

# 能源互联网环境下电力系统配电网智能规划模型

房子衿 周波

上海电力大学电气工程学院

**【摘要】**传统配电网的能效评估均是基于历史统计数据进行的,而本文考虑在能源互联网环境下电力系统配电网智能规划模型,为建设投运中提出预防性节能降损建议,因此需先对配电网的运行状态进行仿真计算,为后续进行运行能效评估提供数据支撑。本文主要对能源互联网环境下电力系统配电网智能规划模型进行论述。

**【关键词】**能源互联网;电力系统;配电网;智能模型

## Intelligent planning model of power system distribution network under the energy Internet environment

House Jin Zhou Bo

School of Electrical Engineering, Shanghai Electric Power University

**【Abstract】** the traditional distribution network assessment of energy efficiency are based on historical statistics, and this paper consider in the energy Internet environment distribution network intelligent planning model, put forward for construction preventive energy saving loss reduction Suggestions, so need to first the operation state of the distribution network simulation calculation, provide energy efficiency for subsequent operation of evaluation data support. This paper mainly discusses the intelligent planning model of power system distribution network under the energy Internet environment.

**【Key words】** energy Internet; power system; distribution network; intelligent model

## 引言

随着我国经济的稳步发展,我国的电力建设规模呈现逐年递增的趋势,电力环境也开始趋于能源互联网化,有效缓解了部分地区电网滞后的局面。本文主要对能源互联网环境下电力系统配电网智能规划模型进行论述,详情如下。

## 1 WOA 算法改进

根据上述分析可知,WOA 算法具有参数少且局部寻优能力强的特点,常用于短期负荷预测和无功调度优化等领域,但由于算法自身的局限性,算法在后期存在全局寻优能力较差和容易陷入局部最优的问题。因此,为解决以上问题,更好地实现面向多元客户侧的可调负荷集群控制策略,采用自适应惯性权重和随机差分变异改进了算法。(1)自适应惯性权重。相较于固定权重,自适应调整权重可明显提高算法性能。由于 WOA 算法在泡沫攻击阶段采用固定惯性权重,无法随实际情况变化。因此,在 WOA 算法泡沫攻击阶段引入自适应惯性权重,通过在算法接近局部最优个体时,降低权重,提高算法对最优解周围区域的寻优能力。引入自适应惯性权重的 WOA 算法权重和模型可表示为:

$$\omega = \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{T_{\max}} + \pi\right) + 1$$

$$\vec{X}(t+1) = \omega \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}$$

(2)随机差分变异策略。WOA 算法在更新位置时,通常根

据参考位置和当前位置确定更新位置,这导致算法后期因为收敛速度过快而容易陷入局部最优。通过研究发现,随机差分变异策略可有效改善算法的收敛速度。因此引入随机差分变异策略对位置进行随机差分变异,提高算法的全局寻优性能。引入差分变异策略的 WOA 算法可表示为:

$$\vec{X}(t+1) = r \cdot (\vec{X}(t) - \vec{X}^*(t)) - r \cdot (\vec{X}_{\text{rand}}(t) - \vec{X}^*(t))$$

通过引入自适应惯性权重与随机差分变异改进 WOA 算法,可将改进 WOA 算法流程概括如下:(1)初始化算法种群规模、最大迭代次数等参数,并执行 WOA 算法;(2)计算个体适应度值,选择最佳值作为当前个体和全局最佳适应度值,并记录其值与其位置;(3)随机差分变异种群中的个体位置;(4)当算法满足终止条件则输出结果,反之则执行步骤(2)。

## 2 基于改进极限学习机的增量配电网线损率预测模型

### 2.1 ELM 网络结构

ELM 网络中增量配电网网络结构的设置能够影响电网线损率的计算复杂度与实际泛化能力。一般情况下,若 ELM 网络结构过于复杂,将会加快电子传输量的训练速度,将待训练数据进行拟合处理,但会大幅增加线损率计算的复杂水平度,从而使增量配电网的应用推广能力持续下降;相反,若 ELM 网络结构过于简单,虽然能够在一定程度上节省电子传输量的实际训练时间,但会使增量配电网的学习变得更加困难,甚至无法针对线损率预测问题形成一个独立且有

效的处理模型。在确定电子传输量训练集样本后, ELM 网络结构的选择可以简化为对增量配电网节点个数的确定。输入层配网神经元的个数基本等于电子量输入样本的维数, 输出层配网神经元的个数可作为电子量期望的输出维数。ELM 网络结构如图 1 所示。

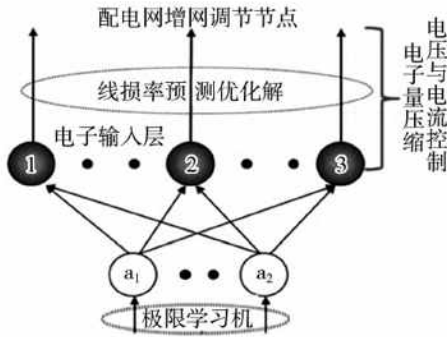


图 1 中, 数字 1、2、3 代表输入层配网神经元的个数, a1、a2 代表电子量输入样本的维数。

## 2.2 配电网参数寻优

在适应度函数确定后, 需要对配电网参数进行寻优处理。配电网参数寻优结果直接描述了改进极限学习机算法的实际应用能力, 可在原有电网应用环境的基础上, 针对不同电量分子进行划分与调试, 从而实现增量配电网空间的有效规划。配电网参数寻优方向主要是使增量配电网空间中电子输入权重和阈值变得更加有效, 且达到提高改进极限学习机算法隐含层节点有效性的目的。在分析改进极限学习机算法应用能力的同时, 可使适应度函数的预测能力得到最大化发挥。因此, 从整体层面来考虑, 提高配电网参数寻优结果的实用性能可决定线损率预测行为的准确度价值。设  $e_0$  代表配电网参数下限寻优限制条件,  $e_n$  代表配电网参数的上限寻优限制条件,  $n$  代表电子量的实际输入数值, 联立公式, 可配电网参数寻优结果表示为:

$$\phi = \sum_{r=1}^{e_r} \frac{E \cdot (s_r, s_1)}{\sqrt{w_1^2 + w_2^2} \|D_{n+1} - D_n\|}$$

其中,  $s_1$  代表第一个增量隐含层结点系数,  $s_n$  代表第  $n$  个增量隐含层结点系数,  $D_{n+1}$  代表第  $n+1$  个电子输入权重值,  $D_n$  代表第  $n$  个电子输入权重值,  $w_1$ 、 $w_2$  分别代表两个不同的增量配电网线损率预测参量。

## 3 多谐波源接入的城市配电网 SAPF 优化配置方法

传统配电网中谐波源相对集中且数量有限, 可以利用谐波治理装置“一对一”治理, 但对于新型城市配电网中的多谐波源随机接入, 谐波污染分散化、全网化的特征, 结合实用性和经济性层面考虑, 采用配电网分区优化方法, 安装有

限个谐波治理装置, 减轻整体配电网谐波失真, 是行之有效的方法。

### 3.1 谐波源诺顿等效模型

由典型谐波源特性分析可知, 配电网谐波潮流计算时, 考虑基波电压和谐波电压对谐波电流产生的影响, 波源可以采用一个阻抗来模拟其谐波源的线性部分, 并用一个谐波电流源去模拟谐波的非线性部分, 实际计算中可通过基波电流计算其输出谐波电流。h 次谐波电流、h 次谐波电压和 h 次谐波电流非线性部分的诺顿等效模型如式所示:

$$\dot{I}_h = \dot{I}_{0,h} + \dot{U}_h / Z_h$$

### 3.2 基于 SAPF 优化配置的城市配电网谐波治理策略

谐波治理效果和治理成本是衡量城市配电网谐波治理两个重要指标。SAPF 接入位置不同和接入容量大小会影响配电网谐波治理效果, 而位置和容量与治理成本紧密相关。所以, 配电网中 SAPF 优化配置可看作一个多目标非线性混合整数规划问题, 其优化目标为治理成本最低和配电网各节点电压畸变率最小。两个目标函数形成嵌套式双层优化模型, 待求解变量为: SAPF 接入位置和接入容量。内、外层优化模型以及决策变量间的关系如下图 2 所示, 外层优化模型以谐波治理成本最低, 采用粒子群算法求解目标函数, 将 SAPF 可能的配置数量作为变量传递给内层优化模型。内层模型在设定的约束条件内, 将 SAPF 最优安装位置以及对应的安装容量作为变量返回到外层优化模型。然后外层优化模型计算筛选对应成本最优的配置方案。通过内外层反复迭代并更新全局最优配置方案, 最终求解得到满足配电网谐波要求的治理成本最小的 SAPF 配置方案。

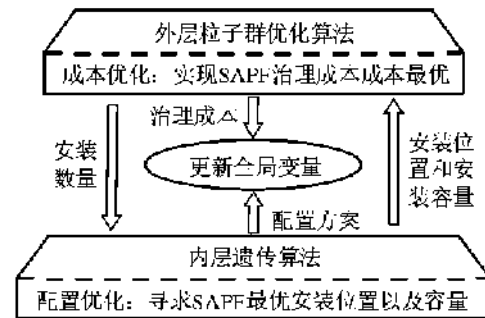


图 2 内、外层优化及决策变量间关系。

## 4 计及需求响应和混合博弈含多微网主动配电网协调优化

### 4.1 场景聚类

从长期来看, 配电网中某一天的新能源出力并不具有代表性, 无法表征新能源出力的不确定性, 基于单日新能源出力进行配电网运行优化不能完全满足实际中大多数运行场

景。由于新能源出力一般具有一定规律,大量历史数据可以在一定程度上表征新能源出力减小新能源不确定性对配电网运行优化的影响。由于历史场景太多导致计算量很大,通过场景削减技术进行场景聚类,形成能够表征配电网中新能源初始场景的典型场景集。

#### 4.2 主从博弈模型

配电网和微网属于不同利益主体且配电网的决策能力和市场地位较高,主从的递阶特征明显。对此,以配电网为领导者、多类型微网为跟随者构建主从博弈模型。下层多微网间形成合作联盟,将多微网等效为一个整体与ADN进行交易,主从博弈阶段暂不考虑微网间的交易电价。

#### 4.3 多微网合作博弈模型

进一步探究微网之间的合作关系,寻找多微网间利益分配机制和交易电价。为公平起见,微网间交易买卖同价,属于合作博弈。在合作联盟下,微网间合作交易下各微网总成本均小于和ADN直接进行交易的成本,减少的成本即为“合作剩余”,也是多微网合作联盟获取的收益。为维持长期稳定的合作联盟关系,需要制定合理的利益分配机制,维持微网间的利益平衡。

### 5 综合考虑多类型灵活性资源的主动配电网优化调度方法

#### 5.1 灵活性需求分析

灵活性需求是指系统应对净负荷时序波动变化和随机变化所需的灵活调节能力。净负荷是有功负荷除去风电、光伏等不可控分布式电源出力后,系统需要供应的剩余负荷。为充分考虑净负荷的不确定性,将风电、光伏和负荷的实际功率均等效为预测值与预测误差之和。其中,预测值为确定值,预测误差为随机变量。准确刻画系统灵活性需求需要建立风电、光伏和负荷的预测误差概率模型。

#### 5.2 网络型灵活性供给

网络型灵活性供给是指线路传输能力,只存在向上方向。在不升级线路的前提下,可以通过优化系统潮流分布,尽可能减少线路上的功率流动,为节点型灵活性供给的传输预留可行通道。考虑的网络型灵活性资源包括固有网架和SOP。固有网架起传输支撑作用,SOP可以根据调度指令实时控制馈线两端的功率传输,改变系统的潮流分布。此外,储能可以通过SOP直流端接入配电网中,构成E-SOP,进一步增强SOP功率调节能力,同时最大程度地发挥储能的削峰填谷作用。

#### 5.3 主动配电网灵活性提升多目标优化调度模型

基于灵活性供需平衡分析,提出了综合考虑多类型灵活性资源的主动配电网灵活性提升优化调度方法。综合考虑节

点型灵活性资源的可控调节能力和网络型灵活性资源的灵活传输能力,以微型燃气轮机、上级电网的有功出力、柔性负荷的中断量、储能充放电功率和SOP各端口传输的有功、无功功率作为决策变量,构建计及经济性、节点灵活性和网络灵活性的多目标优化调度模型。

### 6 基于多模式柔性互联的交直流低压配电网优化调度

#### 6.1 FID 多模式组网形式

根据应用场景的不同,FID的组网形式如图3所示。其主要分为以下两种形式。

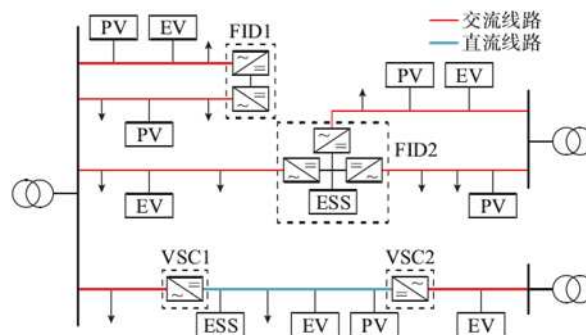


图3 FID的组网形式

#### 6.2 背靠背柔性互联组网形式

如图4中FID1、FID2及其互连网络拓扑所示,该形式FID采用双端或多端背靠背的电压源型变流器(VSC)实现单台区或多台区的低压末端互联,通过三相有功、无功功率控制,能够有效应对单相光伏和充电桩大规模接入低压配电网产生的电压越限和台区、馈线、相间负载不均衡问题,实现负荷转移和容量共享,改善低压配电网的电能质量。为进一步提升FID的潮流控制能力,可采用如FID2所示的形式,将储能并联至多端背靠背VSC的直流侧,形成自储能多端背靠背柔性直流装置(SESDC)。相较于分散独立配置的FID和储能,SESDC结构简单,便于集成,具有更低的建设和运行成本,已在一些研究和工程中得到了应用。

#### 6.3 交直流混合柔性互联组网形式

如图4中VSC1、VSC2及其互连网络拓扑所示,该形式FID实现了低压交直流配电网的柔性互联,有利于直流负荷和光伏储能的高效接入,能够有效提升系统效率,促进新能源就地消纳,在当前配电网电力电子化、交直流互联特征愈发明显的趋势下,具有重要的现实工程意义。综上所述,背靠背柔性互联组网形式结构简单,建设成本低,适用于交流负载成分较高、改造困难的居民住宅台区互联;交直流混合柔性互联组网形式可拓展性强,适用于大规模直流光-储-充-荷设备接入的台区互联;在未来交直流光-储-充-荷设备高度耦合的新型低压配电网中,两种组网形式并存将成为

低压配电网柔性互联的新常态。研究两种组网形式并存的低压台区群优化调度,可以实现更大范围内的电能资源优化配置,对于提升清洁能源消纳效率、支撑终端电能替代、提升源荷互动水平和供用电可靠性具有重大意义。

总之,在配电网仿真系统上,仅以以上系统为研究对象对所提模型进行验证,而实际新型电力系统配电网结构复杂程度远远高于该仿真系统,因此,模型对更复杂的配电网规划效果还有待进一步验证。下一步研究,将尝试对实际更复杂的配电网进行智能规划。

## 结语

## 参考文献

- [1]武晓朦,时政,付子义,等.基于密度峰值快速搜索聚类的多场景分布式电源规划[J].河南理工大学学报(自然科学版),2022,41(2):117-123.
- [2]赵海洲,陈建凯,杨海跃,等.考虑传输能力的含分布式电源配电网扩展规划方法[J].电力自动化设备,2021,41(12):70-77.
- [3]郑焕坤,曾凡斐,傅钰,等.基于E-C-K-均值聚类和SOP优化的分布式电源双层规划[J].太阳能学报,2022,43(2):127-135.
- [4]高峰阳,袁成,李昭君,等.考虑风-光-荷时空相关性的分布式电源和广义储能联合规划[J].电力自动化设备,2021,41(6):133-144.
- [5]胡晶,陈红坤,陈磊,等.考虑多主体利益与需求响应的分布式电源优化配置[J].电力系统保护与控制,2021,49(15):38-46.
- [6]郭浩明,陈英华,姜英涵,等.考虑分布式电源不确定性的配电网多维设备动态优化配置[J].可再生能源,2021,39(9):1255-1262.
- [7]韦涛,苏剑,崔艳妍,等.交直流混合配电网VSC与分布式电源三层协调规划方法研究[J].可再生能源,2021,39(9):1263-1270.
- [8]刘洪波,曲晟岐,徐咏盛.基于改进哈里斯鹰优化算法的主动配电网规划[J].吉林电力,2021,49(5):16-20+25.