为 I_{di} 换流变压器阻抗为 jX_{Li} 交流滤波器阻抗为 jX_{fi} 换流器内部损耗和换流变压器损耗的等效电阻为 R_i 交流系统流入换流变压器的有功功率和无功功率分别为 P_{si} 和 Q_{si} 流入换流桥的有功功率和无功功率分别为 P_{ci} 和 Q_{ci} 流过换流变压器的电流为 I_i 假设方向如图 1 所示. 忽略换流器的等效电阻, 可得

$$P_{si} = \frac{U_{si}U_{ci}\sin(\theta_{si} - \theta_{ci})}{X_{Li}} \quad Q_{si} = \frac{U_{si}[U_{si} - U_{ci}\cos(\theta_{si} - \theta_{ci})]}{X_{Li}} + \frac{U_{si}^2}{X_{fi}} \quad (1)$$

为讨论方便, 令 $\delta_i = \theta_{si} - \theta_{ci}$, $|Y_i| = \frac{1}{\sqrt{R_i^2 + X_{Li}^2}}$, $\alpha_i = \arctan \frac{X_{Li}}{R_i}$ 式(1)进一步推导可得

$$P_{si} = -|Y_i|U_{si}U_{ci}\cos(\delta_i + \alpha_i) + |Y_i|U_{si}^2\cos\alpha_i \quad Q_{si} = -|Y_i|U_{si}U_{ci}\sin(\delta_i + \alpha_i) + |Y_i|U_{si}^2\sin\alpha_i + \frac{U_{si}^2}{X_{fi}} \quad (2)$$

同理可推导得到

$$P_{ci} = |Y_i|U_{si}U_{ci}\cos(\delta_i - \alpha_i) - |Y_i|U_{ci}^2\cos\alpha_i \quad Q_{ci} = -|Y_i|U_{si}U_{ci}\sin(\delta_i - \alpha_i) - |Y_i|U_{ci}^2\sin\alpha_i \quad (3)$$

由于 VSC 的换流桥臂的损耗已经由 R_i 等效, 所以直流功率 P_{di} 应该与 P_{ci} 相等, 因此可得

$$P_{di} = U_{di}I_{di} = |Y_i|U_{si}U_{ci}\cos(\delta_i - \alpha_i) - |Y_i|U_{ci}^2\cos\alpha_i \quad (4)$$

另外, VSC 采用 PWM 技术控制, 有 $U_{ci} = \frac{\mu_i}{\sqrt{2}}M_iU_{di}$, 其中 μ 为 PWM 的直流电压利用率($0 < \mu \leq 1$), M 为调制度($0 < M < 1$).

1.2 VSC-MTDC 的基本控制方式

目前, 通常采用 PWM 技术对 VSC 进行控制, 由式(1)可见, 可以通过控制 δ 来间接地控制 P_s , 通过控制 M 来间接地控制 Q_s , 从而达到对有功功率和无功功率灵活、独立控制的目的.

VSC-MTDC 中, 直流电压的稳定与否直接关系着系统能否正常运行以及交流侧输出电压的稳定性. 如果有功发送端的 VSC 从该端交流系统吸收的有功功率大于接收端 VSC 发送到对应端交流系统的有功功率, 则直流电压升高, 反之降低. 因此为了实现这种功率平衡, 其中一端 VSC 必须采用定直流电压控制. 另外, 若直流电压恒定, 则直流电流的变化量正比于有功功率的不平衡量, 定直流电压控制和定有功功率控制是等效的. 综合以上分析, VSC-MTDC 中 VSC 可以选择的控制方式有以下 4 种: 定直流电压、定无功功率控制; 定直流电压、定交流电压控制; 定有功功率、定无功功率控制; 定有功功率、定交流电压控制.

1.3 含 VSC-MTDC 的交直流混合系统的潮流计算方程

按照节点是否接有换流变压器, 可将节点分为直流节点和纯交流节点. 设系统节点总数为 n , 其中 VSC 的个数为 n_c , 则直流节点数为 n_c , 纯交流节点数为 $n_a = n - n_c$. 下面为了行文方便, 假设交直流混合系统的节点编号顺序为: $1 \sim n_a$ 节点为纯交流节点, 其中有 1 个平衡节点; $n_a + 1 \sim n$ 节点为直流节点.

1.3.1 交流系统的潮流计算方程

对于系统中的纯交流节点(用下标 a 表示), 其潮流计算方程与传统的潮流计算方程相同, 为

$$\Delta P_{ai} = P_{sai} - U_{ai} \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad \Delta Q_{ai} = Q_{sai} - U_{ai} \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (5)$$

式中: U, θ ——节点电压幅值和相角; G, B ——节点导纳矩阵的实部和虚部; i ——节点; j ——与节点 i 直接相连的所有节点(公式中用 $j \in i$ 表示), P_{sai}, Q_{sai} ——节点 i 的给定有功功率、无功功率.

而对于直流节点(用下标 t 表示), 其潮流计算方程为

$$\Delta P_{ti} = P_{sti} - U_{ti} \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - P_{si} \quad \Delta Q_{ti} = Q_{sti} - U_{ti} \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - Q_{si} \quad (6)$$

1.3.2 直流系统的潮流计算方程

根据推导建立的 VSC-MTDC 的稳态模型, 以及直流网络方程, 可得到直流系统的潮流计算方程为

$$\begin{cases} \Delta d_{i1} = P_{si} + \frac{\mu_i}{\sqrt{2}} M_i U_{si} U_{di} |Y_i| \cos(\delta_i + \alpha_i) - U_{si}^2 |Y_i| \cos \alpha_i \\ \Delta d_{i2} = Q_{si} + \frac{\mu_i}{\sqrt{2}} M_i U_{si} U_{di} |Y_i| \sin(\delta_i + \alpha_i) - U_{si}^2 |Y_i| \sin \alpha_i - \frac{U_{si}^2}{X_{fi}} \\ \Delta d_{i3} = U_{di} I_{di} - \frac{\mu_i}{\sqrt{2}} M_i U_{si} U_{di} |Y_i| \cos(\delta_i - \alpha_i) + \frac{1}{2} (\mu_i M_i U_{di})^2 |Y_i| \cos \alpha_i \\ \Delta d_{i4} = I_{di} - \sum_{j=1}^{n_c} g_{dij} U_{dj} \end{cases} \quad (7)$$

式中 g_{dij} 为直流网络节点电导矩阵的元素。

2 改进交替迭代求解法

对于上述建立的含 VSC-MTDC 的交直流混合系统的潮流计算模型,目前的算法主要有统一法和交替法 2 类。本文针对这 2 种算法存在的不足,提出了改进交替迭代求解法,具体推导过程如下:

由式(5)(6)(7)联立可得含 VSC-MTDC 的交直流混合系统潮流的计算方程,描述为

$$\begin{aligned} f_{ac} &= \mathbf{0} & f_{ac-dc} &= \mathbf{0} & f_{dc} &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} f_{ac} &= (\Delta P_{a1} \ \Delta Q_{a1} \ \dots \ \Delta P_{an_a} \ \Delta Q_{an_a})^T & f_{ac-dc} &= (\Delta P_{t1} \ \Delta Q_{t1} \ \dots \ \Delta P_{tn_c} \ \Delta Q_{tn_c})^T \\ f_{dc} &= (\Delta d_{11} \ \Delta d_{12} \ \Delta d_{13} \ \Delta d_{14} \ \dots \ \Delta d_{n_c1} \ \Delta d_{n_c2} \ \Delta d_{n_c3} \ \Delta d_{n_c4})^T \end{aligned}$$

对式(8)进行泰勒级数展开,并忽略二阶及以上高阶项,可得牛顿-拉夫逊法的修正方程:

$$f_N = -J_N \Delta x_N \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} f_N &= (f_{ac}^T \ f_{ac-dc}^T \ f_{dc}^T)^T & \Delta x_N &= (\Delta x_{ac1}^T \ \Delta x_{ac2}^T \ \Delta x_{ac-dc}^T \ \Delta x_{dc}^T)^T \\ \Delta x_{ac1} &= (\Delta U_{a1} \ \Delta \theta_{a1} \ \dots \ \Delta U_{an_a} \ \Delta \theta_{an_a})^T & \Delta x_{ac2} &= (\Delta U_{t1} \ \Delta \theta_{t1} \ \dots \ \Delta U_{tn_c} \ \Delta \theta_{tn_c})^T \\ \Delta x_{ac-dc} &= (\Delta P_{s1} \ \Delta Q_{s1} \ \dots \ \Delta P_{sn_c} \ \Delta Q_{sn_c})^T & \Delta x_{dc} &= (\Delta U_{d1} \ \Delta I_{d1} \ \Delta \delta_1 \ \Delta M_1 \ \dots \ \Delta U_{dn_c} \ \Delta I_{dn_c} \ \Delta \delta_{n_c} \ \Delta M_{n_c})^T \end{aligned}$$

由此,雅可比矩阵 J_N 的形式如下:

$$J_N(\begin{matrix} x_{ac1} & x_{ac2} & x_{ac-dc} & x_{dc} \end{matrix}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{ac}}{\partial x_{ac1}} & \frac{\partial f_{ac}}{\partial x_{ac2}} & \frac{\partial f_{ac}}{\partial x_{ac-dc}} & \frac{\partial f_{ac}}{\partial x_{dc}} \\ \frac{\partial f_{ac-dc}}{\partial x_{ac1}} & \frac{\partial f_{ac-dc}}{\partial x_{ac2}} & \frac{\partial f_{ac-dc}}{\partial x_{ac-dc}} & \frac{\partial f_{ac-dc}}{\partial x_{dc}} \\ \frac{\partial f_{dc}}{\partial x_{ac1}} & \frac{\partial f_{dc}}{\partial x_{ac2}} & \frac{\partial f_{dc}}{\partial x_{ac-dc}} & \frac{\partial f_{dc}}{\partial x_{dc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{a-a1} & J_{a-a2} & 0 & 0 \\ J_{ad-a1} & J_{ad-a2} & J_{ad-ad} & 0 \\ J_{d-a1} & J_{d-a2} & J_{d-ad} & J_{d-d} \end{bmatrix} \quad (10)$$

将含 VSC-MTDC 的交直流潮流计算方程写为

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} f_1 &= f_{ac} & f_2 &= (f_{ac-dc}^T \ f_{dc}^T)^T & \Delta x_1 &= \Delta x_{ac1} & \Delta x_2 &= (\Delta x_{ac2}^T \ \Delta x_{ac-dc}^T \ \Delta x_{dc}^T)^T \\ J_{11} &= J_{a-a1} & J_{21} &= \begin{bmatrix} J_{ad-a1} \\ J_{d-a1} \end{bmatrix} & J_{12} &= [J_{a-a2} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}] & J_{22} &= \begin{bmatrix} J_{ad-a2} & J_{ad-ad} & \mathbf{0} \\ J_{d-a2} & J_{d-ad} & J_{d-d} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

对于一个含有 n_c 个电压源换流器的 n 节点系统,式(11)共有 $2(n-1)+4n_c$ 个方程、 $2(n-1)+6n_c$ 个变量。根据控制方式可以消去 $2n_c$ 个变量,由此可见式(11)可解。又 f_1 为 (n_a-1) 维矩阵, Δx_1 也为 (n_a-1) 维矩阵,故 J_{11} 的逆矩阵存在; f_2 为 $6n_c$ 维矩阵, Δx_2 为 $8n_c$ 维矩阵, Δx_2 根据控制方式可以消去 $2n_c$ 维,故 J_{22} 的逆矩阵也存在。

将式(11)展开,即

$$\begin{cases} -(J_{11} \Delta x_1 + J_{12} \Delta x_2) = f_1 \\ -(J_{21} \Delta x_1 + J_{22} \Delta x_2) = f_2 \end{cases} \quad (12)$$

求解式(12)得到改进交替迭代求解法(简称改进法)的形式为

$$\begin{cases} \Delta x_1 = -(J_{11} - J_{12}J_{22}^{-1}J_{21})^{-1}(f_1 - J_{12}J_{22}^{-1}f_2) \\ \Delta x_2 = -(J_{22} - J_{21}J_{11}^{-1}J_{12})^{-1}(f_2 - J_{21}J_{11}^{-1}f_1) \end{cases} \quad (13)$$

从推导过程可以看出,该算法没有进行任何假设,在迭代求解的过程中完全计及了交直流系统间的相互影响,只是从数学表达形式上严格解除了交流变量和直流变量之间的耦合关系,因此,理论上它应该具有与统一法一致的精度和收敛性;同时矩阵 J_{11} 、 J_{12} 可以通过已有的纯交流程序计算获得,因此可以高效利用已有的纯交流系统潮流求解程序,程序编制工作量不大。

3 算例分析

为了验证本文算法的有效性,分别对 IEEE-14、IEEE-30、IEEE-57 节点的标准算例进行了仿真计算(电压和功率均为标么值)。图 2 为修改后的 IEEE-14 节点交直流混合系统,其中 VSC₁、VSC₂ 和 VSC₃ 分别连接于节点 12、13 和 14 上,参数为: $X_L=0.15$, $R=0.006$, 直流电阻 $R_d=0.03$, $X_f=0.01$ 。VSC₁ 采用定直流电压($U_{d1\text{ref}}=2.0000$)、定交流无功功率($Q_{s1\text{ref}}=0.2099$)控制;VSC₂ 采用定交流有功功率($P_{s2\text{ref}}=-0.3601$)、定交流无功功率($Q_{s2\text{ref}}=0.0187$)控制;VSC₃ 采用定交流有功功率($P_{s3\text{ref}}=-0.8663$)、定交流无功功率($Q_{s3\text{ref}}=-0.0864$)控制。

表 1、表 2 分别列出了 3 种方法的交流系统、直流系统潮流计算结果,从中可以看出改进法与统一法的计

表 1 交流系统潮流计算结果

Table 1 Results of power flows of AC system

节点	统一法		交替法		改进法	
	电压幅值	电压相角/(°)	电压幅值	电压相角/(°)	电压幅值	电压相角/(°)
1	1.0600	0	1.0600	0	1.0600	0
2	1.0100	-15.4579	1.0100	-15.4582	1.0100	-15.4579
3	1.0700	-13.0876	1.0700	-13.0878	1.0700	-13.0876
4	1.0556	-16.5137	1.0551	-16.5139	1.0556	-16.5137
5	1.0900	-16.5137	1.0900	-16.5139	1.0900	-16.5137
6	1.0431	-17.3509	1.0429	-17.3512	1.0431	-17.3509
7	1.0393	-16.8823	1.0395	-16.8825	1.0393	-16.8823
8	1.0498	-15.1272	1.0497	-15.1274	1.0498	-15.1272
9	1.0546	-14.1954	1.0547	-14.1955	1.0546	-14.1954
10	1.0475	-14.5171	1.0471	-14.5172	1.0475	-14.5171
11	1.0263	-17.1308	1.0267	-17.1310	1.0263	-17.1308
12	1.0284	-6.3732	1.0283	-6.3735	1.0284	-6.3732
13	1.0844	-5.4060	1.0843	-5.4061	1.0844	-5.4060
14	1.0632	-14.9864	1.0633	-14.9866	1.0632	-14.9864

表 2 直流系统潮流计算结果

Table 2 Results of power flows of DC system

换流器	方法	U_d	I_d	$\delta/(^\circ)$	M	P_s	Q_s
VSC ₁	统一法	2.0000	0.6186	10.3294	0.8221	1.2462	0.2099
	交替法	2.0000	0.6186	10.3287	0.8220	1.2456	0.2099
	改进法	2.0000	0.6186	10.3294	0.8221	1.2462	0.2099
VSC ₂	统一法	1.9920	-0.1811	-2.6368	0.8894	-0.3601	0.0187
	交替法	1.9920	-0.1810	-2.6370	0.8893	-0.3601	0.0187
	改进法	1.9920	-0.1811	-2.6368	0.8894	-0.3601	0.0187
VSC ₃	统一法	1.9894	-0.4375	-6.4296	0.8923	-0.8663	-0.0864
	交替法	1.9894	-0.4374	-6.4291	0.8924	-0.8663	-0.0864
	改进法	1.9894	-0.4375	-6.4296	0.8923	-0.8663	-0.0864

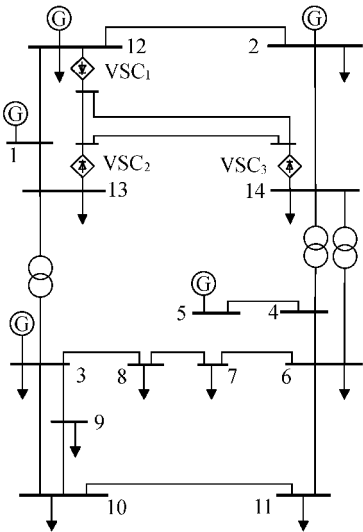


图 2 修改后的 IEEE-14 节点交直流混合系统

Fig. 2 Modified IEEE-14-bus AC-DC system

算结果一致,这是由于改进法完全计及了交直流系统间的相互影响,从数学表达形式上严格解除了交直流变量之间的耦合关系,因此从理论上讲,它应该具有与统一法相同的计算精度。同时,由于交替法迭代过程中没有考虑交直流变量之间的耦合,导致该算法的精度不及统一法和改进法,表中结果也说明了这一点。另外,由表 2 可见,改进法可收敛于各 VSC 的控制目标。VSC₁ 和 VSC₂、VSC₃ 输出电压相角分别滞后和超前相应节点的交流母线电压相角,从而使得 VSC₁ 从交流电网吸收有功功率,VSC₂、VSC₃ 则向交流电网注入有功功率。

保持其余控制参数不变,只改变 VSC₂ 的有功功率设定值,通过改进法求得的 VSC-MTDC 各直流变量以及控制变量的变化曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出,直流系统通过直流输电线路两端的电压差来传输有功

功率,同时由于直流输电线路的电阻较小,在传输不同有功功率的情况下两端直流电压差均较小,有功功率的变化量主要体现在直流电流相应的增量上.另外从结果可以看出,输送有功功率的变化主要由控制量中的 δ 进行控制,而 M 基本保持不变,这个与前面得到的 VSC-MTDC 的运行特性相一致,也从另外一个侧面验证了改进法的有效性.

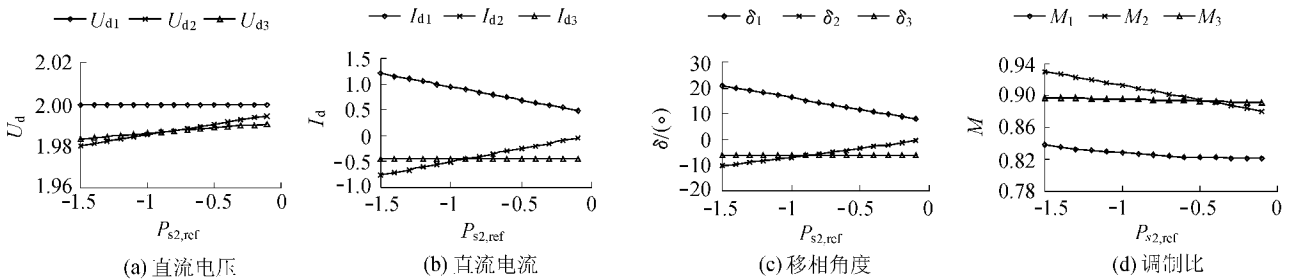


图 3 不同 $P_{s2,ref}$ 下 VSC-MTDC 各变量的变化曲线

Fig. 3 Curves for variables of VSC-MTDC under different $P_{s2,ref}$

保持其余控制参数不变,只改变 VSC₂ 的无功功率设定值,通过改进法求得的 VSC-MTDC 各直流变量以及控制变量的变化曲线如图 4 所示.由于有功功率设定值不变,因此两端直流电压和直流电流基本保持不变,无功功率的变化主要通过调节相应交流侧节点的电压幅值得以实现,所以主要由控制量中的 M 进行控制,但是从表 2 也可以看出,由于无功功率和 δ 还是存在一定的耦合作用,因此无功功率的变化也在一定程度上影响了 δ .

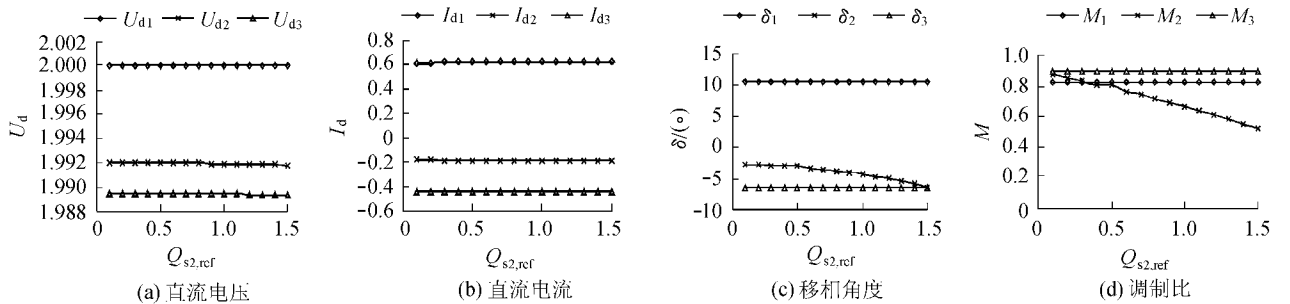


图 4 不同 $Q_{s2,ref}$ 下 VSC-MTDC 各变量的变化曲线

Fig. 4 Curves for variables of VSC-MTDC under different $Q_{s2,ref}$

由于 VSC₃ 有功功率和无功功率的设定值不变,所以其直流变量以及控制变量的值基本保持不变,与图 3、图 4 结果一致.图 3 和图 4 从另一个角度说明了改进法对于不同的控制目标均有良好的收敛性.

本文还对经过修改的 IEEE-30, IEEE-57 节点交直流混合系统进行潮流计算.表 3 给出了 3 个算例的 3 种潮流算法的计算性能比较,从计算时间上来看,改进法与其他 2 种算法处于同等数量级,且随着网络规模的增大,改进法依然是有效的,同时它的迭代次数没有受到明显的影响,因此改进法具有较强的实际应用价值,且程序的运行效率可满足在线实时计算的要求.

表 3 3 个算例下潮流算法的性能比较

Table 3 Comparison of performances among three kinds of power flow algorithms

算 例	统一法		交替法		改进法	
	迭代次数	迭代时间/s	迭代次数	迭代时间/s	迭代次数	迭代时间/s
IEEE-14	5	0.006 7	4	0.004 7	8	0.008 0
IEEE-30	5	0.032 3	4	0.020 3	9	0.045 2
IEEE-57	5	0.141 3	4	0.093 3	10	0.161 3

4 结 语

本文首先确定了 VSC-MTDC 的稳态模型,然后建立了含 VSC-MTDC 的交直流混合系统潮流计算的数学模型,并针对统一法和交替法存在的不足,提出了改进算法.改进算法从数学表达形式上严格解除了交流变量和直流变量之间的耦合关系,具有与统一法相当的精度和良好的收敛性.同时,改进算法可以高效利用已

有的纯交流系统潮流求解程序,大大降低了程序编制难度.测试结果表明,改进算法对于不同的控制目标、不同的控制方式组合以及不同的网络规模均是正确有效的.

参考文献:

- [1] 杨勇.高压直流输电技术发展与应用前景[J].电力自动化设备,2001,21(9):58-60.(YANG Yong. High voltage DC transmission technique and its future application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(9): 58-60. (in Chinese))
- [2] 赵晓君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004:1-25.
- [3] SCHETTLER F, HUANG H, CHRISTL N. HVDC transmission systems using voltage sourced converters design and applications[C]//IEEE PES Summer Meeting, Vol.2, Alberta, Canada, IEEE, 2000:715-720.
- [4] PILOTTOL A S, BIANCO A, WATANABE E H, et al. Back-to-back VSC devices: a new solution for the interconnection of asynchronous AC systems[C]//Cigre Session, Paris [s. n.], 2000:14-203.
- [5] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等.轻型高压直流输电技术的发展与展望[J].电力系统自动化,2003,27(4):71-81.(LI Geng-yin, LV Peng-fei, LI Guang-kai, et al. Development and prospects for HVDC light[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 71-81. (in Chinese))
- [6] 汤广福,贺之渊,滕乐天,等.电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J].电网技术,2008,32(22):39-44.(TANG Guang-fu, HE Zhi-yuan, TENG Le-tian, et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 39-44. (in Chinese))
- [7] 袁旭峰,程时杰.多端直流输电技术及其发展[J].继电器,2006,34(19):61-67.(YUAN Xu-feng, CHENG Shi-jie. Multi-terminal HVDC transmission technology and its development[J]. Relay, 2006, 34(19): 61-67. (in Chinese))
- [8] 张欢,刘天琪,李兴源,等.新型直流多端输电技术研究[J].四川电力技术,2007,30(6):1-5.(ZHANG Huan, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan, et al. Study on novel multi-terminal DC transmission technology[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2007, 30(6): 1-5. (in Chinese))
- [9] ZHANG Xiao-ping. Multi-terminal voltage-sourced converter-based HVDC models for power flow analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4):1877-1884.
- [10] LI Geng-yin, ZHOU Ming, HE Jie, et al. Power flow calculation of power systems incorporating VSC-HVDC[C]. International Conference on Power System Technology, Vol.2, Singapore, IEEE, 2004:1562-1566.
- [11] 郑超,盛灿辉.含VSC-HVDC的交直流混合系统潮流统一迭代求解算法[J].中国电力,2007,40(7):65-69.(ZHENG Chao, SHENG Can-hui. Uniform iterative power flow algorithm for systems equipped with VSC-HVDC[J]. Electric Power, 2007, 40(7): 65-69. (in Chinese))
- [12] 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 Xiao-xin, LI Ruo-mei, et al. Study on the steady characteristics and algorithm of power flow for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 1-5. (in Chinese))
- [13] 陈谦,唐国庆,王浔.多端VSC-HVDC系统交直流潮流计算[J].电力自动化设备,2005,25(6):1-6.(CHEN Qian, TANG Guo-qing, WANG Xun. AC-DC power flow algorithm for multi-terminal VSC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(6): 1-6. (in Chinese))

Modified power flow algorithm for hybrid AC-DC systems equipped with VSC-MTDC

YE Fang, WEI Zhi-nong, SUN Guo-qiang

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the steady model of voltage source converter based multi-terminal direct current (VSC-MTDC) transmission, a mathematical model for hybrid AC-DC power flow systems equipped with VSC-MTDC was derived. With regard to the shortcomings of two kinds of algorithms: the uniform iterative method and the alternative iterative method, a modified alternative iterative power flow algorithm was proposed. The proposed algorithm strictly canceled the coupling relation between AC and DC variables in the mathematical form, and it could be efficiently solved by means of the existing AC power flow programs so as to ensure the accuracy and convergence of the algorithm. The simulated results of test systems of IEEE-14, IEEE-30 and IEEE-57 show that the proposed mathematical model is effective.

Key words: DC transmission; voltage source converter; multi-terminal direct current; power flow algorithm