

考虑不完全LU分解预处理的交直流混联配电网潮流计算方法

敖禹琦,熊亮雳,许 洵,叶 畅,肖梦涵,李嘉诚,江克正
(国网湖北省电力有限公司 电力科学研究院,武汉 430077)

摘要:随着新能源渗透率增加、用户负荷类型增多及电力电子技术发展,传统交流配电网正逐渐向交直流混联配电网发展。为实现含多换流器的复杂混联配电网潮流高效计算,解决初值选取不当导致潮流计算不收敛的问题,提出考虑不完全LU分解预处理的交直流混联配电网统一潮流计算方法。首先,建立了电压源型换流器(voltage source converter, VSC)交流侧和直流侧的电压和功率方程。然后,建立考虑节点类型的功率平衡方程,以及VSC有功和无功控制方程。接着,利用不完全LU分解预处理雅克比矩阵,再采用稳定双共轭梯度法(biconjugate gradient stabilized method, BICGSTAB)对交直流混联配电网潮流进行求解。最后,通过算例分析对比不同预处理方法的非零元素注入量和预处理前后潮流收敛次数验证了预处理的有效性,并通过对比不同算法的收敛情况验证了所提算法具有良好的鲁棒性。

关键词:交直流混联配电网;潮流计算;电压源型换流器;不完全LU分解;稳定双共轭梯度法

A method for power flow calculation in hybrid AC/DC distribution network with incomplete LU decomposition preprocessing consideration

AO Yuqi, XIONG Liangli, XU Xun, YE Chang, XIAO Menghan, LI Jiacheng, JIANG Kezheng
(Electric Power Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract: With the increasing penetration of renewable energy, the diversification of load types, and the advancement of power electronics technology, traditional AC distribution networks are gradually evolving into hybrid AC/DC distribution networks. To address the challenge of power flow convergence in complex hybrid networks with multiple converters-particularly the instability arising from improper initial value selection-a unified power flow calculation method for hybrid AC/DC distribution networks incorporating incomplete LU decomposition preconditioning is proposed. Initially, the voltage and power equations for both the AC and DC sides of the voltage source converter (VSC) are established. Subsequently, power balance equations are formulated, taking into account various node types and the active/reactive power control strategies of the VSC. Jacobian matrix is then preconditioned using incomplete LU decomposition, and the power flow of the hybrid AC/DC distribution network is solved via the preconditioned biconjugate gradient stabilized (BiCGSTAB) method. Finally, the effectiveness of the proposed preconditioning approach is verified through a comparison of non-zero element fill-ins and the number of iterations required for convergence. Furthermore, the robustness of the algorithm is validated by comparing its convergence behavior against alternative numerical methods.

Key words: AC/DC hybrid distribution system; power flow calculation; voltage source system; incomplete LU decomposition preconditioning; biconjugate gradient stabilized method

0 引言

随着分布式电源渗透率快速增加^[1-2]和负荷类型多元化发展^[3-4],传统供用电模式和配电网结构发生了巨大变化。同时,电力电子技术的进步,特别是全控型器件的成熟,使得电压源换流器成为交直流混联配电网的核心设备,将VSC技术应用于配

电网领域,可有效解决城市配电网面临的挑战^[5]。传统配电网正逐渐向交直流混联配电网发展,张北交直流配电网是以柔性变电站作为能量调控枢纽,为分布式光伏直流并网、数据中心负荷直流供电的典型代表。珠海唐家湾三端柔性直流配电网项目是面向多元化源负荷接入交直流混合组网的典型代表。潮流分析是交直流混合配电网规划与设计、运行调控、分布式电网并网规划、故障分析等的重要基础。交直流混联配电网潮流计算在交流模块的基础上拓展了VSC模块和直流模块,这使得雅克

收稿日期:2026-01-21;修回日期:2026-03-23

基金项目:国网湖北省电力有限公司科技项目(B31532241284)

比矩阵更加稀疏,初值选取不当会导致雅克比矩阵奇异而导致潮流计算不收敛,因此,研究稳定且高效的交直流配电网潮流计算方法有重要意义。

目前,交直流混联配电网潮流计算方法主要可分为两类:统一求解法和交替迭代法。交替求解法将直流方程与交流方程分开迭代,通过接口变量传递两者的计算结果。只要当两个网络和公共连接点收敛后,整个系统的潮流计算才收敛。文献[6]提出了增广雅克比矩阵的交直流解耦潮流算法,该方法解决了传统解耦算法需要多次迭代且不易收敛的问题。文献[7]考虑了多端直流分区的耦合特性,提出基于直流电网线性潮流的多端直流分区互联电网改进潮流算法,减少了潮流的计算量。综上所述,这种将交流系统和直流系统分开求解的方法使得两个系统的耦合性变差,可能出现迭代次数增加或者不收敛的情况。因此,统一求解法具有更好的应用前景。

统一求解法是在传统牛顿拉夫逊算法的基础上拓展直流模块和换流器模块,并将这3部分联立求解,这种方法能够全面反映交直流网络的耦合关系,收敛速度快,收敛精度高。文献[8]考虑了电力电子装置不同接入场景下的支路潮流,通过拓展定义网络矩阵,建立了交直流混联配电网统一潮流计算模型。文献[9]针对复杂直流系统建模困难问题,提出了适用于串联型和并联型交直流混联系统潮流计算方法。文献[10]考虑下垂系数变量,建立自适应下垂系数的交直流混联系数潮流计算模型,同时引入调制比约束,实现不同调制比下的交直流混联电网潮流计算。上述研究均采用牛顿迭代法进行迭代计算,虽然牛顿迭代法收敛速度快,但其收敛性依赖于初值,初值选取不当会导致迭代不收敛甚至发散。

针对上述现有研究的不足之处,本文首先建立了VSC稳态模型及其交直流混联配电网潮流计算模型;然后,提出了不完全LU分解预处理的交直流混联配电网潮流计算方法。BICGSTAB算法求解稀疏线性方程具有稳定性和高效性,不完全LU分解是将矩阵分解为一个上三角矩阵 $\tilde{L}$ 和下三角矩阵 $\tilde{U}$,在分解时有策略地丢弃一些新产生的非零元素,并令预条件子 $\mathbf{W}=\tilde{L}\tilde{U}$ 。交直流混联配电网潮流方程是一组稀疏线性方程组,利用不完全LU分解预处理雅克比矩阵得到预条件子并配合BICGSTAB算法求解潮流方程可以加速迭代收敛。最后,算例验证了本文算法能够快速计算不同VSC控制方式下的交直流混联配电网潮流,兼顾计算效率和收敛性能,

具有良好的鲁棒性,并且解决了传统迭代方法对于初值敏感导致计算不收敛的问题。

1 VSC稳态模型

电压源型换流器是交直流混合配电网的关键设备之一,能够实现有功、无功功率独立快速解耦调控,且能够通过改变电流方向逆转潮流,其物理结构如图1所示。图1中: $P_{s,c,s}$ 和 $Q_{s,c,s}$ 分别为交流系统注入换流器的有功和无功功率。 $P_{d,q}$ 为换流器注入直流系统的有功功率。 U_s 和 θ_s 分别与换流器直接相连节点的电压幅值和相角。 $U_{c,s}$ 和 $\theta_{c,s}$ 分别为换流器交流侧电压幅值和相角。 R 和 X 分别为换流器等效损耗电阻和电抗。 $U_{d,q}$ 为换流器直流侧电压幅值。

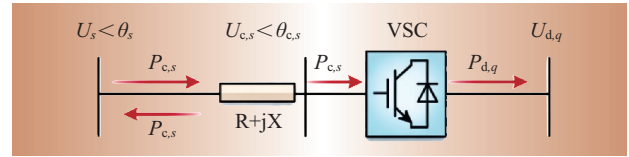


图1 VSC等值电路

Fig. 1 VSC physical model

当采用空间脉宽矢量调制时,电压 $U_{c,s}$ 和 $U_{d,q}$ 存在以下关系^[11]

$$U_{c,s} = \frac{M}{\sqrt{2}} U_{d,q} \quad (1)$$

式中: M 为换流器调制比。

上述模型已经将换流器损耗折算到等效电阻 R 和等效电抗 X 上,故换流器交流侧和直流侧功率相等^[8],即

$$P_{c,s} = P_{d,q} \quad (2)$$

从交流系统注入VSC的有功功率 $P_{s,c,s}$ 、无功功率 $Q_{s,c,s}$ 以及直流系统注入VSC的有功功率 $P_{c,s}$ 如下式所示

$$\begin{cases} P_{s,c,s} = -U_s U_{c,s} Y^v \cos(\delta + \alpha) + U_s^2 Y^v \cos \alpha \\ Q_{s,c,s} = -U_s U_{c,s} Y^v \sin(\delta + \alpha) + U_s^2 Y^v \sin \alpha \\ P_{c,s} = U_s U_{c,s} Y^v \cos(\delta - \alpha) - U_s^2 Y^v \cos \alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中: $Y^v = 1/\sqrt{R^2 + X^2}$; α 为换流器等效损耗阻抗角; δ 为换流器控制角; s 为交流系统中直接和VSC连接的节点。

2 交直流混联配电网潮流方程

2.1 交流节点功率方程

在交流系统中,根据节点是否与VSC相连,可

将节点分为纯交流节点和非纯交流节点。

对于纯交流节点,有功和无功不平衡方程如式

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: n 为交流节点个数; U_i 为交流系统节点 i 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的相角差; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的电导和电纳; P_i 和 Q_i 分别为交流系统节点 i 的注入有功和无功功率。

对于非纯交流节点,需要在式(4)的基础上抽出一项注入换流器的功率,具体方程如式

$$\begin{cases} \Delta P_s = P_s - U_s \sum_{j=1}^n U_j (G_{sj} \cos \theta_{sj} + B_{sj} \sin \theta_{sj}) + \\ \quad U_s U_{c,s} Y^v \cos(\delta + \alpha) - U_s^2 Y^v \cos \alpha \\ \Delta Q_s = Q_s - U_s \sum_{j=1}^n U_j (G_{sj} \sin \theta_{sj} - B_{sj} \cos \theta_{sj}) + \\ \quad U_s U_{c,s} Y^v \sin(\delta + \alpha) - U_s^2 Y^v \sin \alpha \end{cases} \quad (5)$$

2.2 直流节点功率方程

在直流系统中,根据节点是否与VSC相连,也可以将节点分为纯直流节点和非纯直流节点。

对于纯直流节点,有功不平衡方程如式

$$\Delta P_{d,i} = P_{d,i} - U_{d,i} \sum_{j=1}^m Y_{ij} U_{d,j} \quad (6)$$

式中: m 为直流节点个数; $U_{d,i}$ 为直流节点 i 的电压幅值; Y_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的导纳; $P_{d,i}$ 为直流节点 i 的注入有功功率。

对于非纯直流节点,需要在式(6)的基础上抽出一项注入换流器的有功功率,具体方程如式

$$\Delta P_{d,q} = P_{d,q} - U_{d,q} \sum_{j=1}^m Y_{ij} U_{d,j} + U_s U_{c,s} Y^v \cos(\delta - \alpha) - U_{c,s}^2 Y^v \cos \alpha \quad (7)$$

2.3 VSC功率平衡方程

由于换流器损耗已经等效到损耗阻抗上,因此换流器交流侧功率和直流侧功率相等,具体方程如式

$$\begin{aligned} \Delta P_b &= U_s U_{c,s} Y^v \cos(\delta - \alpha) - U_{c,s}^2 Y^v \cos \alpha - \\ &U_{d,q} \sum_{j=1}^m Y_{ij} U_{d,j} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

2.4 VSC控制方程

交直流混联系统潮流计算中换流器的控制方式主要分为有功控制和无功控制两类,一台换流器可以控制其中两个变量。

2.4.1 有功类控制方程

(1) 定换流器直流侧电压

VSC直流侧电压平衡方程如式

$$\Delta D_1 = U_{d,ref} - U_{d,q} \quad (9)$$

式中: $U_{d,ref}$ 为直流电压设定值。

(2) 定换流器交流侧有功功率

注入VSC有功功率平衡方程如式

$$\Delta D_2 = P_{s,ref} - P_{s,c,s} \quad (10)$$

式中: $P_{s,ref}$ 为有功功率设定值。

2.4.2 无功类控制方程

(1) 定换流器交流电压

VSC交流侧电压平衡方程如式

$$\Delta D_3 = U_{s,ref} - U_s \quad (11)$$

式中: $U_{s,ref}$ 为交流电压设定值。

(2) 定换流器交流侧无功功率

注入VSC无功功率平衡方程如式

$$\Delta D_4 = Q_{s,ref} - Q_{s,c,s} \quad (12)$$

式中: $Q_{s,ref}$ 为无功功率设定值。

3 考虑不完全LU分解预处理的交直流混联配电网潮流方程求解

3.1 迭代方程

交直流混联配电网潮流计算迭代方程本质是一组稀疏线性方程组,这一方程组的变量是交流电压幅值、交流电压相角、直流电压幅值、换流器调制比、换流器控制角、换流器交流侧电压和换流器直流侧电压,它通过将各节点功率平衡方程、VSC功率平衡方程和VSC控制方程利用泰勒展开后得到。

对于不与换流器相连的交流和直流节点功率不平衡方程可线性化结果下式

$$\begin{cases} \Delta P_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} \Delta U_j \\ \Delta Q_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} \Delta U_j \\ \Delta P_{d,i} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta P_{d,i}}{\partial U_{d,j}} \Delta U_{d,j} \end{cases} \quad (13)$$

上述方程组表示为矩阵形式有

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_a & N_a & 0 \\ H_r & N_r & 0 \\ 0 & 0 & K_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \\ \Delta U_d \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中雅可比矩阵的非对角元素满足^[12]

$$\begin{cases} H_{a,ij} = -U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \\ N_{a,ij} = -U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ H_{r,ij} = U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ N_{r,ij} = U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \\ K_{d,ij} = -U_{d,i}^2 G_{ij} \end{cases} \quad (15)$$

对角线元素满足

$$\begin{cases} H_{a,i,i} = H_{a,i,j} + Q_i \\ N_{a,i,i} = N_{a,i,j} - P_i \\ H_{r,i,i} = H_{r,i,j} - P_i \\ N_{r,i,i} = N_{r,i,j} + Q_i \\ K_{d,i,i} = K_{d,i,j} - P_{d,i} \end{cases} \quad (16)$$

与换流器直接相连的交流和直流节点功率不平衡方法可线性化结果如下式

$$\begin{cases} \Delta P_s = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta P_s}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta P_s}{\partial U_j} \Delta U_j + \\ \quad \frac{\partial \Delta P_s}{\partial U_{d,q}} \Delta U_{d,q} + \frac{\partial \Delta P_s}{\partial M_l} \Delta M_l + \frac{\partial \Delta P_s}{\partial \delta_l} \Delta \delta_l \\ \Delta Q_s = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta Q_s}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta Q_s}{\partial U_j} \Delta U_j + \\ \quad \frac{\partial \Delta Q_s}{\partial U_{d,q}} \Delta U_{d,q} + \frac{\partial \Delta Q_s}{\partial M_l} \Delta M_l + \frac{\partial \Delta Q_s}{\partial \delta_l} \Delta \delta_l \\ \Delta P_{d,q} = \frac{\partial \Delta P_{d,q}}{\partial U_s} \Delta U_s + \frac{\partial \Delta P_{d,q}}{\partial U_{d,q}} \Delta U_{d,q} + \\ \quad \frac{\partial \Delta P_{d,q}}{\partial M_l} \Delta M_l + \frac{\partial \Delta P_{d,q}}{\partial \delta_l} \Delta \delta_l \end{cases} \quad (17)$$

式中: $l=1,2,\dots,N_s$; N_s 为混联系统中VSC个数。

换流器功率平衡方程线性化结果如下式

$$\begin{aligned} \Delta P_b = \frac{\partial \Delta P_b}{\partial U_s} \Delta U_s + \frac{\partial \Delta P_b}{\partial U_{d,q}} \Delta U_{d,q} + \\ \frac{\partial \Delta P_b}{\partial M_l} \Delta M_l + \frac{\partial \Delta P_b}{\partial \delta_l} \Delta \delta_l \end{aligned} \quad (18)$$

换流器控制方程线性化结果如下式

$$\Delta D_i = \frac{\partial \Delta D_i}{\partial U_s} \Delta U_s + \frac{\partial \Delta D_i}{\partial U_{d,q}} \Delta U_{d,q} + \frac{\partial \Delta D_i}{\partial M_l} \Delta M_l + \frac{\partial \Delta D_i}{\partial \delta_l} \Delta \delta_l \quad (19)$$

结合式(13)一式(19)可得如下交直流混联配电网潮流计算迭代方程

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_d \\ \Delta P_b \\ \Delta D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_a & N_a & 0 & A_a & F_a \\ H_r & N_r & 0 & A_r & F_r \\ 0 & N_d & K_d & A_d & F_d \\ 0 & N_b & K_b & A_b & F_b \\ 0 & L_a & L_b & L_d & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U/U \\ \Delta U_d/U_d \\ \Delta U_c \\ \Delta E \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中交流系统功率不平衡方程拓展模块对应元素满足

$$\begin{cases} A_{a,s,l} = \frac{M_l}{\sqrt{2}} U_s Y^v \cos(\delta_l + \alpha) \\ F_{a,s,l} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_s U_{d,q} Y^v \cos(\delta_l + \alpha) \\ F_{a,s,l+N_s} = -\frac{1}{\sqrt{2}} U_s U_{d,q} Y^v \sin(\delta_l + \alpha) \\ A_{r,s,l} = \frac{M_l}{\sqrt{2}} U_s Y^v \sin(\delta_l + \alpha) \\ F_{r,s,l} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_s U_{d,q} Y^v \sin(\delta_l + \alpha) \\ F_{r,s,l+N_s} = -\frac{1}{\sqrt{2}} U_s U_{d,q} Y^v \cos(\delta_l + \alpha) \end{cases} \quad (21)$$

直流系统功率不平衡方程拓展模块对应元素满足

$$\begin{cases} N_{d,s,l} = -\frac{M_l}{\sqrt{2}} U_{d,q} Y^v \cos(\delta_l - \alpha) \\ A_{d,s,l} = -\frac{1}{\sqrt{2}} U_s Y^v \cos(\delta_l - \alpha) + M_l^2 U_{d,q} Y^v \cos \alpha \\ F_{d,s,l} = -\frac{1}{\sqrt{2}} U_s U_{d,q} Y^v \cos(\delta_l - \alpha) + M_l U_{d,q}^2 Y^v \cos \alpha \\ F_{d,s,l+N_s} = \frac{M_l}{\sqrt{2}} U_s U_{d,q} Y^v \sin(\delta_l - \alpha) \end{cases} \quad (22)$$

新增换流器功率平衡方程对应雅克比矩阵中的元素满足

$$\begin{cases} N_b = \text{diag} \left(\frac{M}{\sqrt{2}} U_{d,q} Y^v \cos(\delta - \alpha) \right) \\ K_b = \text{diag} \left(\frac{M}{\sqrt{2}} U_{d,q} Y^v \cos(\delta - \alpha) \right) \\ A_b = \text{diag} \left(\frac{M}{\sqrt{2}} U_s Y^v \cos(\delta - \alpha) \right) \\ F_b = \begin{bmatrix} \text{diag} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} U_s U_{d,q} Y^v \cos(\delta - \alpha) \right) \\ \text{diag} \left(-\frac{M}{\sqrt{2}} U_s U_{d,q} Y^v \sin(\delta - \alpha) \right) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (23)$$

换流器控制方程对应元素根据控制方式的不同会发生变换。

3.2 不完全LU分解预处理

预处理矩阵采用不完全LU分解。标准LU分解是将雅克比矩阵 J 分解为下三角矩阵 L 和上三角矩阵 U , 即 $J=LU$, 精确的分解过程会产生大量填充元素。不完全LU分解, 又称为ILU分解, 是指将 J 近似分解为 $\tilde{L}$ 和 $\tilde{U}$, 并令预处理矩阵 $W=\tilde{L}\tilde{U}$, $\tilde{L}$ 和 $\tilde{U}$ 与 L 和 U 对应的元素相同, 并且 $\tilde{L}$ 和 $\tilde{U}$ 分别与 J 的下、上三角部分有完全相同的非零结构。本文采用ILU(0)预处理, 又称为无填充的不完全LU分解, 其中, “0”表示矩阵分解时产生的非零元素个数为0。这种预处理方法只允许 $\tilde{L}$ 和 $\tilde{U}$ 在 J 的非零位置上有非零元^[13]。

3.3 求解步骤

由于交直流混联配电网潮流统一求解法拓展了直流模型和换流器模块, 故雅克比矩阵的维度增加且变得更加稀疏。稳定双共轭梯度算法适用于求解不对称稀疏线性方程组, 且该算法对于迭代初值不敏感, 具有更好的鲁棒性。同时, 利用不完全LU分解预处理雅克比矩阵可以明显改善算法收敛速度。

(1) 输入发电、负荷、支路阻抗和VSC控制方式等基础数据。

(2) 根据支路数据生成节点导纳矩阵,从而得到支路电导和电纳。

(3) 设置迭代变量 θ 、 U_a 、 U_d 、 δ 、 M 的初值。

(4) 根据潮流基本方程,得到交直流混联系统潮流计算修正方程组,生成功率不平衡量和雅克比矩阵。

$$\Delta x = J^{-1} \Delta b \quad (24)$$

式中:

$$\Delta x = [\Delta \theta \quad \Delta U_a \quad \Delta U_d \quad \Delta U_c \quad \Delta E]^T \quad (25)$$

$$\Delta b = [\Delta P_a \quad \Delta Q_a \quad \Delta P_d \quad \Delta P_b \quad \Delta D]^T \quad (26)$$

$$J = \begin{bmatrix} H_a & N_a & 0 & A_a & F_a \\ H_r & N_r & 0 & A_r & F_r \\ 0 & N_d & K_d & A_d & F_d \\ 0 & N_b & K_b & A_b & F_b \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (27)$$

考虑到雅克比矩阵的非对称性和稀疏性,本文采用BICGSTAB算法^[14]结合不完全LU分解预处理雅克比矩阵进行线性方程求解,具体步骤如下。

步骤1:首先,给定迭代矩阵 J ,向量 b ,初始值 x_0 以及最大迭代次数 $k_{\max}$,最大容差 $\varepsilon_{\max}$ 。利用不完全LU分解预处理雅克比矩阵求取预处理矩阵 W ,计算 $r_0 = b - Jx_0$,并令 $k = 1$, $\tilde{r}_0 = r_0$ 。

步骤2:若 $k \leq k_{\max}$ 且 $\varepsilon \geq \varepsilon_{\max}$,则转步骤3,否则,停止计算,输出 x_k 。

步骤3: $\rho_k = \tilde{r}^T r_{k-1}$ 。若 $\rho_{k-1} = 0$ 或者 $\omega_{k-1} = 0$,则算法终止,计算失败,否则转步骤4。

步骤4:若 $k = 1$,则 $p_1 = r_0$,否则,计算

$$\begin{cases} \beta_{k-1} = \rho_{k-1} \alpha_{k-1} / \rho_{k-2} \alpha_{k-2} \\ p_k = r_{k+1} + \beta_{k-1} (p_{k-1} - \omega_{k-1} V_{k-1}) \end{cases}$$

步骤5:求解方程 $W\hat{p} = p$,计算 $V_k = A\hat{p}$, $\alpha_k = \rho_{k-1} / (\tilde{r}^T V_k)$, $s_k = r_{k-1} - \alpha_k V_k$ 。

步骤6: $\varepsilon = \|s_k\|$,若 $\varepsilon > \varepsilon_{\max}$,则 $x_k = x_{k-1} + \alpha_k \hat{p}$,否则,停止输出 x_k 。

步骤7:求解 $W\hat{s} = s$, $t = A\hat{s}$, $\omega_k = t^T s / (t^T t)$, $x_k = x_{k-1} + \alpha_k p_k + \omega_k \hat{s}$, $r_k = s - \omega_k t$, $\varepsilon = \|r_k\|$,令 $k = k + 1$,转步骤2。

(5) 计算式(24),得到修正量 Δx ,判断最大不平衡功率小于收敛精度,若满足收敛精度,则算法收敛,否则,更新修正量 $x^{k+1} = x^k + \Delta x$ 。

(6) 更新迭代次数 $k = k + 1$,若迭代次数大于或等于最大迭代次数,则退出算法,潮流计算不收否则转(4)。

4 算例分析

为验证本文潮流算法的有效性、精确性和鲁棒

性,在MATLAB平台上编写了交直流混联系统统一潮流计算程序,并对不同换流器控制方式下的IEEE33节点交直流混联系统进行了潮流计算。如图2所示,该系统在交流9节点、20节点和29节点接入换流器,直流系统电压等级为35 kV,交流系统电压等级为10 kV。

算例中,VSC额定电压取35 kV,额定容量取1 MVA,换流器等效损耗阻抗参考文献[9]。另外,取系统容量基准值,交流和直流网络电压基准值分别取其标准电压等级,电压值分别归算到对应电压等级下,相角初值取0,VSC控制角初值 $\delta^{(0)}$ 取0,调制比初值 $M^{(0)}$ 取1,收敛精度取 $1e^{-5}$,最大迭代次数取50。

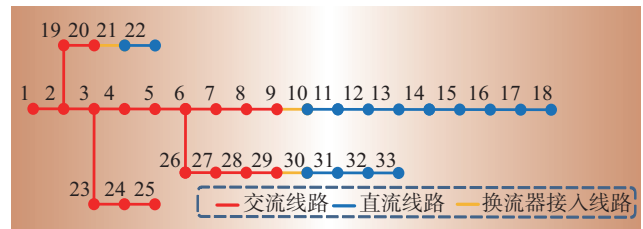


图2 IEEE33交直流混联系统

Fig. 2 IEEE33 AC/DC hybrid system

换流器主要考虑以下4种控制方式^[15]:(1)定 U_s 、定 U_d ; (2)定 Q_s 、定 U_d ; (3)定 P_s 、定 U_s ; (4)定 P_s 、定 Q_s 。

4.1 潮流计算结果

潮流计算结果展示了VSC不同控制模式下交直流混联系统各节点的电压幅值和相角,并分析VSC控制方式对电压幅值和相角的影响。

从图3可以看出,换流器第一种控制方式和第三种控制方式交流侧的电压幅值相同,第三种控制方式直流侧的电压要大于第一种控制方式。这说明当VSC交流侧电压保持恒定时,电压计算结果不

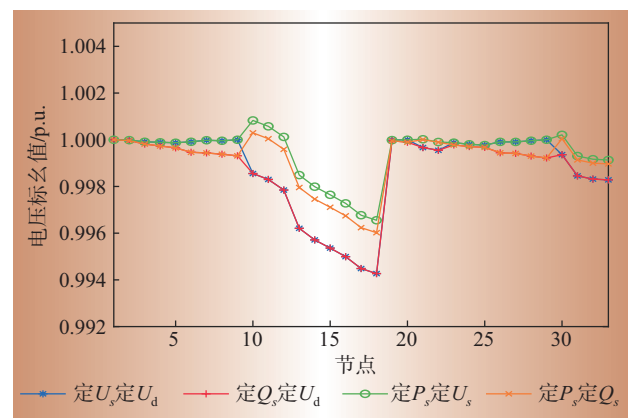


图3 不同换流器控制方式下的电压计算结果

Fig. 3 Voltage calculation results under different converter control modes

会被VSC控制的另一个参数影响。第三种和第四种VSC控制方式直流侧电压计算结果要明显高于第一种和第二种VSC控制方式直流侧电压计算结果,这说明当VSC直流侧电压保持恒定时,会降低直流侧节点的电压值。

从图4可以看出,4种VSC控制方式只对应两种相角曲线,第一种和第三种VSC控制方式的相角计算结果完全相同,第二种和第四种VSC控制方式的电压计算结果完全相同。

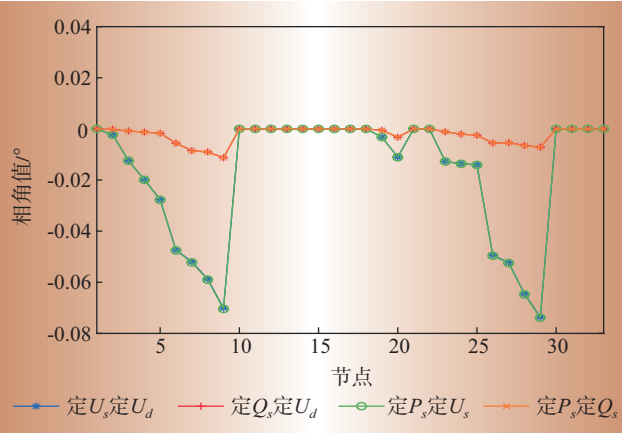


图4 不同换流器控制方式下的相角计算结果
Fig. 4 Phase angle results under different converter control modes

综上所述,不同VSC控制方式下的电压幅值和相角计算结果不是完全不同,实际上具有高度相关性。

4.2 算法性能

4.2.1 预处理效果

由表1可以看出,本文预处理方法在大部分VSC控制策略下大幅减少迭代次数,加速迭代收敛。因此,本文预处理方法对于求解交直流混联系统潮流计算具有明显作用。

表1 预处理前后迭代次数对比
Table 1 Comparison of the number of iterations before and after preconditioned

控制方式	预处理前迭代次数	预处理后迭代次数
1	32	30
2	34	9
3	21	4
4	25	4

不完全LU分解预处理方法分为ILU(0)、ILU(1)和ILU(2)3种,由表2可以看出,在VSC的不同控制方式下,ILU(1)和ILU(2)两种预处理方式注入的非零元素个数比较多,会导致计算耗时增加。本文的预处理方法无非零元素注入,维持了矩阵的稀疏性。

表2 不同预处理方法的注入非零元素比较
Table 2 Comparison of injecting non-zero elements using different precondition methods

控制方式	非零元素个数	ILU(1)	ILU(2)	本文方法
1	244	527	551	0
2	262	490	456	0
3	256	419	613	0
4	335	416	442	0

4.2.2 收敛性对比

收敛精度为 $1e^{-5}$ 时,表3列举了牛顿迭代法、广义最小残差算法(generalized minimal residual algorithm,GMRES)和本文算法的潮流计算时间。

表3 本文算法与其他算法的计算用时比较
Table 3 Comparison of computation time between this algorithm and other algorithms

控制方式	牛顿法用时	GMRES用时	本文算法用时
1	3.05	5.75	3.63
2	1.16	2.83	1.21
3	0.61	2.32	0.60
4	0.56	3.56	0.62

从表3中可以看出,在相同迭代次数下,GMRES算法的计算时间最长,本文算法在计算速度上略逊于牛顿法。

为了验证本文算法的收敛性受初值的影响较小,本章将调制比初值设置为0,将控制角初值设置为 90° ,将电压初值在 $[0.95, 1.05]$ 之间调整。计算结果如表4所示。

表4 本文算法与其他算法的收敛结果比较
Table 4 Comparison of convergence result between this algorithm and other algorithms

控制方式	牛顿法	GMRES	本文算法
1	不收敛	不收敛	不收敛
2	不收敛	收敛	收敛
3	不收敛	不收敛	收敛
4	不收敛	收敛	收敛

从表4中可以看出,改变迭代初值后,四种控制方式下本文算法的收敛次数是3次,GMRES算法的收敛次数是2次,牛顿法的收敛次数是0次。

综上所述,3种算法中牛顿迭代法的计算时间最短,但是其对于迭代初值的灵敏度比较高,当初值选取不合适或者迭代矩阵稀疏度较高时,会出现迭代矩阵奇异导致计算不收敛的情况。GMRES算法是比较保守的算法,虽然其对于潮流计算的初值灵敏度比较低,但计算时间比较长。本文算法虽在计算时间上略逊于牛顿法,优于GMRES算法,但优点在对初值要求不高,比牛顿法更加稳定。

5 结束语

本文建立了含多VSC交直流混联配电网潮流计算模型,提出了考虑不完全LU分解的统一潮流计算方法,对不同VSC控制方式下的潮流模型进行稳定双共轭梯度法统一迭代求解,实现了对复杂交直流混联配电网潮流的稳定、快速求解。算例结果表明,本文提出的预处理方法能够有效地减少迭代次数,加快潮流计算收敛,提出的迭代方法能够解决牛顿迭代法对于初值敏感导致潮流计算不收敛的问题,算法收敛快速可靠,具有很好的鲁棒性,同时能够满足VSC不同运行工况下的交直流混联配电网潮流计算。

参考文献:

- [1] 赵书强,吴杨,李志伟,等.考虑风光出力不确定性的电力系统调峰能力及经济性分析[J].电网技术,2022,46(5):1752-1761.
ZHAO Shuqiang, WU Yang, LI Zhiwei, et al. Analysis of peak-shaving capability and economy of power systems considering the uncertainty of wind and photovoltaic output [J]. Power System Technology, 2022, 46(5):1752-1761.
- [2] 吉兴全,陈德华,张维,等.多端直流架构的交直流混合配电网三相不平衡潮流计算[J].电力系统自动化,2019,43(3):169-177.
JI Xingquan, CHEN Dehua, ZHANG Wei, et al. Three-phase unbalanced power flow calculation for AC/DC hybrid distribution networks with multi-terminal DC architecture [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3):169-177.
- [3] XU Q, ZHAO T, XU Y, et al. A distributed and robust energy management system for networked hybrid AC/DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11:3496-3508.
- [4] LIU H, DENG Z, LI X, et al. The averaged-value model of a flexible power electronics based substation in hybrid AC/DC distribution systems [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(2):452-464.
- [5] 朱禹澜,廖凯,杨健维,等.含多电力电子变压器的交直流混合配电网潮流计算方法[J].电网技术,2024,48(12):5089-5099.
ZHU Yulan, LIAO Kai, YANG Jianwei, et al. Power flow calculation method for AC/DC hybrid distribution networks with multiple power electronic transformers [J]. Power System Technology, 2024, 48(12):5089-5099.
- [6] 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 decoupled power flow algorithm for AC/DC systems based on augmented Jacobian matrix [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6):1382-1389.
- [7] 王一振,裴艾斐,盛浩,等.多端直流分区互联电网的改进潮流算法[J].电力系统自动化,2025,49(21):

140-150.

- WANG Yizhen, PEI Aifei, SHENG Hao, et al. Improved power flow algorithm for multi-terminal DC partitioned interconnected power grids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(21):140-150.
- [8] 李国庆,赵妍辉,成龙.基于支路模型的交直流混合配电网统一潮流计算[J].电网技术,2023,47(10):4302-4313.
LI Guoqing, ZHAO Yanhui, CHENG Long. Unified power flow calculation for AC/DC hybrid distribution networks based on branch model [J]. Power System Technology, 2023, 47(10):4302-4313.
- [9] 宋智强,黄耀辉,赵化时,等.含LCC-MMC串/并联混合直流的交直流系统潮流计算方法[J].电网技术,2023,47(7):2860-2868.
SONG Zhiqiang, HUANG Yaohui, ZHAO Huashi, et al. Power flow calculation method for AC/DC systems with LCC-MMC series/parallel hybrid DC links [J]. Power System Technology, 2023, 47(7):2860-2868.
- [10] 王学奎,彭春华,孙惠娟.考虑VSC控制策略的交直流混合配电网潮流计算[J].中国电机工程学报,2023,43(10):3731-3742.
WANG Xuekui, PENG Chunhua, SUN Huijuan. Power flow calculation of AC/DC hybrid power grids considering VSC control strategies [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10):3731-3742.
- [11] 陈然,周鑫,刘万方,等.面向数字孪生的输电线路设备平行控制方法[J].智慧电力,2025,53(1):1-8.
CHEN Ran, ZHOU Li, LIU Wanfang, et al. Parallel control method of transmission line equipment for digital twin [J]. Smart Power, 2025, 53(1):1-8.
- [12] 杨雪梅,张文庆,邹文文,等.考虑绿证交易和碳排放约束的交直流混合微网低碳优化调度[J].智慧电力,2025,53(1):9-16.
YANG Xuemei, ZHANG Wenqing, ZOU Wenwen, et al. Low-carbon optimal scheduling for AC/DC hybrid microgrids considering constraints of green certificate trading and carbon emissions [J]. Smart Power, 2025, 53(1):9-16.
- [13] 肖茂然,郭宁,强宇一,等.基于领域驱动的配电网边缘智能体系统构建[J].电力需求侧管理,2024,26(6):81-87.
XIAO Maoran, GUO Ning, QIANG Yuyi, et al. Construction of distribution network edge agent systems based on domain-driven design [J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(6):81-87.
- [14] 杜先波,陈国琳,唐一铭,等.多站融合型数据中心交直流供电模式对比分析[J].电力需求侧管理,2021,23(1):84-89.
DU Xianbo, CHEN Guolin, TANG Yiming, et al. Comparative analysis of AC/DC power supply modes for multi-station integrated data centers [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(1):84-89.
- [15] 庞维震,马艳红,金春华,等.基于Stackelberg博弈的V2G交易激励策略研究[J].智慧电力,2025,53(1):17-23.
PANG Weizhen, MA Yanhong, JIN Chunhua, et al. Research on V2G transaction incentive strategy based on stackelberg game [J]. Smart Power, 2025, 53(1):17-23.

作者简介:

敖禹琦(1998),男,湖北武汉人,硕士,主要研究方向为新能源运行控制、电网优化调控与系统分析等;

许洵(1999),通信作者,男,湖南岳阳人,硕士,主要研究方向为新能源电力系统运行评估与控制等。

(责任编辑 安然)