

[分布式电源]

分布式电源的配电网线损计算与降损技术探讨

文/吴杰

国能包头煤化工有限责任公司

分布式电源的大规模接入,促使配电网从传统辐射状单向供电模式向多源互联的双向功率流动模式转变,使得配电网潮流分布呈现高度复杂性与不确定性。传统基于稳态假设的线损计算方法误差率高达20%~35%,依赖经验的降损技术也难以满足新型配电网运行需求。因此,研究适用于分布式电源环境的配电网线损计算与降损技术,提升配电网运行效率,保障电网安全经济运行。

在全球能源转型与“双碳”目标的推动下,分布式电源(Distributed Generation, DG)以其清洁、灵活的特性在配电网中的占比持续攀升。截至2024年底,我国分布式光伏发电累计装机容量已突破1.5亿kW,风电、生物质能等多元分布式电源协同发展。分布式电源的大规模接入促使配电网从传统辐射状单向供电模式向多源互联的双向功率流动模式转变,使得配电网潮流分布呈现高度复杂性与不确定性。传统基于稳态假设的线损计算方法误差率高达20%~35%,依赖经验的降损技术也难以满足新型配电网运行需求。因此,研究适用于分布式电源环境的配电网线损计算与降损技术,对提升配电网运行效率、保障电网安全经济运行具有重要意义。

分布式电源接入对配电网线损的影响机理

1. 功率双向流动引发的损耗重构

分布式电源接入打破了配电网“源-网-荷”的单向功率流动格局。当分布式电源输出功率大于接入点负荷时,功率会逆向注入配电线路,导致潮流方向发生改变。在三相四线制配电网中,功率双向流动使得各相电流大小和相位关系发生变化,增加

了线路损耗计算的复杂性。根据焦耳定律

$$P_{\text{loss}}=I^2R \quad (1)$$

式中, P_{loss} 为线路损耗功率; I 为线路电流; R 为线路电阻。

功率逆向流动时,原本处于末端的线路可能成为功率传输的主要通道,导致线路电流增大,进而使线损增加。

2. 电压波动与损耗耦合效应

分布式电源出力的随机性和间歇性会引发节点电压的动态波动。根据线路损耗计算公式

$$P_{\text{loss}}=\frac{P_2+Q_2}{U_2}R \quad (2)$$

式中, P 为有功功率; Q 为无功功率; U 为节点电压; R 为线路电阻。

电压与线损之间存在复杂的耦合关系。当节点电压升高时,在功率不变的情况下,线路电流减小,线损降低;但过高的电压会超出设备绝缘耐受范围,加速设备老化,增加运维成本。反之,电压过低则会导致线路电流增大,线损增加,同时影响用户侧设备的正常运行。在分布式电源出力波动较大的配电网中,电压波动范围可达额定电压的 $\pm 10\%$,由此带来的线损变化不容忽视。

3. 不确定性带来的损耗预测难题

分布式电源的出力受气象条件（如光照强度、风速等）的影响，具有很强的不确定性。以光伏发电为例，其输出功率与光照强度呈非线性关系，在多云天气下，光照强度可能在短时间内发生剧烈变化，导致光伏电源出力大幅波动。此种不确定性使得配电网潮流呈现时空双重随机特性，传统基于确定性模型的线损计算方法无法准确预测线损。同时，用户侧用电行为的不确定性进一步加剧了配电网运行状态的复杂性，使得线损计算需要综合考虑电源、负荷等多方面的随机因素。

分布式电源配电网线损精确计算方法

1. 传统计算方法的局限性分析

传统配电网线损计算方法，如均方根电流法、最大电流法和损失因数法等，主要基于配电网稳态运行假设，适用于单向功率流动的辐射状配电网。相关方法未考虑分布式电源的动态特性、功率双向流动以及三相不平衡等因素，在分布式电源高比例接入的配电网中，计算结果与实际线损存在较大偏差。首先，均方根电流法假设电流在计算周期内按固定规律变化，忽略了分布式电源出力波动导致的电流瞬时变化，使得计算误差可达27.6%。其次，最大电流法仅考虑线路中出现的最大电流来计算线损，无法反映电流的实际变化情况，在分布式电源接入后，其计算结果与实际线损相差甚远。最后，损失因数法凭借经验公式计算线损，没有考虑配电网的实时运行状态和分布式电源的影响，同样难以满足新型配电网线损精确计算的需求。此外，传统方法通常采用简化的网络模型，无法准确反映配电网复杂的拓扑结构和运行状态，导致新型配电网线损精确计算需求得不到满足。

2. 基于动态潮流的线损计算模型

为精确计算分布式电源配电网线损，建立考虑分布式电源实时出力的三相不平衡潮流计算模型。对于配电网中的任一节点，其注入有功功率和无功功率可表示为

$$\begin{cases} P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

式中， U_i 、 U_j 分别为节点*i*和节点*j*的电压； G_{ij} 、 B_{ij} 为节点导纳矩阵元素； θ_{ij} 为节点和节点电压的相角差； n 为配电网节点总数。

在构建该模型时，需要准确确定节点导纳矩阵元素。对于架空线路和电缆线路，分别根据其参数（如电阻、电抗、电导和电纳等）计算导纳矩阵元素。同时，考虑分布式电源的接入对节点注入功率的影响，将分布式电源的输出功率准确计入相应节点。采用改进的牛顿-拉夫逊法进行迭代求解，为准确模拟分布式电源的动态特性，将光伏最大功率点跟踪（MPPT）模型、风机变桨控制模型嵌入潮流计算过程。光伏MPPT模型根据光照强度和温度实时调整光伏阵列的工作点，使其始终输出最大功率。风机变桨控制模型根据风速变化调节叶片桨距角，实现风机的高效运行。在迭代求解过程中，为提高计算效率和收敛性，对牛顿-拉夫逊法的雅可比矩阵进行优化更新，并设置合理的收敛判据。基于动态潮流的线损计算流程如图1所示。

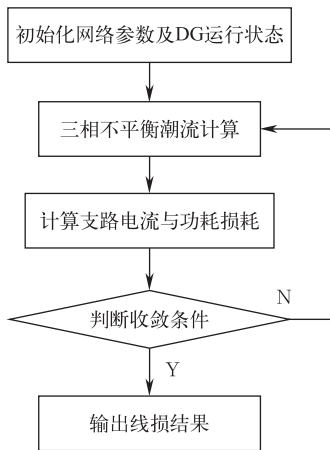


图1 基于动态潮流的线损计算流程图

3. 算例验证与误差分析

在一个包含37个节点的配电网算例系统中进行验证，该系统接入了多个分布式光伏和风力发电单元。分别采用传统均方根电流法和基于动态潮流的计算方法进行线损计算，计算周期为24 h，结果见表1。

表1 不同计算方法线损计算结果对比

计算方法	日间线损/ (kW·h)	夜间线损/ (kW·h)	平均误差率 (%)
均方根电流法	1 120	850	21.3
基于动态潮流的方法	915	820	3.7

从计算结果可以看出,在日间分布式光伏大发时段,传统方法计算的线损比实际值高出 22.4%,而基于动态潮流的方法误差仅为4.1%。在夜间负荷高峰时段,传统方法误差为3.7%,基于动态潮流的方法误差为1.2%。整体而言,基于动态潮流的计算方法平均误差率较传统方法降低17.6个百分点,能够更准确地反映分布式电源接入后配电网的线损情况。进一步对算例结果进行深入分析,发现基于动态潮流的计算方法在处理分布式电源出力快速变化的场景时,优势更为明显。例如,在某一时刻,由于天气变化导致光伏出力突然下降,基于动态潮流的方法能够迅速调整计算结果,准确反映线损的变化,而传统方法则无法及时捕捉这种变化,导致计算误差增大。

分布式电源配电网复合降损技术体系

1. 基于多目标优化的分布式电源布局规划

合理规划分布式电源的接入位置和容量是降低配电网线损的关键措施之一。建立以线损最小、投资成本最低、电压偏差最小为目标的多目标优化模型

$$\min F = \omega_1 P_{\text{loss}} + \omega_2 C_{\text{inv}} + \omega_3 \Delta U_{\text{max}} \quad (4)$$

式中, P_{loss} 为线损功率; G_{inv} 为分布式电源投资成本; ΔU_{max} 为配电网最大电压偏差; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为权重系数,且 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$, 根据实际需求确定各权重值。

在确定权重值时,需要综合考虑配电网的实际情况和运行需求。例如,对于经济较为发达、对供电可靠性要求较高的地区,可以适当增大电压偏差最小目标的权重,而对于投资预算有限的地区,则可增加投资成本最低目标的权重。

采用非支配排序遗传算法 - II (NSGA - II) 进行求解,该算法凭借模拟二进制交叉和多项式变异操作生成新的种群,并利用非支配排序和拥挤度计算对种群进行筛选,在帕累托前沿中选取最优方案。在实际应用中,为提高算法的搜索效率和求解质量,对算法的参数进行优化调整,如调整交叉概率、变异概率等。为便于计算,选取 10 kV 配电线路作为研究对象。假定在线路 5 km 处接入分布式光伏电源,分别对一天内接入容量为 200 kW、400 kW...1 800 kW、2 000 kW 时的分布式光伏发

电功率进行统计。同时,计算不同接入容量下,一天中(6:00—18:00)配电线路 5 km 接入点的理论线损率,并绘制“接入容量 - 网损率”的变化曲线,具体如图 2 所示。

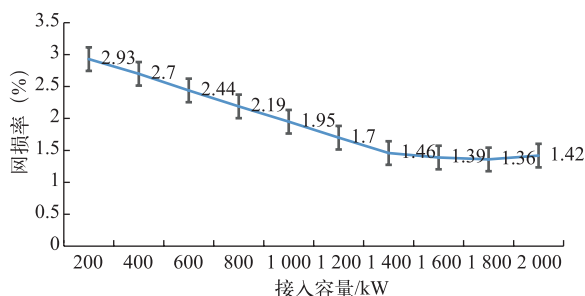


图2 不同接入容量的理论网损率

根据图2的分析结果,10 kV 配电网的理论网损率随着接入容量的变化呈现出规律性特征:当接入容量逐步提升时,网损率先出现显著下降,随后又有小幅回升。具体来看,在接入容量从 200 kW 增加至 1 800 kW 的过程中,网损率从 2.93% 降至 1.36%;而当接入容量继续增大后,网损率开始呈现上升趋势。这表明,对于在 10 kV 配电网 5 km 处接入分布式光伏电源的场景,当接入容量达到 1 800 kW 时,理论网损率可降至最低水平。

2. 源 - 网 - 荷协同无功优化控制

构建包含分布式电源无功调节、电容器组投切、负荷侧无功补偿的源 - 网 - 荷协同无功优化控制模型。采用模型预测控制 (MPC) 算法,以 15 min 为控制周期,根据配电网实时运行状态和预测的负荷、分布式电源出力情况,滚动优化无功配置方案。MPC 算法首先建立配电网的预测模型,根据当前时刻的系统状态和未来一段时间内的负荷、电源出力预测值,计算出各控制变量(如分布式电源无功出力、电容器组投切状态)的最优序列。在建立预测模型时,需要考虑分布式电源的动态特性、负荷的变化规律以及配电网的拓扑结构等因素。然后,将控制序列的第一个元素作为当前时刻的控制指令下发执行,并在下一个控制周期根据新的系统状态重新进行优化计算。在实际应用中,源 - 网 - 荷协同无功优化控制模型面临着诸多挑战,如分布式电源无功调节能力有限、电容器组投切次数限制等。为应对这些挑战,可通过协调多个分布式电源的无功出力,提高整体无功调节能力,采用智能投

切策略，合理安排电容器组的投切次数，延长设备寿命。立足于该协同控制模型，能够有效调节配电网无功功率分布，提高功率因数，降低线损。

3. 基于数字孪生的智能运维系统

基于数字孪生的智能运维系统立足于构建物理配电网的虚拟镜像，实现设备状态感知、故障诊断与线损优化的深度融合。系统架构包含数据感知层、数字孪生建模层、智能分析层与控制执行层，各层级根据5G与边缘计算技术达到毫秒级数据交互的效果，保证虚拟模型与物理系统的实时同步。在数字孪生建模过程中，采用多尺度建模方法对变压器、断路器等关键设备建立基于物理机理的精细化模型，考虑铁心损耗、触头接触电阻等非线性特性；对低压配电线路采用基于拓扑的等值模型，结合历史运行数据进行参数修正。融合高斯过程回归与粒子滤波算法，实现模型参数的动态更新，使模型误差在复杂运行场景下保持在3%以内。

智能分析层集成多源数据挖掘与深度学习算法。在设备健康评估方面，构建基于注意力机制的双向长短期记忆网络（BiLSTM - Attention）模型，将电流、电压和油色谱等12类监测数据进行特征融合，实现设备潜在故障的提前72 h预警。针对线损异常诊断，采用改进的孤立森林算法，结合配电网潮流特征，能够快速识别窃电、三相不平衡等8类异常事件，定位误差控制在2个节点以内。

实际应用中，系统需克服数据传输延迟与海量

数据处理难题，部署边缘计算节点，将实时数据在本地完成预处理与特征提取，仅上传关键诊断结果至云端，使数据传输量减少。针对数据传输延迟导致的控制滞后问题，设计基于模型预测的前馈补偿机制，利用数字孪生模型预测未来5分钟的系统状态，提前调整运维策略。在降损管理方面，系统实时监测线路损耗分布，自动生成包含负荷转移、设备参数调整、无功补偿优化的综合降损方案。基于强化学习算法，对不同降损措施进行模拟推演，评估其在电压约束、设备容量约束下的降损效果，生成最优控制策略。经实际验证，该系统可使计划外停电时间减少40%，因设备故障导致的线损占比降低至5%以下，显著提升配电网运维管理的智能化水平与经济性。

结束语

综上所述，随着分布式电源与储能等新型电力设备的融合应用加速，配电网线损特性正呈现新的演变趋势。高比例分布式电源与储能系统的协同运行，使得配电网在时间维度上具备更强的功率调节能力，但也带来了储能充放电策略与线损优化协同的新课题。未来研究需围绕前沿技术的融合创新，提升线损计算与降损决策的可靠性，推动新型电力系统线损管理向智能化、可信化方向发展。EA

（收稿日期：2025-07-25）

