

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.01.009

基于混合换流器的多端交直流系统潮流计算

熊月清^{1,2}, 李峰², 徐鹏², 王卓^{1,2}, 许国胜¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘要:基于电网换相换流器(LCC)和基于电压源换流器(VSC)在稳态模型和工作原理上有本质的不同,当这2种换流器混合运用于同一个多端直流输电系统,系统的稳态数学模型和潮流计算方法也发生了相应的变化。首先描述了该混合多端交直流系统的稳态模型,然后在综合考虑2种换流器工作原理的基础上,导出了该混合系统的潮流计算数学模型。为实现系统的功率平衡和保证各换流器有一定的裕度配合运行,分析了混合系统控制方式的配置原则,利用牛顿法得到了一种适用于该系统的交替求解算法,并给出了算法的具体实现步骤。最后,分别通过两端和多端的混合直流输电系统算例验证了该算法的准确性和有效性。

关键词:电网换相换流器;电压源换流器;混合多端直流输电;潮流计算;交替迭代法

中图分类号:TM734

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)01-0064-07

0 引言

基于电网换相换流器(line commutated converter, LCC)的传统高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)作为一项日趋成熟的输电技术,具有造价低、损耗小、可靠性高等优点,在远距离、大容量输电、海底电缆送电、交流系统间非同步互联等方面得到了广泛的应用^[1-3]。然而,由于技术及经济的原因,LCC-HVDC难以应用于近距离小容量的输电场合,在受端电网中存在换相失败的风险,且不适合向弱交流系统或无源网络送电,导致其进一步发展受限^[4-5]。

20世纪90年代以来,电力电子技术得到了迅猛发展,以全控型器件作为开关的电压源换流器(voltage source converter, VSC)逐步成熟,并在高压直流输电中得到了广泛应用。由VSC构成的高压直流输电系统(VSC-HVDC)具有独立控制有功无功、不存在换相失败、可为无源孤岛供电等诸多优点,且易于构成多端直流输电系统(multi-terminal direct current, MTDC),因此具有较好的发展前景^[6-8]。但是,与LCC相比,VSC存在运行损耗大、制造成本高、技术成熟度低等缺点。因此,为了结合二者的优点,实现降低制造成本、避免换相失败、扩展应用场合等目标,送端采用基于LCC的常规直流,受端采用基于VSC柔性直流的混合直流输电技

术已受到越来越多的关注。

文献[9—10]研究了混合双端直流输电系统的拓扑结构和运行机理,仿真验证了系统的可行性和有效性;文献[11]研究分析了混合两端直流输电系统向无源负荷供电的相关特性;文献[12—13]研究了混合多端直流输电系统应用于实际电网的可行性和优越性;文献[14]研究建立了一种电网换相换流器-模块化多电平换流器(line commutated converter-modular multilevel converter, LCC-MMC)的混合直流输电系统,设计了相应的控制和启动策略;文献[15]介绍了一种将现有常规直流受端换流站改造为柔性直流换流站的方案,并仿真验证了该方案的有效性和准确性;文献[16]研究了常规直流和柔性直流2种方案对受端广东电网的稳定性的影响,研究表明在同等无功补偿的情况下,采用VSC换流器能够提高系统的稳定性;文献[17]提出了一种针对LCC-MMC混合直流输电系统改进环流控制策略;文献[18]针对混合直流输电系统中交流系统不对称故障引起的直流功率下降问题,提出了一种提升直流功率控制策略。虽然LCC-VSC混合直流输电系统在拓扑结构、运行特性、控制策略及其工程应用等方面已有较多的研究成果,但是至今为止针对该混合多端交直流系统完备的潮流计算算法研究还很少。

针对该种混合多端直流输电系统,在综合考虑2种换流器稳态工作原理和控制方式^[19-20]的基础上,导出了该LCC与VSC混合多端交直流系统的潮流计算数学模型,进而提出了一种适用于该混合系统的交替求解算法。最后,通过修改后的EPRI-7节点混合两端直流系统算例和修改后的IEEE-14混合

收稿日期:2019-07-13;修回日期:2019-09-02

基金项目:国家重点研发计划资助项目“大电网智能调度与安全预警关键技术研究及应用”(2017YFB0902600);国家电网有限公司总部科技项目“调度控制系统测试验证与一体化运维关键技术研究与应用”

多端直流系统算例验证了模型和算法的有效性与准确性。

1 混合系统潮流计算的数学模型

1.1 拓扑结构

混合直流输电系统的拓扑主要分为3种类型：两端型、多端型和网络型。目前研究者大多致力于混合两端型的研究，且该系统已运用于实际工程。图1给出了两端单极混合直流输电系统拓扑结构。整流侧采用传统的LCC换流器，由6组晶闸管与二极管反并联组成的12脉动换流桥臂构成，包含了滤波器、换流变压器和无功功率补偿设备等。逆变侧采用的是VSC换流器，由换流桥、换流电抗器和交流滤波器等组成。

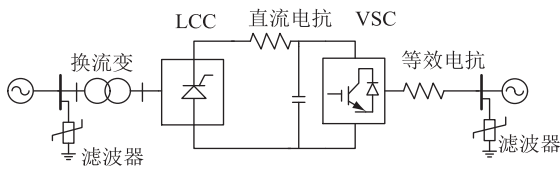


图1 混合两端直流输电系统拓扑结构

Fig.1 Hybrid two-terminal DC transmission system topology

假设混合多直流输电系统中，换流器的总数为 n_c ，其中VSC的个数为 n_v ，LCC的个数为 n_l ， $n_c = n_v + n_l$ ，下面对不同换流端的潮流计算模型进行分类讨论。

1.2 采用LCC换流端的潮流计算模型

在混合多端直流输电系统中，各个换流器之间通过直流网络连接，若第 i 换流器采用的是LCC，则其单相稳态模型如图2所示。

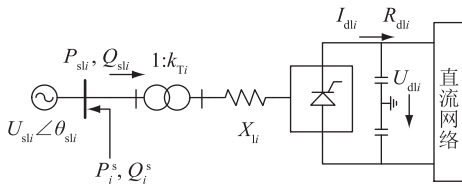


图2 采用LCC换流端的稳态模型

Fig.2 Steady-state model using LCC converter

图2中， X_{li} 为换流站的等效电抗； P_{sl}, Q_{sl} 分别为交流系统输出的有功、无功功率； P_i^s, Q_i^s 为与LCC连接的交流母线节点（一般称之为PCC点）的注入有功、无功功率； $U_{sl} \angle \theta_{sl}$ 为PCC点线电压的基波相量； k_{Ti} 为换流变压器的变比； I_{di} 为直流电流； U_{di} 为直流电压； R_{dli} 为直流线路电阻。混合系统中采用LCC换流端的潮流计算方程^[3]如下。

对于交流系统的纯交流节点，其功率方程与交流潮流计算功率方程完全一样，即：

$$\Delta P_i = P_i^s - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^s - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

式中： U_i, U_j 为交流节点电压幅值， $j \in i$ 表示与节点 i 相连的所有节点； $\theta_{ij}, G_{ij}, B_{ij}$ 分别为节点 i, j 间相角差、电导和电纳。

对于PCC点，其功率方程式相较于式(1)和式(2)，就是多了一项输送到直流系统的功率，并且忽略LCC的功率损耗，即：

$$\Delta P_i = P_i^s - U_{si} \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - P_{sli} \quad (3)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^s - U_{si} \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - Q_{sli} \quad (4)$$

$$P_{sli} = U_{dli} I_{dli} \quad (5)$$

$$Q_{sli} = U_{dli} I_{dli} \tan \varphi_{di} \quad (6)$$

式中： φ_{di} 为PCC点的功率因数角。

对于直流系统而言，其方程式包含以下3个方面：

(1) 换流器基本方程。

$$\Delta U_{dli} = U_{dli} - (3\sqrt{2}/\pi) nk_{Ti} U_{sli} \cos \theta_{di} + (3/\pi) n X_{li} I_{dli} = 0 \quad (7)$$

$$\Delta U_{d2i} = U_{dli} - (3\sqrt{2}/\pi) nk_{Ti} k_r U_{sli} \cos \varphi_{di} = 0 \quad (8)$$

式中： θ_{di} 为换流器 i 的控制角（对于整流器为触发角 α ，对于逆变器为关断角 γ ）； n 为LCC换流器的桥数； k_r 为计及换相效应所得参数，通常取0.995可满足精度要求。

(2) 直流网络方程。

$$\Delta I_{dli} = I_{dli} - \sum_{j=1}^{n_c} g_{dij} U_{dj} = 0 \quad (9)$$

式中： g_{dij} 为整个混合系统消去中间联络节点后直流网络节点电导矩阵中的元素。

(3) 每个换流器对应2个控制方程。

$$\Delta C_{1i} = d_{4i}(I_{dli}, U_{dli}, \cos \theta_{di}, k_{Ti}) = 0 \quad (10)$$

$$\Delta C_{2i} = d_{5i}(I_{dli}, U_{dli}, \cos \theta_{di}, k_{Ti}) = 0 \quad (11)$$

考虑换流变压器分接头调节作用，每个换流器需指定2种控制方式，LCC换流器通常对以下4个变量进行控制： $I_{dli}, U_{dli}, \cos \theta_{di}, k_{Ti}$ 。因此，控制方程可用式(10)和式(11)来通用表达。

综上所述，式(1)一式(11)组成了混合系统中LCC换流端潮流计算的数学模型。

1.3 采用VSC换流端的潮流计算模型

在混合多端直流输电系统中，若第 i 换流器采用VSC，则其单相稳态模型如图3所示。

图3中VSC可以简化为理想的比例放大器，其

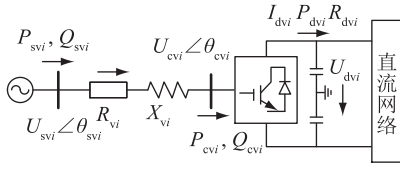


图3 采用VSC换流端的稳态模型

Fig.3 Steady-state model using VSC commutation

功率损耗由电阻 R_{svi} 等效。 $U_{svi} \angle \theta_{svi}$ 为 VSC 的 PCC 点线电压的基波相量； $U_{cvi} \angle \theta_{cvi}$ 为换流桥输出电压的基波相量； X_{vi} 为换流电抗等效电抗； P_{svi} 、 Q_{svi} 分别为交流系统输出的有功、无功功率； P_{cvi} 、 Q_{cvi} 分别为 VSC 吸收的有功、无功功率； I_{dvi} 为直流电流； U_{dvi} 为直流电压； R_{dvi} 为直流线路电阻； P_{dvi} 为直流功率。

令：

$$\begin{cases} \delta_i = \theta_{svi} - \theta_{cvi} \\ Y_i = 1 / \sqrt{R_{vi}^2 + X_{vi}^2} \\ \alpha_i = \arctan(X_{vi} / R_{vi}) \end{cases} \quad (12)$$

则直流系统的功率方程式为：

$$P_{svi} = -Y_i U_{svi} U_{cvi} \cos(\delta_i + \alpha_i) + Y_i U_{svi}^2 \cos \alpha_i \quad (13)$$

$$Q_{svi} = -Y_i U_{svi} U_{cvi} \sin(\delta_i + \alpha_i) + Y_i U_{svi}^2 \sin \alpha_i \quad (14)$$

$$P_{dvi} = U_{dvi} I_{dvi} = Y_i U_{svi} U_{cvi} \cos(\delta_i - \alpha_i) - Y_i U_{cvi}^2 \cos \alpha_i \quad (15)$$

VSC 采用脉宽调制技术，换流桥输出电压有效值 U_{cvi} 和直流电压 U_{dvi} 存在如下关系：

$$U_{cvi} = \mu_d M_i U_{dvi} / \sqrt{2} \quad (16)$$

式中： μ_d 为直流电压利用率（调制方式为正弦波脉宽调制时， $\mu_d = \sqrt{3}/2$ ；调制方式为空间矢量脉宽调制时， $\mu_d = 1$ ）； M 为调制度，设定 $0 \leq M \leq 1$ 。

由以上功率平衡方程和直流网络方程，可进一步得到直流系统的潮流计算方程式为：

$$\Delta P_{svi} = P_{svi} + (\mu_d M_i / \sqrt{2}) Y_i U_{svi} U_{dvi} \times \cos(\delta_i + \alpha_i) - Y_i U_{svi}^2 \cos \alpha_i \quad (17)$$

$$\Delta Q_{svi} = Q_{svi} + (\mu_d M_i / \sqrt{2}) Y_i U_{svi} U_{dvi} \times \sin(\delta_i + \alpha_i) - Y_i U_{svi}^2 \sin \alpha_i \quad (18)$$

$$\Delta P_{dvi} = U_{dvi} I_{dvi} - (\mu_d M_i / \sqrt{2}) Y_i U_{svi} U_{dvi} \cos(\delta_i - \alpha_i) + (\mu_d M_i / \sqrt{2})^2 U_{dvi}^2 Y_i \cos \alpha_i \quad (19)$$

$$\Delta I_{dvi} = I_{dvi} - \sum_{j=1}^{n_c} g_{dj} U_{dj} = 0 \quad (20)$$

式(17)一式(20)为 VSC 换流端直流潮流计算的数学模型，其对应的交流系统功率方程式与式(1)一式(4)相同。

2 混合系统控制方式

混合多端直流输电系统换流器包含了 LCC 和

VSC 2 种，因此，其运行和控制方式与纯 LCC-MTDC、纯 VSC-MTDC 有很大的不同。该混合系统一般送端采用的是 LCC 常规直流输电，受端采用的是 VSC 柔性直流输电，因此通常 LCC 作为整流器运行，VSC 作为逆变器运行。若换流器其中一种控制方式为定直流电压控制，则其有功功率和直流电流成正比，因此定有功功率控制和定直流电压控制是等效的。考虑 LCC 换流变压器分接头的调节作用，LCC 和 VSC 换流器可选择的控制方式如表 1 所示。

表 1 LCC 和 VSC 控制方式

Table 1 LCC and VSC control methods

编号	LCC	VSC
①	定 U_d 、定 α 控制	定 U_d 、定 Q_s 控制
②	定 U_d 、定 K_T 控制	定 U_d 、定 U_s 控制
③	定 I_d 、定 α 控制	定 P_s 、定 Q_s 控制
④	定 I_d 、定 K_T 控制	定 P_s 、定 U_s 控制

为实现整个混合系统的功率平衡和保证各换流器有一定的裕度配合运行，一般要使其中一端换流器采用定电压控制，其余换流器采用除定直流电压以外的其他控制方式。故对于混合两端直流输电系统，可选择的控制方式组合为 LCC①或②+VSC③或④、LCC③或④+VSC①或②。对于混合多端直流系统而言，由于换流器数目的增加，可以衍生出更多的控制方式组合，只要服从上述控制原则即可。

3 混合系统的交替迭代求解法

由第一节分析可知，对于采用 LCC 与 VSC 混合多端直流输电系统，式(7)一式(11)、式(17)一式(20)组成了其直流系统潮流计算方程式，运用牛顿法，进行泰勒级数展开，略去二次项及其高阶项后，可得混合系统潮流计算修正方程的矩阵形式为：

$$\Delta Y = J \Delta X \quad (21)$$

$$\Delta Y = \begin{bmatrix} \dots, \Delta U_{d1i}, \Delta U_{d2i}, \Delta I_{d1i}, \Delta C_{1i}, \Delta C_{2i}, \\ \dots, \Delta P_{svi}, \Delta Q_{svi}, \Delta P_{dvi}, \Delta I_{dvi}, \dots \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \dots, \Delta U_{d1i}, \Delta I_{d1i}, \Delta k_{Ti}, \Delta \cos \varphi_{di}, \Delta \cos \theta_{di}, \\ \dots, \Delta U_{dvi}, \Delta I_{dvi}, \Delta \delta_i, \Delta M_i, \dots \end{bmatrix} \quad (23)$$

其中， J 为雅克比矩阵，由各偏差量对各个变量求偏导。

当 VSC 采用定直流电压控制时，因待求变量直流电压已知，应去掉有功平衡方程 ΔP_{svi} ，因此式(21)中矩阵和向量的维数为 $4n_v + 5n_1$ (LCC 采用定直流电压控制)或 $4n_v + 5n_1 - 1$ (VSC 采用定直流电

压控制)。

LCC 与 VSC 的交流系统和直流系统均是通过 PCC 点电压幅值和输出的有功无功发生相互作用的,直流系统可看作是交流系统的等值恒定功率负荷 P_{si}, Q_{si} , 交流系统可以看作是直流系统的恒定电压源 U_{si} 。因此对于 LCC 与 VSC 混合交直流系统而言,其交流系统和直流系统的潮流计算是解耦的,可采用交替迭代求解法,该方法的交直流系统接口示意如图 4 所示。图中,有上标的表示由直流潮流计算结果得出的功率,无上标的表示由交流潮流计算结果得出的功率。

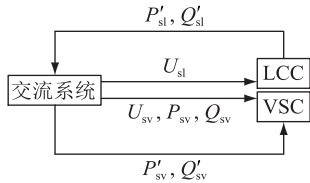


图 4 交替迭代法交直流系统接口示意

Fig.4 Schematic diagram of alternating iterative method for AC and DC systems

VSC 给定的控制变量除直流电压外,其余都为交流侧物理量,因此首次进行交流系统潮流计算时,VSC 可根据控制方式设定直流节点为 PV 节点或者 PQ 节点,采用①和③控制方式时为 PQ 节点,采用②和④时为 PV 节点;对于 LCC,给定的均是直流侧物理量,由式(7)一式(11)可知,LCC 与其余换流器只通过直流电压发生耦合作用,而直流线路的电阻一般较小,所以各个换流器的直流电压较为接近。可以先假定 LCC 的直流电压和采用定直流电压控制的换流器的电压设定值相等,则 LCC 换流端潮流方程可单独求解,再由式(5)和式(6)计算出 LCC 的 P_{sl}, Q_{sl} , 以此作为首次交流潮流计算的估计值。对于采用定直流电压控制的 VSC,其 PCC 点输出的有功功率由式(23)进行估计。

$$P_{sb} = - \left(\sum_{i=1, i \neq b}^{n_v} P_{siref} + \sum_{i=1}^{n_l} P_{sli} \right) \quad (24)$$

式中: P_{sb} 为采用定直流电压控制 VSC 的 PCC 点输出有功功率, P_{siref} 为 VSC 的 PCC 点输出有功功率设定值; P_{sli} 为按照上述方法求出的 LCC 的 PCC 点输出的有功功率。

在交直流系统交替迭代计算的过程中, P_{sb}, Q_{svi}, P_{sli} 和 Q_{sli} 由直流系统潮流结果进行修正,若利用所得的直流变量,由式(13)、式(14)、式(5)和式(6)分别求得 $P'_{sb}, Q'_{svi}, P'_{sli}, Q'_{sli}$ 与交流潮流计算结果 $P_{sb}, Q_{svi}, P_{sli}, Q_{sli}$ 之差在计算允许的误差内,则不需要再次用混合系统的直流潮流结果去修正交

流系统 PCC 点的等值功率负荷。从而得出该混合系统的交替求解收敛判据为:

$$\begin{cases} |P'_{sb} - P_{sb}^{(k)}| < \varepsilon \\ \max |Q'_{svi} - Q_{svi}^{(k)}| < \varepsilon \quad i = 1, \dots, n_v \\ \max |P'_{sli} - P_{sli}^{(k)}| < \varepsilon \quad i = 1, \dots, n_l \\ \max |Q'_{sli} - Q_{sli}^{(k)}| < \varepsilon \quad i = 1, \dots, n_l \end{cases} \quad (25)$$

式中: $P_{sb}^{(k)}, Q_{svi}^{(k)}, P_{sli}^{(k)}, Q_{sli}^{(k)}$ 为第 k 次交替迭代求解中,由交流潮流结果求得的对换流器 PCC 点输出的有功无功功率; $P'_{sb}, Q'_{svi}, P'_{sli}, Q'_{sli}$ 为第 k 次交替迭代求解中,由直流潮流结果求得的对换流器有功无功功率。

该混合多端交直流系统潮流交替求解的具体实现算法流程如图 5 所示。

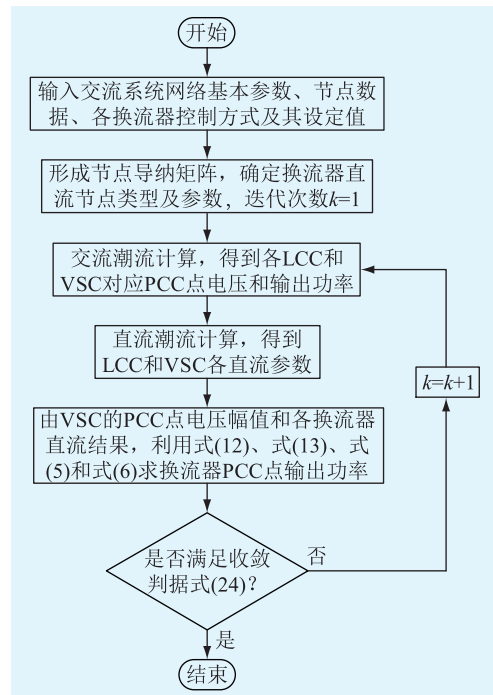


图 5 混合交直流系统交替迭代计算流程

Fig.5 Alternating iterative calculation flow chart of hybrid AC/DC system

4 算例分析

为验证针对该混合系统算法的有效性,以修改后的 EPRI-7 节点测试系统和修改后的 IEEE-14 标准算例进行了仿真计算。

4.1 两端系统算例

图 6 给出了修改后的 EPRI-7 节点测试系统的接线图,其中 2 号节点连接 LCC 换流器,作为整流侧;3 号节点连接 VSC 换流器,作为逆变侧,由此形成了一个混合两端直流输电系统。

LCC 采用定直流电流 ($I_{dl} = 0.1$ p.u.), 定变压器变比 ($k_T = 1$ p.u.) 控制;VSC 采用定直流电压

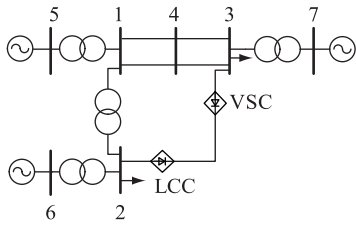


图6 修改后 EPRI-7 节点混合系统接线

Fig.6 Modified EPRI-7 node hybrid system wiring diagram

($U_{d2} = 2$ p.u.), 定交流无功功率 ($Q_{s2} = -0.1$ p.u.) 控制。换流器对应参数如表 2 所示。采用上述交替迭代法进行潮流计算, 其中交流系统的潮流计算可借助电力系统分析程序 PSD-BPA 潮流计算模块实现, 直流系统通过编程实现, 结果如表 3、表 4 所示。

表 2 换流器参数列表

Table 2 Converter parameter list

参数	LCC	VSC
电抗/p.u.	$X_l = 0.15$	$X_v = 0.2$
换流桥数 n	2	
换流电阻 $R/p.u.$		0.005
直流电阻 $R_d/p.u.$	0.03	0.03

表 3 交流系统潮流计算结果

Table 3 AC system power flow calculation results

节点	电压幅值/p.u.	相位/(°)
1	0.977 2	26.8
2	0.982 1	25.5
3	0.973 7	-0.7
4	0.947 5	13.1
5	0.999 8	33.8
6	1.030 0	32.4
7	1.000 0	0.0

表 4 直流系统潮流计算结果

Table 4 DC system power flow calculation results

参数	VSC	LCC
$U_d/p.u.$	2.000 0	2.030 0
$I_d/p.u.$	-1.000 0	1.000 0
$\delta(VSC)/\cos\theta(LCC)$	-0.384 2	0.873 3
$M(VSC)/\cos\varphi(LCC)$	0.884 5	0.769 1
$P_s/p.u.$	-1.980 0	2.030 0
$Q_s/p.u.$	-0.100 0	1.686 8
$U_s/p.u.$	0.973 7	0.982 1

4.2 多端系统算例

图 7 给出了修改后的 IEEE-14 标准节点系统接线图, 其中 10 号节点连接 LCC 换流器, 作为整流侧; 13, 14 分别连接 VSC1、VSC2, 作为逆变侧, 由此形成了一个混合多端直流输电系统。

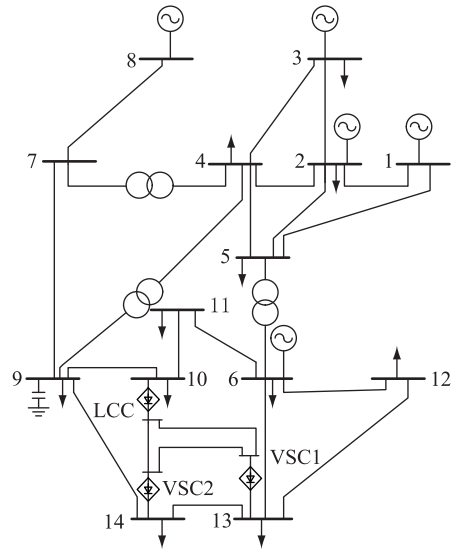


图7 修改后 IEEE-14 节点混合系统接线

Fig.7 Modified IEEE-14 node hybrid system wiring diagram

LCC 采用定直流电压 ($U_{d1} = 2$ p.u.), 定触发角 ($\alpha = 15^\circ$) 控制; VSC1 采用定交流有功功率 ($P_{s2} = -0.08$ p.u.), 定交流无功功率 ($Q_{s2} = 0.018 7$ p.u.) 控制; VSC2 采用定交流有功功率 ($P_{s3} = -0.095$ p.u.), 定交流无功功率 ($Q_{s3} = -0.036 7$ p.u.) 控制, 系统参数如表 5 所示。潮流计算结果见表 6、表 7。

表 5 系统参数

Table 1 System parameter

参数	LCC	VSC
电抗/p.u.	$X_l = 0.15$	$X_v = 0.2$
换流桥数 n	2	
换流电阻 $R/p.u.$		0.006
直流电阻 $R_d/p.u.$	0.03	0.03

表 6 交流系统潮流计算结果

Table 6 AC system power flow calculation results

节点	电压幅值/p.u.	相位/(°)	节点	电压幅值/p.u.	相位/(°)
1	1.060 0	0	8	1.090 0	-13.6
2	1.045 0	-5.0	9	1.051 3	-15.3
3	1.010 0	-12.7	10	1.038 8	-15.9
4	1.017 6	-10.3	11	1.050 3	-15.0
5	1.019 9	-8.8	12	1.056 7	-14.5
6	1.070 0	-13.9	13	1.055 1	-14.3
7	1.059 3	-13.6	14	1.047 1	-15.3

由以上算例系统潮流计算结果可知, 混合系统的各交流母线电压均在额定电压附近运行, 各个换流器的直流参数满足各功率方程、直流网络方程以及各控制方程, 且在合理的范围内运行, 同时可以看出 LCC 送出的有功功率等于所有 VSC 接受的有功功率、换流器的损耗以及直流线路损耗之和, 结

表7 直流系统潮流计算结果
Table 7 DC system power flow calculation results

参数	VSC1	VSC2	LCC
$U_d / \text{p.u.}$	1.998 7	1.998 7	2.000 0
$I_d / \text{p.u.}$	-0.040 0	-0.047 6	0.087 6
$\delta(\text{VSC}) / k_T (\text{LCC})$	-0.624 5	-0.728 8	0.747 2
$M(\text{VSC}) / \cos \varphi (\text{LCC})$	0.860 3	0.860 3	0.958 8
$P_s / \text{p.u.}$	-0.080 0	-0.095 0	0.175 2
$Q_s / \text{p.u.}$	0.018 7	-0.036 7	0.051 9
$U_s / \text{p.u.}$	1.055 1	1.047 1	1.038 8

合文献[20—21]可知,在换流器不同控制参数下,该算法均能可靠收敛,验证了文中所提混合多端交直流系统潮流计算数学模型和算法的准确性和有效性。

5 结语

文中分析了LCC与VSC混合交直流系统稳态模型及其控制方式,建立了该混合系统潮流计算的数学模型;在此基础上,提出了一种适用于该混合系统的交替求解算法,最后,在不同的控制方式下,分别通过一个修改后的EPRI-7混合两端直流输电系统算例和一个修改后的IEEE-14混合多端直流输电系统算例,验证了所提数学模型和算法的准确性与有效性。文中所做的工作为常规直流和柔性直流混合输电系统潮流计算的进一步研究提供了借鉴和参考,为混合多端直流输电系统的网架规划、参数设计以及运行方式的安排提供了重要依据。

参考文献:

- [1] 郝亮亮,詹清清,陈争光,等. LCC-MMC型混合直流送端交流系统故障时直流电流的暂态过程解析[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):220-227.
HAO Liangliang, ZHAN Qingqing, CHEN Zhengguang, et al. Analysis of DC current transient process when LCC-MMC hybrid DC transmission AC system failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39 (9): 220-227.
- [2] 倪晓军,郭春义,赵成勇,等. LCC-HVDC直流控制模式对混合双馈入直流系统运行特性的影响[J]. 电网与清洁能源,2017,33(1):24-30.
NI Xiaojun, GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, et al. Influence of LCC-HVDC DC control mode on the operating characteristics of hybrid double-fed DC system[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33 (1): 24-30.
- [3] 夏成军,王真,周保荣,等. VSC-HVDC对LCC-HVDC受端系统电压支撑强度的影响[J]. 电网技术,2019,43(6):2031-2038.
XIA Chengjun, WANG Zhen, ZHOU Baorong, et al. The effect of VSC-HVDC on the voltage support strength of LCC-HVDC receiving end system[J]. Power System Technology, 2019, 43

(6): 2031-2038.

- [4] 郭春义,赵剑,刘炜,等. 抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(S1):1-10.
GUO Chunyi, ZHAO Jian, LIU Wei, et al. Summary of methods for suppressing commutation failures in HVDC transmission systems[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2018, 38 (S1): 1-10.
- [5] 李春华,李明,黄莹,等. 一种抑制高压直流输电换相失败的控制优化方法和装置[J]. 南方电网技术,2017,11(6):1-7.
LI Chunhua, LI Ming, HUANG Ying, et al. A control optimization method and device for suppressing commutation failure of HVDC transmission[J]. China Southern Power Grid Technology, 2017, 11 (6): 1-7.
- [6] 严道,焦彦军,杜哲. 基于多端VSC技术的一种交直流混合配电网网络结构[J]. 电力建设,2016,37(12):48-54.
YAN Shao, JIAO Yanjun, DU Zhe. An AC/DC hybrid distribution network structure based on multi-terminal VSC technology[J]. Power Construction, 2016, 37 (12): 48-54.
- [7] 刘洪波,刘海涵,聂建航. 用于风电并网的VSC-HVDC网侧换流器改进控制策略[J]. 电力建设,2017,38(10):10-16.
LIU Hongbo, LIU Haihan, NIE Jianhang. Improved control strategy of VSC-HVDC grid-side converter for wind power integration[J]. Power Construction, 2017, 38 (10): 10-16.
- [8] 邓旗,张英敏,曾琦,等. 一种VSC-MTDC系统的综合协调控制策略[J]. 电力建设,2017,38(8):59-63.
DENG Qi, ZHANG Yingmin, ZENG Qi, et al. An integrated coordinated control strategy for VSC-MTDC system[J]. Power Construction, 2017, 38 (8): 59-63.
- [9] 黄俊玮,谭建成,文泓铸. LCC-MMC型混合直流输电系统综述[J]. 电气开关,2019,57(5):1-5,10.
HUANG Junwei, TAN Jiancheng, WEN Hongzhu. A summary of LCC-MMC hybrid DC transmission system[J]. Electrical Switch, 2019, 57 (5): 1-5, 10.
- [10] 高淑萍,朱航舰,张保会,等. 基于LCC-HVDC和VSC-HVDC的混合双极直流输电系统的建模及仿真分析[J]. 河南机电高等专科学校学报,2018,26(2):1-6.
GAO Shuping, ZHU Hangjian, ZHANG Baohui, et al. Modeling and simulation analysis of hybrid bipolar DC transmission system based on LCC-HVDC and VSC-HVDC[J]. Journal of Henan Mechanical and Electrical Engineering College, 2018, 26 (2): 1-6.
- [11] KOTB O, SOOD V K. A hybrid HVDC transmission system supplying a passive load[C]//2010 IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC). Halifax, CA: IEEE, 2010: 1-5.
- [12] CHEN X, SUN H, WEN J, et al. Integrating wind farm to the grid using hybrid multiterminal HVDC technology[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(2): 965-972.
- [13] 雷霄,王华伟,曾南超,等. LCC与VSC混联型多端高压直流输电系统运行特性的仿真研究[J]. 电工电能新技术,2013,32(2):48-52.
LEI Xiao, WANG Huawei, ZENG Nanchao, et al. Simulation study on operating characteristics of LCC and VSC hybrid

- multi-terminal HVDC transmission system [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2013, 32(2):48-52.
- [14] 杨洋,王瑶,李浩涛,等. 子模块混合型 LCC-MCC 混合直流输电系统的启动控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018,46(8):58-64.
YANG Yang, WANG Yao, LI Haotao, et al. Startup control strategy for sub-module hybrid LCC-MCC hybrid HVDC transmission system [J]. *Power System Protection and Control*, 2018,46(8):58-64.
- [15] 姚文峰,洪潮,周保荣,等. 采用常规直流配置动态无功补偿或柔性直流对受端广东电网稳定性影响的对比分析[J]. *南方电网技术*, 2017,11(7):45-50.
YAO Wenfeng, HONG Chao, ZHOU Baorong, et al. Comparative analysis of the effects of dynamic reactive power compensation or flexible DC on the stability of Guangdong power grid in conventional DC configuration [J]. *China Southern Power Grid Technology*, 2017,11(7):45-50.
- [16] 黄伟煌,饶宏,黄莹,等. 一种基于常规直流输电系统混合直流改造方案[J]. *中国电机工程学报*, 2017,37(10):2861-2827.
HUANG Weihuang, RAO Hong, HUANG Ying, et al. A hybrid DC transformation scheme based on conventional DC transmission system [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2017,37(10):2861-2827.
- [17] 蔡宜君,文明浩,陈玉,等. LCC-MCC 混合直流输电系统整流侧故障穿越控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018,46(14):1-8.
CAI Yijun, WEN Minghao, CHEN Yu, et al. Control strategy of LCC-MCC hybrid HVDC system under rectifier side fault [J]. *Power System Protection and Control*, 2018,46(14):1-8.
- [18] 时伯年,洪潮,孙刚. 交流不对称故障下的 LCC-MCC 混合直流系统输电功率提升策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017,45(20):73-78.
SHI Bonian, HONG Chao, SUN Gang. Research on the power transmission strategy of LCC-MCC hybrid DC system under AC asymmetric faults [J]. *Power System Protection and Control*, 2017,45(20):73-78.
- [19] 叶芳,卫志农,孙国强. 含 VSC-MTDC 的交直流混合系统的改进潮流算法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011,39(3):338-343.
YE Fang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang. Improved power flow algorithm for AC/DC hybrid systems with VSC-MTDC [J]. *Journal of Hohai University (Natural Science Edition)*, 2011,39(3):338-343.
- [20] 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 power flow calculation method of AC/DC hybrid network with VSC-HVDC [J]. *Power System Technology*, 2018,42(9):2892-2899.
- [21] 徐经民,徐在德,童超. 基于模糊下垂控制的 VSC-HVDC 交直流系统潮流计算方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019,47(20):50-57.
XU Jingmin, XU Zaide, TONG Chao. Power flow calculation method of VSC-HVDC AC/DC system based on fuzzy droop control [J]. *Power System Protection and Control*, 2019,47(20):50-57.

作者简介:



熊月清

熊月清(1995),男,硕士,工程师,从事电力系统调度相关工作(E-mail:1103035002@qq.com);

李峰(1978),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电力系统调度相关工作;

徐鹏(1984),男,硕士,高级工程师,从事电力系统调度相关工作。

Power flow calculation of multi terminal AC / DC system based on hybrid converter

XIONG Yueqing^{1,2}, LI Feng², XU Peng², WANG Zhuo^{1,2}, XU Guosheng¹

(1. College of Energy and Electric Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: LCC and VSC are essentially different in the steady-state model and working principle. When the two converters are mixed and applied to the same multi-terminal HVDC transmission system, the steady-state mathematical model and the power flow calculation method have also changed accordingly. Firstly, the steady-state model of the hybrid system is described. Then, based on the comprehensive consideration of the working principle and control mode of the two converters, the mathematical model of the power flow calculation of the hybrid system is derived. Furthermore, an alternating solution algorithm suitable for the hybrid system is proposed. Finally, the effectiveness and accuracy of the proposed algorithm are verified by a hybrid DC transmission system example and a hybrid three-terminal system.

Keywords: line commutated converter (LCC); high voltage direct current (VSC); hybrid multi-terminal direct current transmission; power flow calculation; alternating iteration method

(编辑 钱悦)