

DOI: 10.7667/PSPC170969

基于扩展节点法的交直流混合电网统一潮流算法

吴素农¹, 于金镒¹, 田庄², 张志立¹, 杨为群¹, 李迎军¹, 彭莉萍¹, 吴文传²

(1. 国网江西省电力公司, 江西 南昌 330077; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 基于电压源型换流器的多端直流输电电网是解决可再生能源并网和消纳的有效途径, 因此研究交直流混合电网的潮流算法很有必要。提出了一种基于扩展节点法的交直流混合电网统一潮流算法。首先建立了电压源型换流站的稳态模型和控制策略及基于扩展节点法的交流和直流电网的网络模型。然后推导了基于牛顿法的统一潮流算法, 将交直流混合电网的节点注入电流、支路电流和节点电压作为未知变量同时求解。通过 IEEE 30 节点交直流混合电网算例验证了所提算法的有效性。

关键词: 交直流电网; 电压源型换流器; 扩展节点法; 潮流计算

A unified power flow algorithm for AC/DC hybrid networks using modified augmented nodal analysis

WU Sunong¹, YU Jinyi¹, TIAN Zhuang², ZHUANG Zhili¹, YANG Weiqun¹, LI Yingjun¹, PENG Liping¹, WU Wenchuan²

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Corporation, Nanchang 330077, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The VSC based Multi-terminal DC (MTDC) grid is a promising approach for the integration of renewable energy sources. It's necessary to study the power flow of the AC/DC network. A unified power flow algorithm for AC/DC network using Modified Augmented Nodal Analysis (MANA) is proposed. The detailed steady state model and different control modes of VSC station, MANA based AC and DC network model is established firstly. Then a unified power flow algorithm is developed based on the Newton MANA method, the node injection currents and branch currents of AC/DC network are added as unknown variables and solved simultaneously with the unknown node voltages. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by numerical tests on modified IEEE 30-bus system.

This work is supported National Natural Science Foundation of China (No. 51477083).

Key words: AC/DC network; voltage source converter; modified augmented nodal analysis; power flow

0 引言

随着对环境问题和节能减排的日益关注, 当前可再生能源的并网和消纳引起了高度重视。对于海上风电场或其他边远地区的可再生能源, 远距离传输是整合这些资源的关键问题, 而多端直流输电电网(Multi-Terminal DC, MTDC)是解决可再生能源传输问题的有效技术手段^[1-5]。相比于传统的电流源型换流器, 电压源型换流器(Voltage Source Converter, VSC)更为经济、灵活和环保, 很适合应用于可再生能源并网、城市电网供电和异步电网互联等领域。对于交直流混合电网, 潮流计算是进行稳态分析的基础, 具有重要的研究意义。

针对含 VSC-MTDC 的交直流混合电网的潮流算法已经有了一定的研究, 其方法可分为两类: 统一求解法^[6-8]和交替求解法^[9-12]。在文献[13]中, 提出了一种交替求解的潮流算法处理包含 VSC-MTDC 的交直流电网, 其中考虑了换流器的损耗模型, 但是换流站的模型过于简单。在文献[14]中, 对于通过直流电网互连的多个异步交流电网提出了一种统一的潮流算法。在文献[15]中, 研究了 VSC 换流站的控制模式, 并提出了一种交替潮流算法。在文献[16]中, 将直流平衡节点所连换流器的功率损耗作为新的变量, 提出了基于 AC/DC 单元的统一潮流算法。在文献[17]中, 提出了使用 Newton-Raphson 法的统一潮流算法, 其中考虑了换流器 PWM 控制的移相和脉宽调制特性。在文献[18]中, 考虑了 VSC 的电压下垂控制策略, 但换流站的控制模式尚

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477083)

未得到充分研究。在文献[19]中, VSC-MTDC 被应用于交直流混合配电网, 并且研究了与文献[15]相同的四种换流站控制模式。在文献[20]中, 提出了一种统一潮流算法, 综合考虑了换流站模型、换流站控制模式和换流器损耗, 但对于直流恒定电压控制模式, 控制方程少于控制变量, 无法求解。总体而言, 交替求解法可以在已有的交流潮流计算程序的基础上扩展, 便于嵌入, 但其收敛性速度较慢。统一求解法收敛性好, 计算速度更快, 但需要对原有的潮流计算程序进行大量修改。

扩展节点法(Modified Augmented Nodal Analysis, MANA)在传统节点法的节点电压方程基础上增加元件方程, 通过附加方程表示回路电压、电流控制特性等一系列元件特性, 是节点法与回路法的混合方法^[21-22]。相比于传统节点法, 扩展节点法可以简洁表示理想电压源、变压器和开关等元件, 综合利用电流、电压等多种类型的变量, 而且可以利用已有的节点法网络方程, 减少建模的工作量。文献[23]研究了交流配电网的多相潮流计算方法。交直流混合电网在传统交流网络模型的基础上引入了换流站和直流网络的一系列电压、电流变量及换流站接口方程和直流网络方程, 适合采用扩展节点法进行统一建模。

本文提出了基于扩展节点法的交直流潮流统一求解算法, 考虑了VSC换流站的四种常规控制策略和损耗模型, 以及交流、直流电网的不同节点类型, 可以求解含多个VSC、任意交直流拓扑结构、复杂交直流连接方式的交直流潮流计算问题。在直角坐标系下, 通过扩展节点法建立交直流电网的统一模型, 有效利用了传统节点法网络模型的节点导纳矩阵, 减少了建模的工作量。通过将交直流电网的节点电压、节点注入电流及变压器、换流站的支路电流作为状态变量, 可以简洁表示交直流混合电网中的各种非线性元件及控制方程, 对于换流站的各种控制策略具有很好的扩展性。在牛顿法求解潮流的迭代过程中, 雅可比矩阵的大部分元素都保持不变, 与传统节点法相比, 雅可比矩阵需要更新的元素数量大幅减少, 提高了计算效率。最后, 采用包含多端柔性直流的IEEE 30节点和118节点算例, 通过与交替求解法的潮流计算结果进行对比, 验证了本文所提模型和方法的有效性和准确性。

1 交直流混合电网模型

1.1 扩展节点法模型

扩展节点法的方程如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_n & \mathbf{A}_c \\ \mathbf{A}_r & \mathbf{A}_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_n \\ \mathbf{I}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_n \\ \mathbf{V}_x \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \mathbf{Y}_n 为节点导纳矩阵; \mathbf{A}_c 、 \mathbf{A}_r 和 \mathbf{A}_d 为增广矩阵, 用于表示额外的网络方程, 如电压源、变压器或开关的方程; \mathbf{V}_n 和 \mathbf{I}_x 分别表示待求的节点电压和支路电流; \mathbf{I}_n 和 \mathbf{V}_x 分别表示已知的支路电流和节点电压。以如图1所示的变压器支路 ij 为例, 可将支路分为阻抗支路 ij' 及理想变压器支路 $j'j$, 建立扩展节点法方程如式(2)所示。

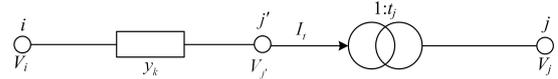


图1 变压器支路示意图

Fig. 1 Schematic of transformer branch

$$\begin{bmatrix} y_k & -y_k & 0 & 0 \\ -y_k & y_k & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1/t_j \\ 0 & 1 & -1/t_j & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_{j'} \\ V_j \\ I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i \\ 0 \\ I_j \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: V_i 与 V_j 为节点 i 和节点 j 的电压; $V_{j'}$ 为节点 j' 的电压; I_i 为流过变压器的电流; I_i 和 I_j 为节点 i 和节点 j 的注入电流。通过引入新变量 $V_{j'}$ 和 I_i , 可以将支路阻抗与变压器变比分离, 当变压器变比发生变化时, 也无需重新计算节点导纳阵的元素。通过扩展节点法可以简洁直观地建立配电网的网络方程, 该方法为交直流电网建模的基础。

1.2 交流电网模型

交流网络可通过扩展节点法建模如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{ac} & -\mathbf{A}_{c,ac} \\ \mathbf{A}_{r,ac} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{ac} \\ \mathbf{I}_{ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{V}_{s,ac} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{Y}_{ac} 为交流网络的节点导纳矩阵; \mathbf{V}_{ac} 为各节点的电压; \mathbf{I}_{ac} 为各节点的注入电流; $\mathbf{V}_{s,ac}$ 为平衡节点的电压; $\mathbf{A}_{c,ac}$ 为单位阵; $\mathbf{A}_{r,ac}$ 为行向量; 其中与平衡节点对应的元素为 1, 其余元素为 0, 方程 $\mathbf{A}_{r,ac} \mathbf{V}_{ac} = \mathbf{V}_{s,ac}$ 表示了平衡节点的电压。

1.3 直流电网模型

直流网络可通过扩展节点法建模如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{dc} & -\mathbf{A}_{c,dc} \\ \mathbf{A}_{r,dc} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{dc} \\ \mathbf{I}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{V}_{s,dc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: \mathbf{Y}_{dc} 为交流网络的节点导纳矩阵; \mathbf{V}_{dc} 为各节点的电压; \mathbf{I}_{dc} 为各节点的注入电流; $\mathbf{V}_{s,dc}$ 为平衡节点的电压; $\mathbf{A}_{c,dc}$ 为单位阵; $\mathbf{A}_{r,dc}$ 为行向量; 其中与平衡节点对应的元素为 1, 其余元素为 0, 方程

$A_{r,dc} V_{dc} = V_{s,dc}$ 表示了平衡节点的电压。

1.4 换流站模型

如图 2 所示为 VSC 换流站的模型, 交直流潮流计算中, 换流器可以被模拟成可控电压源 V_c , 通过换流变压器 $Z_t = R_t + jX_t$ 和换流电抗器 $Z_c = R_c + jX_c$ 与交流侧实现能量交换, 与换流站相连的交流节点电压为 V_s , B_f 代表低通滤波器。

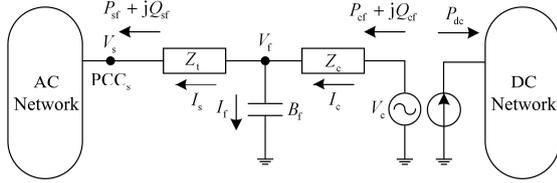


图 2 VSC 换流站模型

Fig. 2 VSC station model

由换流站注入交流电网的功率表示为

$$P_s + jQ_s = V_s I_s^* \quad (5)$$

换流器侧的功率表示为

$$P_c + jQ_c = V_c I_c^* \quad (6)$$

换流站内的电压和电流关系表示为

$$V_c - V_f - Z_c I_c = 0 \quad (7)$$

$$V_f - V_s - Z_t I_s = 0 \quad (8)$$

$$B_f V_f - I_f = 0 \quad (9)$$

$$I_c - I_s - I_f = 0 \quad (10)$$

式中: V_f 为滤波器处的电压; I_c 、 I_f 和 I_s 分别表示流过变压器、滤波器和电抗器的电流。

换流站的功率损耗可以表示为流过换流器的有功功率 P_c 的一定比例:

$$P_{\text{loss}} = \beta P_c \quad (11)$$

由换流站注入直流电网的有功功率表示为

$$P_{\text{dc}} = -P_c - P_{\text{loss}} \quad (12)$$

换流站可以分别控制注入交流电网的有功功率和无功功率, 对于有功功率 P_s , 有如下两种控制方式:

1) 定有功功率

换流站注入交流电网的有功功率为恒定值。

2) 定直流电压

换流站通过调整注入交流电网的有功功率保持换流站所连直流节点的电压恒定。

定直流电压控制的换流站与直流电网的平衡节点相连, 保证直流电网的功率平衡。

对于无功功率 Q_s , 有如下两种控制方式:

1) 定无功功率

换流站注入交流电网的无功功率为恒定值。

2) 定交流电压

换流站通过调整注入交流电网的无功功率保持换流站所连交流节点的电压幅值恒定。

综合以上分析, 潮流计算中换流站可以选择的控制方式有四种模式, 如表 1 所示。

表 1 VSC 换流站控制模式

Table 1 Control modes of VSC stations

控制模式	有功功率控制	无功功率控制
1	定有功功率	定无功功率
2	定有功功率	定交流电压
3	定直流电压	定无功功率
4	定直流电压	定交流电压

2 交直流混合潮流计算模型

为了将交流模型与直流模型统一求解, 交流电网和 VSC 换流站方程中的复数状态变量都用实部(上标 R)和虚部(上标 I)分量来表示。因此, 交流电网和 VSC 换流站的每个复数电压或电流变量都将由 2×1 的列向量代替, 其中第一行和第二行元素分别是变量的实部和虚部, 节点扩展法矩阵中的每个元素 ($y = g + jb$) 被 2×2 矩阵代替:

$$\begin{bmatrix} g & -b \\ b & g \end{bmatrix} \quad (13)$$

2.1 交流网络潮流方程

根据交流网络的扩展节点法方程, 可以列出节点注入电流方程和平衡节点电压方程:

$$f_{\text{aci}} = Y_{\text{ac}} V_{\text{ac}} - A_{\text{c,ac}} I_{\text{ac}} = 0 \quad (14)$$

$$f_{\text{acv}} = A_{\text{r,ac}} V_{\text{ac}} - V_{\text{s,ac}} = 0 \quad (15)$$

对于交流网络中的节点 i , 若节点 i 为 PQ 节点, 其潮流方程为

$$f_{\text{acP},i} = P_i - V_{\text{aci}}^R I_{\text{aci}}^R - V_{\text{aci}}^I I_{\text{aci}}^I = 0 \quad (16)$$

$$f_{\text{acQ},i} = Q_i - V_{\text{aci}}^I I_{\text{aci}}^R + V_{\text{aci}}^R I_{\text{aci}}^I = 0 \quad (17)$$

式中: V_{aci}^R 表示节点 i 电压的实部分量; V_{aci}^I 表示节点 i 电压的虚部分量; I_{aci}^R 表示节点 i 注入电流的实部分量; I_{aci}^I 表示节点 i 注入电流的虚部分量; P_i 和 Q_i 表示注入节点 i 的功率。

$$P_i = P_{gi} - P_{di} + P_{sj} \quad (18)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} + Q_{sj} \quad (19)$$

式中: P_{gi} 和 Q_{gi} 分别表示节点 i 所连发电机的有功和无功功率; P_{di} 和 Q_{di} 分别表示节点 i 所连负荷的有功和无功功率; P_{sj} 和 Q_{sj} 分别表示节点 i 所连换流站注入交流网络的有功和无功功率。

若节点 i 为 PV 节点, 其潮流方程为

$$f_{acP,i} = P_i - V_{aci}^R I_{aci}^R - V_{aci}^1 I_{aci}^1 = 0 \quad (20)$$

$$f_{acV,i} = V_{aci}^{\text{ref}} - \sqrt{(V_{aci}^R)^2 + (V_{aci}^1)^2} = 0 \quad (21)$$

式中, V_{aci}^{ref} 表示 PV 节点 i 的电压幅值。

2.2 直流网络潮流方程

根据直流网络的扩展节点法方程, 可以列出节点注入电流方程和平衡节点电压方程:

$$f_{dcl} = Y_{dc} V_{dc} - A_{c,dc} I_{dc} = 0 \quad (22)$$

$$f_{dcV} = A_{r,dc} V_{dc} - V_{s,dc} = 0 \quad (23)$$

若直流网络中的非平衡节点 i 与第 j 个换流站相连, 其潮流方程为

$$f_{dcp,i} = V_{dci} I_{dci} + (1 + \beta)(V_{cj}^R I_{cj}^R + V_{cj}^1 I_{cj}^1) = 0 \quad (24)$$

否则为

$$f_{dcp,i} = V_{dci} I_{dci} = 0 \quad (25)$$

式中: V_{dci} 表示节点 i 的电压; I_{dci} 表示节点 i 的注入电流; V_{cj}^R 和 V_{cj}^1 表示换流站 j 电压的实部和虚部分量; I_{cj}^R 和 I_{cj}^1 表示换流站 j 电流的实部分量和虚部分量。

2.3 换流站潮流方程

设第 i 个换流站与交流网络的节点 j 及直流网络的节点 k 相连, 根据式(7)~式(10)可以列出以下 8 个基础潮流方程:

$$f_{vsc,i} = \begin{cases} V_{ci}^R - V_{fi}^R - R_{ci} I_{ci}^R + X_{ci} I_{ci}^1 = 0 \\ V_{ci}^1 - V_{fi}^1 - R_{ci} I_{ci}^1 - X_{ci} I_{ci}^R = 0 \\ V_{fi}^R - V_{acj}^R - R_{ti} I_{si}^R + X_{ti} I_{si}^1 = 0 \\ V_{fi}^1 - V_{acj}^1 - R_{ti} I_{si}^1 - X_{ti} I_{si}^R = 0 \\ B_{fi} V_{fi}^R + I_{fi}^1 = 0 \\ B_{fi} V_{fi}^1 - I_{fi}^R = 0 \\ I_{ci}^R - I_{si}^R - I_{fi}^R = 0 \\ I_{ci}^1 - I_{si}^1 - I_{fi}^1 = 0 \end{cases} \quad (26)$$

对于控制模式 1 的换流站, 可以列出 2 个额外的潮流方程。

$$f_{vscP_1,i} = P_{si}^{\text{ref}} - (V_{acj}^R I_{si}^R + V_{acj}^1 I_{si}^1) = 0 \quad (27)$$

$$f_{vscQ_1,i} = Q_{si}^{\text{ref}} - (V_{acj}^1 I_{si}^R - V_{acj}^R I_{si}^1) = 0 \quad (28)$$

式中, P_{si}^{ref} 和 Q_{si}^{ref} 分别表示换流站注入交流电网的有功功率和无功功率的设定值。

对于控制模式 2 的换流站, 可以列出 2 个额外的潮流方程。

$$f_{vscP_2,i} = P_{si}^{\text{ref}} - (V_{acj}^R I_{si}^R + V_{acj}^1 I_{si}^1) = 0 \quad (29)$$

$$f_{vscQ_2,i} = V_{aci}^{\text{ref}} - \sqrt{(V_{aci}^R)^2 + (V_{aci}^1)^2} = 0 \quad (30)$$

对于控制模式 3 的换流站, 可以列出 2 个额外的潮流方程。

$$f_{vscP_2,i} = V_{dck} I_{dck} + (1 + \beta)(V_{ci}^R I_{ci}^R + V_{ci}^1 I_{ci}^1) = 0 \quad (31)$$

$$f_{vscQ_1,i} = Q_{si}^{\text{ref}} - (V_{acj}^1 I_{si}^R - V_{acj}^R I_{si}^1) = 0 \quad (32)$$

式中: V_{dck} 表示直流网络第 k 个节点的电压; I_{dck} 表示直流网络第 i 个节点的注入电流。

对于控制模式 4 的换流站, 可以列出 2 个额外的潮流方程。

$$f_{vscP_2,i} = V_{dck} I_{dck} + (1 + \beta)(V_{ci}^R I_{ci}^R + V_{ci}^1 I_{ci}^1) = 0 \quad (33)$$

$$f_{vscQ_2,i} = V_{aci}^{\text{ref}} - \sqrt{(V_{aci}^R)^2 + (V_{aci}^1)^2} = 0 \quad (34)$$

2.4 可解性分析

假设交直流混联配电网中一共有 n_{vsc} 个换流站且四种控制模式的换流站分别有 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 个, 交流网络中有 n_{ac} 个节点, 其中包含 1 个平衡节点, n_{pq} 个 PQ 节点和 n_{pv} 个 PV 节点, 直流网络中有 n_{dc} 个节点, 其中包含 1 个平衡节点。交直流混联配电网的潮流方程和未知量如表 2 所示。

表 2 潮流方程与未知量

Table 2 Equations and unknown variables of AC/DC network

	方程类型	方程数量	未知量类型	未知量数量
交流网络	f_{acI}	$2n_{ac}$	V_{ac}	$2n_{ac}$
	f_{acV}	2	I_{ac}	$2n_{ac}$
	f_{acP}	$2n_{pq} + 2n_{pv}$		
	f_{acQ}	$2n_{pq}$		
	f_{acV}	$2n_{pv}$		
换流站	f_{vsc}	$8n_{vsc}$	V_c	$2n_{vsc}$
	f_{vscP_1}	$n_1 + n_2$	V_f	$2n_{vsc}$
	f_{vscQ_1}	$n_1 + n_3$	I_c	$2n_{vsc}$
	f_{vscP_2}	$n_3 + n_4$	I_f	$2n_{vsc}$
	f_{vscQ_2}	$n_2 + n_4$	I_s	$2n_{vsc}$
直流网络	f_{dcl}	n_{dc}	V_{dc}	n_{dc}
	f_{dcV}	1	I_{dc}	n_{dc}
	f_{dcp}	$n_{dc} - 1$		

从表 2 中可以看到, 交直流电网的潮流方程与未知量个数相等, 因此潮流问题可解。

3 求解方法

3.1 牛顿法潮流计算

对于交直流电网的统一潮流方程, 可以采用牛顿法求解。牛顿法的迭代格式如式(35)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{J}^{(j)} \Delta \mathbf{x}^{(j)} = -\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(j)}) \\ \mathbf{x}^{(j+1)} = \mathbf{x}^{(j)} + \Delta \mathbf{x}^{(j)} \end{cases} \quad (35)$$

式中: (j) 表示迭代次数; \mathbf{J} 为雅可比矩阵; $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 为潮流方程; \mathbf{x} 为状态变量。根据表 2, 潮流方程包括线性方程 f_{acI} 、 f_{acV} 、 f_{vsc} 、 f_{dcl} 、 f_{dcV} 和非线性方程 f_{acP} 、 f_{acQ} 、 f_{acV} 、 f_{vscP_1} 、 f_{vscQ_1} 、 f_{vscP_2} 、 f_{vscQ_2} 、

f_{dcP} 。对于线性潮流方程,其雅可比矩阵可以直接由扩展节点法方程的系数矩阵获得,以交流电网的节点注入功率平衡方程 f_{acI} 为例

$$f_{acI}^{(j)} = Y_{ac} V_{ac}^{(j)} - A_{c,ac} I_{ac}^{(j)} \quad (36)$$

其迭代格式为

$$Y_{ac} \Delta V_{ac}^{(j)} - A_{c,ac} \Delta I_{ac}^{(j)} = -f_{acI}^{(j)} \quad (37)$$

由此可得统一潮流方程的雅可比矩阵是在扩展节点法的系数矩阵的基础上增广而来,在潮流求解的迭代过程中,线性潮流方程的雅可比矩阵保持不变。

3.2 计算复杂度分析

1) 根据表 2,本文提出的交直流潮流计算模型包括 $4n_{ac} + 10n_{vsc} + 2n_{dc}$ 个未知量和潮流方程,因此牛顿法求解所产生的雅可比矩阵为 $4n_{ac} + 10n_{vsc} + 2n_{dc}$ 阶矩阵。传统基于节点法的交直流潮流计算模型包括 $2n_{ac} + 4n_{vsc} + n_{dc}$ 个未知量和潮流方程。本模型所产生的方程数量约为传统模型的 2 倍,在牛顿法迭代过程中,本模型所产生的雅可比矩阵的阶数是传统模型的 2 倍。

2) 假设交流网络有 p 条支路,直流网络有 q 条接地支路,本模型所产生的雅可比矩阵中非零元素最多为 $14n_{ac} + 44n_{vsc} + 4n_{dc} + 8p + 2q$ 个,传统节点法模型所产生的雅可比矩阵中非零元素最多为 $4n_{ac} + 18n_{vsc} + n_{dc} + 8p + 2q$ 个。由于交直流电网的支路数通常大于节点数,即 $p \geq n_{ac}$, $q \geq n_{dc}$,因此本模型所产生的雅可比矩阵中非零元素约为传统算法的两倍。虽然本模型所产生的雅可比矩阵中的元素数量是传统模型的 4 倍,但非零元素更为稀疏。

3) 在牛顿法迭代过程中,本模型有 $8n_{ac} + 18n_{vsc} + 2n_{dc}$ 个元素需要更新,传统节点法模型有 $4n_{ac} + 18n_{vsc} + n_{dc} + 8p + 2q$ 个元素需要更新。由于交直流电网的支路数通常大于节点数,因此在迭代过程中,本模型需要更新的元素数量与传统节点法相比大约减少了三分之一,计算需求大幅降低,计算速度可以得到提高。

4 算例分析

4.1 IEEE 30 节点系统

采用如图 3 所示的改进的 IEEE 30 节点^[24]交直流电网模型对基于扩展节点法的交直流统一潮流算法进行分析验证,并将潮流结果与交替求解法^[15]的计算结果进行对比。该算例系统包括 3 个 VSC 换流站和 1 个三端柔性直流电网,换流站分别与交流电网的节点 2、5、6 相连,直流电网部分包含 3 个直流母线和 2 条直流输电线。交流电网的电压基值

为 135 kV,功率基值为 100 MVA,直流电网的电压等级为 150 kV^[25]。换流站和直流电网的参数在表 3 列出。

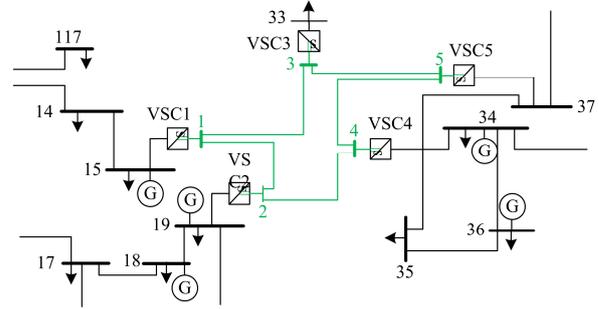


图 3 改进的 IEEE 30 节点系统

Fig. 3 Modified IEEE 30-bus network

表 3 VSC 换流站和直流电网参数

Table 3 VSC station and DC network parameters

参数类型	参数值/p.u.	参数类型	参数值/p.u.
R_l	0.01	B_f	0.1
X_l	0.25	β	0.015
R_c	0.005	R_{dc}	0.1
X_c	0.15		

对于不同的换流器控制方式,设置了两个测试场景,如表 4 和表 5 所示。

表 4 VSC 换流站控制模式(场景 A)

Table 4 Control modes of VSC station (case A)

VSC	控制模式	控制参数	
VSC1	3	$V_{dc} = 1.11$ p.u.	$Q_s = 8.0$ MW
VSC2	1	$P_s = -33.5$ MW	$Q_s = 0$
VSC3	2	$P_s = 13.5$ MW	$V_{ac} = 0.98$ p.u.

表 5 VSC 换流站控制模式(场景 B)

Table 5 Control modes of VSC station (case B)

VSC	控制模式	控制参数	
VSC1	4	$V_{dc} = 1.11$ p.u.	$V_{ac} = 1.00$ p.u.
VSC2	1	$P_s = -30$ MW	$Q_s = -5$ MW
VSC3	1	$P_s = 15$ MW	$Q_s = 5.0$ MW

潮流计算的未知量包括电压和电流,所有电压和电流的实部的初值均选为 1.0 p.u.,虚部的初值均选为 0.0 p.u.。统一潮流算法和交替求解法的潮流计算收敛精度均为 1×10^{-8} ,对于场景 A 所示的电网,各换流站所连交直流节点的潮流计算结果如表 6 所示。

对于场景 B 所示的电网,各换流站所连交直流节点的潮流计算结果如表 7 所示。

根据表 6 和表 7,可以看到对于换流站的不同控制模式,在收敛精度范围内,本文方法与交替求解法的潮流计算结果一致,验证了本文方法的正确

性。对比本文方法与交替求解法的迭代次数, 说明统一求解法的收敛性优于迭代求解法, 具有更快的计算速度。

表 6 场景 A 计算结果

Table 6 Results of case A

节点编号	本文方法结果	交替求解法结果
$V_{ac}/p.u.$		
6	0.969 6∠-2.301 4°	0.969 6∠-2.301 4°
2	1.000 0∠-0.417 9°	1.000 0∠-0.417 9°
5	0.980 0∠-1.951 4°	0.980 0∠-1.951 4°
$V_{dc}/p.u.$		
1	1.110 0	1.110 0
2	1.127 7	1.127 7
3	1.115 3	1.115 3
迭代次数	5	25

表 7 场景 B 计算结果

Table 7 Results of case B

节点编号	本文方法结果	交替求解法结果
$V_{ac}/p.u.$		
6	1.000 0∠-3.023 0°	1.000 0∠-3.023 0°
2	1.000 0∠-0.357 0°	1.000 0∠-0.357 0°
5	1.005 9∠-2.392 1°	1.005 9∠-2.392 1°
$V_{dc}/p.u.$		
1	1.110 0	1.110 0
2	1.123 2	1.123 2
3	1.109 4	1.109 4
迭代次数	5	17

4.2 IEEE 118 节点系统

为进一步研究本文方法的收敛性和计算精度, 采用改进的 IEEE 118 节点交直流电网模型对基于扩展节点法的交直流统一潮流算法和交替求解法^[15]进行对比, 如图 4 所示为系统中的柔性直流电网及其相邻交流电网部分。

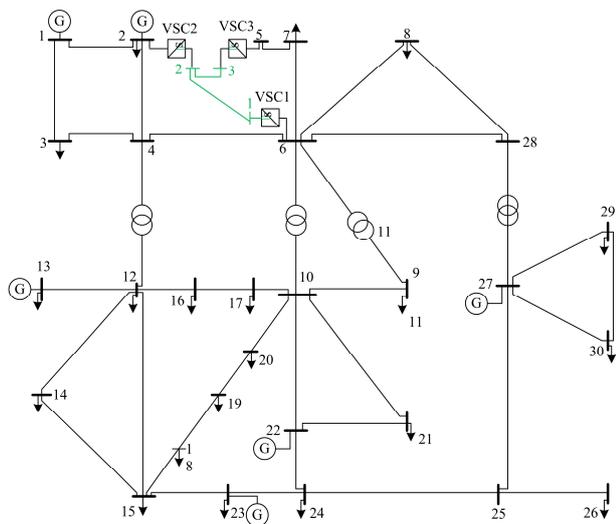


图 4 改进的 IEEE 118 节点系统的直流电网部分

Fig. 4 DC grid within modified IEEE 118-bus network

该算例系统包括 5 个 VSC 换流站和 1 个五端柔性直流电网, 换流站分别与交流电网的节点 15、19、33、34、37 相连, 直流电网部分包含 5 个直流母线和 5 条直流输电线, 换流站和直流电网的参数在表 3 列出。换流器的控制方式如表 8 所示。

表 8 VSC 换流站控制模式

Table 8 Control modes of VSC station

VSC	控制模式	控制参数	
VSC1	3	$V_{dc} = 1.11 p.u.$	$Q_s = 8.0 MW$
VSC2	1	$P_s = 15 MW$	$Q_s = 24 MW$
VSC3	1	$P_s = 23 MW$	$Q_s = 9 MW$
VSC4	1	$P_s = 90 MW$	$Q_s = -36 MW$
VSC5	2	$P_s = -110 MW$	$V_{ac} = 1.00 p.u.$

设定统一潮流算法和交替求解法的潮流计算收敛精度均为 1×10^{-6} , 各换流站所连交直流节点的潮流计算结果如表 9 所示, 两种方法在的收敛过程如表 10 所示。

表 9 118 节点系统计算结果

Table 9 Results of 118-bus system

节点编号	本文方法结果	交替求解法结果
$V_{ac}/p.u.$		
15	0.970 0∠-20.244 9°	0.970 0∠-20.244 9°
19	0.962 0∠-20.001 0°	0.962 0∠-20.001 0°
33	0.984 1∠-19.899 7°	0.984 1∠-19.899 7°
34	0.984 0∠-19.350 2°	0.984 0∠-19.350 2°
37	1.000 0∠-19.507 8°	1.000 0∠-19.507 8°
$V_{dc}/p.u.$		
1	1.110 0	1.110 0
2	1.076 7	1.076 7
3	1.107 6	1.107 6
4	1.057 6	1.057 6
5	1.126 4	1.126 4
迭代次数	7	23

表 10 收敛过程信息

Table 10 Convergence process information

迭代次数	本文方法		交替求解法	
	潮流方程残差	迭代次数	潮流方程残差	迭代次数
1	6.516 0	5(交流)	2.097 6	
2	6.448 4	4(直流)	1.504 7	
3	1.582 2	5(交流)	0.002 1	
4	0.142 7	2(直流)	0.002 0	
5	0.001 3	3(交流)	$7.833 6 \times 10^{-6}$	
6	$7.433 3 \times 10^{-6}$	2(直流)	$7.678 8 \times 10^{-6}$	
7	$7.130 6 \times 10^{-8}$	2(交流)	$2.981 2 \times 10^{-8}$	

从表 9 可以看到本文方法与交替求解法的潮流计算结果一致, 验证了本文方法的正确性。根据表 10, 本文的统一潮流算法的收敛性优于交替求解法, 进一步对比在不同收敛精度下两种方法的迭代次数, 如表 11 所示。

表 11 两种算法在不同收敛精度时迭代次数比较
Table 11 Convergence behavior comparison of two methods
under different precision

收敛精度	本文方法迭代次数	交替求解法迭代次数
1×10^{-4}	6	16
1×10^{-6}	7	23
1×10^{-8}	8	31

由表 11 可知, 随着收敛精度增加, 本文方法只需要较少次数迭代即可收敛, 而交替迭代法需要较多迭代, 本文方法具有更好的收敛性。

5 结论

本文在基于扩展节点法建立了交直流混合电网的稳态模型, 提出了计及 VSC 型换流站多种控制模式的交直流混合电网统一潮流计算方法, 结合 IEEE 30 节点和 118 节点算例验证了方法的有效性。

所提出的算法适用于包含各种节点类型的交直流混合电网, 考虑了 VSC 型换流站的四种常见控制模式及损耗模型, 可以求解含多个 VSC、任意交直流拓扑结构、复杂交直流连接方式的交直流潮流计算问题。通过扩展节点法建立的网络模型, 有效利用了传统节点法网络模型的节点导纳矩阵, 减少了建模的工作量。通过引入支路电流和节点注入电流作为变量, 可以简洁表示交直流混合电网中的各种非线性元件及控制方程, 对于换流站的各种控制策略具有很好的扩展性。交直流混合电网的统一潮流模型通过牛顿法求解, 在每步迭代过程中, 雅可比矩阵的大部分元素都保持不变, 与传统节点法相比, 雅可比矩阵需要更新的元素数量减少了三分之一左右, 大幅降低了计算需求, 提高了计算效率。

本文提出的基于扩展节点法的交直流混合电网统一潮流计算方法易于在已有潮流计算程序上进行扩展, 可为交直流混合电网的稳态分析及潮流计算提供参考。

参考文献

- [1] 李兴源, 赵睿, 刘天琪, 等. 传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 288-300.
LI Xingyuan, ZHAO Rui, LIU Tianqi, et al. Research of conventional high voltage direct current transmission system stability analysis and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 288-300.
- [2] 武家辉, 王海云, 王维庆, 等. 混合三端直流输电系统在风火打捆并网中的应用及其控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 49-55.
WU Jiahui, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. A bundling system of wind-coal power plants and its control strategies based on hybrid MTDC transmissions[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 49-55.
- [3] 张宏俊, 吴越文, 陈卓, 等. 交直流配电网接纳分布式电源的实时仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 79-85.
ZHANG Hongjun, WU Yuewen, CHEN Zhuo, et al. Real-time simulation of AC and DC distribution network to receive distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 49-55.
- [4] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148.
LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.
- [5] 傅旭, 杨欣, 苗淼, 等. 青海交直流混合送端电网暂态稳定性分析[J]. 陕西电力, 2016, 44(9): 20-25.
FU Xu, YANG Xin, MIAO Miao, et al. Study on the transient stability of hybrid sending systems in Qinghai power grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(9): 20-25.
- [6] 李传栋, 王建明, 印永华. 含多端柔性直流的大电网潮流联立计算方法研究[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1025-1029.
LI Chuandong, WANG Jianming, YIN Yonghua. Research of power flow simultaneous algorithm for power system with VSC-MTDC[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1025-1029.
- [7] SMED T, ANDERSSON G. A new approach to AC/DC power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3): 1238-1244.
- [8] 郭捷龙, 杜一盟, 袁霞. 基于 VSC-HVDC 稳态响应的解析求解方法研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(4): 42-45, 50.
WU Jielong, DU Yimeng, YUAN Xia. Analytic method for solving steady-state response of VSC-HVDC[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(4): 42-45, 50.
- [9] 谭涛亮, 张尧. 计及直流控制方式转换和换流变变比调整的交直流潮流算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 40-45.
TAN Taoliang, ZHANG Yao. Study on AC/DC power flow algorithm considering the switching of DC control mode and converter transformer ratio[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 40-45.
- [10] 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.
- [11] LIU C, ZHANG B, HOU Y, et al. An improved approach for AC-DC power flow calculation with multi-infeed DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 862-869.
- [12] 陆晓楠, 孙凯, GURRERO J, 等. 适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 35-42.
LU Xiaonan, SUN Kai, GURRERO J, et al. DC hierarchical control system for microgrid applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 35-42.
- [13] BEERTEN J, COLE S, BELMANS R. A sequential AC/DC power flow algorithm for networks containing multi-terminal VSC HVDC systems[J]. University of British Columbia, 2010, 89(1): 1-7.
- [14] BARADAR M, GHANDHARI M, VAN HERTEM D, et al. Power flow calculation of hybrid AC/DC power systems[C] // Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA: 1-6.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] ACHA E, KAZEMTABRIZI B. A new STATCOM model for power flows using the Newton-Raphson method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2602-2612.
- [18] WANG W, BARNES M. Power flow algorithms for multi-terminal VSC-HVDC with droop control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1721-1730.
- [19] LIANG H, ZHAO X, YU X, et al. Study of power flow algorithm of AC/DC distribution system including VSC-MTDC[J]. Energies, 2015, 8(8): 8391-8405.
- [20] CHAI R, ZHANG B, BO Z, et al. A generalized unified power flow algorithm for AC/DC networks containing VSC-based multi-terminal DC grid[C] // International Conference on Power System Technology, October 20-22, 2014, Chengdu, China: 2361-2366.
- [21] HO C W, RUEHLI A, BRENNAN P. The modified nodal approach to network analysis[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems, 1975, 22(6): 504-509.
- [22] WEDEPHOL L M, JACKSON L. Modified nodal analysis: an essential addition to electrical circuit theory and analysis[J]. Engineering Science & Education Journal, 2002, 11(3): 84-92.
- [23] KOCAR I, MAHSEREDJIAN J, KARAAGAC U, et al. Multiphase load-flow solution for large-scale distribution systems using MANA[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 908-915.
- [24] 30-bus system (IEEE Test Case)[EB/OL]. <http://al-roomi.org/power-flow/30-bus-system>.
- [25] ABB. It's time to connect-technical description of HVDC light technology[Z]. Sweden: ABB Power Technology, 2005.

收稿日期: 2017-06-28; 修回日期: 2017-09-20

作者简介:

吴素农(1964—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划;

于金镒(1963—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划;

田庄(1992—), 男, 博士, 博士研究生, 研究方向为配电网优化调度。

(编辑 张爱琴)