

多端 VSC-HVDC 系统交直流潮流计算

陈 谦,唐国庆,王 浔

(东南大学 电气工程系,江苏 南京 210096)

摘要:电压源换流器 VSC(Voltage Sourced Converter)与传统高压直流输电(HVDC)换流器在物理模型和工作原理上有本质区别,因此传统的交直流系统潮流计算方法不能在 VSC 构成的多端直流输电系统 VSC-MTDC(VSC Multi-Terminal HVDC)中直接使用。首先描述了 MTDC 潮流计算的数学模型,随后在综合 VSC 工作原理及控制方式的基础上,推导了适用于 VSC-MTDC 潮流计算的 VSC 数学模型。进而由换流器控制量 M (调制度)和 δ (PWM 相位角)的不同组合,列出了 4 种运行控制方案,并针对每种控制方案给出了其交直流潮流交替求解的接口方程。最后以一含 3 个 VSC 的系统为例,对其中 1 个 VSC 的不同运行控制方案进行潮流分析,结果表明采用交替算法的潮流算法交直流接口简单清晰、程序编写方便且通用性好。

关键词: VSC-HVDC; 多端直流输电; 潮流模型; 交替算法

中图分类号: TM 744

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)06-0001-06

0 引言

近年来,随着直流输电技术的不断发展和日臻完善,在更多的交流电力系统中出现了直流输电线路,并有进一步发展为多端直流输电系统 MTDC(Multi-Terminal HVDC)的趋势。与两端直流输电系统相比,MTDC 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。尤其是基于电压源换流器 VSC(Voltage Sourced Converter)的新型直流输电出现以后,这种趋势将更加明显。由于 VSC 构成的 VSC-MTDC 具有良好的运行可靠性和灵活性,因此成为了直流输电领域的重要研究方向。而包含 VSC-MTDC 的交直流系统潮流计算的分析研究也显得十分重要。含 VSC 的交直流混合潮流计算是分析 VSC-HVDC 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 VSC-HVDC 暂态特性和研究相应控制保护技术的重要环节。另外,对于研究包含 VSC-HVDC 设备的交流系统动态特性,以及 VSC-HVDC 设备对交流系统的附加控制,该潮流分析计算 also 具有重要意义。

传统交直流电力系统的潮流计算方法可以分为两大类:统一求解法和交替求解法。统一求解法将交流系统方程和直流系统方程联合求解,统一求出交流系统和直流系统的未知变量。而交替求解法则将直流系统潮流方程和交流系统潮流方程分开求解,并交替迭代,直到收敛为止。

对于仅含传统换流器的 MTDC 系统的潮流计算已经取得了比较丰富的研究成果^[1-4]。但是由于 VSC 取代了传统的 HVDC 换流器,两者在物理模型上有了

本质的区别,传统的交直流系统潮流计算方法不能在 VSC-MTDC 系统中直接使用,所以有必要对含 VSC-HVDC 设备的潮流计算进行详细的分析和研究。

本文在综合 VSC-HVDC 的工作原理及控制方式的基础上,推导出了适用于新型 HVDC 系统潮流计算的稳态数学模型,并分析了换流器等效注入功率法的计算方法。然后针对 VSC-MTDC 编写了相应的交直流潮流交替计算程序。采用交替算法的交直流潮流程序具有结构清晰、编程简单、程序通用性好等特点。随后本文用一个实际算例证明了上述模型和算法的有效性与正确性。

1 VSC-HVDC 潮流计算的数学模型

1.1 潮流计算的数学描述

交直流混合系统由交流系统和直流系统组成。本文采用换流变压器初级绕组所联接的交流母线为交流系统和直流系统的接口,如图 1 所示。

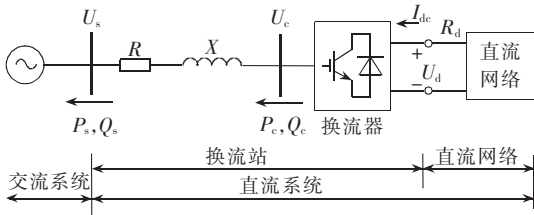


图 1 交直流系统示意图

Fig.1 The sketch diagram of AC-DC system

图中由 VSC 和换流变压器组成了换流站,而换流站与直流网络又组成了直流系统。交流系统部分的潮流计算模型和纯交流系统的模型类似,仍用节点功率方程表示。以下推导的公式中,下标 s 表示换流变压器的交流系统侧,下标 c 表示换流变压器的换流器侧,而上标 s 表示节点指定功率。对于交流

系统中并不直接和换流站联接的交流系统一般节点(用下标 a 表示),其节点功率偏差方程和纯交流系统的完全相同,即

$$\Delta P_a = P_{sa}^s - P_{sa}(U, \theta) \quad (1)$$

$$\Delta Q_a = Q_{sa}^s - Q_{sa}(U, \theta) \quad (2)$$

而对于直接和换流站联接的交流系统特殊节点(用下标 t 表示),其节点功率偏差方程为

$$\Delta P_t = P_{st}^s + P_{st}(U_t, X_{DC}) - P_{st}(U, \theta) \quad (3)$$

$$\Delta Q_t = Q_{st}^s + Q_{st}(U_t, X_{DC}) - Q_{st}(U, \theta) \quad (4)$$

$P_{st}(U_t, X_{DC})$ 和 $Q_{st}(U_t, X_{DC})$ 是换流器注入交流母线的有功、无功功率,它们是其相应交流母线电压 U_t 和直流系统变量 X_{DC} 的函数,其中 X_{DC} 为

$$X_{DC} = [U_d \ I_{dc} \ M \ \delta]^T \quad (5)$$

式中 U_d 为换流器直流电压; I_{dc} 为换流器直流电流; M 为调制度; δ 为 PWM 相位角。

式(1)和式(2)组成了某一般节点的交流功率方程,而式(3)和式(4)组成了某特殊节点的交流功率方程。因此整个多端交直流系统的功率方程可表示为

$$F(U, \theta, X_{DC(1)}, \dots, X_{DC(n)}) = 0 \quad (6)$$

式中 U 为交流系统节点电压向量; θ 为功角向量; $X_{DC(i)}(i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 个换流器的直流变量,若有 n 个特殊节点,则公式中应包含 n 个类似的直流系统变量。

关于直流系统的潮流计算模型,可表示为

$$G(U_t, X_{DC(1)}, \dots, X_{DC(n)}) = 0 \quad (7)$$

式中 U_t 为所有特殊节点的电压向量。

式(7)的方程可分为 VSC 控制方程和直流系统约束方程。因而交直流潮流计算可表述为由式(6)和(7)构成的方程组的求解问题,即求出能够同时满足式(6)和(7)的系统状态变量 X_{DC} , 以及交流系统变量 U, θ 。

1.2 VSC-HVDC 换流器模型

在交直流电力系统潮流计算中,对 VSC 采用了如下几个基本假设:

- VSC 母线的三相交流电压是对称平衡正弦波;
- VSC 本身的运行是完全对称平衡的;
- 换流器内部损耗和换流变压器损耗由电阻 R 模拟,如图 1 所示,为了分析简便,假定 $R=0$,即不考虑损耗;
- 以换流器的额定容量为基准值,换流变压器的电抗标么值约为 0.1~0.2;
- 直流电流和直流电压是平直的。

图 2 为 VSC 单个节点电压矢量图。

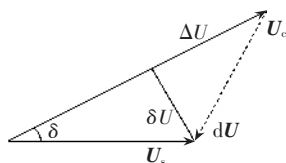


图 2 VSC 的电压矢量图

Fig.2 Voltage vector diagram of VSC

令 $U_c = U_c \angle 0^\circ$, 由图 2 可得:

$$\Delta U = U_c - U_s \cos \delta = \frac{P_c R + Q_c X}{U_c} \quad (8)$$

$$\delta U = U_s \sin \delta = \frac{P_c X - Q_c R}{U_c} \quad (9)$$

由此可得下面的换流器控制方程:

$$P_c R + Q_c X = U_c^2 - U_c U_s \cos \delta \quad (10)$$

$$P_c X - Q_c R = U_c U_s \sin \delta \quad (11)$$

式中 P_c, Q_c 分别为换流器发出的有功、无功功率; U_c 与控制变量 M 成正比。

若不考虑换流器损耗,即 R 为 0,则由式(10)和(11)可得:

$$Q_c X = U_c^2 - U_c U_s \cos \delta \quad (12)$$

$$P_c X = U_c U_s \sin \delta \quad (13)$$

$$\sin \delta = P_c X / (U_c U_s) \quad (14)$$

$$\cos \delta = -(Q_c X - U_c^2) / (U_c U_s) \quad (15)$$

因此,控制变量 δ 可表示为

$$\delta = \arctan [P_c X / (U_c^2 - Q_c X)] \quad (16)$$

换流器端的无功功率 Q_c 为

$$Q_c = (U_c^2 - \sqrt{U_s^2 U_c^2 - P_c^2 X^2}) / X \quad (17)$$

因此换流器注入交流系统的有功功率 P_s 和无功功率 Q_s 分别为

$$P_s = P_c \quad (18)$$

$$Q_s = Q_c - (P_c^2 + Q_c^2) X / U_c^2 \quad (19)$$

另外换流器必须满足:

$$P_c = U_d I_{dc} \quad (20)$$

$$U_c = k M U_d \quad (21)$$

式中 k 为直流电压利用率; M 为调制度。

将式(20)和(21)分别代入式(18)和(19),可得 VSC 注入交流系统的有功和无功功率分别为

$$P_{st} = f_p(U_{st}, U_d, I_{dc}, M, \delta) = f_p(U_{st}, X_{DC}) \quad (22)$$

$$Q_{st} = f_q(U_{st}, U_d, I_{dc}, M, \delta) = f_q(U_{st}, X_{DC}) \quad (23)$$

1.3 VSC-HVDC 换流器运行控制方案

VSC-HVDC 采用全控型开关器件,每个换流器有 2 个控制量,即调制度 M 以及 PWM 相位角 δ ,并可达到独立调节换流器有功和无功功率的目的^[5]。

由于 VSC 换流器具有 2 个控制量,可同时控制直流侧某一状态变量(直流电压、直流电流或直流功率)和交流侧某一状态变量(交流侧电压或交流侧无功),故 VSC-HVDC 换流器运行控制可分为 4 种:

a. VSC 按给定控制参数运行,即调制度 M 以及 PWM 相位角 δ 都为确定量;

b. PWM 相位角 δ 为确定量,而交流侧控制交流电压或注入交流系统的无功功率为给定值;

c. 调制度 M 为确定量,而直流侧控制直流电压、直流电流或直流功率为给定值;

d. VSC 按给定控制目标运行,即交流侧控制注入系统的无功或交流电压为恒定值,而直流侧控制直流电压、直流电流或直流功率为给定值。

1.4 VSC-MTDC 直流网络模型

对于复杂的多端直流网络,用节点方程表示为

$$\mathbf{I}_{dc} = \mathbf{G} \mathbf{U}_d \quad (24)$$

式中 $\mathbf{G}$ 是直流网络的节点导纳矩阵; $\mathbf{I}_{dc}$ 为直流电流向量; $\mathbf{U}_d$ 为直流电压向量。

对于端数不多的直流网络,则采用回路方程更为简洁方便。例如对于两端直流网络,即有

$$I_{dc1} = -I_{dc2}, \quad U_{d1} - U_{d2} = R_d I_{dc1} \quad (25)$$

式中 R_d 为直流线路电阻。

于是直流网络方程可概括为

$$\mathbf{f}_d(\mathbf{U}_d, \mathbf{I}_{dc}) = 0 \quad (26)$$

1.5 交直流潮流计算方法

与传统交直流潮流计算方法相似,包含 VSC-HVDC 的交直流潮流计算也可以分为 2 种,即交替求解法和统一求解法^[6,7]。本文将只考虑交直流潮流的交替解法。交替求解法是指交替计算交流和直流系统的状态变量,并相互迭代,直至交流系统和直流系统的状态变量都收敛。在迭代计算过程中,交流系统潮流方程组和直流系统方程组分别单独求解。在求解交流系统运行变量时,将直流系统的换流器处理为交流节点上的一个等效 PQ 负荷。而在求解直流系统方程组时,将交流系统模拟成加在换流器母线上的一个恒定电压。在每次迭代过程中,由交流系统方程组的解得到换流站交流母线电压值,而由直流系统方程组的解为下一次求解交流系统方程组提供等效的 P, Q 负荷值。

图 3 为交直流潮流交替解法的接口示意图。



图 3 交直流潮流交替解法接口示意图

Fig.3 The interface of alternant AC-DC power flow calculation

迭代计算过程中,交流系统方程组的求解为随后直流系统方程组的求解建立换流站交流母线电压值 U_{st} ,而直流系统方程组的求解又为随后交流系统方程组的求解提供换流站的等效负荷值 P_{st}, Q_{st} 。由于交流和直流系统方程组在迭代过程中分别单独求解,可以采用任何一种有效的解法计算交流系统潮流。至于直流系统方程组,则可以采用牛顿法或高斯-塞德尔法求解。

由于直流系统包含了换流器以及直流网络,因此可以进一步将换流器方程以及直流网络方程分开求解。由于 M 和 δ 为换流器控制变量,而 U_d 和 I_{dc} 为直流网络变量,因此对于一个包含 n 个 VSC 的多端直流系统,就有 $4n$ 个直流系统变量。而换流器本身具有 2 个独立的控制方程,另外换流器两端直流功率受到一定约束,因此可以消去 $3n$ 个变量,所以最终剩下的 n 个变量可由直流网络求解。一般而言,求解直流网络时,若 VSC 直流侧不控制直流电压,

则通过求解换流器控制方程和约束方程,可以求出该换流器注入直流网络的电流或功率,而待求量为该换流器直流电压;若换流器控制直流电压恒定,则待求量为该换流器直流电流。由于该直流网络方程组可能是非线性的(功率注入量),因此求解方法仍可以采用牛顿法或高斯-塞德尔法。下面将具体讨论各种运行控制方案下的接口方程。

2 交直流潮流交替求解的接口方程

2.1 换流器按给定控制参数值运行

VSC 按给定控制参数运行时,调制度 M 以及 PWM 相位角 δ 都为确定量。

计算交流系统的等效注入功率 P_s, Q_s 时,交流电压 U_s 和直流电压 U_d 为已知量。由式(21)可以得到换流器端交流电压 U_c 。因此换流器直流功率 P_c 为

$$P_c = U_c U_s \sin \delta / X \quad (27)$$

随后可由式(17)得到换流器端的无功功率 Q_c 。再由公式(19)可得到交流系统端等效注入无功功率 Q_s 。因为换流器没有损耗,即注入交流系统的有功功率 P_s 与 P_c 相等,从而得到 VSC 注入交流系统的等效功率 P_s 。

交流系统潮流计算结束后,可得更新后的交流系统端电压 U_s 。换流器端的无功功率 Q_c 为

$$Q_c = Q_s + (P_s^2 + Q_s^2)X / U_s^2 \quad (28)$$

换流器直流功率 P_c 与 P_s 相等,因此可得换流变压器的换流器端交流电压 U_c 为

$$U_c = \sqrt{\frac{P_c^2 + Q_c^2}{Q_c - Q_s} X}, \quad P_s^2 + Q_s^2 > 0 \quad (29)$$

或为

$$U_c = U_s, \quad P_s^2 + Q_s^2 = 0 \quad (30)$$

再由式(21)可得直流端电压为

$$U_d = U_c / (kM) \quad (31)$$

换流器对直流网络的注入电流 I_{dc} 为

$$I_{dc} = P_c / U_d = U_s kM \sin \delta / X \quad (32)$$

式中 U_d 为上一次求解直流网络方程所得直流电压。

可见,在这种控制方式下,直流注入电流与交流母线电压成正比。经过直流网络计算后,可得到用于计算下一次交流潮流的直流电压 U_d 。

2.2 PWM 相位角 δ 按给定控制参数值运行

PWM 相位角 δ 为确定量,而交流侧控制交流电压或注入交流系统的无功功率为给定值,因此分别讨论这 2 种情况下的接口方程。

2.2.1 注入交流系统的无功功率 Q_s 为恒定值

计算交流系统的等效注入功率 P_s 时,交流电压 U_s 、直流电压 U_d 以及 PWM 相位角 δ 为已知量。

$$Q_s = (U_s U_c \cos \delta - U_s^2) / X \quad (33)$$

换流器端交流电压 U_c 为

$$U_c = (Q_s X + U_s^2) / (U_s \cos \delta) \quad (34)$$

等效注入有功功率 P_s 为

$$P_s = P_c = (U_c U_s \sin \delta) / X \quad (35)$$

从而得到换流器对交流系统的等效注入功率。

交流系统潮流计算结束后,可以得到更新后的交流系统端电压 U_s ,并由式(28)得到换流器端的无功功率 Q_c 。随后可由式(29)或(30)得到更新后的换流器端交流电压 U_c 。再由式(35)可以得到换流器直流功率 P_c ,然后再次求解直流网络方程,得出用于下一次交流潮流计算的直流电压 U_{d0} 。

2.2.2 交流侧控制交流电压为给定值

此时,由于换流变压器交流母线处的电压为恒定值,因此求解交流系统潮流时,该节点应该表示为 PV 节点。求解交流系统方程时, U_d, U_s, Q_s 和 PWM 相位角 δ 为已知量。因此仿照 2.2.1 情况的计算方法,可以求出换流器注入交流系统的有功功率 P_s 。

求解直流系统方程时, U_s, P_s, Q_s 和 PWM 相位角 δ 为已知量,因此仿照 2.2.1 运行方式下的计算方法,可以求出换流器端交流电压 U_c 以及换流器直流功率 P_c ,并通过求解直流网络方程得出用于下一次交流潮流计算的换流器直流电压 U_{d0} 。

2.3 调制度 M 按给定控制参数值运行

调制度 M 为确定量,直流侧控制直流电压、直流电流或直流功率为给定值。分别讨论这 3 种情况下的接口方程。

2.3.1 直流侧控制直流电压 U_d 恒定

计算交流系统的等效注入功率 P_s, Q_s 时,交流电压 U_s 、直流电压 U_d 、直流电流 I_{dc} 以及调制度 M 为已知量。由式(20)可以求出换流器直流功率 P_c 以及注入交流系统的有功功率 P_s ,由式(21)可以求出换流器端交流电压 U_c 。然后由式(27)可以求出 PWM 相位角 δ ,并由式(17)可求出换流器端无功功率 Q_c ,再由式(19)求出换流器注入交流系统的无功功率 Q_s 。

由于换流器直流侧控制直流电压 U_d 恒定,因此求解直流网络时不需要该节点的注入电流或功率,因此下一次求解交流网络时,仍可采用上述步骤。

2.3.2 直流侧控制直流电流 I_{dc} 恒定

计算交流系统的等效注入功率 P_s, Q_s 时,交流电压 U_s 、直流电压 U_d 、直流电流 I_{dc} 以及调制度 M 为已知量,可仿照 2.3.1 运行方式下求解等效注入功率的方法。

由于换流器直流侧控制直流电流 I_{dc} 恒定,因此求解直流网络时该节点的注入电流已知,不需要根据换流器控制方程求解。

2.3.3 直流侧控制直流功率 P_c 恒定

此时计算交流系统的等效注入功率 P_s, Q_s 时,交流电压 U_s 、直流电压 U_d 、直流功率 P_c 以及调制度 M 为已知量。由式(21)可以求出换流器端交流电压 U_c 。然后由式(17)可求出换流器端无功功率 Q_c ,再由式(19)求出换流器注入交流系统的无功功率 Q_s 。而换流器注入交流系统的有功功率 P_s 与 P_c 相等。

同样,由于换流器直流侧控制直流功率 P_c 恒定,因此求解直流网络时该节点的注入功率已知,不需要根据换流器控制方程求解。

2.4 换流器按给定控制目标运行

换流器按给定控制目标运行时交流侧控制注入系统的无功或交流端电压为恒定值,而直流侧控制直流电压、直流电流或直流功率为给定值。若换流器交流侧控制无功恒定,则计算交流系统潮流时该节点表示为 PQ 节点;若换流器交流侧控制电压恒定,则计算交流系统潮流时该节点表示为 PV 节点。

3 交直流潮流交替求解过程

确定交直流潮流的接口方程和迭代步骤后,就可以用交替求解交流系统潮流和直流网络方程的方法求解交直流系统潮流。计算交流系统潮流时,可以采用任何现有的潮流计算方法,而直流网络方程可以采用牛顿法或高斯-塞德尔法。图 4 为交直流潮流交替算法的流程。

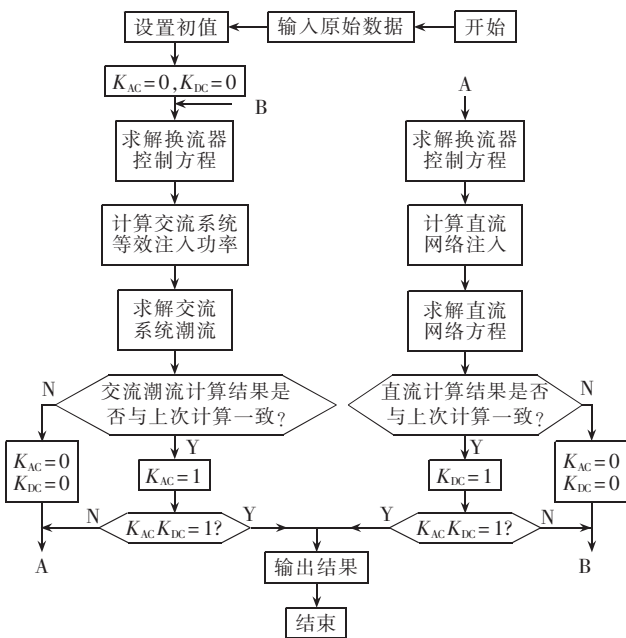


图 4 交直流潮流交替解法的流程图

Fig.4 The flowchart of alternant AC-DC power flow calculation

对于多端系统而言,最常见的运行方式为一个换流器控制直流电压,而其余的控制器控制直流电流或直流功率恒定。若所有换流器直流侧控制目标恒定,即所有换流器直流侧控制直流电流、直流电压或直流功率恒定,则直流网络的运行参数是唯一确定的,且不受交流系统运行状态影响,从而直流网络只需要计算一次,就可以得到固定不变各换流器直流电压和直流电流。交直流潮流的算法流程也可简化为图 5 所示。

进一步而言,若所有换流器直流侧只控制直流电压或直流电流恒定,则由于直流网络方程是线性的,因此可以采用线性方程组的解法。

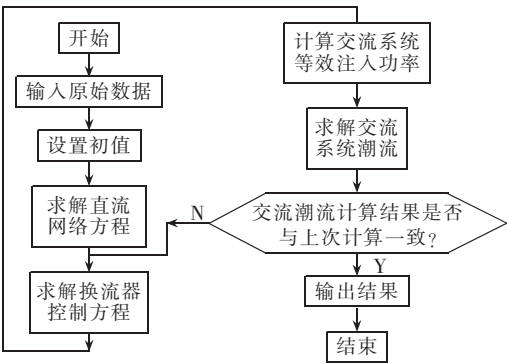


图 5 交直流潮流交替解法流程图

Fig.5 The simplified flowchart of alternant AC-DC power flow calculation

4 算例分析

下面用一个包含 3 个 VSC 的系统为例进行算法验证。系统接线图如图 6 所示。

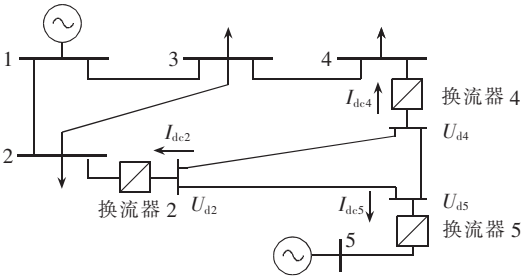


图 6 三端 VSC 系统接线图

Fig.6 The system diagram of 3-terminal VSC-MTDC

图中换流器 2,4,5 都为 VSC,其高压侧分别接于交流母线 2,4,5。交流母线 1~4 组成了交流系统 1,交流母线 5 用于模拟交流系统 2,交流系统 1 与交流系统 2 相互独立,交流系统 2 的系统电抗为 0。文中给出的参数都为标么值。

交流线路参数为: L_{12} 的阻抗 $Z_{12}=0.02+j0.06$; L_{13} 的阻抗 $Z_{13}=0.08+j0.24$; L_{23} 的阻抗 $Z_{23}=0.06+j0.18$; L_{34} 的阻抗 $Z_{34}=0.01+j0.03$ 。交流负荷参数为:交流负荷 $S_2=-0.2-j0.2$; $S_3=0.45+j0.15$; $S_4=0.4+j0.05$ 。直流线路的参数为: L_{24} 的电阻 $R_{24}=0.06$; L_{25} 的电阻 $R_{25}=0.04$; L_{45} 的电阻 $R_{45}=0.08$ 。

换流器 2,4,5 的参数一致;换流器直流电压利用率为 1;换流变压器的电抗 $X_T=0.1$;忽略换流器的有功损耗,即换流变压器的电阻 $R_T=0$ 。交流母线 1 为交流系统 1 的平衡节点,电压 $U_1=1.06$ 。

换流器 2 直流侧控制直流侧电压为恒定值($U_{d2}=1.006$),交流侧控制注入交流系统 1 的无功功率为恒定值($Q_{s2}=-0.213930$);换流器 5 直流侧控制直流电流为恒定值($I_{dc5}=0.6$),交流侧控制注入交流系统 2 的无功功率为恒定值($Q_{s5}=0.1$)。下面将对换流器 4 的不同运行控制方案进行潮流分析。交流母线除了平衡节点和 PV 节点以外,所有的节点电压初始值都为 1.0;对于直流母线,除了节点电压受控制的节点以外,所有节点初始电压为 1.0。

4.1 换流器 4 按给定控制参数运行

换流器 4 调制度 M 及 PWM 相位角 δ 都为确定量, $M=1.0$, $\sin \delta=0.0207$ 。程序流程见图 4,交流潮流采用直角坐标系的牛顿-拉夫逊法。交流母线电压计算结果见表 1。交直流系统间相互迭代 8 次。

表 1 交流节点电压值(1)

Tab.1 The voltages of AC buses(1)

节点	节点电压 /p.u.	电压模值 /p.u.	功角 /p.u.
1	1.060 000+j0.000 000	1.060 000	0.000 000
2	1.032 792-j0.046 229	1.033 826	-0.044 731
3	0.993 689-j0.081 262	0.997 006	-0.081 597
4	0.988 861-j0.085 998	0.992 593	-0.086 749

直流母线电压: $U_{d2}=1.006$, $U_{d4}=0.989781$, $U_{d5}=0.984594$ 。换流器直流电流: $I_{dc2}=-0.805467$, $I_{dc4}=0.205467$, $I_{dc5}=0.6$ 。直流线路电流: $I_{24}=0.270311$, $I_{25}=0.535156$, $I_{45}=0.064844$ 。

4.2 换流器 4 PWM 相位角 δ 按给定控制参数运行

换流器 4 的 PWM 相位角 δ 为确定量,交流侧控制注入交流系统的无功功率为给定值。其中 $\sin \delta=0.0207$,交流系统的无功功率 $Q_{s4}=0.061628$ 。程序流程图如图 4 所示,交流潮流采用直角坐标系的牛顿-拉夫逊法。交流母线电压的计算结果如表 2 所示。交直流系统之间相互迭代次数为 4 次。

表 2 交流节点电压值(2)

Tab.2 The voltages of AC buses(2)

节点	节点电压 /p.u.	电压模值 /p.u.	功角 /p.u.
1	1.060 000+j0.000 000	1.060 000	0.000 000
2	1.035 532-j0.047 233	1.036 609	-0.045 581
3	1.005 159-j0.084 207	1.008 680	-0.083 579
4	1.003 127-j0.089 785	1.007 137	-0.089 260

直流母线电压: $U_{d2}=1.006$, $U_{d4}=0.989459$, $U_{d5}=0.984486$ 。换流器直流电流: $I_{dc2}=-0.813537$, $I_{dc4}=0.213537$, $I_{dc5}=0.6$ 。直流线路电流: $I_{24}=0.275691$, $I_{25}=0.537846$, $I_{45}=0.062154$ 。

4.3 换流器 4 调制度 M 按给定控制参数运行

换流器 4 调制度 M 为确定量,而直流侧控制电流为给定值,其中 $M=1.0$,直流电流 $I_{dc4}=0.21128$ 。程序流程图见图 5,交流潮流采用直角坐标系的牛顿-拉夫逊法。交流母线电压的计算结果如表 3 所示。直流网络只需计算一次,交流系统与直流系统(换流器)之间的相互迭代次数为 8 次。

表 3 交流节点电压值(3)

Tab.3 The voltages of AC buses(3)

节点	节点电压 /p.u.	电压模值 /p.u.	功角 /p.u.
1	1.060 000+j0.000 000	1.060 000	0.000 000
2	1.032 696-j0.046 339	1.033 735	-0.044 842
3	0.993 705-j0.080 696	0.996 976	-0.081 030
4	0.988 892-j0.085 243	0.992 559	-0.085 988

直流母线电压: $U_{d2}=1.006$, $U_{d4}=0.989549$, $U_{d5}=0.984516$ 。换流器直流电流: $I_{dc2}=-0.811280$, $I_{dc4}=0.211280$, $I_{dc5}=0.6$ 。直流线路电流: $I_{24}=0.274187$, $I_{25}=0.537093$, $I_{45}=0.062907$ 。

4.4 换流器 4 按给定控制目标运行

当换流器 4 按给定控制目标运行,交流侧控制注入系统无功为恒定值,直流侧控制电流为给定值,其中 $Q_{s4}=0.063\ 180$,直流电流 $I_{dc4}=0.211\ 28$ 。程序流程图见图 5,交流潮流采用直角坐标系的牛顿-拉夫逊法。交流母线电压的计算结果如表 4 所示。

表 4 交流节点电压值(4)
Tab.4 The voltages of AC buses(4)

节点	节点电压/p.u.	电压模值/p.u.	功角/p.u.
1	1.060 000+j0.000 000	1.060 000	0.000 000
2	1.035 591-j0.047 197	1.036 666	-0.045 544
3	1.005 240-j0.084 455	1.008 781	-0.083 818
4	1.003 223-j0.090 115	1.007 262	-0.089 585

直流侧计算结果与 4.3 例中相同。

换流器 4 注入交流母线 4 的有功和无功功率都为恒定值,因此换流器等效于常规交流潮流计算中的负荷功率。故直流网络方程只需计算一次就可求出注入功率值,且交直流潮流无需相互迭代。

5 结论

本文在综合 VSC-HVDC 的工作原理及控制方式的基础上,完整地导出了新型 HVDC 系统潮流计算的数学模型,并设计了基于等效注入功率法的潮流计算方法。然后将该方法推广到多端直流系统,并编写了相应的交直流潮流交替计算方法进行验证。算例分析表明:采用交替解法的潮流算法具有交直流接口简单清晰、程序编写方便、程序通用性好等特点。

参考文献:

[1] 汪馥英. 多端 DC-AC 系统的潮流计算[J]. 华中理工大学学报,1990,18(6):81-86.
WANG Fu-ying. Load flow calculation for a multi-terminal DC-AC system [J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology**, 1990, 18(6): 81-86.

[2] 陆进军,黄家裕. 电力系统多端直流(MTDC)潮流算法改进[J]. 电力系统及其自动化学报,2000,12(5):4-6,18.
LU Jin-jun,HUANG Jia-yu. An improved multi-terminal HVDC power flow method[J]. **Proceedings of the EPSA**, 2000,12(5):4-6,18.
[3] 闫晓霞. 一种多端交直流混合输电系统的潮流算法[J]. 电力学报,1997,12(2):32-35,70.
YAN Xiao-xia. An algorithm for power flow in multi-terminal AC/DC transmission system[J]. **Journal of Electric Power**, 1997, 12(2):32-35,70.
[4] 陆进军,黄家裕. 一种新的电力系统多端直流(MTDC)潮流算法[J]. 电力系统及其自动化学报,2000,12(3):18-20,30.
LU Jin-jun,HUANG Jia-yu. A new multiterminal MTDC power flow algorithm [J]. **Proceedings of the EPSA**, 2000, 12(3): 18-20,30.
[5] JIANG Hong-bo,EKSTROM A. Multiterminal HVDC systems in urban areas of large cities [J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**,1998,13(4):1278-1284.
[6] 丁奇锋,张伯明. EMS 中含 FACTS 元件的电力系统潮流分析[J]. 电力系统自动化,1998,22(6):39-42.
DING Qi-feng,ZHANG Bo-ming. Power flow analysis in EMS for the power system with FACTS devices[J]. **Automation of Electric Power Systems**,1998,22(6):39-42.
[7] 段献忠,陈金富,凌 煦. 潮流计算中 FACTS 元件模型选择研究[J]. 电工技术学报,1999,14(3):65-69.
DUAN Xian-zhong,CHEN Jin-fu,LING Xu. Study on models of FACTS devices in power flow calculation[J]. **Journal of Electrician Technique**,1999,14(3):65-69.
(责任编辑:李育燕)

作者简介:

陈 谦(1972-),男,江苏南京人,博士研究生,主要从事电力系统控制、电力电子技术、高压直流输电的研究(E-mail: qianchen@seu.edu.cn);
唐国庆(1937-),男,上海人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统控制、人工智能在电力系统中应用等;
王 浔(1975-),男,湖南双峰人,硕士研究生,主要从事电力电子技术在电力系统中应用的研究。

AC-DC power flow algorithm for multi-terminal VSC-HVDC systems

CHEN Qian,TANG Guo-qing,WANG Xun

(Department of Electrical Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: Since there is essential difference between VSC (Voltage Sourced Converter) and traditional HVDC converters in both physical model and operating principle,the traditional power flow algorithm for AC-DC system can't be directly used in VSC-MTDC(VSC Multi-Terminal HVDC). The mathematical model of MTDC power flow calculation is described. The VSC model for VSC-MTDC power flow calculation is deduced based on the operating principle and control scheme of VSC. According to the combinations for control variables M (modulating degree) and δ (PWM phase), four kinds of control schemes are brought forward,and corresponding interface functions for AC-DC alternant calculation are provided. Taking a three-VSC system as an example,the power flows are analyzed with one VSC controlled by different schemes. The results show that the universal alternant power flow calculation is simple in interface and easy to program.

Key words: VSC-HVDC; VSC-MTDC; power flow model; alternant algorithm