

基于区域划分的交直流混联系统网损分摊方法

马喜平, 董晓阳, 梁琛, 朱宏毅, 李亚昕

(国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730070)

摘要: 随着高比例新能源的并网与远距离输送, 电力系统正向拓扑复杂、潮流交互频繁的交直流混联电网形态演进。传统基于单一流向追踪或改进的平均网损分摊方法, 在处理大规模电网跨区功率传输及关键枢纽节点责任认定时存在显著的公平性缺失。为此, 本文提出一种基于虚拟节点扩展与区域划分的交直流混联系统网损分摊新方法。首先, 构建交直流网络虚拟节点模型, 将交流线路与直流输电通道统一等效为承载复功率损耗的虚拟负荷节点, 实现物理网络的无损化; 其次, 提出基于有功功率分配系数的改进模块度指标, 利用混合整数二次规划求解兼顾电气耦合度与物理连通性的电网最优分区方案; 最后, 建立复功率双向潮流追踪模型, 引入边界等效源/荷机制, 将网损责任在发电机、负荷及传输枢纽节点间进行双向公平分摊。基于 IEEE 39 及大规模 IEEE 118 节点交直流混联系统的算例验证表明所提方法在 39 节点系统和 118 节点系统中实现了网损分摊的严格守恒, 并且可以有效识别出电气自治区域。结果证明该方法能准确量化主力电源的外送责任及跨区联络节点的传输责任, 为交直流混联电网的精细化降损与市场化结算提供了理论依据。

关键词: 交直流混联系统; 区域划分; 网损分摊; 复功率; 双向分摊模型

Network Losses Allocation Method in AC/DC Hybrid Systems Based on Zone Division

MA Xiping, DONG Xiaoyang, LIANG Chen, ZHU Hongyi, LI Yaxin

(Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730070, China)

Abstract: With the integration of a high proportion of renewable energy and long distance transmission, the power system is evolving toward a complex, topologically intricate AC/DC hybrid grid characterized by frequent power flow interactions. Traditional average network loss allocation methods based on single-direction tracking or improved methods suffer from significant fairness deficiencies when dealing with large-scale inter-regional power transmission and the determination of responsibility for key hub nodes. To address this, in this paper a novel network loss allocation method for AC/DC hybrid systems based on virtual node expansion and regional partitioning is proposed. First, a virtual node model of the AC/DC network is constructed, AC lines and DC transmission channels is unified as virtual load nodes to carry complex power losses, thus achieving lossless physical network operation. Then, an improved modularity index based on the active power allocation coefficient is proposed, and mixed integer quadratic programming is used to solve for the optimal grid partitioning scheme that balances electrical coupling and physical connectivity. Finally, a bidirectional complex power flow tracking model is set up, and a boundary equivalent source/load mechanism is introduced to fairly allocate network loss responsibility bidirectionally among generators, loads, and transmission hub nodes. Numerical examples based on IEEE 39 and large-scale IEEE118 node AC/DC hybrid systems show that the proposed method achieves strict conservation of network loss allocation in both 39-node and 118-node systems can effectively identify electrically autonomous regions. The results prove that this method can accurately quantify the transmission responsibility of the

收稿日期:2025-11-13; 修回日期:2025-12-06

基金项目:国网甘肃省电力公司科技项目(52272223004A);甘肃省重点人才项目(2025RCXM044)。

Project Supported by State Grid Gansu Electric Power Company Science and Technology Project(52272223004A); Gansu Province Key Talent Project(2025RCXM044)。

main power source and the transmission responsibility of inter-regional interconnection nodes, providing a theoretical basis for refined loss reduction and market-based settlement in AC/DC hybrid power grids.

Keywords: AC/DC hybrid system; zone division; network loss allocation; complex power; bidirectional allocation model

0 引言

在“双碳”目标的驱动下,近年来我国能源结构正加快向清洁化方向转变^[1]。而高比例新能源的接入和大规模远距离外送,加剧了电网损耗的增加。网损在电力市场交易中扮演着至关重要的角色,遵循公平分摊的原则^[2]。因此,在电力市场中如何公平合理地进行网损分摊是一个值得探讨的问题。

国内外已有较多关于配电网网损分摊的研究^[3-4]。文献[5]提出将配电网的网损分为正序网损和负序网损两部分,利用平均网损系数法计算各节点得到的正序网损,提出负序网损分配因子法计算各节点得到的负序网损,进而得到各节点应分摊的总网损;文献[6]针对分布式电源(distributed generation, DG)接入配网后网损分摊不合理的问题,构建了一种基于知识图谱和网络拓扑学的配电网网损分摊方法,该文献首先构建了含DG的配电网网损异常辨识知识图谱,然后采用网络拓扑学理论改进了传统潮流追踪法,将网损合理分配给用电负荷和DG;文献[7]针对DG接入配电网后,采用基于比例系数的边际损耗系数法时存在市场成员分摊差距过大的问题,通过对正、负网损分摊量取绝对值后求和,结合网损分摊量总和与实际总损耗平衡的等式约束条件,借助奖惩系数对网损分摊量进行修正;文献[8]提出了一种兼顾DG对配电网网损贡献率的网损分摊方法,其先设计了一套DG对配电网网损的影响指标体系,并明确各指标权重,随后将网损初始值通过潮流追踪法分配给原配电网所有用户,而网损变化量则依据网损贡献率分摊给各DG;文献[9]鉴于小水电运行对配电网节点电压及网损存在不同程度影响,构建了一种适用于含小水电配电网且计及电压约束的网损分摊方法,其先借助改进平均网损系数法确定基础分摊量,进而依据各节点电压越限量和平水期最小网损的变化量修正基础分摊量。然而,上述研究多局限于交流配电网的网损分摊,交直流配电网由于节点繁多、结构复杂,导致网损分摊难以实现,因此专门针对交直流配电网网损分摊的研究仍较为缺乏。

同时,将网损分摊和区域划分相联系结合,也为配电网网损分摊研究提供了一种新思路。文献

[10]针对分布式电源和负荷的不确定性导致配电网电压越限和集中优化调度难的问题,提出了一种基于集群划分的配电网两阶段鲁棒电压无功控制策略,该文献计及节点可调无功容量构建了综合电气距离模块度指标指导该文献的集群划分;文献[11]针对新型电力系统潮流频繁波动问题提出了一种无功鲁棒分区方法,该方法利用混合边权参数为电网结构划分提供标度,在计及电网物理特性的基础上,考虑电网的拓扑特点增加了所提方法的鲁棒性;文献[12]提出了一种基于输电网络区域划分的共享优化配置方法,该文献结合电力系统网络结构、节点、线路的动态特性提出了共享区域综合划分指标,并借鉴Dijkstra算法思想求解以实现划分指标最优为目标的区域划分问题;文献[13]针对分布式电源大量接入配电网引发的电压越限问题,以及传统集中式电压优化控制存在的不足,推导得出跨电压等级交直流配电网的灵敏度计算式,建立了中低压交直流配电网动态分区的评价指标体系,并采用遗传算法优化分区方案及选择分区主导节点;文献[14]聚焦交直流混合配电系统优化调度的模型与策略问题展开研究,建立了一种计及运行风险的交直流混合配电系统“源-网-荷-储”协调优化运行模型,并提出基于交替方向乘子算法的分区分布式优化策略及求解方法;文献[15]计及配电网、配气网及交通网间的相互作用,纳入移动应急电源与负荷需求响应因素,以电-气综合能源系统恢复净收益最大化为优化目标,求解恢复分区划分及分区内恢复方案。在分区算法层面,聚类算法是常用的技术之一。例如,文献[16]采用层次聚类算法对电网进行次区域划分,为后续辨识主导节点提供了基础;文献[17]则利用DBSCAN密度聚类算法,将电压曲线相似的设备归类,以实现低压台区拓扑辨别。此外,基于复杂网络社团结构的方法也得到了广泛应用。文献[18]引入加权模块度指标,在考虑无功源容量约束的前提下进行无功分区;文献[19]则将改进的Fast-Newman算法应用于网络划分,为线损的并行计算提供了支持。

综上所述,为了克服现有方法在分摊公平性及大系统适用性上的局限,本文开展了基于虚拟节点扩展与区域划分的交直流混联系统网损分摊研

究。本文的主要创新与贡献如下:1)提出了基于虚拟节点扩展的无损化网络建模方法。本文引入虚拟节点承载复功率线损,构建了物理节点与虚拟节点共存的扩展网络,在保留原始网络物理连接特性的同时,为精确量化源-荷-网之间的电气耦合强度提供了计算基础;2)建立了兼顾电气耦合度与物理连通性的区域划分优化模型。本文定义了考虑潮流追踪分配系数的改进模块度指标,并引入图论连通性约束与最小规模约束。该策略在 IEEE 118 节点等大规模系统中,能够识别出源荷供需自平衡的电气自治区域,实现了分区的物理完整性与电气紧凑性的统一;3)构建了复功率的双向精确分摊机制。本文提出了边界等效源/荷概念,通过在各分区独立执行复功率双向潮流追踪,不仅实现了电源与负荷对网损责任的共同分担,更强制跨区传输的无源无荷节点承担了与其传输容量相匹配的损耗责任。算例验证表明,该机制在大规模交直流混联系统中实现了网损分摊总量的数学守恒,显著提升了分摊结果的公平性。

1 复功率潮流追踪法

潮流追踪法核心在于基于已知的潮流分布,量化电源与负荷之间的物理关联,确定各发电机组对线路潮流和节点负荷的贡献度,或反向追溯负荷的电力来源^[20-22]。该原则假定节点处流入的功率混合后,按下路支路功率比例分配;反之,节点抽取的功率与其注入功率成正比。

传统的潮流追踪方法常在有功功率和无功功率解耦的假设下进行,即单独追踪有功潮流来分摊有功网损。然而,在交直流混联系统中,由于环流设备的存在和复杂的潮流交互,有功与无功的耦合效应显著增强,无功潮流的变化同样会引起有功损耗的改变。仅考虑有功功率的追踪方法忽略了无功功率对有功损耗的影响,导致分摊结果有失公平性和准确性。因此,在有功与无功不解耦的条件下,采用复功率潮流追踪法成为必然选择。该方法直接对复功率 $S = P + jQ$ 进行追踪,将有功与无功视为一个整体,能够更精确地描述发电机与负荷之间完整的功率交换关系,从而为复功率网损的公平分摊提供了更合理的依据。

1.1 基于扩展网络的潮流追踪模型

为了在有损网络中精确应用潮流追踪,通常需要先将其等效为一个无损网络。目前,常规使用的一种方法为平均线损法,即将线路上的损耗平均分配至线路的起点和终点节点^[23]。本文采用增设虚拟节点的

方法来实现:将网络中的每一条线路视为一个虚拟节点,该虚拟节点的负荷等于该线路的复功率损耗。这样原始的物理网络就被转换成了一个规模更大,但内部所有支路均为无损的扩展网络。在此扩展网络上,可以建立基于节点功率平衡的数学模型。

1.1.1 顺流追踪模型

顺流追踪旨在确定个各发电机对网络中任意节点的总通过功率以及对各负荷的贡献。对于扩展网络中的任一节点 i ,其总通过功率(即总流出功率) S_i 公式为

$$S_i = \sum_{j \in \alpha_i} S_{ij} + S_{Li} \quad (1)$$

式中: S_{ij} 为支路 $i-j$ 传输的复功率,且 S_{ij} 的实部 $P_{ij} > 0$; S_{Li} 为节点 i 处的负荷; α_i 为节点 i 的下游节点集。

根据比例共享原则, $S_{ij} = (S_{ij}/S_j)S_j$, 可得矩阵公式为

$$B_d S_i = S_{Li} \quad (2)$$

式中, B_d 为顺流分配矩阵,其元素定义为

$$[B_d]_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j \\ -S_{ij}/S_j, & j \in \alpha_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

通过求解 $S_j = [B_d]^{-1} S_{Li}$, 即可得到每个符合对于网络中任一节点总通过功率的贡献。

1.1.2 逆流追踪模型

逆流追踪旨在确定网络中任意节点的功率来自哪些上游的发电机。对于扩展网络中的任一节点 i ,其总通过功率 S_i 公式为

$$S_i = \sum_{j \in \beta_i} S_{ji} + S_{Gi} \quad (4)$$

式中: S_{ji} 为支路 $j-i$ 传输的复功率,且 S_{ji} 的实部 $P_{ji} > 0$; S_{Gi} 为节点 i 处的发电机出力; β_i 为节点 i 的上游节点集。

同理,根据比例共享原则,可得矩阵公式为

$$A_u S_i = S_{Gi} \quad (5)$$

式中, A_u 为逆流分配矩阵,其元素定义为

$$[A_u]_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j \\ -S_{ji}/S_j, & j \in \beta_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

通过求解 $S_j = [A_u]^{-1} S_{Gi}$, 可以得到各发电机对网络中任一节点总通过功率的贡献。这两种追踪模型共同构成了后续分区和分摊的理论基础。

1.2 基于潮流追踪法的双向追踪模型

单纯的逆流追踪将所有网损责任归于发电机,而顺流追踪则将责任完全归于负荷。这两种单向

分摊模式均存在片面性,因为网损的产生是发电机与负荷共同参与潮流传输的结果,理由由双方共同承担^[24]。

本文确立的网损分摊原则如下:网损本质上是由于潮流在电网中流动而产生的,而潮流是由电源与负荷共同作用形成的。因此,从责任对等的角度,网损理应由源、荷双方共同承担。本文采用的“双向分摊”模型,正是基于这一原理,将总网损在源侧与荷侧之间平均分配(各承担 50%)。对于自身无源无荷但承担了大量的跨区潮流的枢纽节点,将其识别为区域边界的等效电源或等效负荷。依据电力市场中,谁占用输电通道,谁承担传输损耗的原理,此类节点虽无物理负荷,但因占用了输电容量并产生了损耗,必须分摊相应的网损责任。基于上述原则,本文引入一个分摊系数 γ ($0 < \gamma < 1$),其中, γ 表示有电源侧承担的网损比例, $(1-\gamma)$ 表示由负荷侧承担的网损比例。当 $\gamma=1$ 时,模型退化为纯逆流分摊;当 $\gamma=0$ 时,模型退化为纯顺流分摊,在工程实际中,为了体现公平性原则,通常取 $\gamma=0.5$,即电源侧和负荷侧各承担一半的责任。

利用逆流追踪的结果,可以得到电源侧应该分摊的网损为

$$\Delta S_{Gk} = \sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{\gamma S_{Li}}{S_i} [A_u]^{-1} S_{Gk} \quad (7)$$

式中: n 为物理节点个数; m 为虚拟节点个数; k 为任一物理节点。

同理,利用顺流追踪的结果,可以得到负荷侧应该分摊的网损为

$$\Delta S_{Lk} = \sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{(1-\gamma) S_{Gi}}{S_i} [B_d]^{-1} S_{Lk} \quad (8)$$

最终,每个主体(电源或负荷)承担的总网损,是其在网络中所有线路上分摊到的损耗之和。该双向模型清晰地界定了源、荷双方的责任,是当前主流的公平网损分摊框架。

2 基于潮流追踪的区域划分方法

2.1 社区发现算法与模块度

区域划分是复杂网络分析中的重要技术,旨在将网络划分为内部连接紧密、外部连接稀疏的若干个子区域^[25]。模块度是衡量网络划分质量最常用的指标之一。其值在 $[0, 1]$ 之间,越接近于 1,表示社区结构越明显,划分质量越好。模块度 Q 的定义为

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_i \sum_j \left(e_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta_{ij} \quad (9)$$

式中: e_{ij} 为邻接矩阵的元素; k_i 和 k_j 分别为节点 i 和节点 j 的加权重; δ_{ij} 为二进制变量,取 1 表示节点 i 和节点 j 在同一社区内,否则为 0; m 为网络中所有边权之和,公式为

$$m = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j e_{ij} \quad (10)$$

节点 i 的加权重 k_i 数学公式为

$$k_i = \sum_j e_{ij} \quad (11)$$

2.2 考虑潮流追踪的模块度指标构建

传统的模块度函数大多仅依赖于网络的拓扑结构或者简单的线路参数,未能反应电力网络中功率的实际流动路径和源荷之间的电气联系强度。为了使分区结果更具有物理意义,本文将基于潮流追踪的有功功率分配系数矩阵 K 引入了模块度函数,构建了新的模块度指标。

分配系数矩阵 K 是在本文第 1 章的扩展网络上进行有功潮流追踪计算得出的。矩阵元素 K_{ik} 的物理意义为:发电机 k 发出的有功功率中,最终有多少功率流向了节点 i (包括物理负荷节点和代表线路损耗的虚拟节点)。该矩阵能够精确量化发电机与网络中任意一个功率消耗点之间的电气联系强度。

首先,构建基于有功功率的逆流分配矩阵 A_u^{real} 为

$$[A_u^{\text{real}}]_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j \\ -P_{ji}/P_{Tj}, & j \in \beta_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中, P_{Tj} 为节点 j 的注入功率,通过求逆可得 P_{Tj} 为

$$P_{Tj} = (A_u^{\text{real}})^{-1} P_{Gi} \quad (13)$$

进而可以得到分配系数矩阵 K 公式为

$$K_{ik} = \frac{P_{Gk}}{P_{Tk}} [(A_u^{\text{real}})^{-1}]_{ki} \quad (14)$$

本文将能反应源荷电气距离的 K 矩阵作为新的“边权”,来构建模块度函数。此时,发电机与负荷构成了一个二分网络。本文将 K 矩阵视为这个二分网络的加权邻接矩阵,并据此构建新的模块度指标为

$$Q_{\text{flow}} = \frac{1}{2m_k} \sum_i \sum_j \left(K_{ij} - \frac{k_i^{\text{out}} k_j^{\text{in}}}{2m_k} \right) \delta_{ij} \quad (15)$$

式中: Q_{flow} 为融合潮流追踪法的模块度指标; $k_i^{\text{out}} = \sum_j K_{ij}$ 和 $k_j^{\text{in}} = \sum_i K_{ij}$ 分别代表节点的“出”权和“入”权。

新模块度指标中所有节点的边权之和 m_k 为

$$m_k = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j K_{ij} \quad (16)$$

新的模块度指标 Q_{flow} 不仅包含了网络的拓扑信息,更重要的是融入了潮流的分布特性。

3 基于潮流追踪的分区优化模型

基于第2章构建的考虑潮流追踪的模块度指标,本章建立以最大化该指标为目标的区域划分优化模型。

3.1 考虑潮流追踪的模块度指标构建

本文所提区域划分优化模型的目标函数即为最大化考虑潮流追踪的模块度 Q_{flow} ,即寻找一种分区方法,使得区域内部的源荷关系最为紧密,这与将网损分摊给关系最紧密的个体的理念高度契合。目标函数数学关系为

$$\max Q_{\text{flow}} = \frac{1}{2m_k} \sum_i \sum_j \left(K_{ij} - \frac{k_i^{\text{out}} k_j^{\text{in}}}{2m_k} \right) \delta_{ij} \quad (17)$$

3.2 约束条件

为了将该问题转化为混合整数规划模型,引入以下二进制决策变量:如果节点 i 被划分到分区 k ,则 $z_{ik} = 1$,否则为0;如果分区 q 被启用(即至少包含一个节点),则 $y_k = 1$,否则为0。

3.2.1 唯一归属约束

每个节点必须且只能属于一个分区,公式为

$$\sum_{k=1}^G z_{ik} = 1, \quad \forall i \in N_{\text{total}} \quad (18)$$

式中: G 为发电机总数,也是可能的最大分区数; N_{total} 为扩展网络中所有节点集合。

3.2.2 分区启用与发电机绑定约束

如果一个分区被启用,它至少包含一个发电机节点,公式为

$$\sum_{i \in N_G} z_{ik} \geq y_k, \quad \forall k \in \{1, \dots, G\} \quad (19)$$

式中, N_G 为发电机节点集合。

如果一个节点被分配到某个分区,那么该分区必须是启用的:

$$z_{ik} \geq y_k, \quad \forall i \in N_{\text{total}}, \forall k \in \{1, \dots, G\} \quad (20)$$

3.2.3 分区数量约束

总的分区数量 p 可以作为一个变量进行迭代寻优,公式为

$$\sum_{k=1}^G y_k = p \quad (21)$$

3.2.4 连通性约束

为确保每个划分出的区域在拓扑上使联通的,即不存在“飞地”,引入以下约束:对于任意一个非发电机节点,如果它被划分到某个分区,那么它的邻居节点中至少有一个也必须在该分区内,公式为

$$\sum_{j \in N_i^{\text{adj}}} z_{jk} \geq z_{ik}, \quad \forall i \in N_{\text{total}}, \forall k \in \{1, \dots, G\} \quad (22)$$

式中, N_i^{adj} 为节点 i 的邻居节点集合。

3.2.5 最小规模约束

为避免出现规模过小、无实际意义的分区,可以设定每个被启用的分区必须包含的最小节点数量 $N_{\min}$,公式为

$$\sum_{i \in N_{\text{total}}} z_{ik} \geq N_{\min} \times y_k, \quad \forall k \in \{1, \dots, G\} \quad (23)$$

3.2.6 内联线约束

为了保证线路损耗的归属与其物理线路的归属一直,即如果一条物理线路的两端节点 u 和 v 都属于分区 k ,则该线路损耗的虚拟节点 l 也必须属于分区 k :

$$z_{uk} + z_{vk} - 1 \leq z_{lk}, \quad \forall k \in \{1, \dots, G\} \quad (24)$$

通过求解这个最大化 Q_{flow} 为目标,并满足上述约束的规划问题,即可得到交直流混联电网的最优分区方案。

4 算例分析

为了验证本文提出的基于区域划分的交直流混联系统网损分摊方法的有效性 with 适用性,本节选取 IEEE 39 节点系统和 IEEE 118 节点系统进行仿真测试。算例分析在 Matlab 2022a 平台上完成,区域划分优化模型采用 YALMIP 工具箱调用 GUROBI 12.0.0 求解器进行求解。

4.1 算例分析流程

本文提出的网损分摊策略主要包含潮流计算、区域划分和网损分摊3个阶段,具体计算流程如下:

1) 系统初始化与潮流计算:对目标交流系统进行直流化改造,构建交直流混联系统模型。利用牛顿-拉夫逊法进行交直流系统的潮流计算,获取收敛后的节点电压、相角及线路复功率潮流分布。

2) 扩展网络构建与区域划分:利用虚拟节点方法,将每一条有损线路等效为节点-虚拟节点-节点结构,其中虚拟节点的负荷等于该线路的复功率损耗,从而将有损原始网络转化为无损扩展网络;基于扩展网络构建有功功率分配系数矩阵 K ,计算考

考虑潮流追踪的模块度指标;以模块度最大化为目标,结合连通性与最小规模约束,通过混合整数二次规划(MIQP)求解最优分区方案。

3)网损分摊计算:基于最优分区结果,在每个区域内部建立局部的复功率双向潮流追踪模型。对于区域内的虚拟节点,依据其功率来源和去向计算贡献度,将网损公平地分摊给该区域内的节点。

为全面评估本文所提方法的性能,本节设置了3种不同的网损分摊方案进行对比分析:

方案1。采用平均分配线损的模型进行分区,网损分摊阶段采用改进的平均网损系数法。该方法仅考虑有功功率。

方案2。采用虚拟节点的网络模型,但不进行分区,直接在全局执行复功率双向潮流追踪分摊方法。

方案3。采用虚拟节点的网络模型进行分区,分摊阶段在各分区内部独立执行复功率双向潮流追踪。

4.2 IEEE 39节点系统算例分析

4.2.1 系统参数与改造

在标准 IEEE 39 节点系统的基础上,选取部分线路进行直流化改造,构建交直流混联测试系统如图 1 所示。系统包含 10 台发电机和 46 条线路,电压等级为 345 kV。具体的直流线路改造参数及控制方式详见附录。

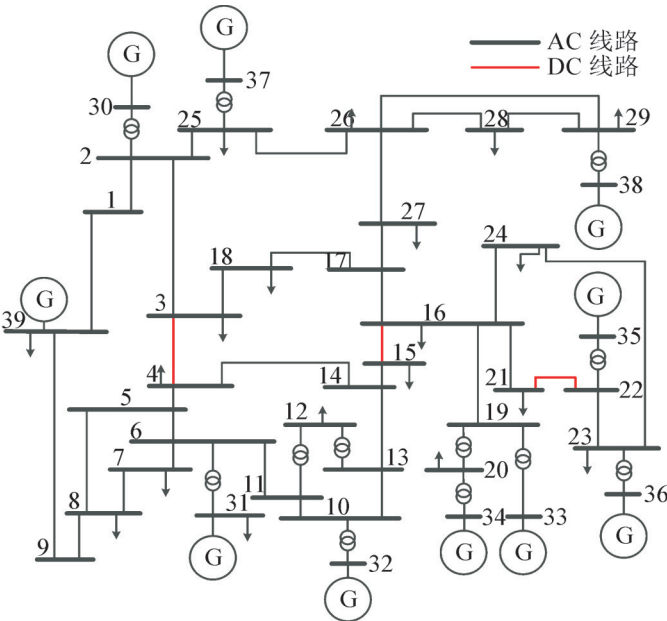


图1 IEEE 39节点系统交直流混联系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of IEEE 39 node AC/DC hybrid system

4.2.2 分区结果分析

本文所提分区方法的核心在于将反映电气距离的有功功率分配系数矩阵 K 引入模块度函数。改进的 IEEE 39 节点交直流混联系统中共有 10 台

发电机组,为确定最优分区数量,对分区数 p 从 1 到 10 进行迭代寻优。不同最优分区方法下模块度 Q 值变化趋势如图 2 所示。

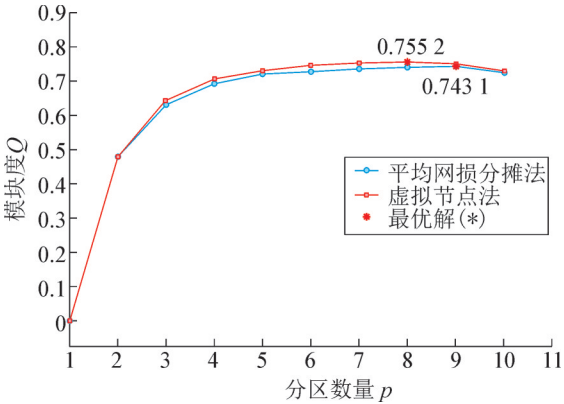


图2 IEEE 39节点系统模块度 Q 值趋势图
Fig. 2 Trend chart of modularity Q value of IEEE 39 node system

方案 1 和方案 3 采用了不同的网络无损化模型,导致了分区结果的差异。从图 2 可以看出,随着分区数量 p 的增加,模块度 Q 值呈现先快速上升后平缓的趋势。在平均分配线损法中,当分区数量 $p=9$ 时,模块度 Q 值为 0.743;本文使用的虚拟节点法中,当分区数量 $p=8$ 时,模块度 Q 值可达 0.755。对比可知,本文所提的虚拟节点法分区模型得到了更高的模块度 Q 值,表明其划分出的区域结构更清晰、内部联系更紧密,分区质量更高,这是因为虚拟节点模型更精确地描述了损耗在网络中的位置,使得基于潮流追踪的 K 矩阵能更真实地反应源荷之间的电气联系强度。由于平均分配线损法将线路上的网损平均分配至线路两端节点,为两端节点增加了负荷,这种无损化的方式一定程度上改变了源荷之间的电气联系,所以导致与虚拟节点法的分区质量不同。平均线损法和虚拟节点法求得的最优分区结果分别如表 1-2 所示。

表1 IEEE 39节点系统平均线损法求得的最优分区结果
Table 1 Optimal partition obtained by average line loss allocation method of IEEE 39 node system

区域	区域内部节点
1	1, 2, 3, 25, 30, 37
2	4, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 32
3	5, 6, 7, 8, 31
4	9, 39
5	16, 17, 18, 19, 33
6	20, 34
7	21, 22, 35
8	23, 24, 36
9	26, 27, 28, 29, 38

表2 IEEE 39节点系统虚拟节点法求得的最优分区结果
Table 2 Optimal partition obtained by virtual node method of IEEE 39 node system

区域	区域内部节点
1	1,2,3,25,30,37
2	4,10,11,12,13,14,15,32
3	5,6,7,8,31
4	9,39
5	16,17,18,19,21,22,33,35
6	20,34
7	23,24,36
8	26,27,28,29,38

经过验证,两种分区方案均能有效将地理临近切电气耦合紧密的节点聚合到同一区域内,且每个分区均包含至少一个发电机节点作为功率支撑核心,验证了分区方法在保持网络特性方面的有效性。

通过对比表1-2中的节点归属,可以发现最显著的差异出现在节点集合{21,22,35}和节点集合{16,17,18,19,33}的归属上。节点16与节点21存在物理连接,虚拟节点法正确地将损耗建模在这些连接线路上,保留了这两个节点集合间强大的电气耦合关系,因此将它们识别为一个分区。而平均线损法将线路16-21和21-22的损耗人为的计入了两端节点的“等效负荷”,这可能在数学上“拉远”了这两个组团的电气距离,导致算法将它们拆分。

表4 IEEE 39节点系统节点网损分摊结果对比
Table 4 Comparison of network loss allocation results of IEEE 39 node system

节点	分摊网损/MW		分摊网损/MVA		节点	分摊网损/MW		分摊网损/MVA	
	方案1	方案2	方案3			方案1	方案2	方案3	
1	0.966 093	1.230 703+j2.632743	1.995 379-j17.632 333		21	8.953 894	0.912 981+j1.953 065	5.191 998+j14.242 914	
2	0.050 260	0	0		22	0.284 100	0.378 696+j0.810 113	2.153 591+j5.907 824	
3	3.131 614	2.006 814+j4.293 016	3.107 234-j27.457 338		23	1.076 175	0.221 303+j0.473 416	1.715 671+j32.547 251	
4	1.854 942	8.662 733+j18.531 486	1.019 691+j19.473 359		24	1.336 418	0.071 972+j0.153963	0.446 152+j8.463 763	
5	0.002 402	0	0		25	2.213 885	0.736 922+j1.576437	1.1947 95-j10.557 908	
6	0.002 248	0	0		26	0.851 616	0.813 944+j1.741 204	0.717 691-j6.599 196	
7	0.482 760	1.823 113+j3.900 039	0.358 327+j17.641 628		27	1.702 896	1.377 146+j2.946 017	1.161 710-j10.681 978	
8	1.077 004	7.008 424+j14.992 556	1.374 401+j67.666 414		28	1.253 568	3.009 568+j6.438 125	2.501388-j23.000 375	
9	0.003 849	0.108 661+j0.232 451	0.581 758-j71.696 987		29	1.741 771	0.894 800+j1.914 174	0.743709-j6.838 436	
10	0.002 264	0	0		30	2.015 791	1.286 192+j2.751 446	1.713 162-j15.138 498	
11	0.001 446	0	0		31	1.583 364	4.478 599+j9.580705	1.732 728+j85.308 042	
12	0.031 740	0.116 420+j0.249 048	0.231 492+j4.420 879		32	3.093 400	3.573 971+j7.645 508	2.937 682 5+j6.101 850	
13	0.005 486	0	0		33	4.474 541	3.777 637+j8.081 193	7.347 520+j20.156 035	
14	0.007 670	0	0		34	1.609 905	0	1.309 726+j26.194 521	
15	1.189 852	0.805 493+j1.723 126	1.686 499+j32.207 611		35	9.237 994	4.194 889+j8.973 787	7.461 541+j20.468 822	
16	2.994 704	0.910 687+j1.948 158	4.815 774+j13.210 839		36	2.415813	0.938190+j2.006 995	2.161 823+j41.011 014	
17	0.008 771	0	0		37	4.354108	3.975597+j8.504 674	4.584 246-j40.509 080	
18	1.426 784	0.531 333+j1.136 638	2.647 698+j7.263 280		38	5.565711	8.235286+j17.617 082	5.124 498-j47.119 985	
19	0.030 586	0	0		39	0.604057	7.245948+j15.500672	0.581 758-j71.696 987	
20	1.606 817	0.581 346+j1.243 627	1.309 726+j26.194 521						

4.2.3 网损分摊结果对比分析

1)网损守恒性分析

3种方案的总体网损分摊结果如表3所示。

表3 3种方案的总体网损分摊结果
Table 3 Overall network loss allocation results of three solutions

项目	方案1	方案2	方案3
分摊有功总和/MW	69.246	69.909	69.909
实际有功总损耗/MW	69.909	69.909	69.909
有功误差/MW	0.663	0	0
分摊无功总和/Mvar	—	149.551	149.551
实际无功总损耗/Mvar	—	149.551	149.551
无功误差/Mvar	—	0	0

分析表3可知,方案1采用传统有功模型,其分摊得到的有功总和为69.246 MW,与实际系统总有功损耗之间存在0.663 MW的误差,且无法处理无功损耗的分摊,反映出传统方法在模型一致性方面的固有缺陷。

方案2和方案3均采用了复功率的双向潮流追踪模型,实现了总体网损分摊的0误差,满足了系统功率平衡约束,也证明了采用复功率模型是实现网损分摊平衡的必要前提。

2)分区后节点分配网损分析

为解释不同方案在网损分摊公平性上的差异,表4列出了3种方案下各节点的网损分摊结果。

表4的数据揭示了不同方法在公平性上的显著差异,特别是对转移功率节点、边界节点和发电机节点的责任认定。

节点2、5、6、10、11、13、14、17、19上没有负荷,但方案1为其分配了有功损耗,源于方案1采用平均线损法进行系统无损化处理,预先将线路损耗平均分配至两端节点,人为的为节点创造了等效负荷,导致该节点分配到了网损。而方案2和方案3采用虚拟节点方法进行无损化处理,损耗被精确定位在虚拟节点上,并且这些节点均在分区内部,没有与外界分区链接,由于节点上没有负荷,也没有跨区潮流,潮流追踪模型认为其对区域损耗的贡献度和拉动程度均为0,因此实现了节点网损零分摊。

节点22上没有负荷,但方案2和方案3为其分配了网损,是因为节点22位于区域5,它通过线路与区域7的节点23相连接,而计算潮流显示,有功功率从节点22流出至节点23,所以在方案3的模型中,这个跨区流出的功率被视为节点22的等效负荷,因此在区域5内部进行潮流追踪时,节点22不再是零负荷节点,而是向区域供电的等效负荷节点。潮流追踪模型计算了节点22对区域5内部损耗的拉动责任,因此为其分摊了复功率损耗。方案2则是将节点22的责任稀释到全网,所以也为其分摊了网损。

方案2和方案3对不同发电机的责任认定存在差异。节点30为纯发电机节点,其没有负荷。在方案2中节点30承担复功率损耗的有功部分为1.286 192 MW,在方案3中承担1.713 162 MW。这是分区后网损责任集中的体现,节点30位于区域1,方案3使其承担了更多区内的损耗责任,而方案2是将责任稀释到全网。节点39既是发电机节点,又是负荷节点。在方案2中其承担复功率损耗的有功部分为7.245 948 MW,在方案3中其承担0.581 758 MW。由于节点39位于区域4,仅与节点9同区,其几乎所有功率都通过节点9流出到区域1和区域3。在方案3中,这个巨大的跨区流出功率被视为区域4的等效负荷,因此区域4的内部计算等效为发电机节点39通过线路9-39向节点9上的等效负荷供电。区域4内部的损耗极小,故分摊网损有功部分仅0.581 758 MW。节点34为纯发电机节点,在方案2中其承担复功率网损为0,是由于其对全网46条线路损耗的复功率贡献度恰好抵消,但在方案3中,节点34位于区域6,节点34上的发

电机仅需要负责线路20-34的损耗和节点20上等效负荷,没有出现全局抵消的情况,因此承担网损不为0。

4.3 IEEE 118节点系统算例分析

为了验证所提方法在大规模复杂网络中的适用性,通过引入包含54台发电机、186条线路的IEEE 118系统进行测试。

4.3.1 系统参数与改造

保持原有的交流拓扑结构,选取3条输电通道进行直流改造(见附录表1、图1、表2),系统基准容量设为100 MVA。该系统拓扑结构复杂,环网众多,能够充分检验分区策略的鲁棒性和分摊算法的计算效率。

4.3.2 分区结果分析

为确定最优分区方案,本文对分区数量 p 在[1,54]范围内(最大发电机数量)进行迭代寻优。图3展示了基于本文提出的虚拟节点扩展法与传统的平均线损法在不同分区数量下的模块度 Q 值变化趋势。

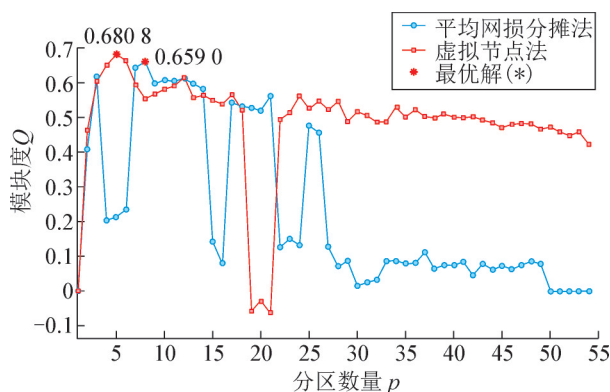


图3 IEEE 118节点系统模块度 Q 值趋势图
Fig. 3 Trend chart of modularity Q value of IEEE 118 node system

从图4可以看出,两种方法的模块度 Q 值均随分区数量的增加呈现先上升后波动的趋势。传统平均线损法在 $p=8$ 时达到最大模块度 $Q=0.6590$ 。该方法简单地将线损平分至两端节点,虽然计算简便,但人为改变了节点负荷,导致部分电气联系紧密的节点被错误分割。本文采用的虚拟节点法在 $p=5$ 时达到最大模块度 $Q=0.6808$ 。相比传统方法,本文方法不仅获得了更高的模块度值,而且在较少的分区数量下实现了更优的聚类效果。这表明基于虚拟节点的扩展网络模型能够更精准地捕捉源-网-荷之间的电气耦合强度,生成的区域结构更加紧凑、合理。平均线损法和基于虚拟节点法的最优分区方案分别如表5-6。

表5 IEEE 118节点系统平均线损法求得的最优分区结果
Table 5 Optimal partition obtained by average line loss allocation method of IEEE 118 node system

区域	区域内部节点
1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,14,30,117
2	11,13,15,16,17,18,19,20,21,22,23,25,26,27,28,29,31,32,33,113,114,115
3	24,44,45,46,47,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,97,98,118
4	34,43
5	35,36,37,38,39,40,41,42,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,62,63,64,65,66,67,68,116
6	60,61
7	82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,101,102
8	99,100,103,104,105,106,107,108,109,110,111,112

表6 IEEE 118节点系统虚拟节点法求得的最优分区结果
Table 6 Optimal partition obtained by virtual node method of IEEE 118 node system

区域	区域内部节点
1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,117
2	15,16,17,18,19,20,21,22,23,25,26,27,28,29,30,31,32,33,113,114,115
3	24,43,44,45,46,47,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,97,98,118
4	34,35,36,37,38,39,40,41,42,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,116
5	82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,99,100,101,102,103,104,105,106,107,108,109,110,111,112

经过验证,两种分区方案均能有效将地理临近且电气耦合紧密的节点聚合到同一区域内,且每个分区均包含至少一个发电机节点作为功率支撑核心,验证了分区方法在保持网络特性方面的有效性。基于虚拟节点法的最优分区结果将节点34和43分别分配至区域4和3,将节点60和61分配至区域4,成功避免了传统方法中的少节点孤岛现象,同时提高了模块度 Q 。

4.3.3 网损分摊结果分析

1)网损守恒性分析

3种方案的总体网损分摊结果如表7所示。

表7 3种方案的总体网损分摊结果
Table 7 Overall network loss allocation results of three solutions

项目	方案1	方案2	方案3
分摊有功总和/MW	190.210	190.352	190.352
实际有功总损耗/MW	190.352	190.352	190.352
有功误差/MW	-0.142	0	0
分摊无功总和/Mvar	—	-257.621	-257.621
实际无功总损耗/Mvar	—	-257.621	-257.621
无功误差/Mvar	—	0	0

分析表7可知,方案1采用传统有功模型,其分摊得到的有功总和为190.210 MW,与实际系统总有功损耗之间存在-0.142 MW的误差,且无法处理无功损耗的分摊,反映出传统方法在模型一致性方面的固有缺陷。

方案2和方案3均采用了复功率的双向潮流追踪模型,实现了总体网损分摊的0误差,满足了系统功率平衡约束,也证明了采用复功率模型事实实现网损分摊平衡的必要前提。

2)分区后节点分配网损分析

为进一步解释不同方案在网损分摊公平性上的差异,表8列出了3种方案下典型节点的网损分摊结果,3种方案完整的分摊结果详见附录表3。

表8 IEEE 118节点系统节点网损分摊结果对比
Table 8 Comparison of network loss allocation results of IEEE 118 node system

节点	分摊网损/MW		分摊网损/MVA	
	方案1	方案2	方案3	
10	6.984 064	19.149 816-j5.917 285	5.800 009-j1.162 280	
30	0.024 307	0.600 824-j0.813 152	2.926 465-j7.936 336	
116	2.535 895	0.416 737-j0.564 010	1.838 502-j6.794 419	

方案2为节点10分摊的有功网损高达19.15 MW,是因为在无分区的全局追踪下,主力电源往往被判定为向全网远端负荷供电,从而承担了长距离输电的累积损耗,责任被过度放大。方案3将其分摊量降至5.80 MW。这是因为在分区自治的框架下,节点10主要负责其所在区域1内部的负荷及向相邻分区的边界送出功率。这种就近供电的机制避免了电源承担不合理的远程损耗,同时也通过较大的无功分摊体现了其对区域电压支撑的贡献。节点30本身几乎无源无荷,方案2为其分摊了约0.60 MW的有功负荷,方案1又为其增加了一半的线损,使该节点上的负荷增大,所以提高了该节点的网损分摊量。在分区情况下,节点30位于区域2的边缘,与区域1和区域4相邻,该节点作为关键的功率传输通道,强制其承担了与其传输容量相匹配的损耗

责任。节点116位于系统边缘,方案2仅为其分摊了0.42 MW的有功负荷,而方案3识别出节点116是区域4的负荷中心,其巨大的用电需求拉高了该区域的线路损耗,所以为其分配更高的网损量。

综上所述,本文所提方法不仅在数值上实现了网损的严格守恒,更在机理上兼顾了电源的送出责任、负荷的拉动责任以及枢纽节点的传输责任,比传统方法和全局追踪方法更具公平性与合理性。

5 结语

本文针对交直流混联电网网损分摊中存在的公平性缺失与计算误差问题,提出了一种基于虚拟节点扩展与区域划分的复功率双向分摊方法。通过IEEE 39及IEEE 118节点系统的仿真验证,主要结论如下:

1)构建了兼顾电气耦合与物理连通的区域划分策略。所提虚拟节点扩展模型有效解决了传统方法因人为平分线损导致的电气距离失真问题。算例表明,该策略在IEEE 39节点系统和IEEE 118节点系统中识别出了结构紧凑、源荷自治的典型区域,并通过连通性约束,确保了分区方案在物理拓扑上的连续性与完整性。

2)实现了大规模复杂网络网损分摊的严格守恒。基于虚拟节点的复功率双向潮流追踪模型在数学上保证了分摊总量的精确性。在IEEE 118节点算例中,分摊后的总网损与物理总网损一致,消除了传统方法中存在的计算残差,验证了算法的鲁棒性。

3)确立了基于责任共担与边界等效的公平分摊机制。所提方法不仅合理量化了电源侧送出与负荷侧拉动对网损的双重贡献,更通过边界等效源/荷方法,准确识别了跨区传输枢纽节点的过网责任,为交直流混联电网的精细化网损管理与市场化交易结算提供了更为公平、透明的理论依据。

参考文献

- [1] 高可,王鹏,梁楠,等.大型能源基地风光火储系统联合运营与外送优化[J/OL].电网技术,1-15[2025-10-20]. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0848.
GAO Ke, WANG Peng, LIANG Nan, et al. Joint operation and external transmission optimization of wind, solar, thermal and energy storage systems in large-scale energy bases research[J]. Power System Technology, 1-15[2025-10-20]. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0848.
- [2] 霍箭.电力市场环境下游电网损成本分摊及结算方法研究[D].北京:华北电力大学,2017.
- [3] 胡博,周家浩,王蕾报,等.考虑削负荷责任分摊的电力系统可靠性跟踪方法[J].电力系统自动化,2020,44(23): 64-71.
- [4] 刘家军,杨晓倩,陈乃兴,等.含小水电群的配电网网损分摊研究[J].智慧电力,2020,48(7):93-99.
LIU Jiajun, YANG Xiaoqian, CHEN Naixing, et al. Loss allocation of distribution network with small hydropower groups[J]. Smart Power, 2020, 48(7): 93-99.
- [5] 李鑫鹏,王果,李永顺,等.计及三相不平衡影响的三相三线制含源配电网网损分摊新方法[J].电气工程学报,2025,20(2):228-236.
LI Xinpeng, WANG Guo, LI Yongshun, et al. A new method for loss allocation in three-phase three-wire distribution networks with sources considering the influence of three phase unbalance[J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(2): 228-236.
- [6] 桂俊平,周博滔,饶尧,等.基于知识图谱和网络拓扑学有源配电网网损分摊方法研究[J/OL].武汉大学学报(工学版),1-17[2025-07-15]. <https://kns.cn/ci.net/kcms2/article?V.>
GUI Junping, ZHOU Botao, RAO Yao, et al. Loss allocation method for distribution network with DG based on knowledge graph and network topology[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1-17[2025-07-15]. <https://kns.cn/ci.net/kcms2/article?V.>
- [7] 李蒙赞,霍成军,王玮茹,等.基于改进MLC的含DG配电网网损分摊研究[J].电力工程技术,2024,41(1):180-184.
LI Mengzan, HUO Chengjun, WANG Weiru, et al. Loss allocation of distribution network with distributed generations based on improved marginal loss coefficients method[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2024, 41(1): 180-184.
- [8] 黄湘,欧阳森,马少华.考虑DG对配电网网损贡献率的网损分摊方法[J].电测与仪表,2024,56(18):16-24.
HUANG Xiang, OUYANG Sen, MA Shaohua. Line loss allocation method considering the contribution rate of the distributed generation to distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 56(18): 16-24.
- [9] 李颖峰,库城银,桑兴勇,等.计及电压约束的含小水电配电网网损分摊方法[J].陕西理工大学学报(自然科学版),2022,38(4):1-7.
LI Yingfeng, KU Chengyin, SANG Xingyong, et al. Considering the voltage constraints of the distribution network with small hydropower network loss allocation method[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 38(4): 1-7.
- [10] 李晓波,谢剑锋,张世乐.基于集群划分的主动配电网电

- 压无功两阶段鲁棒控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(18): 7058-7071.
- LI Xiaobo, XIE Jianfeng, ZHANG Shile. A two-stage robust strategy for voltage/var control in active distribution networks based on cluster partitioning[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(18): 7058-7071.
- [11] 李鹏, 王加浩, 徐贤, 等. 面向新型电力系统潮流频繁波动的无功鲁棒分区方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 102-110.
- LI Peng, WANG Jiahao, XU Xian, et al. Robust reactive power partitioning method for frequent power flow fluctuation in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 102-110.
- [12] 徐海栋, 丁一凡, 王仁顺, 等. 基于输电网络区域划分的共享储能优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(19): 7539-7551.
- XU Haidong, DING Yifan, WANG Renshun, et al. Optimal allocation of shared energy storage based on transmission network zoning[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(19): 7539-7551.
- [13] 徐玉韬, 蔡永翔, 王扬, 等. 考虑跨电压等级电压-功率灵敏度的交直流配电网动态分区方法[J]. 供用电, 2024, 41(7): 29-38.
- XU Yutao, CAI Yongxiang, WANG Yang, et al. A dynamic partitioning method for AC/DC distribution networks considering voltage-power sensitivity across voltage levels[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(7): 29-38.
- [14] 李蕊, 惠慧, 赵岩松, 等. 考虑运行风险的交直流混合配电系统分区分布式优化运行策略[J]. 供用电, 2025, 42(3): 25-36.
- LI Rui, HUI Hui, ZHAO Yansong, et al. Distributed optimal operation strategy of AC/DC hybrid distribution system considering operational risk[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(3): 25-36.
- [15] 周文俊, 李威, 丁波, 等. 含移动应急能源的电-气综合能源系统恢复策略[J]. 供用电, 2025, 42(2): 38-50.
- ZHOU Wenjun, LI Wei, DING Bo, et al. Restoration strategy of power-gas integrated energy system considering mobile emergency energy[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(2): 38-50.
- [16] 郭小龙, 宋朋飞. 考虑邻域耦合程度的次区域主导节点优化辨识方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(6): 83-91.
- GUO Xiaolong, SONG Pengfei. Optimal identification of sub-regional dominant node considering the neighbourhood coupling degree[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(6): 83-91.
- [17] 刘学, 肖衍, 俞乾, 等. 基于改进相关性分析的低压台区拓扑辨别方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(6): 63-72.
- LIU Xue, XIAO Yan, YU Qian, et al. Topology identification method for low-voltage distribution area based on improved correlation analysis[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(6): 63-72.
- [18] 袁博, 张雪敏, 张至美. 考虑无功源容量约束的无功分区方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 59-65.
- YUAN Bo, ZHANG Xuemin, ZHANG Zhimei. Reactive partitioning method considering var source capacity constraints[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 59-65.
- [19] 易锴, 王维洲, 井天军, 等. 基于双层迭代并行方式的线损在线计算方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(5): 131-137.
- YI Kai, WANG Weizhou, JING Tianjun, et al. Study on on-line calculation method of line loss based on double-layer iterative parallel method[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(5): 131-137.
- [20] 蒋玮, 撒鹏程, 贾俊, 等. 基于潮流追踪模块度的虚拟微电网分区规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(24): 132-142.
- JIANG Wei, SA Pengcheng, JIA Jun, et al. Virtual microgrid partitioning planning based on modularity of power flow tracking[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(24): 132-142.
- [21] OSAMA R A, ZOBAA A F, ABDELAZIZ A Y. A planning framework for optimal partitioning of distribution networks into microgrids[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(1): 916-926.
- [22] YIN Shuangrui, AI Qian, LI Jiamei, et al. Energy pricing and sharing strategy based on hybrid stochastic robust game approach for a virtual energy station with energy cells[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 772-784.
- [23] BARANI M, AGHAEI J, AKBARI M A, et al. Optimal partitioning of smart distribution systems into supply-sufficient microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2523-2533.
- [24] 王湜, 王润铸, 谢开贵, 等. 新能源电力系统能量-网损-备用协同决策下的交流潮流嵌入式节点边际定价方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-16[2025-10-20]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.250736.
- WANG Hao, WANG Runzhu, XIE Kaigui, et al. ACOPF-integrated IMP method for joint energy-reserve co-optimization with network loss compensation in renewable energy systems[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-16[2025-10-20]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.250736.
- [25] LIU Zhaoxi, WANG Lingfeng, MA Li. A transactive energy framework for coordinated energy management of networked

microgrids with distributionally robust optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 395-404.

作者简介:

马喜平(1987—),男,高级工程师,研究方向为电网降损降碳。E-mail: 1273264023@qq.com。
董晓阳(1995—),男,高级工程师,研究方向为电网降损

降碳。
梁琛(1985—),男,高级工程师,研究方向为电网降损降碳。
朱宏毅(1980—),男,工程师,研究方向为水电及新能源运行。
李亚昕(1994—),女,工程师,研究方向为电网降损降碳。

附录

表1 IEEE 39节点系统直流线路参数
Table 1 IEEE 39 bus system DC lines parameters

项目	节点					
	3	4	15	16	21	22
节点类型	整流	逆变	逆变	整流	逆变	整流
$V_d/\text{p.u.}$	1	1	1	1	1	1
控制角/ $^\circ$	10	18	20	12	16	8
$P/\text{p.u.}$	0.4	1	1	1	1	6
$I_d/\text{p.u.}$	0.4	0.4	1	1	6	6
换相电抗/ p.u.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
电阻/ p.u.	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

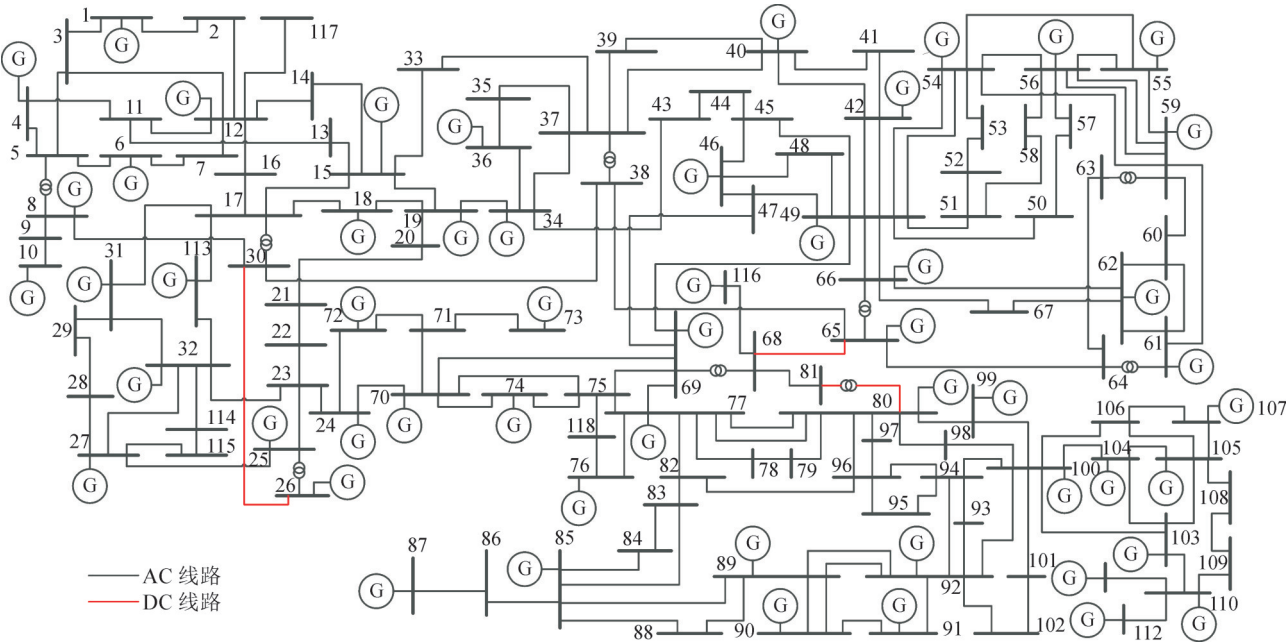


图1 IEEE 118节点系统交直流混联系统示意图
Fig. 1 IEEE 118 node AC/DC hybrid system diagram

表2 IEEE 118节点系统直流线路参数
Table 2 IEEE 118 node system DC lines parameters

项目	节点					
	26	30	65	68	80	81
节点类型	整流	逆变	整流	逆变	整流	逆变
$V_d/\text{p.u.}$	1	1	1	1	1	1
控制角/ $^\circ$	15	18	15	18	15	18
$P/\text{p.u.}$	1.5	1.5	2	2	1.8	1.8
$I_d/\text{p.u.}$	1.5	1.5	2	2	1.8	1.8
换相电抗/ p.u.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
电阻/ p.u.	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

表3 IEEE 118节点系统节点网损分摊结果对比
Table 3 Comparison of network loss allocation results of IEEE 118 node system

节点	分摊网损/W			节点	分摊网损/MW		
	方案1	方案2	方案3		方案1	方案2	方案3
1	1.225 190	1.523 294-j2.061 620	0.878 053-j9.259 253	60	0.582 806	0.508 836-j0.688 657	0.475 145-j1.755 958
2	0.483 529	0.205 632-j0.278 301	0.208 559-j2.199 297	61	0.590 703	2.971 135-j4.021 123	0.673 495-j2.488 986
3	0.952 225	0.714 645-j0.967 197	0.557 897-j5.883 136	62	1.069 215	2.251 797-j3.047 574	0.531 271-j1.963 378
4	0.945 355	0.497 389-j0.673 164	0.560 871-j5.914 494	63	0.002 488	3.715 319-j5.028 298	0.164 913-j0.609 455
5	0.039 996	0.626 685-j0.848 153	0.278 030-j2.931 886	64	0.006 635	6.692 931-j9.058 186	0.169 574-j0.626 681
6	1.255 992	0.188 253-j0.254 780	0.757 051-j7.983 259	65	3.760 538	2.034 276-j2.753 181	2.735 528-j10.109 491
7	0.455 728	4.328 969-j5.858 809	0.296 820-j3.130 027	66	8.217 025	14.103 473-j19.08 7584	5.658 235-j20.910 726
8	0.733 173	19.149 816-j25.917 285	1.704 836-j17.977 841	67	0.392 695	2.763 983-j3.740 764	0.135 971-j0.502 499
9	0.112 110	1.628 679-j2.204 247	0.238 475-j2.514 771	68	0.019 114	0.340 044-j0.460 214	5.913 314-j0.112 836
10	6.984 064	2.441 426-j3.304 216	5.800 009-j61.162 280	69	19.434 879	0.017 768-j0.024 047	29.817 159-j0.867 923
11	1.937 461	0.540 517-j0.731 534	1.078 589-j11.373 938	70	2.320 981	1.499 339-j2.029 199	1.743207+j0.305 168
12	2.442 996	0.106 644-j0.144 332	1.168 609-j12.323 221	71	0.009 559	0.922 581-j1.248 618	0.009869+j0.001 728
13	0.929 759	2.777 629-j3.759 233	0.730 604-j6.212 678	72	0.411 309	1.938 050-j2.622 950	0.672845+j0.117 789
14	0.336 138	0.425 417-j0.575 758	0.144 555-j1.524 359	73	0.200 660	4.793 856-j6.487 985	0.604121+j0.105 758
15	2.474 766	0.163 717-j0.221 574	2.684 553-j2.258 278	74	2.280 990	0.488 832-j0.661 583	2.445011+j0.428 026
16	0.684 188	0.797 658-j1.079 547	0.698 235-j0.145 284	75	1.740 318	10.339 172-j13.99 2995	1.230415+j0.215 398
17	0.342 357	2.297 671-j3.109 660	0.430 651+j0.455 953	76	2.295 534	0.463 199-j0.626 891	2.822251+j0.494 066
18	1.645 208	0.652 124-j0.882 582	1.612 346+j1.707 076	77	2.216 455	0.633 206-j0.856 978	1.518804+j0.265 883
19	1.234 668	0.590 778-j0.799 557	2.209 254+j2.339 054	78	2.375 908	0.194 191-j0.262 817	2.364904+j0.414 002
20	0.505 414	0.395 216-j0.534 884	0.654 791+j0.693 262	79	1.310 034	0.212 591-j0.287 720	0.940488+j0.164 643
21	0.405 653	0.251 539-j0.340 432	0.494 859+j0.523 933	80	13.985 880	0.396 937-j0.537 212	7.208322+j1.261 896
22	0.320 542	0.130 781-j0.176 998	0.334 087+j0.353 715	81	0.036 617	0.143 377-j0.194 046	0.025505+j0.004 465
23	0.385 470	4.840 738-j6.551 436	3.184 434+j1.571 526	82	1.110 952	0.222 583-j0.301 243	2.096512-j0.784 579
24	0.440 751	2.056 401-j2.783 125	1.009 880+j0.176 791	83	0.426 572	0.417 649-j0.565 244	0.530133-j0.297 802
25	10.835 953	0.977 136-j1.322 452	9.280 544+j9.825 803	84	0.234 909	7.362 785-j9.964 764	0.237655-j0.133 502
26	7.927 845	0.175 665-j0.237 745	4.870 821+j5.156 995	85	0.523 193	5.657 504-j7.656 844	0.354820-j0.199 320
27	2.085 268	0.298 965-j0.404 618	1.395 986+j1.478 004	86	0.432 087	0.086 821-j0.117 503	0.399175-j0.224 236
28	0.473 411	0.600 824-j0.813 152	0.361 671+j0.382 921	87	0.079 106	2.087 178-j2.824 778	0.009359-j0.005 257
29	0.657 742	1.316 535-j1.781 793	0.688 877+j0.729 350	88	1.002 655	0.185 378-j0.250 890	0.394605-j0.221 669
30	0.024 307	1.908 226-j2.582 585	2.926 465-j7.936 336	89	12.053 878	0.734 498-j0.994 067	13.091378-j7.354 074
31	1.529 668	0.116 075-j0.157 095	1.606 205+j1.700 574	90	3.387 779	1.744 285-j2.360 708	1.269428-j0.713 101
32	1.721 538	1.101 880-j1.491 280	1.366 978+j1.447 292	91	0.205 520	1.629 583-j2.205 471	0.341458-j0.191 814
33	0.628 874	0.695 931-j0.941 870	0.735 598-j0.033 123	92	1.425 729	0.130 102-j0.176 079	0.627966-j0.352 760
34	0.108 528	0.001 722-j0.002 330	2.040 637-j1.994 954	93	0.260 760	0.232 192-j0.314 247	0.220474-j0.123 851
35	0.455 526	0.760 592-j1.029 382	0.453 671-j1.676 597	94	0.642 669	0.346 940-j0.469 547	0.647704-j0.363 847
36	0.427 724	5.543 501-j7.502 553	0.576 268-j2.129 670	95	0.863 744	6.892 948-j9.328 888	1.336209-j0.750 614
37	0.015 723	0.329 635-j0.446 126	0.164 674-j0.608 573	96	0.784 141	0.252 552-j0.341 802	1.705379-j0.193 930
38	0.015 697	2.037 332-j2.757 317	2.019 789-j2.837 764	97	0.505 831	0.158 792-j0.214 909	0.301048+j0.052 702
39	0.378 667	0.125 627-j0.170 023	0.391 691-j1.447 542	98	1.139 363	0.994 937-j1.346 544	0.620349+j0.008 377
40	0.917 857	0.241 894-j0.327 379	1.033 097-j3.817 942	99	0.791 887	0.781 208-j1.057 284	0.637088-j0.135 553
41	0.511 785	0.960 181-j1.299 505	0.526 849-j1.947 038	100	6.454 693	0.821 636-j1.111 999	3.492186-j1.961 733
42	1.374 021	0.534 329-j0.723 159	0.743 729-j2.748 543	101	0.457 572	0.733 832-j0.993 165	0.604338-j0.339 487
43	0.033 302	0.338 402-j0.457 992	1.133 441+0.198 421	102	0.109 524	0.977 209-j1.322 550	0.090093-j0.050 610
44	0.545 849	0.244 655-j0.331 115	0.612 780+0.107 274	103	1.384 673	0.061 397-j0.083 094	0.632850-j0.355 503
45	1.816 405	13.643610-j18.465 208	1.538 347-j0.845 319	104	0.735 139	0.076 586-j0.103 651	0.670232-j0.376 502
46	1.577 948	0.369 565-j0.500 168	0.844 482-j0.165 846	105	0.600 273	0.502 136-j0.679 588	0.771840-j0.433 581
47	1.471 418	0.375 543-j0.508 258	1.414 817+0.247 679	106	0.832 221	0.585 060-j0.791 818	0.697663-j0.391 912
48	0.276 791	0.417 450-j0.564 975	0.124 785-j0.461 161	107	0.946 402	0.108 113-j0.146 320	1.244240-j0.698 951
49	5.446 039	4.401 779-j5.957 351	10.593979-j21.884 275	108	0.039 986	0.230 966-j0.312 588	0.082207-j0.046 180
50	0.247 735	1.900 491-j2.572 118	0.111 266-j0.411 199	109	0.151 889	0.857 196-j1.160 125	0.278769-j0.156 599
51	0.257 017	1.235 950-j1.672 730	0.144 193-j0.532 884	110	0.763 798	0.416 737-j0.564 010	0.897882-j0.504 385
52	0.250 068	0.111 536-j0.150 953	0.202 426-j0.748 091	111	0.815 411	0.399 534-j0.540 728	0.038227-j0.021 474
53	0.317 633	0.097 642-j0.132 149	0.393 251-j1.453 309	112	1.291 370	1.412 946-j1.912 276	1.713269-j0.962 428
54	2.521 038	7.631 108-j10.327 911	0.780 347-j2.883 872	113	0.184 396	0.508 836-j0.688 657	0.335604+j0.355 322
55	0.870 810	1.523 294-j2.061 620	0.943 430-j3.486 567	114	0.217 951	2.971 135-j4.021 123	0.265654+j0.281 262
56	1.166 050	0.205 632-j0.278 301	1.213 579-j4.484 935	115	0.601 105	2.251 797-j3.047 574	0.464745+j0.492 050
57	0.174 342	0.714 645-j0.967 197	0.140 774-j0.520 246	116	2.535 895	3.715 319-j5.028 298	1.838502-j6.794 419
58	0.166 927	0.497 389-j0.673 164	0.141 677-j0.523 585	117	0.480 672	6.692 931-j9.058 186	0.225079-j2.373 506
59	6.860 031	0.626 685-j0.848 153	2.863 568-j10.582 679	118	1.113 379	2.034 276-j2.753 181	1.230363+0.215 389