[分布式电源]

基于混沌正余弦算法的含分布式电源配电网无功规划

文/刘步骞
国网洛南县供电公司

在配电网中建立无功优化数学模型，采用混沌正余弦算法，借助迭代搜索的方式，找寻符合约束条件并且能让目标函数达到最小值的最优解。将最优解进行输出，获取最优无功规划方案。实验结果表明，DG接入后的有功网损情况明显下降，有效地降低了配电网的有功网损，显著提高系统的安全效果。

随着能源结构的转型，无功规划方法在面对含有分布式电源的配电网时，可以确保配电网的功率平衡，优化无功补偿配置。在此背景下，混沌正余弦算法以其强大的全局优化能力和适应性引入到无功规划中，能够在搜索过程中自动调整搜索步长和搜索方向，从而有效避免陷入局部最优，获得更为精准的计算解。因此，将混沌正余弦算法应用于含分布式电源的配电网无功规划中，有望解决传统方法在面对复杂电网结构时的局限性。在研究过程中，文献[1]提出一种将规划与运行相融合的多目标无功规划配置法。以规划方案最小化为目标，把电压波动当作研究对象，对SVG和电容器组的最优配置问题加以分析。构建模型过程中难以准确获取大量的实际运行数据。文献[2]采用有载调压变压器和电容器作为无功控制方式，构建动态无功优化模型。采用解耦内点法思想，修正方程的对角带边结构进行模型求解。该算法针对特定区域电网建立的无功优化模型，可能不适用于其他类型的电网。因此现阶段，以基于混沌正余弦算法的含分布式电源配电网无功规划为研究对象，结合实际情况进行研究与分析。

电源配电网无功规划

1. 建立无功优化数学模型

在配电网中建立无功优化数学模型，通过调整无功补偿设备和分布式电源的无功输出，以最小化系统的有功网损，同时满足各种约束条件。将配电网有功网损最小设为无功优化的目标函数，表示为

$$\min P=\sum_{i-1}^{N} Pi-\sum_{i-1}^{N} Pl \tag{1}$$

式中，Pl为有功网损；N为系统节点数；Pi为节点注入有功功率中的损耗部分[3]。

在此基础上，建立潮流方程描述了系统中各节点的功率注入与电压、电流之间的关系。为了把无功优化模型转化成简单形式，用矩阵和向量形式呈现潮流方程。如此一来，针对系统中的每个节点，注入功率可表示为

$$S=U\cdot\frac{Y+Yi}{2}+j(U\cdot\frac{Y+Yi}{2j}) \tag{2}$$

式中，Y为系统节点矩阵；U为节点的电压幅值向量。

针对建立模型添加不等式约束，则有连续无功补偿装置的不等式约束为

$$Q_{\min} \leqslant Q \leqslant Q_{\max} \tag{3}$$

式中，Q为补偿装置的无功功率；$Q_{\min}$和$Q_{\max}$分别为对应的极限值。

对于每个节点所连接的分组投切电容器组，其挡位有一个明确的取值范围。具体来说，挡位只能取从0～K_i之间的整数，其中K_i为该节点所连接电容器组的最高挡位[3]。同时，针对分布式电源，其有功出力P_i。DG需要等于预测的有功出力值，确保DG的实际输出与预测值保持一致，从而满足电网的调度需求。设定DG的无功出力上限值$Q_{\mathrm{DG,max}}$，即DG不能发出超过这个值的无功功率。这个上限值是由DG并网逆变器提供最大功率和DG的实际有功出力共同得到的。在给定有功出力的情况下，DG能够提供的无功功率是有限制的。对于电网中的每个节点，其电压幅值不能低于下限值$V_{\min}$，确保电网的稳定运行和设备的正常工作。

综上所述，这些不等式约束共同构成配电网无功优化的数学模型的一部分[4]。通过求解这个模型，可以找到在满足各种约束条件的前提下，使系统有功网损最小的无功补偿策略和DG运行方式。

2. 混沌正余弦算法设计

建立的含DG配电网无功优化的数学模型涉及多个变量和约束条件[5]。为求解该问题，可采用混沌正余弦算法求解，通过迭代搜索，找出满足约束条件并使目标函数值最小的对应解。在分析含分布式电源的配电网无功规划问题时，于标准正余弦算法内，依据正弦和余弦函数的特征变化来实现个体位置的更新。具体地，对于个体i在维度j上的位置$X_{i,j}^{t+1}$。在更新过程中，设定正余弦振幅转换因子r，随迭代次数线性递减中其因子可以表示为

$$r = a - \frac{a \cdot t}{T} \tag{4}$$

式中，a为常数；t为当前迭代次数；T为时间。

为了提升初始种群的质量，引入混沌自适应策略。首先，利用Logistic混沌映射生成一组候选解。在该策略中选择一个初始值，为[0,1]区间内的任意数[6]。将初始值作为混沌序列的起点。根据Logistic混沌映射的公式，从x_0开始迭代生成的响应序列。由于混沌序列具有遍历性和随机性，能够在[0,1]区间内均匀分布，为优化算法提供丰富的候选解。将生成的混沌序列映射到优化问题的解空间中。根据问题的约束条件和目标函数，从映射后的候选解中选择适应度较好的解作为初始种群的一部分，公式为

$$x_{k+1} = \mu x(1 - x_k) \tag{5}$$

式中，μ为混沌控制参数，当μ=4时确保混沌序列的遍历性。

然后，运用反向学习策略通过对当前解进行反向操作，生成一个与之对应的反向解。通过分析两个解的优劣，从而选择一个较好的解作为新的起点[7]。这样能够扩大搜索范围，提升找到全局最优解的可行性。对于每个个体，反向解的计算公式为

$$\bar{X}_{i,j}^{t} = a + b - X_{i,j}^{t} \tag{6}$$

式中，b为种群中个体在迭代中的值。

通过引入反向学习策略，算法能够在搜索过程中不断尝试新的解空间区域。最后，选择适应度值较好的解作为初始种群。在混沌自适应正余弦算法中，通过迭代搜索，不断更新个体的位置，同时考虑配电网无功优化的多个变量和约束条件，算法将收敛到满足约束条件且使目标函数最小的最优解。这种结合混沌映射和反向学习的初始化方法以及标准正余弦算法的更新策略，为含DG的配电网无功优化问题提供一种有效的求解途径。

3. 确定最优无功规划方案

在含分布式电源的配电网中，将分布式电源视为具有恒定功率的PQ节点，并基于上述算法进行潮流计算和网损评估，以确定最优的无功规划方案[8]。由于配电网中分布式电源的位置通常靠近负荷中心，因此将DG视为PQ节点，并将其接入配电网的负荷点上。为进行潮流计算和网损评估，首先需要输入系统节点信息、支路信息以及电压、电流的上下限等关键参数。在算法开始之前，需要初始化一系列参数。对于种群中的每个个体（即每个潜在的无功规划方案）进行潮流计算，以得到电网中各节点的电压等电力参数的分布[9]。基于潮流计算的结果，可以进一步计算网损，并据此评估每个个体的适应度值。适应度值的计算公式可以表示为

$$F(X_{new}) = X(t) + \theta(t) * e \tag{7}$$

式中，$\theta(t)$为权重系数；$X(t)$为迭代中的最优位置；e为分布的随机数。

在初始化阶段，取种群中适应度值最小的个体作为当前全局最优解。这个最优解将作为后续迭代

过程中的参考基准。在每次迭代中，根据当前全局最优解和个体最优解，按照算法更新公式计算每个个体的新速度和位置。计算公式为

$$x_{i,d}^{k+1} = x + v_{i,d}^{k+1} \tag{8}$$

$$v_{i,d}^{k+1} = \omega v_{i,d}^{k} + zr(\varepsilon - x_{i,d}^{k}) \tag{9}$$

式中，ω为惯性因子；z为权重因子；r为随机数；ε为历史最优位置。

通过比较不同个体适应度值和当前个体最优解。若某个个体的适应度值更小，则更新个体最优解和对应的位置。同时，对当前全局最优解与新评估出的最小适应度值加以比较，若新值更小，随即更新全局最优解。为防止算法陷入局部最优解，本文引入重新初始化部分个体的策略[10]。当全局最优解连续10次迭代未发生变化时，重新初始化部分个体以跳出局部最优区域，并继续搜索更优的解。最后，判断迭代次数是否已达到设置的需求迭代次数。若达到，则停止迭代并输出最后一次迭代后的全局最优解，即最优无功规划方案。这个方案包含了各节点的无功补偿设备设置和电压调节策略等信息，可以为配电网的实际运行提供数据支撑。

实验测试与分析

1. 搭建实验环境

本实验利用MATLAB计算环境，通过仿真分析35节点配电网测试系统在接入分布式电源进行无功规划的性能变化，以验证本文算法在无功规划方面的有效性。实验测试系统为35节点配电网测试系统，具体如图1所示。

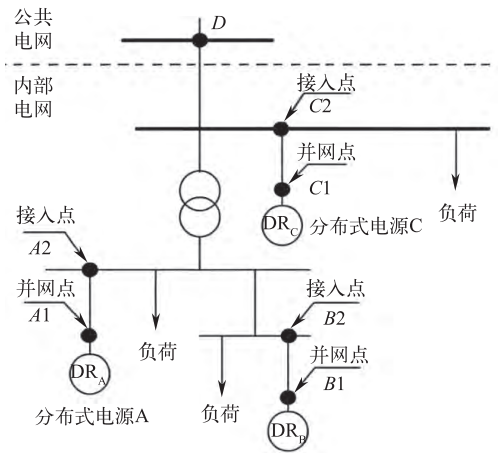

图1　分布式电源接入配网系统测试示意图

在MATLAB中构建节点配电网的电气模型，设置权重因子2，最大迭代次数为50。节点系统负荷总的有功功率3 800 kW。首先，在未接入DG时，算出系统的有功网损。接着，运用本文算法探寻DG的最佳接入位置与最优有功容量。最后，在接入DG后，重新计算系统的有功网损，并对比优化前后网损的变化情况。在进行仿真实验时，需确保MATLAB软件及所需工具箱已正确安装和配置。仿真结果可能受计算机性能因素的影响，因此在实际应用中需进行充分的调整。

2. 结果与分析

为了深入分析分布式电源对配电系统性能的具体影响，并同时验证本文算法在实际应用中的有效性，进行了一系列仿真计算。通过计算DG接入前后的有功网损情况，得到具体结果如图2所示。

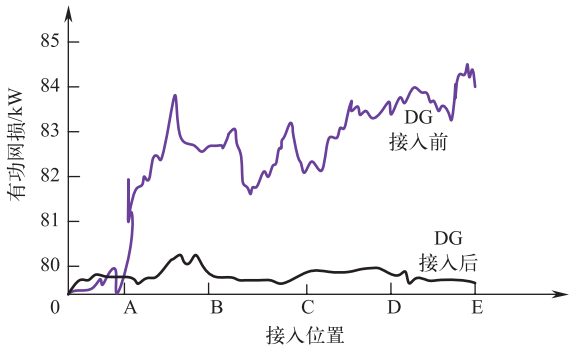

图2　节点配电有功网损测试结果

通过分析图中数据可知，DG接入后的有功网损情况明显下降，其数值在80~81 kW。从而证明了本文算法在配电网DG规划领域的可行性和有效性，提升在处理此类复杂优化问题时的准确性。通过对DG进行合理的选址，可以显著提升配电系统的整体性能。DG的接入不仅有效地降低配电网的有功网损，还显著提高系统的安全效果，对于改善配电系统电压分布有重要作用。

同时，为验证本文算法在应用过程中的有效性。需要根据相对时间，结合算法计算达到最优解的收敛速度。通过分析比较后，获取在优化过程中的收敛情况，具体如图3所示。

通过分析可以明显看出，本文算法具有较快的收敛速度，能够更迅速地逼近并达到最优解。这充分证明本文算法在功率优化效率上具有显著效果，不仅加速收敛过程，提高最终解的质量，使得优化

结果更加精确和可靠。在实验过程中展现出显著的成本优势，具有在不同类型和规模电网中的适用性，为能源系统中分布式电源的高效集成提供更加智能的规划方案。

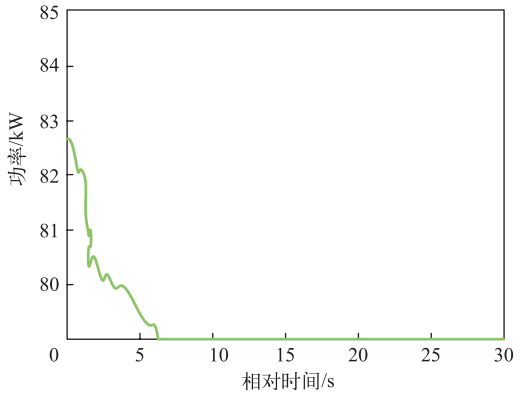

图3　算法优化的收敛特性图

综上所述，针对含有分布式电源的配电网进行无功规划研究。通过引入混沌理论增强算法的遍历性和全局搜索能力，结合正余弦函数的周期性变化特性，有效提升算法在求解复杂无功优化问题时的收敛速度和准确度。能够准确快速地确定分布式电源的最佳无功补偿位置和容量，显著降低系统的无功网损，提高电压质量和系统稳定性。

结束语

本文研究基于混沌正余弦算法的含分布式电源配电网无功规划，通过引入混沌正余弦算法，实现对电网的优化配置和功率平衡的调整。混沌正余弦算法的全局优化能力和搜索机制，有效地解决传统方法在面临复杂电网结构时的局限性。本文的研究成果不仅为含分布式电源的配网无功规划提供新的解决方案，还为实际工程中的配网无功规划提供支持。提高电力系统的运行效率，使其能够满足供电需求，促进电力系统的智能化发展。进一步深入研究还需与其他优化算法结合，形成更完善的无功规划方法。**EA**

（收稿日期：2025-03-03）

参考文献

[1] 何松涛，邵振国，郑文迪，等．计及SVG动态调压策略的配电网双层不确定性无功规划配置[J]．电网技术，2023，47(12)：5158-5170．

[2] 张杰，郑云耀，刘生春，等．基于解耦内点法与混合整数规划法的区域电网动态无功优化算法[J]．中国电力，2023，56(1)：112-118．

[3] 郭子辉，吴军，黄文鑫，等．考虑接入风险与无功配置的大用户接入规划方法[J]．电网与清洁能源，2023，39(6)：88-97．

[4] 张杰，王恒凤，刘生春，等．基于内点法和邻域搜索解耦动态规划法的区域电网动态无功优化方法[J]．中国电力，2023，56(2)：59-67．

[5] 苏向敬，彭赫，米阳，等．基于线性规划的中低压不平衡配电网电压无功实时优化[J]．电网技术，2023，47(11)：4719-4731．

[6] 孙乾皓，张耀，周一丹，等．基于半正定规划的交直流主动配电网三相有功无功联合优化[J]．电工技术学报，2024，39(9)：2608-2620．

[7] 金国锋，杨世峰，刘玲玲，等．基于二维混沌映射正余弦算法的智能变电站虚回路自动连接技术[J]．中国电力，2024，57(8)：152-158．

[8] 李湘喆，顾磊，马丽，等．余弦自适应混沌被囊体种群优化算法[J]．计算机工程与应用，2023，59(2)：65-75．

[9] 刘宝伟，邹宽胜，张兆军，等．基于混沌自适应正余弦算法的负荷频率自抗扰控制[J]．现代电子技术，2024，47(24)：97-104．

[10] 邵彝君，朱良宽，付雪，等．融合混沌和差分变异的正余弦算术优化算法[J]．计算机仿真，2024，41(11)：393-402．

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告