

含多类型直流的交直流混联电网潮流计算方法适用性分析

宋智强¹,黄耀辉¹,赵化时²,许建中¹,赵成勇¹,贾秀芳¹

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206;
2. 中国南方电网电力调度控制中心,广东 广州 510670)

摘要:作为电网发展的新阶段,交直流混联电网呈现多类型直流参与、大规模交直流互联的特点,而关于统一迭代和交替迭代2种潮流计算方法的适用性尚未得到深入分析。为此基于含多类型直流的交直流混联电网对2种潮流计算方法的运算性能进行对比研究。推导了含常规直流、柔性直流、混合直流的交直流混联电网潮流模型,进而提出了相应的统一迭代法和交替迭代法。通过3个交直流混联电网测试系统和南方电网实际系统数据验证了潮流模型的有效性和潮流算法的准确性,结合系统负荷水平、系统强度、直流嵌入规模等因素对2种潮流计算方法的收敛性能和计算速度进行对比分析。研究结果表明,在含多类型直流的交直流混联电网中进行潮流计算时,统一迭代法的计算效率比交替迭代法高。

关键词:多类型直流;交直流混联电网;潮流计算;统一迭代法;交替迭代法

中图分类号:TM744

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202307004

0 引言

目前,直流输电在电网运行中扮演越来越重要的角色^[1-2]。交直流混联电网已成为电网发展演变的新阶段,有着独特的结构特点和运行特点,同时也面临着严峻的安全挑战,国内外在该领域的理论研究和技术开发不够充分^[3-4]。作为电力系统分析中最基本的问题,研究多类型直流参与下交直流混联电网的潮流计算是十分必要的^[5]。目前,直流电网的建设依托现有的交流电网,电网的潮流分析均以直流电网和与其连接的交流电网构成的交直流混联电网为研究对象^[6]。交直流混联电网的模型完整度和计算分析已成为电网稳态分析的重点。

潮流计算的数学本质是求解一组多元的非线性方程组,其求解离不开迭代算法,主要可以分为统一迭代法和交替迭代法^[7-8]。文献[9]以极坐标形式下的牛顿法为基础,将交流系统与基于电网换相换流器(line commutated converter, LCC)的直流系统统一建模并迭代求解,研究表明该算法收敛性良好,适用于不同控制方式及运行条件下的潮流求解。文献[10]针对不同控制方式下的基于电压源型换流器的高压直流系统(voltage source converter based high voltage direct current system, VSC-HVDC),分别推导了交直流混联电网的潮流模型,提出了适用于VSC-HVDC交直流混联电网潮流计算的统一迭代

法。文献[11]进一步提出了不同控制方式下VSC并网节点等效处理方法,构建了计及VSC控制方式的统一迭代潮流模型。针对含混合直流输电的交直流混联电网潮流计算问题,文献[12]将交流系统和直流系统看作整体,推导交直流混联电网潮流模型,并基于统一迭代法求解交直流混联电网的潮流模型。

文献[13]分析了VSC-HVDC的稳态功率特性及控制方式,在稳态模型基础上推导了基于牛顿法的潮流模型,根据VSC控制对象多为交流量的特点,提出了交直流混联电网潮流模型的交替迭代求解算法。文献[14]以现有交替迭代法为基础,分析了其重复交替计算的根源,进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。文献[15]推导了LCC与基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)串/并联混合直流系统潮流模型,针对串联混合时“两节点”电压源情况,提出一种混合直流系统直流网络生成方法。

现有文献针对交流系统和柔性直流系统的不同潮流算法展开对比研究。文献[16]以交流系统为研究对象,对交、直流系统潮流模型进行对比分析,并给出采用直流潮流模型时适用的网络条件。文献[17]对配电网侧线性单相和三相潮流计算方法的运算性能进行比较,并给出算法相应的适用范围。文献[18]针对柔性直流系统潮流模型,采用几种高阶牛顿法进行求解,对几种方法的求解效率进行分析,得出算法计算效率受精度需求影响的结论。

现有的研究多针对单一场景、单一方法展开,未考虑多类型直流参与、大规模交直流混联电网互联的现实背景,不同潮流计算方法的运算性能优劣不明确,算法的选择依据较为模糊。为此,本文基于

收稿日期:2023-02-08;修回日期:2023-05-25

在线出版日期:2023-07-07

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(ZDKJXM20200052)

Project supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(ZDKJXM20200052)

3个交直流混联电网测试系统和南方电网对统一迭代法和交替迭代法的计算性能进行较为全面的对比分析,并对算法收敛性能、速度性能进行详细分析,同时对算法进行综合评价。研究结果表明统一迭代法更适用于大规模交直流混联电网的潮流计算。

1 交直流混联电网发展现状

随着直流输电工程相继投产,直流输电在电网运行中扮演越来越重要的角色。目前,南方电网已形成“八条交流、十一条直流”的交直流混联电网架构^[19]。“八条交流”包括500 kV天广四回交流、贵广四回交流。“十一条直流”包括±500 kV天广直流、江城直流、高肇直流、兴安直流、牛从双回直流、金中直流以及±800 kV楚穗特高压直流、普侨特高压直流、新东特高压直流、昆柳龙特高压直流。其中南方电网直流输电通道结构见附录A图A1。南方电网中的大规模直流输电通道为云南大规模清洁水电送出提供便利,同时也大幅缓解了主网的负荷压力,提高了电网运行的稳定性。

2 含多类型直流的交直流混联电网潮流模型

为了研究交直流混联电网的潮流计算,需要统一两侧系统的标么值基准,直流系统必须与交流系统采用统一的基准功率,确保交直流混联电网潮流模型推导及计算结果的准确性^[13]。含多类型直流的交直流混联电网潮流模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_{dB} = S_B \\ U_{dB} = U_B \\ I_{dB} = \sqrt{3} I_B \\ R_{dB} = Z_B \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_B 、 U_B 、 I_B 、 Z_B 分别为交流侧基准功率、基准电压、基准电流及基准阻抗; P_{dB} 、 U_{dB} 、 I_{dB} 、 R_{dB} 分别为直流侧基准功率、基准电压、基准电流及基准电阻。

2.1 交流系统潮流模型

交流系统潮流模型的状态变量包含节点电压幅值、电压相角。交流系统潮流模型见式(2)、(3)。

$$\Delta d_{i1}^{AC} = P_{si} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (2)$$

$$\Delta d_{i2}^{AC} = Q_{si} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (3)$$

式中: U_i 、 U_j 分别为节点*i*、*j*的电压幅值; δ_{ij} 为节点*i*、*j*间电压相角差; P_{si} 、 Q_{si} 分别为节点*i*注入有功、无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为导纳阵中支路*ij*的电导、电纳; Δd_{i1}^{AC} 、 Δd_{i2}^{AC} 为交流系统中的潮流不平衡量; $j \in i$ 表示节点*i*、*j*相连。

2.2 LCC直流系统潮流模型

LCC直流系统潮流模型的状态变量包含直流电压 U_{dc}^{LCC} 、直流电流 I_{dc}^{LCC} 、控制角 θ (表示触发角或关断

角)余弦 $\cos \theta$ 、功率因数 $\cos \varphi$ 、换流变变比 k_T 。

1) LCC基本方程为:

$$\Delta d_{m1}^{LCC} = U_{dc}^{LCC} - 2.7 k_T U_{sm} \cos \theta_m + \frac{6}{\pi} X_m I_{dc}^{LCC} = 0 \quad (4)$$

$$\Delta d_{m2}^{LCC} = U_{dc}^{LCC} - 2.7 k_T U_{sm} \cos \varphi_m = 0 \quad (5)$$

式中: k_T 为常数,其取值为0.995; U_{sm} 为LCC节点*m*(变量下标*m*表示LCC节点,后同)所连交流母线电压幅值; X_m 为LCC的换相电抗; Δd_{m1}^{LCC} 、 Δd_{m2}^{LCC} 为LCC系统中的潮流不平衡量。

2) 直流网络方程为:

$$\Delta d_{m3}^{LCC, DC} = I_{dc}^{LCC} - \sum_{k=1}^{n_c} g_{mk} N_k U_{dk}^{LCC/MMC} = 0 \quad (6)$$

式中: n_c 为直流网络中LCC和MMC换流站的总数; g_{mk} 为直流网络导纳阵中支路*mk*的元素; N_k 为换流站*k*内的换流器组数; $\Delta d_{m3}^{LCC, DC}$ 为LCC系统直流网络方程中的潮流不平衡量。

3) LCC控制方程为:

$$\Delta d_{m4}^{LCC} = d_{m4}^{LCC}(U_{dc}^{LCC}, I_{dc}^{LCC}, \cos \theta_m, k_T) = 0 \quad (7)$$

$$\Delta d_{m5}^{LCC} = d_{m5}^{LCC}(U_{dc}^{LCC}, I_{dc}^{LCC}, \cos \theta_m, k_T) = 0 \quad (8)$$

式中: Δd_{m4}^{LCC} 、 Δd_{m5}^{LCC} 为LCC控制系统中的潮流不平衡量; $d_{m4}^{LCC}(\cdot)$ 、 $d_{m5}^{LCC}(\cdot)$ 为LCC控制系统中的潮流不平衡量函数。

2.3 MMC直流系统潮流模型

MMC直流系统的潮流模型状态变量包含直流电压 U_{dc}^{MMC} 、直流电流 I_{dc}^{MMC} 、调制比 M 、相角差 δ (交流母线电压与MMC交流出口电压相角差)。

1) MMC功率方程为:

$$\Delta d_{n1}^{MMC} = P_{sn} - \left(\sqrt{6}/4 \right) N_n M_n U_{sn} U_{dcn}^{MMC} Y_n \sin(\delta_n - \alpha_n) - N_n U_{sn}^2 Y_n \sin \alpha_n = 0 \quad (9)$$

$$\Delta d_{n2}^{MMC} = Q_{sn} + \left(\sqrt{6}/4 \right) N_n M_n U_{sn} U_{dcn}^{MMC} Y_n \cos(\delta_n - \alpha_n) - N_n U_{sn}^2 Y_n \cos \alpha_n = 0 \quad (10)$$

式中: $Y_n = 1/\sqrt{R_{Ln}^2 + X_{Ln}^2}$, $\alpha_n = \arctan(R_{Ln}/X_{Ln})$, R_{Ln} 、 X_{Ln} 分别为线路等效电阻、线路等效电抗(变量下标*n*表示MMC节点,后同); Δd_{n1}^{MMC} 、 Δd_{n2}^{MMC} 为MMC系统功率方程中的潮流不平衡量。

2) MMC有功平衡方程为:

$$\Delta d_{n3}^{MMC} = N_n U_{dcn}^{MMC} I_{dcn}^{MMC} - \left(\sqrt{6}/4 \right) N_n M_n U_{sn} U_{dcn}^{MMC} \times Y_n \sin(\delta_n + \alpha_n) + (3/8) N_n M_n^2 U_{dcn}^{MMC} \times Y_n \sin \alpha_n = 0 \quad (11)$$

式中: Δd_{n3}^{MMC} 为MMC系统有功平衡方程中的潮流不平衡量。

3) 直流网络方程为:

$$\Delta d_{n4}^{MMC, DC} = I_{dcn}^{MMC} - \sum_{k=1}^{n_c} g_{nk} N_k U_{dk}^{LCC/MMC} = 0 \quad (12)$$

式中: g_{nk} 为直流网络导纳阵中支路*nk*的元素; $\Delta d_{n4}^{MMC, DC}$ 为MMC系统直流网络中的潮流不平衡量。

2.4 LCC-MMC直流系统潮流模型

对于LCC-MMC串/并联混合直流系统,各换流站间潮流模型相对独立,直流网络方程是模型中唯一相互联系的方程。LCC-MMC并联混合直流潮流模型由LCC、MMC潮流模型直接组合而成。但LCC-MMC串联混合直流潮流模型需要特殊考虑,以送端单座换流站、受端2座换流站串联的3端换流站直流系统为例,分析LCC-MMC串联混合直流潮流模型,其直流网络等效电路如图1所示。

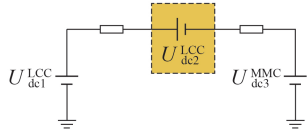


图1 LCC-MMC串联混合直流潮流模型直流网络等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of DC network in LCC-MMC series hybrid DC power flow model

LCC-MMC串联混合直流潮流模型中,串联后的换流站在等效电路中表现为“两节点”电压源,直流网络节点导纳阵失去意义,故直流网络方程式(6)、(12)将不再成立,具体潮流模型参考文献[15]。

3 含多类型直流的交直流混联电网的潮流计算方法

3.1 统一迭代法

统一迭代法将交直流混联电网进行统一建模,即在潮流计算中将交流侧和直流侧的状态变量共同作为求解变量,对整个交直流混联电网进行统一迭代求解。与传统交流潮流模型不同,交直流混联电网中交流潮流模型分为3种情况。

1)纯交流节点下交流潮流模型见式(2)、(3)。

2)含LCC直流节点的交流潮流模型为:

$$\Delta d_{m1}^{LCC} = \Delta d_{m1}^{LCC} - N_m U_{dcn}^{LCC} I_{dcn}^{LCC} \quad (13)$$

$$\Delta d_{m2}^{LCC} = \Delta d_{m2}^{LCC} - N_m U_{dcn}^{LCC} I_{dcn}^{LCC} \tan \varphi_m \quad (14)$$

式中: Δd_{m1}^{LCC} 、 Δd_{m2}^{LCC} 为含LCC直流节点的交流潮流不平衡量。

3)含MMC直流节点的交流潮流模型为:

$$\Delta d_{n1}^{MMC} = \Delta d_{n1}^{MMC} - \left(\sqrt{6}/4 \right) N_n M_n U_{sn} U_{dcn}^{MMC} Y_n \sin(\delta_n - \alpha_n) - N_n U_{sn}^2 Y_n \sin \alpha_n \quad (15)$$

$$\Delta d_{n2}^{MMC} = \Delta d_{n2}^{MMC} + \left(\sqrt{6}/4 \right) N_n M_n U_{sn} U_{dcn}^{MMC} Y_n \cos(\delta_n - \alpha_n) - N_n U_{sn}^2 Y_n \cos \alpha_n \quad (16)$$

式中: Δd_{n1}^{MMC} 、 Δd_{n2}^{MMC} 为含MMC直流节点的交流潮流不平衡量。

交直流混联电网潮流计算是传统交流潮流计算的拓展,本质上都是基于牛顿法求解多元非线性方程组。考虑直流对系统模型的影响,引入直流系统

状态变量,可得交直流混联电网的潮流修正方程为:

$$\Delta D = J \Delta X \quad (17)$$

$$\Delta D = [\Delta d^{AC}, \Delta d^{LCC}, \Delta d^{MMC}]^T \quad (18)$$

$$\Delta X = [\Delta x^{AC}, \Delta x^{LCC}, \Delta x^{MMC}]^T \quad (19)$$

式中: ΔD 为交直流混联电网的潮流模型不平衡量; Δd^{AC} 为交流系统潮流模型不平衡量; Δd^{LCC} 为LCC潮流模型不平衡量; Δd^{MMC} 为MMC潮流模型不平衡量; ΔX 为交直流混联电网的潮流模型偏差量; Δx^{AC} 为交流系统潮流模型偏差量; Δx^{LCC} 为LCC潮流模型偏差量; Δx^{MMC} 为MMC潮流模型偏差量; J 为交直流混联电网的雅可比矩阵。交直流混联电网的统一迭代法流程图见图2。图中PCC表示公共耦合点(point of common coupling, PCC)。

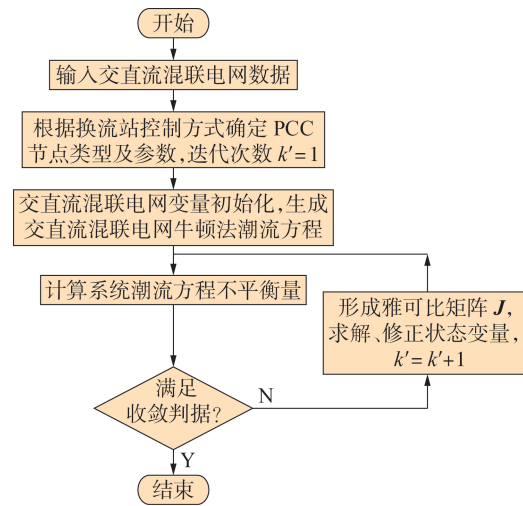


图2 统一迭代法流程图

Fig.2 Flowchart of unified iterative algorithm

3.2 交替迭代法

交替迭代法将交直流混联电网在PCC处解耦,分开求解交流系统、直流系统的潮流。计算交流系统潮流时,将直流侧等效成交流节点;求解直流系统潮流时,将交流侧在PCC处等效为恒压源。交流潮流计算与直流潮流计算交替迭代,直到交直流交界处潮流断面匹配,满足误差要求。

基于牛顿拉夫逊法,在交流系统潮流修正方程上拓展直流系统潮流模块,其中LCC、MMC直流模块修正方程为:

$$\Delta D^{DC} = J^{DC} \Delta X^{DC} \quad (20)$$

$$\Delta D^{DC} = [\Delta d^{LCC}, \Delta d^{MMC}]^T \quad (21)$$

$$\Delta X^{DC} = [\Delta x^{LCC}, \Delta x^{MMC}]^T \quad (22)$$

式中: ΔD^{DC} 为交替迭代法下直流系统潮流模型不平衡量; ΔX^{DC} 为交替迭代法下直流系统潮流模型偏差量; J^{DC} 为交替迭代法下直流系统雅可比矩阵。交直流混联电网的交替迭代法流程如图3所示。

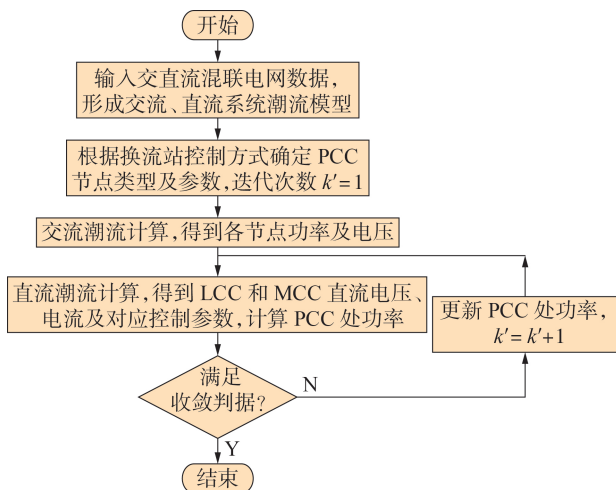


图3 交替迭代法流程图

Fig.3 Flowchart of alternating iteration algorithm

4 交直流混联电网潮流模型及潮流计算方法验证

4.1 交直流混联电网测试系统

为验证交直流混联电网潮流模型的有效性,以及所提交直流混联电网潮流统一迭代、交替迭代法可靠性和准确性,现构建3个交直流混联电网测试系统用于算例分析。

交直流混联电网基准容量为 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 计算精度取 10^{-5} 。交流系统选用 IEEE 系统, 直流系统根据交流系统网络大小嵌入相应规模的直流线路数量, 包括 LCC、MMC 及 LCC-MMC 直流线路。LCC 中换相电抗为 0.16 p.u. ; MMC 中等效电阻为 0.0065 p.u. , 等效电抗为 0.12 p.u. ; 直流线路电阻为 0.03 p.u. 。交直流混联电网测试系统构成如表1所示。

表1 交直流混联电网测试系统构成

Table 1 Composition of AC/DC hybrid connected power grid test system

测试系统	交流系统	LCC 直流线路条数	MMC 直流线路条数	LCC-MMC 直流线路条数
1	IEEE 57	1	1	1
2	IEEE 118	2	2	1
3	IEEE 300	2	2	2

4.2 交直流混联电网潮流模型及潮流计算方法验证

在 Python 中编程对3个交直流混联电网测试系统的潮流进行求解, 测试系统潮流均能可靠收敛。计算机处理器为 Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @1.60 GHz 1.80 GHz, 内存为 RAM 8.00 GB。

以交直流混联电网测试系统2为例, 对其潮流计算结果进行分析。交直流混联电网测试系统2拓扑见附录A图A2。交流系统潮流计算结果如图4所示(图中电压幅值为标幺值), 直流系统潮流计算结果见附录A表A1。

由图4可知: 2种算法下的交流系统节点电压幅

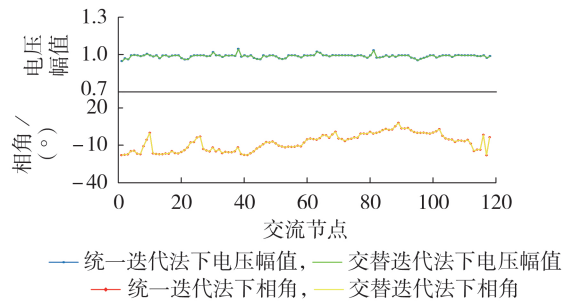


图4 2种算法下潮流计算结果

Fig.4 Power flow calculative results under two algorithms

值、相角曲线完全吻合, 潮流计算结果一致; 电压幅值、相角波动不大, 均处于正常工作范围。这说明所提交流系统潮流模型及潮流计算方法准确。由表A1可知: 2种算法下直流系统的潮流计算结果完全一致, 各换流站状态变量处于合理范围。此外, 其余测试系统的潮流结果也是吻合的。由上述分析可知: 对于相同的交直流混联电网, 分别采用统一建模和解耦建模, 并相应采取统一迭代法和交替迭代法进行求解, 得到的潮流计算结果完全一致。

5 交直流混联电网潮流计算方法运算性能对比分析

5.1 收敛性能

基于统一迭代法和交替迭代法分别在 Python 中求解3个交直流混联电网测试系统的潮流, 结果显示3个交直流混联电网测试系统潮流均能可靠收敛。

统一迭代法潮流收敛曲线见附录A图A3, 其中迭代误差取对数值。由图可知: 交直流混联电网潮流统一迭代法收敛性良好, 程序迭代计算3~5次, 4个测试系统潮流均可靠收敛, 且迭代次数与交直流混联电网规模关系不大; 测试系统的潮流迭代在开始时收敛得较慢, 当收敛到一定程度后, 其收敛速度就非常快, 可见对于统一迭代法, 初值的选择影响着算法的收敛性能。交直流混联电网潮流统一迭代法依然保留着牛顿法的主要收敛特征。

交替迭代法收敛条件比较严苛, 需要满足交流系统潮流收敛、直流系统潮流收敛以及交直流解耦处潮流断面匹配3个收敛条件。交直流混联电网测试系统潮流交替迭代法收敛曲线见附录A图A4, 其中迭代误差取为PCC潮流断面偏差的对数值。由图可知: 算法收敛曲线走势与图A3不同, 交替迭代法在第1、2次迭代时, 迭代误差下降比较大, 之后收敛速度有所减慢; 与统一迭代法相同的是算法迭代次数与系统规模关系不大, 迭代2~3次潮流基本收敛。

交替迭代过程中交直流系统迭代计算详细统计见附录B表B1。由表可知: 交直流混联电网中交流系统迭代计算与直流系统迭代计算符合牛顿类方法的特点, 收敛性好, 且迭代次数与系统规模关系不大。

5.2 计算速度

潮流计算时间是衡量算法性能的重要指标,为此统计2种算法下各交直流混联电网测试系统潮流计算时间如表2所示。由表可知,随着交直流混联电网规模增大,潮流计算时间大幅延长,且交替迭代法受系统规模的影响更为显著。

表2 交直流混联电网潮流计算时间

Table 2 Power flow calculation time of AC/DC hybrid connected power grid

测试系统	计算时间/s	
	统一迭代法	交替迭代法
1	0.36	1.45
2	1.26	2.29
3	9.91	27.98

面对相同的交直流混联电网,统一迭代法计算速度是交替迭代法的3倍左右,说明交直流混联电网的“解耦建模”方式虽然可以实现模型的简化,让编程变得简洁,但是交直流间复杂的交替迭代使计算变得复杂,影响了算法的计算效率。

5.3 综合性分析

为进一步对比分析2种算法的运算性能,研究系统负荷水平、系统强度及直流规模对算法的影响。

5.3.1 不同负荷水平下算法性能分析

以测试系统2为基础,设置系统负荷水平从 $0.5P_{10}$ (P_{10} 为IEEE测试系统中负荷水平初值)到 $1.75P_{10}$ 变化,变化间隔为 $0.25P_{10}$,模拟系统负荷水平变化,观察潮流收敛情况,分析算法的鲁棒性。不同负荷水平下算法收敛情况见附录B表B2。由表可知:当系统负荷水平不断增大时,2种潮流算法收敛效果均明显下降,其中交替迭代虽然整体迭代次数无变化,但是计算过程中交、直流系统的迭代次数增大;当线路重载时,统一迭代法和交替迭代法潮流均无法收敛,鲁棒性较差。

5.3.2 不同系统强度下算法性能分析

以测试系统3为基础,通过增大系统中电抗、降低系统短路比以减弱系统强度,从而分析潮流计算方法的性能。不同系统强度下算法收敛情况见附录B表B3。由表可知:一定程度的系统强度降低,对统一迭代法与交替迭代法性能影响不大;当电抗放大倍数为3时,迭代次数和计算时间略有增加,但此时系统强度很弱,接近稳定运行极限。因此认为系统强度对2种算法的收敛、计算速度性能影响不大。

5.3.3 不同直流嵌入规模下算法性能分析

以测试系统3为基础,增加系统中直流线路嵌入数量,观察潮流计算状态。不同直流嵌入规模下算法计算情况如表3所示。由表可知:随着直流嵌入规模的提升,2种算法的迭代次数基本不变,说明算法收敛性能未受影响;计算时间总体呈现不断延长的趋势,但也出现了计算时间不增反降情况,如交

替迭代法下的16条直流线路嵌入直流系统时的潮流模型计算时间较14条直流线路嵌入时有所缩短。分析原因如下:2种情况下交替迭代法的迭代次数未发生变化,说明单次交替迭代的计算时间有所缩短,其中单次交替迭代中包含交、直流系统潮流模型计算;而直流线路的增加改善了交流系统的潮流分布,缩短了交流系统的潮流计算时间,因此出现了整体潮流计算时间不增反降的现象。

表3 不同直流嵌入规模下算法收敛情况

Table 3 Algorithm convergence situations under different DC inserting scales

直流嵌入规模	迭代次数		计算时间/s	
	统一迭代法	交替迭代法	统一迭代法	交替迭代法
6条直流	5	2	9.91	27.98
8条直流	5	3	12.46	34.09
10条直流	5	3	14.01	52.47
12条直流	5	3	13.48	54.95
14条直流	5	3	14.39	53.87
16条直流	5	3	15.54	47.28
18条直流	5	3	15.91	54.17
20条直流	5	3	16.51	55.64

为进一步分析直流嵌入规模对算法计算效率的影响,定义直流渗透率 γ 为直流系统节点与交流系统节点的比值,表示交流系统节点中与直流系统相连节点所占比例。以表2中6条直流与18条直流2种架构为例,系统直流渗透率由4%增大到12%,统一迭代法计算时间约延长了60.5%,交替迭代法计算时间约延长了93.6%,可见当直流嵌入规模不断提升时,交替迭代法的运算性能所受影响更大,而统一迭代法计算效率更高。

6 基于南方电网实际系统验证分析

6.1 南方电网实际系统计算数据转化

从潮流计算的角度,CIM/XML文档中包含了潮流计算所需的设备参数、拓扑连接关系2个必要条件。但CIM/XML文档中的数据与电力系统潮流计算所需数据间存在拓扑模型、描述语法和参数量纲的差异,应将其转换为特定格式的电力系统数据。

以南方电网2020年的CIM/XML文档为原始数据,经过拓扑模型转化、节点类型识别、交直流系统数据生成等一系列处理,最后得到适用于潮流计算的输入数据文档,其设备规模见附录B表B4。需要声明的是在南方电网实际系统的数据处理过程中,仅保留了500 kV及以上电压等级的交直流网络,将其余设备等效为恒功率节点。

6.2 基于南方电网实际系统对比算法性能

为进一步切合潮流计算实际场景,基于南方电网实际系统对统一迭代法和交替迭代法的计算性能作进一步分析。经统一迭代和交替迭代法求解后,南方电网的交直流混联电网潮流模型均可靠收敛,

系统状态变量位于合理范围。

对比交流系统节点电压幅值、电压相角、直流电压以及直流电流的潮流计算结果与量测量。采用回归评价指标分析2种算法的运算性能,包括:均方根误差(root mean squared error, RMSE)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)和平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)。各参量的评价指标对比结果见表4。由表可知:交流电压幅值、直流电压的MAPE指标值均在1%以内,潮流计算结果与量测结果相符;交流电压相角的MAPE指标值在25%以内,主要受系统节点类型设置的影响,包括PV、PQ及平衡节点的选取,主要是平衡节点的选取不同导致;直流电流的MAPE指标值在24%以内,主要受潮流模型中直流功率的取值影响,直流功率应取为换流器功率控制器参考值,但CIM/XML文档中不包含该控制参数,本文中将其取为额定直流功率,这导致了直流电流发生偏差。

表4 潮流计算结果与量测量对比

Table 4 Comparison between power flow calculative results and measurement values

参量	RMSE 值	MAE 值	MAPE 值 / %
交流电压幅值 / kV	9.2366	4.2526	0.83
交流电压相角 / (°)	5.8165	4.1041	24.68
直流电压 / kV	6.7654	3.8180	0.75
直流电流 / kA	1.3441	0.3461	23.80

统一迭代法和交替迭代法下的计算特性如表5所示。由表可知:2种算法潮流模型的迭代次数与前文分析所得结论相符,二者迭代次数基本相同,故系统规模不影响算法的收敛性能;统一迭代法计算时间较交替迭代法有所缩短,计算效率更高。

表5 2种算法的计算特性

Table 5 Computational characteristics of two algorithms

算法	计算精度	迭代次数	计算时间 / s
统一迭代法	10^{-5}	5	14.84
交替迭代法	10^{-5}	4	45.72

7 结论

本文针对多类型直流参与下大规模交直流混联电网,分别基于统一迭代法和交替迭代法建立潮流模型并求解,通过3个交直流混联电网测试系统对2种算法的性能进行详细分析,并结合实际南方电网数据进行验证,得出如下结论。

1)在本文背景下,2种算法收敛性能相当,但统一迭代法计算速度更快,是交替迭代法计算速度的3倍左右。交替迭代法虽然建模方便,编程简单,但交、直流系统间复杂的交替迭代影响了计算效率。

2)当系统直流渗透率由4%增大到12%时,统一

迭代法、交替迭代法计算时间分别约提高了60.5%、93.6%。当直流嵌入规模不断提升时,交替迭代法速度性能受影响较大,统一迭代法计算效率更高。

3)针对交直流系统潮流算法的选择,就目前直流发展水平而言,出于应用的简便性,可以采用交替迭代法,并结合一些编程技巧弥补其速度性能方面的缺陷。但面对未来大规模交、直流混联电网时,统一迭代法计算性能更优。

本文的工作为含多类型直流的大规模交直流混联电网潮流计算的进一步研究提供参考,为交直流系统潮流在线算法的开发提供依据。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 饶宏,周月宾,李巍巍,等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化,2023,47(1):1-11.
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1):1-11.
- [2] 喻建瑜,范栋琛,徐凯,等. 混合级联多端直流系统的分阶段协调故障穿越策略[J]. 电力自动化设备,2022,42(6):69-75.
YU Jianyu, FAN Dongchen, XU Kai, et al. Staged coordinated fault ride-through strategy for hybrid cascaded multi-terminal DC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6):69-75.
- [3] 杨万里,涂春鸣,兰征,等. 基于储能型柔性多状态开关的直流微电网与交流配电网柔性互联策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5):254-260.
YANG Wanli, TU Chunming, LAN Zheng, et al. Flexible interconnection strategy between DC microgrid and AC distribution grid based on energy storage flexible multi-state switch [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5):254-260.
- [4] 卫志农,裴蕾,陈胜,等. 高比例新能源交直流混合配电网优化运行与安全分析研究综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):85-94.
WEI Zhinong, PEI Lei, CHEN Sheng, et al. Review on optimal operation and safety analysis of AC/DC hybrid distribution network with high proportion of renewable energy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):85-94.
- [5] 吕鹏飞. 交直流混联电网下直流输电系统运行面临的挑战及对策[J]. 电网技术,2022,46(2):503-510.
LÜ Pengfei. Challenges and countermeasures of DC transmission system operation under AC-DC hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(2):503-510.
- [6] 李国庆,边竞,王鹤,等. 直流电网潮流分析与控制研究综述[J]. 高电压技术,2017,43(4):1067-1078.
LI Guoqing, BIAN Jing, WANG He, et al. Review on power flow analysis and control of DC power grid[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4):1067-1078.
- [7] 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.
- [8] 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):3140-3148.
ZHOU Tao, CHEN Zhong, DAI Zhongjian, et al. Power flow algorithm for AC/DC system with VSC-MTDC[J]. Proceedings

- of the CSEE, 2019, 39(11): 3140-3148.
- [9] ARRILLAGA J, BODGER P. Integration of h.v.d.c. links with fast-decoupled load-flow solutions[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1977, 124(5): 463.
- [10] 郑超, 盛灿辉. 含 VSC-HVDC 的交直流混合系统潮流统一迭代求解算法[J]. 中国电力, 2007, 40(7): 65-69.
- ZHENG Chao, SHENG Canhui. Uniform iterative power flow algorithm for systems equipped with VSC-HVDCs[J]. Electric Power, 2007, 40(7): 65-69.
- [11] 王博, 路俊海, 郭小江, 等. 多 VSC 型换流器电力系统潮流计算方法研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2344-2349.
- WANG Bo, LU Junhai, GUO Xiaojian, et al. Research on power flow calculation method of power system with multi-VSC converters[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2344-2349.
- [12] BANDARU T. Newton-Raphson load flow model for hybrid multi-terminal HVDC systems consisting of voltage sourced converters and line commutated converters[C]//IEEE Students Conference on Engineering and Systems. Allahabad, India: IEEE, 2016: 1-6.
- [13] 郑超, 周孝信, 李若梅, 等. VSC-HVDC 稳态特性与潮流算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 1-5.
- ZHENG Chao, ZHOU Xiaoxin, LI Ruomei, et al. Study on the steady characteristic and algorithm of power flow for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 1-5.
- [14] 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, 1176.
- WU Zhiyuan, YIN Zhenggang, TANG Xisheng. AC-DC decoupled power flow algorithm for hybrid power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 937-944, 1176.
- [15] 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/OL]. 电网技术. (2022-08-31)[2023-02-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20220831.0910.002.html>.
- [16] 赵晋泉, 叶君玲, 邓勇. 直流潮流与交流潮流的对比分析[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 147-152.
- ZHAO Jinquan, YE Junling, DENG Yong. Comparative analysis on DC power flow and AC power flow[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 147-152.
- [17] 敖鑫, 王淳, 朱文广, 等. 两种配电网线性潮流计算方法及其比较[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 4004-4013.
- AO Xin, WANG Chun, ZHU Wenguang, et al. Two linear power flow calculation methods for distribution network and their comparison[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 4004-4013.
- [18] 刘团结, 韦延方, 王鹏, 等. 适用于柔性直流系统潮流计算的高阶牛顿法效率分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3837-3846.
- LIU Tuanjie, WEI Yanfang, WANG Peng, et al. Efficiency analysis of high-order Newton method for flexible DC power flow calculation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3837-3846.
- [19] 饶宏, 吴为, 周保荣, 等. 云南电网与南网主网交直流系统相互影响及异步联网方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3470-3476.
- RAO Hong, WU Wei, ZHOU Baorong, et al. Study on interaction between AC and DC systems of Yunnan power grid and southern power grid and asynchronous networking scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3470-3476.

作者简介:

宋智强(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为直流输电(E-mail: qsl464188123@163.com);

赵化时(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统自动化(E-mail: zhaohs@csg.cn);

许建中(1987—), 男, 教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为直流输电(E-mail: xujianzhong@ncepu.edu.cn);

赵成勇(1964—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为直流输电(E-mail: chengyongzhao2@163.com)。

(编辑 王欣竹)

Applicability analysis of power flow calculation methods for AC/DC hybrid connected power grid with multi-type DC

SONG Zhiqiang¹, HUANG Yaohui¹, ZHAO Huashi², XU Jianzhong¹, ZHAO Chengyong¹, JIA Xiufang¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Power Dispatching and Control Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510670, China)

Abstract: As a new stage in the development of power grid, the AC/DC hybrid connected power grid is characterized by multi-type DC participation and large-scale AC/DC interconnection. However, the applicability of the unified iteration and alternating iteration algorithms for power flow calculation has not been deeply analyzed. Therefore, based on an AC/DC hybrid connected power grid with multi-type DC, the calculation performance of the two algorithms is compared and studied. The power flow model of the AC/DC hybrid connected power grid with conventional DC, flexible DC, and hybrid DC is derived, and corresponding unified iteration and alternating iteration algorithms are proposed. The effectiveness of the power flow model and the accuracy of power flow algorithms are verified by the data of three AC/DC hybrid connected power grid test systems and the actual system of China Southern Power Grid. The convergence performance and calculation speed of the two algorithms are compared and analyzed in combination with the factors such as system load level, system strength, and DC embedding scale. The research results show that during the calculative progress of large-scale AC/DC hybrid connected power grid with multi-type DC, the unified iteration algorithm has higher computational efficiency than that of the alternating iteration algorithm.

Key words: multi-type DC; AC/DC hybrid connected power grid; power flow calculation; unified iterative algorithm; alternating iteration algorithm

附录 A



图 A1 南方电网直流输电通道示意图

Fig. A1 Schematic diagram of DC transmission channel of CSG

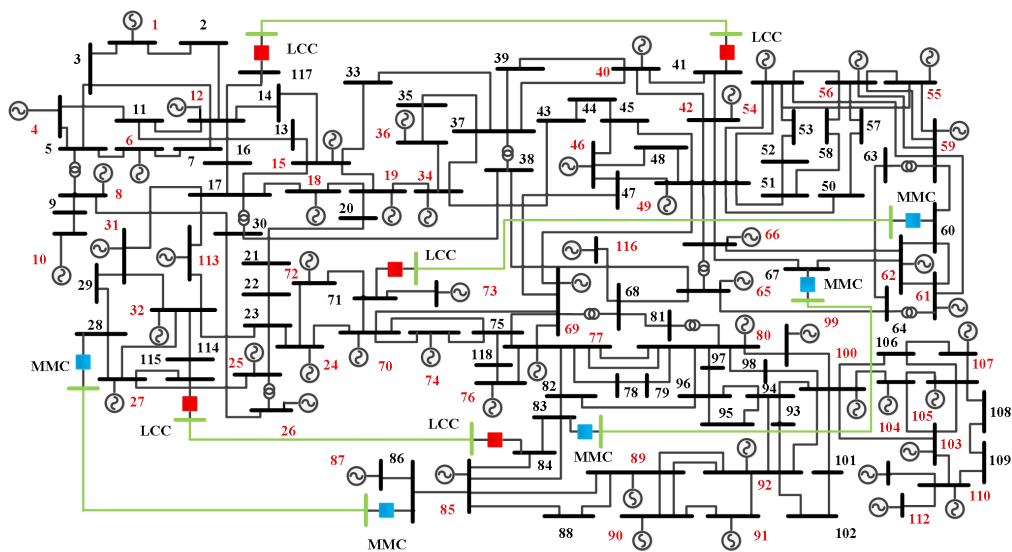


图 A2 交直流混联电网测试系统 2

Fig. A2 AC/DC test system 2

表 A1 交直流系统潮流计算结果

Table A1 DC calculative result of AC/DC system power flow

参数	LCC		参数	MMC	
	统一迭代法	交替迭代法		统一迭代法	交替迭代法
$U_{dc}/p.u.$	2.157 50	2.157 50	$U_{dc}/p.u.$	2.150 00	2.150 00
$I_{dc}/p.u.$	0.250 00	0.250 00	$I_{dc}/p.u.$	-0.250 00	-0.250 00
$\theta/\delta(^{\circ})$	18.561 30	18.561 30	$\theta/\delta(^{\circ})$	-3.436 70	-3.436 70
$\cos\varphi/M$	0.920 33	0.920 33	$\cos\varphi/M$	0.795 12	0.795 12
$k_T/p.u.$	0.833 44	0.833 44	$k_T/p.u.$	-	-

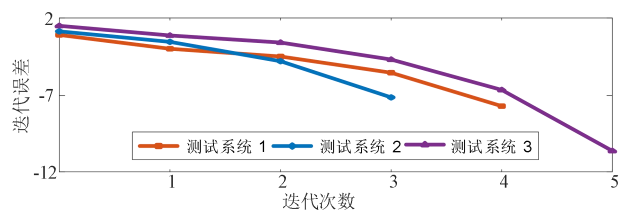


图 A3 统一迭代法潮流收敛曲线

Fig. A3 Convergence curve of power flow of unified iterative algorithm

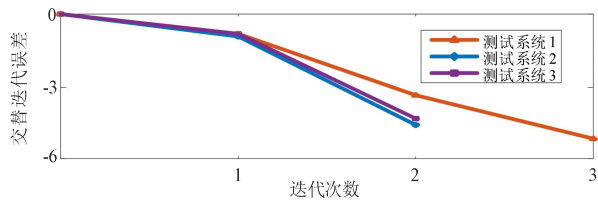


图 A4 交替迭代法潮流收敛曲线

Fig. A4 Convergence curve of alternating iterative algorithm

附录 B

表 B1 交替迭代过程信息统计

Table B1 Alternating iteration process statistics

测试系统	第 1 次迭代下的收敛次数		测试系统	第 2 次迭代下的收敛次数		测试系统	第 3 次迭代下的收敛次数	
	交流系统	直流系统		交流系统	直流系统		交流系统	直流系统
1	4	3	1	4	3	1	4	3
2	3	3	2	3	3	2	—	—
3	5	3	3	5	3	3	—	—

表 B2 不同负荷水平下算法收敛情况

Table B2 Algorithm convergence under different load levels

负荷水平	统一迭代法		负荷水平	交替迭代法	
	迭代次数	计算时间/s		迭代次数	计算时间/s
0.50	4	0.48	0.50	3	1.96
0.75	4	0.89	0.75	3	2.44
1.00	4	0.36	1.00	3	1.45
1.25	5	0.56	1.25	3	2.21
1.50	6	0.82	1.50	3	3.76
1.75	不收敛		1.75	不收敛	

表 B3 不同系统强度下算法收敛情况

Table B3 Algorithm convergence under different system strength

K	统一迭代		K	交替迭代	
	迭代次数	计算时间/s		迭代次	计算时间/s
1.0	4	1.26	1.0	2	2.29
1.5	4	1.37	1.5	2	3.14
2.0	4	1.43	2.0	2	2.98
2.5	4	1.44	2.5	2	3.36
3.0	5	2.88	3.0	3	6.14

注：K 为电抗放大倍数。

表 B4 南方电网系统数据

Table B4 Datas of CSG system

交直流系统	参数信息
交流节点	269 个
交流线路	529 条
接地电抗/电容	397 个
LCC	20 个
MMC	4 个
直流线路	15 条