DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200148

# 基于网络矩阵的交直流混合配电网潮流计算

金国彬[1]，石 超[1]，李国庆[1]，潘 狄[1]，刘座铭[2]

（1.现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学)，吉林 吉林 132000；
2.国网吉林省电力公司研究院，吉林 长春 130000）

**摘要：**为了准确分析含有分布式可再生能源及具有发-用-储一体化新型柔性负荷的复杂大系统的潮流分布，针对具有离散性、动态性、非线性、多目标性和不确定性等特点的现代城市配电网，给出一种基于网络矩阵的交直流混合配电网潮流计算方法。首先，根据 PWM 调制原理给出电压源转换器(VSC)的稳态潮流模型。然后，通过二进制描述的网络矩阵，建立交直流混合配电网拓扑结构的潮流计算模型。进而，针对不同控制策略修改雅可比矩阵，并基于牛顿拉夫逊法求解潮流模型。最后给出了两个算例，针对该方法与 PSCAD 仿真的结果进行比较分析，验证了所提的潮流计算模型的正确性、灵活性和收敛性。

**关键词：**交直流混合配电网；控制策略；网络矩阵；潮流计算；雅可比矩阵

## Power flow calculation of an AC-DC hybrid distribution network based on a network matrix

JIN Guobin[1], SHI Chao[1], LI Guoqing[1], PAN Di[1], LIU Zuoming[2]

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132000, China;
2. State Grid Jilin Electric Power Company Research Institute, Changchun 130000, China)

**Abstract:** It is important to accurately analyze the power flow distribution of complex large-scale systems containing distributed renewable energy and a new flexible load with integrated generation-use-storage. Considering modern urban power distribution networks with characteristics of discreteness, dynamics, non-linearity, multi-objectiveness, and uncertainty, a power flow calculation method of an AC-DC hybrid distribution network based on a network matrix is presented. First, a steady-state power flow model of a Voltage Source Converter (VSC) is given according to the PWM modulation principle. Secondly, based on a binary described network matrix, the power flow calculation model of the AC-DC hybrid distribution network topology is established. Further, by modifying the Jacobian matrix for different control strategies the power flow model is solved based on Newton-Raphson method. Finally, two examples are given, and the results of PSCAD simulation are used to make a comparative analysis, which verifies the correctness, flexibility and convergence of the proposed power flow calculation model.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5102-201999343A-0-0-00).

**Key words:** AC-DC hybrid distribution network; control strategy; network matrix; power flow calculation; Jacobian matrix

## 0 引言

随着分布式能源的兴起以及电力电子化电力系统研究的不断深入，以直流形式灵活利用电能已受到广泛关注[1-3]。相对于传统的交流配电网，直流配电网具有传输容量大、稳定性好、电能质量高、可控性强和占用空间小等一系列优点。同时，分布式电源、储能装置可从直流侧并入系统，减少了电力电子设备并网的逆变环节，降低成本和损耗，提高供电可靠性。为适应不同类型的电源和负荷，城市配电网逐渐向交直流混合配电网模式发展[4-8]。因此

基金项目：国家电网公司总部科技项目资助(5102-201999343A-0-0-00)

针对城市配电网的交直流混合配电网潮流计算成为一项重要研究内容。

现有交流配电网的潮流计算方法已较为成熟，而适用于交直流混合配电网的潮流计算方法，依然需要进一步完善。已有的交直流混合潮流计算方法主要分为两类：统一迭代法和交替迭代法。统一迭代法完整地计及交流系统与直流系统的耦合关系，具有二次收敛精度，对不同结构、控制方式的系统都有良好的收敛性。交替迭代法仅通过公共连接点来传递相互之间的影响，因此耦合性较差，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[9-17]。文献[18]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，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。文献[19]提出了含多平衡机及多机联合调压的潮流计算统一迭代模型以改善大规模交直流电网潮流计算的收敛性。文献[20]分析了交替迭代法重复交替的根源，并设法避免，从而提出一种交直流解耦潮流计算方法，其解耦主要通过调整交直流子系统划分界限和 VSC 潮流计算有功参数的选择来实现。城市微电网采取下垂控制，以实现交流和直流功率比例共享。文献[21]提出了 VSC-HVDC 系统模糊下垂控制改进潮流算法，实现了对 VSC 直流侧电压与有功功率偏差的调节。文献[22]对交直流混合微电网并网与孤岛模式下的运行状态和控制策略进行全面的分析，实现了大批量的充电站和大电网之间的沟通与交互。现有文献研究的交直流潮流模型对于网架拓扑结构的适应能力有限，无法完全适应城市配电网的某些特定或复杂的拓扑结构。

本文首先介绍了 AC-DC 换流器在不同控制策略下的模型；其次，结合配电网拓扑结构形成网络矩阵，并建立交直流拓扑结构下的潮流计算模型及其对应潮流方程。在此基础上，提出基于网络矩阵的交直流混合配电网潮流计算，基于牛顿-拉夫逊法进行求解，对于城市配电网的某些特定或复杂的拓扑结构的潮流问题均可求解。

## 1　AC-DC 换流器稳态模型

AC-DC 电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)是联结交直流混合配电网的重要环节，其主要由全控换流桥、换流变压器、换流电抗器、交流滤波器和直流电容组成，开关器件采用 IGBT 可关断器件[23-24]。稳态运行时可忽略电压电流中的谐波分量，仅考虑基波分量，其等效稳态模型如图 1 所示。

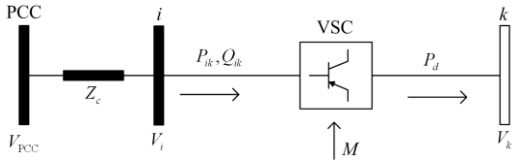



图 1 VSC 换流器稳态模型

Fig. 1 Steady state model of VSC converter

图 1 中，$P_{ik}$ 为 VSC 交流侧有功功率，$Q_{ik}$ 为 VSC 交流侧无功功率，$P_d$ 为 VSC 直流侧有功功率，$V_{\mathrm{PCC}}$ 为公共耦合点(PCC)电压幅值，$V_i$ 为 $i$ 节点电压幅值，$V_k$ 为 $k$ 节点电压幅值，将公共耦合点与 VSC 交流侧节点之间所有元件包括线路阻抗一起用一个阻抗 $Z_c$ 等效。本文采取标幺值参数计算，以下所有公式变量均为标幺值，根据 PWM 调制原理，换流器的交流侧电压和直流侧电压有如式(1)关系。

$$V_i = \frac{\mu M}{\sqrt{2}} V_k \tag{1}$$

式中：$\mu$ 为直流电压利用率，采用正弦波脉宽调制时为 $\sqrt{3}/2$，采用空间矢量脉宽调制时为 1；$M$ 为脉宽调制比。考虑换流器损耗，换流器效率为 $\eta_{ik}^{L}$，如图 1 参考方向，换流器两侧的功率关系为

$$P_{ik} = P_d / \eta_{ik}^{L} \tag{2}$$

当换流器在主从控制策略下，无功功率由换流器功率因数角直接求得：

$$Q_{ik} = P_{ik} \tan \phi_{ik}^{L} \tag{3}$$

当换流器在下垂控制策略下并处于逆变状态时，通过下垂增益实现无功功率比例共享，其无功功率为

$$\begin{cases} Q_{ik} = (V_{\max} - V_i) / \lambda_Q^{\mathrm{VSC}} \\ \lambda_Q^{\mathrm{VSC}} = (V_{\max} - V_{\min}) / Q_{\mathrm{VSC,max}} \end{cases} \tag{4}$$

式中：$\lambda_Q^{\mathrm{VSC}}$ 为换流器无功功率下垂增益；$Q_{\mathrm{VSC,max}}$ 为换流器支持的无功功率上限；$V_{\max}$ 为换流器电压上限；$V_{\min}$ 为换流器电压下限。

## 2　潮流计算模型

### 2.1 网络矩阵

为了交直流混合配电网潮流计算的统一性，定义描述系统拓扑关系的网络矩阵，这也是建立交直流混合配电网潮流计算模型的重要环节，网络矩阵采取二进制的形式表示，定义如下：

1) 节点种类矩阵 $\boldsymbol{B}(N \times 1)$。$B_i = 1, i$ 是直流节点，$B_i = 0, i$ 是交流节点。

2) 网络连接矩阵 $\boldsymbol{C}(N \times N)$。$C_{ij} = 1$，$i$、$j$ 节点

之间有支路连接，$\boldsymbol{C}_{ij}=0$，$i$、$j$ 节点之间无支路连接。

3) 支路种类矩阵 $\boldsymbol{L}(N\times N)$。$L_{ij}=1$，$i$、$j$ 节点间是直流支路，$L_{ij}=0$，$i$、$j$ 节点间是交流支路。

### 2.2 交直流潮流方程模型

通常，交流节点和直流节点的连接方式具体可分为 5 种，如图 2 所示。

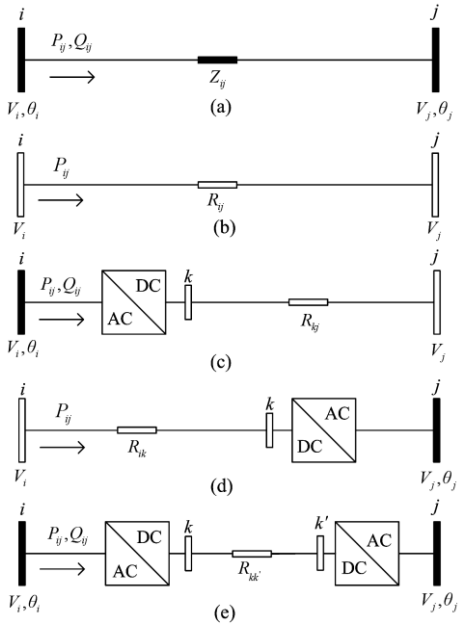



图 2 节点连接拓扑图

Fig. 2 Node connection topology diagram

1) 两个交流节点直接相连，如图 2(a)所示，令线路导纳 $Y_{ij}=1/Z_{ij}=G_{ij}+\mathrm{j}B_{ij}$，其功率方程为

$$\begin{cases}P_{ij}=V_i^2G_{ij}-V_iV_j(G_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij})\\ Q_{ij}=-V_i^2B_{ij}-V_iV_j(G_{ij}\sin\theta_{ij}-B_{ij}\cos\theta_{ij})\end{cases}\tag{5}$$

式中，$\theta_{ij}$ 为 $i$ 节点与 $j$ 节点的电压相角差。结合网络矩阵，得到的潮流方程为

$$\begin{cases}P_{ij}^{(a)}=(1-B_i)(1-B_j)(1-L_{ij})P_{ij}\\ Q_{ij}^{(a)}=(1-B_i)(1-B_j)(1-L_{ij})Q_{ij}\end{cases}\tag{6}$$

2) 两个直流节点直接相连，如图 2(b)所示，令 $Y_{ij}=1/R_{ij}=G_{ij}$，其功率方程为

$$P_{ij}=G_{ij}(V_i^2-V_iV_j)\tag{7}$$

式(7)结合网络矩阵，得到的潮流方程为

$$P_{ij}^{(b)}=B_iB_jL_{ij}P_{ij}\tag{8}$$

3) 一个交流节点和一个直流节点经 AC-DC 变流器相连，如图 2(c)所示，当 VSC 采用正弦脉宽调制时，设交流侧电压基准值 $V_B^{\mathrm{ac}}$ 和直流侧电压基准值 $V_B^{\mathrm{dc}}$ 满足式(9)关系。

$$V_B^{\mathrm{ac}}=\sqrt{3/8}V_B^{\mathrm{dc}}\tag{9}$$

结合式(1)可得

$$V_i=M_{ik}V_k\tag{10}$$

令 $Y_{kj}=1/R_{kj}=G_{kj}$，可得

$$P_{kj}=V_kI_{kj}=V_k(V_k-V_j)\mathrm{G}_{kj}\tag{11}$$

考虑 VSC 处于整流或是逆变状态，定义如式(12)函数。

$$\begin{cases}a_1=0.5(1+\mathrm{sign}(M_{ik}^{-1}V_i-V_j))\\ b_1=0.5(1-\mathrm{sign}(M_{ik}^{-1}V_i-V_j))\end{cases}\tag{12}$$

将式(10)、式(11)和式(12)代入式(2)得

$$P_{ij}=\frac{(M^{-2}V_i^2-M^{-1}V_iV_j)\mathrm{G}_{kj}}{a_1/\eta_{ij}^L+\mathrm{b}_1\eta_{ij}^L}\tag{13}$$

式(13)结合网络矩阵，得到的潮流方程为

$$\begin{cases}P_{ij}^{(c)}=(1-B_i)B_jL_{ij}P_{ij}\\ Q_{ij}^{(c)}=(1-B_i)B_jL_{ij}P_{ij}\tan\phi_{ij}^L\end{cases}\tag{14}$$

4) 一个直流节点和一个交流节点经 DC-AC 变流器相连，如图 2(d)所示，令 $Y_{ik}=1/R_{ik}=G_{ik}$，其功率方程为

$$P_{ij}=G_{ik}(V_i^2-V_iM_{jk}^{-1}V_j)\tag{15}$$

式(15)结合网络矩阵，得到的潮流方程为

$$P_{ij}^{(d)}=B_i(1-B_j)L_{ij}P_{ij}\tag{16}$$

5) 两个交流节点经两个 AC-DC 变流器通过直流线路相连，如图 2(e)所示，令 $Y_{kk'}=1/R_{kk'}=G_{kk'}$，考虑 VSC 处于整流或是逆变状态，定义如式(17)函数。

$$\begin{cases}a_2=0.5(1+\mathrm{sign}(M_{kk'}^{-1}V_i-M_{k'k}^{-1}V_j))\\ b_2=0.5(1-\mathrm{sign}(M_{kk'}^{-1}V_i-M_{k'k}^{-1}V_j))\end{cases}\tag{17}$$

其功率方程为

$$P_{ij}=\frac{G_{kk'}(M_{kk'}^{-2}V_i^2-M_{kk'}^{-1}V_iM_{k'k}^{-1}V_j)}{a_2/\eta_{ij}^L+b_2\eta_{ij}^L}\tag{18}$$

式(18)结合网络矩阵，得到的潮流方程为

$$\begin{cases}P_{ij}^{(e)}=(1-B_i)(1-B_j)L_{ij}P_{ij}\\ Q_{ij}^{(e)}=(1-B_i)(1-B_j)L_{ij}P_{ij}\tan\phi_{ij}^L\end{cases}\tag{19}$$

## 3 交直流混合配电网潮流计算

通常交直流混合配电网中的每一个节点均可接入交流电源、直流电源、交流负荷和直流负荷。对于交流节点，如接直流电源或直流负荷就需要 AC-DC 换流器进行连接；同理，直流节点接交流电源或交流负荷也是如此。节点注入的功率可定义为

$$\begin{cases} P_{is}^{\mathrm{ac}} = P_{\mathrm{G}}^{\mathrm{ac}} - P_{\mathrm{L}}^{\mathrm{ac}} + \eta_i^B P_{\mathrm{G}}^{\mathrm{dc}} - P_{\mathrm{L}}^{\mathrm{dc}} / \eta_i^B \\ Q_{is}^{\mathrm{ac}} = Q_{\mathrm{G}}^{\mathrm{ac}} - Q_{\mathrm{L}}^{\mathrm{ac}} + \eta_i^B P_{\mathrm{G}}^{\mathrm{dc}} \tan\varphi_i^B - \\ \qquad P_{\mathrm{L}}^{\mathrm{dc}} \tan\varphi_i^B / \eta_i^B \\ P_{is}^{\mathrm{dc}} = P_{\mathrm{G}}^{\mathrm{dc}} - P_{\mathrm{L}}^{\mathrm{dc}} + \eta_i^B P_{\mathrm{G}}^{\mathrm{ac}} - P_{\mathrm{L}}^{\mathrm{ac}} / \eta_i^B \end{cases} \tag{20}$$

式中：$P_{is}^{\mathrm{ac}}$ 为交流节点注入有功功率；$Q_{is}^{\mathrm{ac}}$ 为交流节点注入无功功率；$P_{is}^{\mathrm{dc}}$ 为直流节点注入有功功率；$P_{\mathrm{G}}^{\mathrm{ac}}$ 为交流节点电源有功功率；$Q_{\mathrm{G}}^{\mathrm{ac}}$ 为交流节点电源无功功率；$P_{\mathrm{L}}^{\mathrm{ac}}$ 为交流节点负荷有功功率；$Q_{\mathrm{L}}^{\mathrm{ac}}$ 为交流节点负荷无功功率；$P_{\mathrm{G}}^{\mathrm{dc}}$ 为直流节点电源有功功率；$P_{\mathrm{L}}^{\mathrm{dc}}$ 为直流节点负荷有功功率；$\eta_i^B$ 为 $i$ 节点换流器效率；$\varphi_i^B$ 为 $i$ 节点换流器功率因数角。

### 3.1 功率平衡方程

根据之前建立的网络矩阵和潮流计算模型，建立节点总数是 $N$ 的交直流混合配电网功率平衡方程。

$$\begin{cases} P_{is} - P_i = 0, \forall i = 1,2,\cdots,N \\ Q_{is} - Q_i = 0, \forall i = 1,2,\cdots,N \end{cases} \tag{21}$$

其中：

$$\begin{cases} P_{is} = (1 - B_i) P_{is}^{\mathrm{ac}} + B_i P_{is}^{\mathrm{dc}} \\ Q_{is} = (1 - B_i) Q_{is}^{\mathrm{ac}} \\ P_i = \sum\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} C_{ij} (P_{ij}^{(a)} + P_{ij}^{(b)} + P_{ij}^{(\mathrm{c})} + P_{ij}^{(d)} + P_{ij}^{(e)}) \\ Q_i = \sum\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} C_{ij} (Q_{ij}^{(a)} + Q_{ij}^{(c)} + Q_{ij}^{(e)}) \end{cases} \tag{22}$$

### 3.2 修正方程和雅可比矩阵

在交直流混合配电网潮流计算方程中，每一个交流节点涉及 2 个不平衡量，分别为有功功率和无功功率的不平衡量；每一个直流节点都涉及 1 个不平衡量，即有功功率不平衡量；每一个交流节点的状态变量是电压幅值与电压相角；每一个直流节点的状态变量是电压幅值。交流节点类型包括平衡节点、PV 节点、PQ 节点和交流下垂节点；直流节点类型包括定电压节点、定功率节点和直流下垂节点。对功率平衡方程展开成泰勒级数，略去二次及以上各项，可得到交直流潮流的牛顿拉夫逊法的修正方程并采用矩阵形式表示如式(23)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta Q \\ \Delta P \end{bmatrix} = -\boldsymbol{J} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \end{bmatrix} \tag{23}$$

式中：$\boldsymbol{J}$ 为修正方程的系数矩阵，即雅可比矩阵；$\Delta P$ 为有功功率的不平衡量；$\Delta Q$ 为无功功率的不平衡量；$\Delta V$ 为电压幅值的修正量；$\Delta\theta$ 为电压相角的修正量。通过高斯消去法可以对修正方程求解。

需要说明的是，不同控制策略下形成的雅可比矩阵是不同的。

1) 主从控制：平衡节点的电压幅值和电压相角均已知，即该状态变量为常数，雅可比矩阵中与这 2 个状态变量相关联的元素均为零，有功功率和无功功率的不平衡量也为零；PV 节点的电压幅值已知，雅可比矩阵中与这个状态变量相关联的元素均为零，无功功率的不平衡量也为零。

2) 下垂控制：对于交流系统需要设置一个电压相角参考节点，即该节点电压相角状态变量为常数，雅可比矩阵中与这个状态变量相关联的元素均为零，该节点的无功功率的不平衡量也为零，通常这个节点为连接上级配电网的交流节点；为实现交流电源有功功率和直流电源有功功率及交流电源无功功率和 VSC 换流器无功功率比例共享，需要对电源的注入功率加以约束，功率约束条件及下垂比例系数如下式所示。

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G}}^{\mathrm{ac}} = (f_{\max} - f_i) / \lambda_{\mathrm{P}}^{\mathrm{ac}} \\ \lambda_{\mathrm{P}}^{\mathrm{ac}} = (f_{\max} - f_{\min}) / P_{\mathrm{G,max}}^{\mathrm{ac}} \end{cases} \tag{24}$$

$$\begin{cases} Q_{\mathrm{G}}^{\mathrm{ac}} = (V_{\max} - V_i) / \lambda_Q^{\mathrm{ac}} \\ \lambda_{\mathrm{Q}}^{\mathrm{ac}} = (V_{\max} - V_{\min}) / Q_{\mathrm{G,max}}^{\mathrm{ac}} \end{cases} \tag{25}$$

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G}}^{\mathrm{dc}} = (V_{\max} - V_i) / \lambda_{\mathrm{P}}^{\mathrm{dc}} \\ \lambda_{\mathrm{P}}^{\mathrm{dc}} = (V_{\max} - V_{\min}) / P_{\mathrm{G,max}}^{\mathrm{dc}} \end{cases} \tag{26}$$

式中：$\lambda_{\mathrm{P}}^{\mathrm{ac}}$ 为交流电源有功功率下垂增益；$\lambda_{\mathrm{Q}}^{\mathrm{ac}}$ 为交流电源无功功率下垂增益；$\lambda_{\mathrm{P}}^{\mathrm{dc}}$ 为直流电源有功功率下垂增益；$f_i$ 为 $i$ 节点的频率；$f_{\max}$ 为频率上限；$f_{\min}$ 为频率下限。对于交流电源有功功率约束需要对其进行归一化处理[25]。

$$\hat{f} = \hat{V} \tag{27}$$

其中：

$$\begin{cases} \hat{f} = \dfrac{f_i - 0.5(f_{\max} + f_{\min})}{0.5(f_{\max} - f_{\min})} \\ \hat{V} = \dfrac{V_i - 0.5(V_{\max} + V_{\min})}{0.5(V_{\max} - V_{\min})} \end{cases} \tag{28}$$

对于交流下垂节点，$P_{\mathrm{G}}^{\mathrm{ac}}$ 和 $Q_{\mathrm{G}}^{\mathrm{ac}}$ 是关于电压幅值的函数，对状态变量求偏导并加在雅可比矩阵对应的元素上，有功功率和无功功率的不平衡量根据式(24)和式(25)计算并修改；对于直流下垂节点，$P_{\mathrm{G}}^{\mathrm{dc}}$ 是关于电压幅值的函数，对状态变量求偏导并加在雅可比矩阵对应的元素上，有功功率的不平衡量根据式(26)计算并修改；对于 VSC 交流侧节点，当 VSC 换流器处于逆变状态时，通过 VSC 换流器注入系统的无功功率是关于电压幅值的函数，对状态变量求偏导并加在雅可比矩阵对应的元素上，无功功率的

不平衡量根据式(4)计算并修改。

### 3.3 算法流程

本文基于网络矩阵的交直流混合配电网潮流计算过程如下：

1) 输入网络数据及系统控制参数；

2) 形成网络矩阵，设各节点电压初值；

3) 将各节点电压初值和网络矩阵代入式(6)、式(8)、式(14)、式(16)和式(19)，求得各线路传输功率及雅可比矩阵的各个元素；

4) 将各线路传输功率和网络矩阵代入式(21)和式(22)，求得修正方程的不平衡量；

5) 判断系统控制方式，如是下垂控制，计算相应增量并对修改修正方程；

6) 通过高斯消去法解修正方程，求各节点电压的修正量；

7) 计算各节点电压新值，如满足迭代精度计算节点功率和线路功率，否则运用各节点电压新值自第三步开始下一次迭代。

详细计算流程图见图 3。

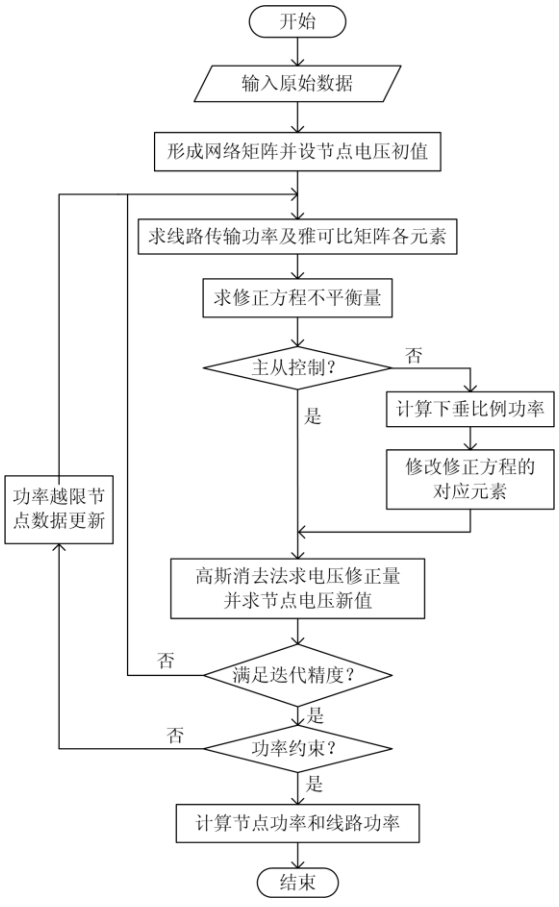



图 3 基于网络矩阵的交直流混合配电网潮流计算流程图

Fig. 3 Flow chart of AC/DC hybrid distribution network power flow calculation based on network matrix

## 4 算例分析

为验证本潮流模型的有效性和灵活性，在配置为 Inter(R) Core(TM) i5-7300HQ CPU @ 2.50 GHz，64 bit, 16GB RAM 的计算机上，通过 Matlab 软件平台编写相应计算机程序和 PSCAD 两种方式，对不同控制下的交直流混合配电网进行仿真测试。

### 4.1 算例 1

图 4 所示为 13 节点交直流混合配电网，系统控制方式为主从控制，系统基准参数如下：$S_B=10$ MW，$V_B^{ac}=4.16$ kV，$V_B^{ac}=6.8$ kV；系统中所有 AC-DC 换流器的效率和功率因数分别 98%和 95%；状态变量修正误差 $pr=0.00001$；各线路数据如表 1 所示；各节点数据如表 2 所示；程序运行迭代次数 4 次，运行时间为 0.125 s，潮流计算节点电压幅值、电压相角和电源节点注入功率如表 3 所示；各支路首末端功率如表 4 所示。PSCAD 与之对应的结果如表 5 和表 6 所示，对比表中数据分析，电压幅值平均误差为 0.017%、电压相角平均误差为 0.016%、有功功率平均误差为 0.027%、无功功率平均误差为 0.026%，对比图如图 5 所示。可以说明主从控制下的交直流混合配电网潮流计算的正确性。

表 1 算例 1 各线路数据

Table 1 Data of each line of example 1

| $i$ 节点 | $j$ 节点 | 电阻/Ω | 电抗/Ω | $i$ 节点 | $j$ 节点 | 电阻/Ω | 电抗/Ω |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 0.221 80 | 0.363 00 | 5 | 6 | 0.220 80 | — |
| 1 | 9 | 0.221 80 | 0.363 00 | 6 | 13 | 0.441 50 | — |
| 2 | 3 | 0.887 00 | 1.452 00 | 7 | 8 | 0.443 50 | 0.726 00 |
| 3 | 10 | 0.050 00 | 0.754 00 | 7 | 12 | 0.050 00 | 0.754 00 |
| 3 | 11 | 0.050 00 | 0.754 00 | 7 | 13 | 0.050 00 | 0.754 00 |
| 4 | 5 | 0.220 80 | — | 8 | 9 | 0.443 50 | 0.726 00 |
| 4 | 11 | 0.441 50 | — | 10 | 12 | 0.883 00 | — |

表 2 算例 1 各节点类型及负荷功率

Table 2 Each node type and load power of example 1

| 节点编号($i$) | 节点类型 | $P_L^{ac}$/MW | $Q_L^{ac}$/Mvar | $P_L^{dc}$/MW |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Slack | 0 | 0 | 0 |
| 2 | PQ | 2 | 0.4 | 0 |
| 3 | PV | 1.5 | 0.2 | 0 |
| 4 | P | 0 | 0 | 1 |
| 5 | V | 0 | 0 | 0 |
| 6 | P | 0.3 | 0.1 | 0.7 |
| 7 | PQ | 2.5 | 0.5 | 0 |
| 8 | PV | 1 | 0.1 | 0 |
| 9 | PQ | 2 | 0.34 | 0.51 |
| 10 | PQ | 0 | 0 | 0 |
| 11 | PQ | 0 | 0 | 0 |
| 12 | PQ | 0 | 0 | 0 |
| 13 | PQ | 0 | 0 | 0 |

表 3 算例 1 潮流结果节点电压及电源功率

Table 3 Power flow results node voltage and power supply of example 1

| 节点编号 | $V$/p.u. | $\theta$/rad | $P$/MW | $Q$/Mvar |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.050 00 | 0.000 00 | 4.920 79 | 1.239 78 |
| 2 | 1.012 57 | −0.036 16 | — | — |
| 3 | 1.000 00 | −0.042 51 | 2.500 00 | 0.525 27 |
| 4 | 0.997 39 | — | — | — |
| 5 | 1.000 00 | — | 1.870 42 | — |
| 6 | 0.993 68 | — | — | — |
| 7 | 0.945 56 | −0.115 95 | — | — |
| 8 | 1.000 00 | −0.052 09 | 2.500 00 | 0.424 13 |
| 9 | 1.004 34 | −0.046 38 | — | — |
| 10 | 0.988 20 | −0.070 74 | — | — |
| 11 | 0.991 72 | −0.062 52 | — | — |
| 12 | 0.956 33 | −0.086 69 | — | — |
| 13 | 0.951 03 | −0.101 37 | — | — |

表 4 算例 1 潮流结果线路功率分布

Table 4 Power flow results line power distribution of example 1

| 支路编号 | $i$ 节点 | $j$ 节点 | $i$ 节点-$j$ 节点 | | $j$ 节点-$i$ 节点 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $P$/MW | $Q$/Mvar | $P$/MW | $Q$/Mvar |
| 1 | 1 | 2 | 2.182 57 | 0.573 41 | −2.123 37 | −0.476 52 |
| 2 | 1 | 9 | 2.738 22 | 0.666 37 | −2.645 89 | −0.515 27 |
| 3 | 2 | 3 | 0.123 37 | 0.076 52 | −0.122 32 | −0.074 80 |
| 4 | 3 | 10 | 0.656 02 | 0.236 37 | −0.654 61 | −0.215 19 |
| 5 | 3 | 11 | 0.466 30 | 0.163 70 | −0.465 60 | −0.153 06 |
| 6 | 4 | 5 | −0.545 70 | — | 0.547 13 | — |
| 7 | 4 | 11 | −0.454 30 | — | 0.465 60 | 0.153 05 |
| 8 | 5 | 6 | 1.323 29 | — | −1.314 93 | — |
| 9 | 6 | 13 | 0.314 93 | — | −0.307 70 | −0.101 15 |
| 10 | 7 | 8 | −1.573 02 | −0.220 13 | 1.645 34 | 0.338 51 |
| 11 | 7 | 12 | −0.619 61 | −0.183 77 | 0.620 96 | 0.204 13 |
| 12 | 7 | 13 | −0.307 36 | −0.096 09 | 0.307 70 | 0.101 15 |
| 13 | 8 | 9 | −0.145 34 | −0.014 38 | 0.145 89 | 0.015 27 |
| 14 | 10 | 12 | 0.654 61 | 0.215 19 | −0.620 96 | −0.204 13 |

表 5 算例 1 PSCAD 潮流结果节点电压及电源功率

Table 5 PSCAD power flow results node voltage and power supply of example 1

| 节点编号 | $V$/p.u. | $\theta$/rad | $P$/MW | $Q$/Mvar |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.050 00 | 0.000 00 | 4.920 55 | 1.239 94 |
| 2 | 1.012 58 | −0.036 15 | — | — |
| 3 | 1.000 00 | −0.042 48 | 2.500 00 | 0.524 77 |
| 4 | 0.997 34 | — | — | — |
| 5 | 1.000 00 | — | 1.870 66 | — |
| 6 | 0.993 59 | — | — | — |
| 7 | 0.945 55 | −0.115 96 | — | — |
| 8 | 1.000 00 | −0.052 09 | 2.500 00 | 0.424 36 |
| 9 | 1.004 32 | −0.046 38 | — | — |
| 10 | 0.988 21 | −0.070 71 | — | — |
| 11 | 0.991 69 | −0.062 49 | — | — |
| 12 | 0.956 35 | −0.086 70 | — | — |
| 13 | 0.951 10 | −0.101 40 | — | — |

表 6 算例 1 PSCAD 潮流结果线路功率分布

Table 6 PSCAD power flow results line power distribution of example 1

| 支路编号 | $i$ 节点 | $j$ 节点 | $i$ 节点-$j$ 节点 | | $j$ 节点-$i$ 节点 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $P$/MW | $Q$/Mvar | $P$/MW | $Q$/Mvar |
| 1 | 1 | 2 | 2.182 37 | 0.573 51 | −2.123 18 | −0.476 63 |
| 2 | 1 | 9 | 2.738 22 | 0.666 38 | −2.645 89 | −0.515 28 |
| 3 | 2 | 3 | 0.123 18 | 0.076 63 | −0.122 13 | −0.074 91 |
| 4 | 3 | 10 | 0.655 85 | 0.236 31 | −0.654 44 | −0.215 13 |
| 5 | 3 | 11 | 0.466 28 | 0.163 69 | −0.465 58 | −0.153 05 |
| 6 | 4 | 5 | −0.545 72 | — | 0.547 15 | — |
| 7 | 4 | 11 | −0.454 28 | — | 0.465 58 | 0.153 05 |
| 8 | 5 | 6 | 1.323 47 | — | −1.315 10 | — |
| 9 | 6 | 13 | 0.315 10 | — | −0.307 86 | −0.101 20 |
| 10 | 7 | 8 | −1.573 03 | −0.220 12 | 1.645 35 | 0.338 50 |
| 11 | 7 | 12 | −0.619 44 | −0.183 73 | 0.620 80 | 0.204 07 |
| 12 | 7 | 13 | −0.307 52 | −0.096 15 | 0.307 86 | 0.101 20 |
| 13 | 8 | 9 | −0.145 35 | −0.014 38 | 0.145 89 | 0.015 28 |
| 14 | 10 | 12 | 0.654 44 | 0.215 13 | −0.620 80 | −0.204 07 |

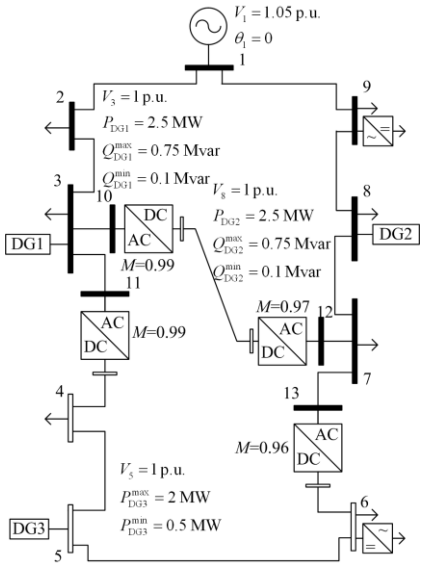
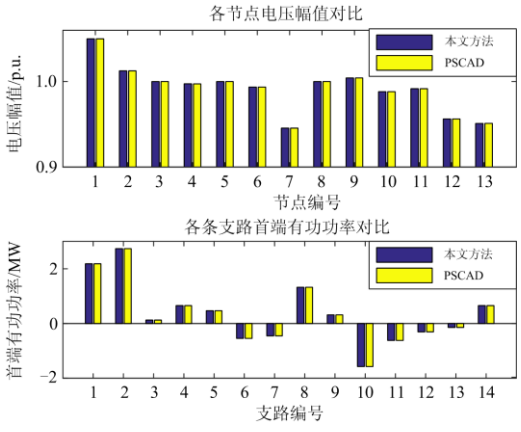



图 4 交直流混合配电网 13 节点拓扑结构图

Fig. 4 13-bus topology diagram of AC/DC hybrid distribution network



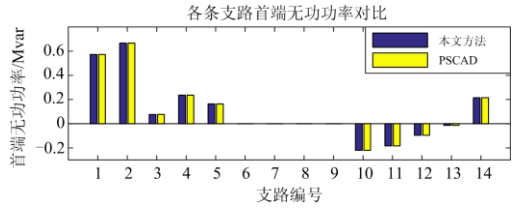



图 5 算例 1 本文方法与 PSCAD 数据对比图

Fig. 5 Comparison between the method in this paper and the PSCAD data of example 1

为了验证系统大小对该算法的影响，建立如图 6 所示的交直流混合配电网，包括一个主配电变电站和四个子系统，每一个子系统是与算例 1 相同的 13 节点网络。程序运行迭代次数 4 次，运行时间为 0.185 s，与 PSCAD 仿真结果对比，电压幅值平均误差为 0.021%、电压相角平均误差为 0.015%、有功功率平均误差为 0.024%和无功功率平均误差为 0.027%。结果表明该算法依然具有很好的收敛性。

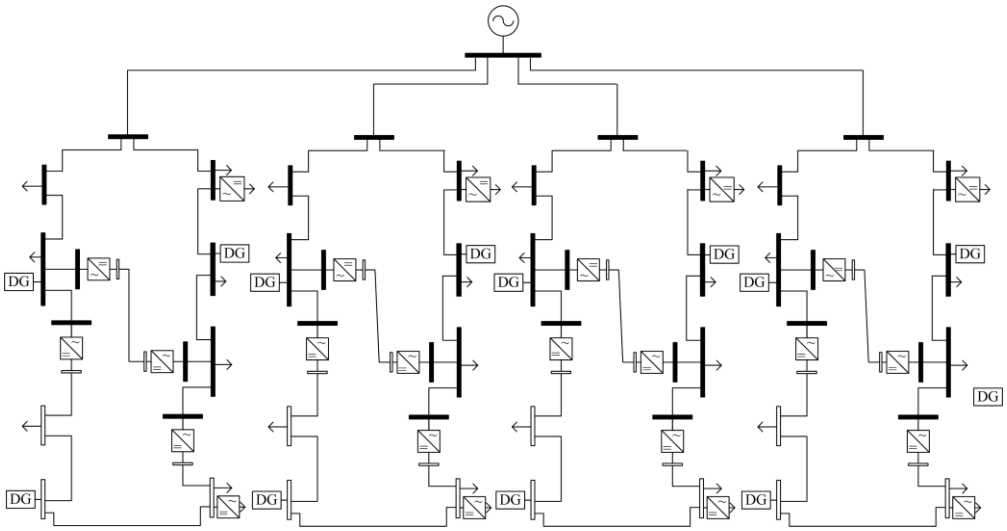



图 6 交直流混合配电网 53 节点拓扑结构图

Fig. 6 53-bus topology diagram of AC/DC hybrid distribution network

## 4.2 算例 2

图 7 所示为 10 节点交直流混合配电网，系统控制方式为下垂控制，系统基准参数如下：$S_{\mathrm{B}}=10\ \mathrm{MW}$，$V_{\mathrm{B}}^{\mathrm{ac}}=4.16\ \mathrm{kV}$，$V_{\mathrm{B}}^{\mathrm{ac}}=6.8\ \mathrm{kV}$；系统频率为 $f=60\ \mathrm{Hz}$，频率偏差为±1%，电压偏差为±5%；系统中所有 AC-DC 换流器的效率和功率因数分别为 95%和 95%，额定功率为 $S_{\mathrm{VSC}}=0.4\ \mathrm{MVA}$，支持的最大无功功率为 $Q_{\mathrm{VSC,max}}=0.1\ \mathrm{Mvar}$；状态变量修正误差 $pr=0.000\,01$；上级配电网所连接的交流节点作为该交直流混合配电网交流系统的电压相角参考节点 $(\theta_1=0\ \mathrm{rad})$；各线路数据如表 7 所示；各节点数据如表 8 所示；程序运行迭代次数 4 次，运行时间为 0.079 s，潮流计算节点电压幅值、电压相角和电源节点注入功率如表 9 所示，各支路首末端功率如表 10 所示。PSCAD 与之对应的结果如表 11 和表 12 所示，对比表中数据分析，电压幅值平均误差为 0.007%、电压相角平均误差为 0.01%、有功功率平均误差为 0.012%和无功功率平均误差为 0.011%，对比图如图 8 所示。可以说明下垂控制下的交直流混合配电网潮流计算的正确性。

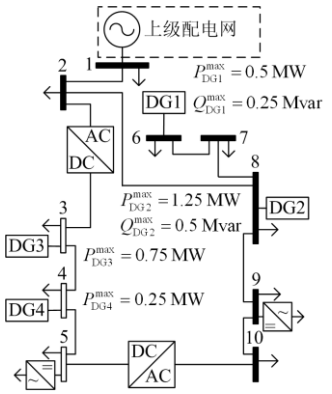
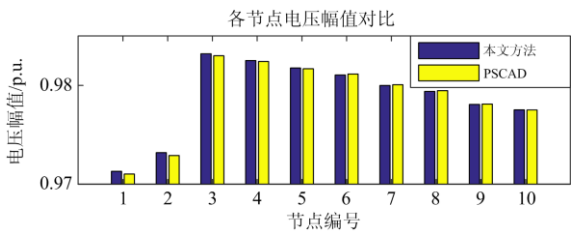



图 7 交直流混合配电网 10 节点拓扑结构图

Fig. 7 10-bus topology diagram of AC/DC hybrid distribution network



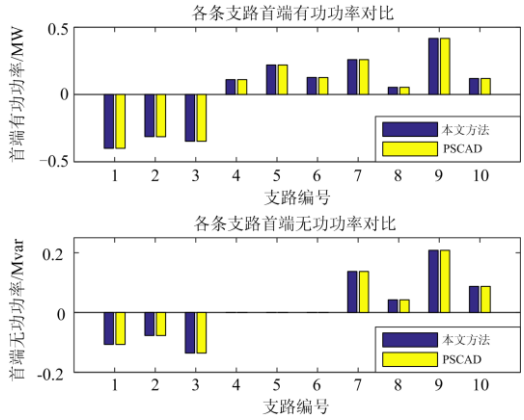



图 8 算例 2 本文方法与 PSCAD 数据对比图

Fig. 8 Comparison between the method in this paper and the PSCAD data of example 2

表 7 算例 2 各线路数据

Table 7 Data of each line of example 2

| *i* 节点 | *j* 节点 | 电阻/Ω | 电抗/Ω | *i* 节点 | *j* 节点 | 电阻/Ω | 电抗/Ω |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 0.591 00 | 0.526 00 | 5 | 10 | 1.000 00 | — |
| 2 | 3 | 1.492 60 | — | 6 | 7 | 0.507 50 | 0.258 50 |
| 2 | 8 | 2.000 00 | 2 | 7 | 8 | 0.974 40 | 0.963 00 |
| 3 | 4 | 2.578 00 | — | 8 | 9 | 0.310 50 | 0.361 90 |
| 4 | 5 | 1.464 00 | — | 9 | 10 | 0.341 00 | 0.530 20 |

表 8 算例 2 各节点类型及负荷功率

Table 8 Types of nodes and load power of example 2

| 节点编号( *i* ) | 节点类型 | $P_L^{ac}$ / MW | $Q_L^{ac}$ / Mvar | $P_L^{dc}$ / MW |
|---|---|---|---|---|
| 1 | PQ | 0.4 | 0.2 | 0 |
| 2 | PQ | 0.26 | 0.105 | 0. |
| 3 | DC Droop | 0 | 0 | 0.06 |
| 4 | DC Droop | 0 | 0 | 0.06 |
| 5 | P | 0.045 | 0.02 | 0.045 |
| 6 | AC Droop | 0.085 | 0.035 | 0 |
| 7 | PQ | 0.1 | 0.06 | 0.1 |
| 8 | AC Droop | 0.17 | 0.05 | 0 |
| 9 | PQ | 0.145 | 0.07 | 0.145 |
| 10 | PQ | 0.24 | 0.16 | 0 |

表 9 算例 2 潮流结果节点电压及电源功率

Table 9 Power flow results node voltage and power supply of example 2

| 节点编号 | *V*/p.u. | *θ*/rad | *P*/MW | *Q*/Mvar |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.971 31 | 0.000 00 | — | — |
| 2 | 0.973 19 | 0.000 97 | — | — |
| 3 | 0.983 20 | — | 0.500 99 | — |
| 4 | 0.982 52 | — | 0.168 70 | — |
| 5 | 0.981 76 | — | — | — |
| 6 | 0.981 05 | 0.003 80 | 0.344 75 | 0.172 37 |
| 7 | 0.979 99 | 0.003 82 | — | — |
| 8 | 0.979 39 | 0.003 75 | 0.882 64 | 0.353 06 |
| 9 | 0.978 08 | 0.003 18 | — | — |
| 10 | 0.977 53 | 0.002 97 | — | — |

表 10 算例 2 潮流结果线路功率分布

Table 10 Power flow results power distribution of transmission line of example 2

| 支路编号 | *i* 节点 | *j* 节点 | *i* 节点-*j* 节点 | | *j* 节点-*i* 节点 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | *P*/MW | *Q*/Mvar | *P*/MW | *Q*/Mvar |
| 1 | 1 | 2 | −0.400 00 | −0.106 75 | 0.400 67 | 0.107 34 |
| 2 | 2 | 3 | −0.313 18 | −0.076 81 | 0.330 05 | — |
| 3 | 2 | 8 | −0.347 49 | −0.135 56 | 0.349 33 | 0.137 39 |
| 4 | 3 | 4 | 0.110 94 | — | −0.110 86 | — |
| 5 | 4 | 5 | 0.219 56 | — | −0.219 39 | — |
| 6 | 5 | 10 | 0.127 02 | — | −0.120 63 | −0.072 47 |
| 7 | 6 | 7 | 0.259 75 | 0.137 37 | −0.259 47 | −0.137 23 |
| 8 | 7 | 8 | 0.054 20 | 0.042 63 | −0.054 17 | −0.042 59 |
| 9 | 8 | 9 | 0.417 49 | 0.208 26 | −0.417 05 | −0.207 75 |
| 10 | 9 | 10 | 0.119 42 | 0.087 58 | −0.119 37 | −0.087 50 |

表 11 算例 2 PSCAD 潮流结果节点电压及电源功率

Table 11 PSCAD power flow results node voltage and power supply of example 2

| 节点编号 | *V*/p.u. | *θ*/rad | *P*/MW | *Q*/Mvar |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.971 03 | 0.000 00 | — | — |
| 2 | 0.972 91 | 0.000 97 | — | — |
| 3 | 0.983 00 | — | 0.501 06 | — |
| 4 | 0.982 42 | — | 0.168 71 | — |
| 5 | 0.981 68 | — | — | — |
| 6 | 0.981 15 | 0.003 80 | 0.344 73 | 0.172 36 |
| 7 | 0.980 07 | 0.003 82 | — | — |
| 8 | 0.979 47 | 0.003 75 | 0.882 59 | 0.353 03 |
| 9 | 0.978 12 | 0.003 18 | — | — |
| 10 | 0.977 51 | 0.002 97 | — | — |

表 12 算例 2 PSCAD 潮流结果线路功率分布

Table 12 PSCAD power flow results power distribution of transmission line of example 2

| 支路编号 | *i* 节点 | *j* 节点 | *i* 节点-*j* 节点 | | *j* 节点-*i* 节点 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | *P*/MW | *Q*/Mvar | *P*/MW | *Q*/Mvar |
| 1 | 1 | 2 | −0.400 00 | −0.106 72 | 0.400 67 | 0.107 33 |
| 2 | 2 | 3 | −0.313 24 | −0.076 82 | 0.330 12 | — |
| 3 | 2 | 8 | −0.347 44 | −0.135 54 | 0.349 27 | 0.137 37 |
| 4 | 3 | 4 | 0.110 91 | — | −0.110 83 | — |
| 5 | 4 | 5 | 0.219 54 | — | −0.219 36 | — |
| 6 | 5 | 10 | 0.127 00 | — | −0.120 61 | −0.072 48 |
| 7 | 6 | 7 | 0.259 71 | 0.137 36 | −0.259 43 | −0.137 21 |
| 8 | 7 | 8 | 0.054 16 | 0.042 60 | −0.054 13 | −0.042 58 |
| 9 | 8 | 9 | 0.417 51 | 0.208 26 | −0.417 07 | −0.207 75 |
| 10 | 9 | 10 | 0.119 44 | 0.087 57 | −0.119 39 | −0.087 50 |

## 5 结论

交直流混合配电网潮流计算是用以解决交直流系统规划和运行中提出的各种问题的重要基础。本文对电压源换流器(VSC)、网络矩阵和不同控制方式的潮流模型进行分析，提出了基于网络矩阵的交直流混合配电网潮流算法，并基于牛顿-拉夫逊算法统一迭代求解，最终实现针对特定及复杂城市的交直流配电网潮流计算。通过算例分析表明：本文所提出的算法对于含有多个 VSC 以及任意交直流连接方式的配电网都是有效的且收敛性好；利用二进制网络矩阵来描述不同交直流拓扑结构；针对不同控制方式，通过修改雅可比矩阵来实现控制方式的转变，体现算法的灵活性。

## 参考文献


[1] 朱益华, 郭琦, 李威, 等. 含柔性直流输电系统的电网安全稳定特性和控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 20-26.
ZHU Yihua, GUO Qi, LI Wei, et al. Research on security and stability characteristics and control strategy of power grid with VSC-HVDC[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 20-26.

[2] CHAUDHARY S K, GUERRERO J M, TEODORESCU R. Enhancing the capacity of the AC distribution system using DC interlinks—a step toward future DC grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1722-1729.

[3] GAO Yajing, XUE Fushen, YANG Wenhai, et al. Optimal operation modes of photovoltaic-battery energy storage system based power plants considering typical scenarios[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 397-406. DOI: 10.1186/s41601- 017-0066-9.

[4] 郑欢, 江道灼, 杜翼. 交流配电网与直流配电网的经济性比较[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3368-3374.
ZHENG Huan, JIANG Daozhuo, DU Yi. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3368-3374.

[5] BOROYEVICH D, CVETKOVIC I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems—a contemplative view[C] // 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), May 20-22, 2010, Basov, Romania.

[6] 冯磊, 杨淑连, 徐达, 等. 考虑风电输出功率波动性的混合储能容量多级优化配置[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 44-50.
FENG Lei, YANG Shulian, XU Da, et al. Multistage optimal capacity configuration of hybrid energy storage considering wind power fluctuation[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(10): 44-50.

[7] 曾嘉思, 徐习东, 赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582-2589.
ZENG Jiasi, XU Xidong, ZHAO Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582-2589.

[8] KUROHANE K, SENJYU T, YONA A, et al. A hybrid smart AC/DC power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2): 199-204.

[9] 杨艳红, 裴玮, 邓卫, 等. 计及换流站运行方式的交直流混合配电系统潮流计算方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2149-2157.
YANG Yanhong, PEI Wei, DENG Wei, et al. Method for calculating power flow of hybrid AC/DC power distribution system with converter station operation mode[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2149-2157.

[10] 王家融, 艾欣, 王坤宇, 等. 基于增广雅可比矩阵的交直流解耦潮流新算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1382-1389.
WANG Jiarong, AI Xin, WANG Kunyu, et al. A novel AC-DC decoupled power flow calculation method based on the augmented Jacobian matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1382-1389.

[11] 张心怡, 韩学山, 孙东磊, 等. 节点电压为状态变量的交直流电网潮流算法[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1484-1491.
ZHANG Xinyi, HAN Xueshan, SUN Donglei, et al. A hybrid AC/DC grid power flow algorithm with node voltages as state variables[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1484-1491.

[12] 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 gird based on voltage source converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 7-13.

[13] 薛振宇, 房大中. 基于双向迭代的交直流互联电力系统潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 61-67.
XUE Zhenyu, FANG Dazhong. A power flow calculation algorithm for AC/DC interconnected power systems based on bi-directional iteration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 61-67.

[14] 王云鹏, 韩学山, 孙东磊, 等. 基于交直流关联最小雅可比矩阵结构的潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 1-6.
WANG Yunpeng, HAN Xueshan, SUN Donglei, et al. A

power flow algorithm based on minimum Jacobian matrix for AC/DC hybrid systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 1-6.

[15] 吴素农, 于金镒, 田庄, 等. 基于扩展节点法的交直流混合电网统一潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 40-47.
WU Sunong, YU Jinyi, TIAN Zhuang, et al. A unified power flow algorithm for AC/DC hybrid networks using modified augmented nodal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 40-47.

[16] 陈宇杰, 王淳, 丁梦妮, 等. 一种新型 VSC 潮流计算模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 7-13.
CHEN Yujie, WANG Chun, DING Mengni, et al. A new VSC power flow calculation model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 7-13.

[17] GRAVIUS A, PIETRASZEKk M, SCHMIDT W J, et al. A comparative study of a sequential and simultaneous AC-DC power flow algorithms for a multi-terminal VSC-HVDC system[C] // 2013 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), November 10-13, 2013, Bangalore, India.

[18] 周涛, 陈中, 戴中坚, 等. 含 VSC-MTDC 的交直流系统潮流算法[J]. 中国电机工程学报，2019, 39(11): 3140-3149.
ZHOU Tao, CHEN Zhong, DAI Zhongjian, et al. An AC/DC system power flow algorithm with VSC-MTDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3140-3149.

[19] 方朝雄. 最优乘子法及其在交直流电网潮流计算中的应用[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 107-112.
FANG Chaoxiong. Optimal multiplier method and its application in power flow calculation for AC/DC power grids[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 107-112.

[20] 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.

[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 algorithm for VSC-HVDC AC/DC system based on fuzzy drop control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 50-57.

[22] 杨俊, 刘秀良, 刘丽娟, 等. 计及电动汽车充电站的微电网综合控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(3): 71-78, 86.
YANG Jun, LIU Xiuliang, LIU Lijuan, et al. Research on microgrid integrated control of charging stations for electric vehicles[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(3): 71-78, 86.

[23] 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.

[24] AHMED H M A, ELTANTAWY A B, SALAMA M. A generalized approach to the load flow analysis of AC–DC hybrid distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 2117-2127.

[25] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2214-2223.

**收稿日期：2020-02-14；　修回日期：2020-04-03**

**作者简介：**

金国彬(1977—)，男，博士，副教授，研究方向为新能源发电及其并网、智能电网技术实现、电能质量治理；E-mail: jgbjgb2005@126.com

石　超(1993—)，男，通信作者，硕士研究生，研究方向为交直流混合配电网潮流优化。E-mail: 469344844@qq.com

（编辑　张爱琴）