# 考虑分布式电源的配电网无功调度模型

多目标无功优化（Multi-Objective Reactive Power Optimization，MORPO）径向配电系统（Radial Distribution System，RDS）的目标是使有功功率损耗和电压偏差最小化，改善系统电压分布，使无功电源（Reactive Power Source，RPS）机组的总初始投资和运行成本同时满足等式约束和不等式约束：

## 2.1 目标函数

2.1.1 功率损耗最小化

配电系统功率损耗*P*L可以将所有线路的损耗（*nl*）加起来得到，其公式可以表示为：

（10）

其中*Gk*表示第*k*条线的电导；*Vi*＜*θi*为第*k*条线的端子母线*i*处的电压；*Vj*＜*θj*是第*k*条线的端子母线*j*处电压。*θij*=*θi*-*θj*。

2.1.2 总电压变化最小化

RDS的电压分布通过最小化总电压变化*TVV*得到改善。通过将电压幅值|Vi|减去参考电压（1.0 Pu），并将其最小化，可以在各种负载母线上获得电压剖面的改善，其公式可以表示为：

 （11）

其中，*LB*表示配电系统的总负载母线。

2.1.3 RPS机组总投资最小化

RPS机组总投资*TC*RPS最小化可以通过最小化RPS机组的总容量来表示，其公式可以表示为：

 （12）

其中，*NQ*是接入RDS的RPS机组总数；*C*RPS是每千瓦时RPS设备的投资；*Q*RPS是RPS的无功需求。

## 2.2 约束条件

2.2.1 等式约束

在RPO问题中，等式约束为功率平衡方程，其公式可以表示为：

（13）

其中，*Pg*和*Dg*分别表示有功和无功性质的发电机输出功率；*P*DG和*Q*DG分别表示DG的有功和无功性质额输出功率；*Pl*和*Ql*分别表示*i*母线上的有功和无功性质负载；*QRPSi*为*i*母线上RPS机组的无功功率。*Nbus*为配电系统中*k*线的电纳值*Bk*。

2.2.2 不等式约束

（1）母线和馈线的传输容量约束

为了保证所有母线系统电压的分布，其范围公式可以表示为：

 （14）

其中，*Vmin*代表下阈值或上限，*Vmax*代表上阈值或下限。除此之外，流经任何线路的功率必须低于其最大限制，其公式可以表示为：

 （15）

其中，*Smax*为第*k*支路的最大加载极限

（2）DG和RPS组件约束

本文所考虑的DG既能注入实际无功，又能注入功率无功，因此，RPS和DG输出的无功功率公式可以表示为：

 （16）

 （17）

其中，NDG表示DG个数。多目标优化问题可以表示为：

 （18）

其中，*ubj*和*lbj*分别为第*j*个决策变量或控制变量的上界和下界。将MORPO问题的不同目标分别表示为:

（19）

其中，因变量*x*的表达式如以下所示：

 （20）

其中，自变量和控制变量的表达式如下所示：

 （21）

MORPO问题的等式和不等式约束如式（13）-（17）所示，变量边界如式（18）所示，所有在变量边界内且满足各种不等式和等式约束的解，构成决策变量的可行空间。等式约束是应用任何潮流技术时都要满足的功率平衡方程。

为了应用不等式约束解决MORPO问题，应用惩罚函数的概念，通过添加仅与违反因变量成比例的项来修改目标函数（penalty function，PF），去除所有不可行解，问题的修正或扩展目标函数可表示为:

 （22）

或表示为：

 （23）

以此类推

 （24）

 （25）

其中，

 （26）

其中，*λV和λS*是因变量违反界限的惩罚因子。

 （27）

 （28）

在多目标优化问题中，目标函数空间中的Pareto前沿或最优解集的概念是指在搜索空间中彼此不占优势但优于其他解的一组解。在多目标优化算法中，两个相互冲突的目标函数之间存在权衡，需要同时考虑两个目标。本文还将不同多目标优化算法得到的Pareto最优解与参考Pareto最优解进行了比较。结果与参考POF非常接近的多目标优化算法被认为是较好的算法。帕累托图的目的是将问题的重要方面与琐碎方面分开。通过图形化地分离问题的各个方面，团队将知道在哪里指导其改进工作，减少图中最大的条比减少较小的条更有利于整体的改进。

MMOD算法通过最小化集成在RDS中的DG和RPS机组的无功功率来解决MORPO问题，这些控制变量本质上是连续的。

在情况A中，有功功率损耗*PL*和总电压变化*TVV*被最小化。在案例B中，有功功率损耗PL和无功电源机组*TCRPS*的总投资最小，而在案例C中，有功功率损耗*PL*、总电压变化*TVV*和RPS机组*TCRPS*的总投资最小。在这三种情况下，除了电压约束外，还考虑了馈线负载约束。一旦通过帕累托最优或非支配方法获得解，则利用基于模糊逻辑方法的隶属函数从中提取最佳优选或折衷解。

# 模型求解

## 3.1鹈鹕优化算法

POA是一种基于自然灵感的创新随机优化方法[9]。其具有探索和利用搜索空间以追求全局最优的卓越能力。最近，群体启发算法引起了人们的极大关注，而POA特别受到鹈鹕觅食策略和行为的影响。在自然界中，鹈鹕在捕猎时经常合作，其方法包括几个步骤。一旦识别出猎物的位置，鹈鹕就会同步俯冲，然后展开翅膀。这种行为迫使鹈鹕的猎物上升到水面，并移动到较浅的区域，使鹈鹕更容易捕获猎物。行动纲领的基本阶段划分如下：

（1）阶段1（探索过程）：向食物来源移动

最初的阶段反映了鹈鹕在寻找猎物时扫描搜索空间的方法。一旦确定了猎物，鹈鹕就会将注意力转移到猎物所在的位置。POA的一个值得注意的特点是会随机生成猎物位置的能力，从而增强探索能力。阶段1第*i*个鹈鹕候选解的新位置数学表达式为:

（30）

式中，其中*I*是随机生成的向量，其值为1或2，*Xp*是随机生成的猎物位置，F(*Xp*)是其目标函数的值。然后基于新位置对解决方案进行更新，如下所示:

 （31）

（2）阶段2（开发过程）：在水上展翅

在这个阶段，鹈鹕开始在水面上展开翅膀，向上移动。这有助于提高本地搜索的能力;第*i*个鹈鹕候选解在第2阶段的新状态被数学建模为:

（32）

其中*t*为当前迭代，*R*为常数，等于0.2。然后根据新位置执行对解决方案的更新，如下所示：

 （33）

式中，*F*()为候选解的目标函数值。

# 算例分析

为了证明所开发的模糊调谐鹈鹕算法的有效性，本文将该算法用于解决IEEE 69总线径向分布系统的RPO问题，该系统在最优位置插入DG和RPS单元。通过模糊调谐鹈鹕算法（FTPOA）、非支配排序遗传算法-Ⅱ（Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-Ⅱ，NSGA-Ⅱ）、多目标粒子群算法（Multi-Objective Particle Swarm Optimization，MOPSO）,和鹈鹕优化算法（POA）对MORPO问题的性能进行了评估，并对径向配电系统的A、B、C三种情况的结果进行了比较：

Case A：PL和TVV最小化

Case B：PL和TCRPS最小化

Case C：PL、TVV和TCRPS最小化

为了验证该方法，在单目标函数下进行MORPO到RPO问题的转换，对MORPO问题进行归一化后的目标函数加权求和，得到RPO问题的单目标函数为PLN、TVVN和TCRPSN，如下所示：

Case A最小化：

 （37）

Case B最小化：

（38）

Case C最小化：

 （39）

式中，W1、W2、W3为权重因子。权重因子W数在得到0~1之间的随机值后均匀分布在0 ~1之间。在式(25)中，W1、W2和W3分别用0到1之间随机放置的数字的0.33、0.33和0.34倍来估计。例如，为了获得30个非劣解，一个单目标EC技术，假设FTPOA要实现30次，其权重因子在0到1之间变化。

如第3节所述，MORPO问题可以通过减少DG和RPS的无功输出来解决。本文假设控制变量本质上是连续的。在径向配电系统的三种情况下，各负载母线电压幅值的下限和上限分别为0.95pu和1.05pu。此外，还考虑了负载母线电压和馈线容量的约束。算法实现在Core i7上的MATLAB versionR2017a中完成，硬盘为2.9 GHz，内存为4GB。

## 4.1 IEEE 69-Bus RDS

本文针对RPO问题所考虑的IEEE 69总线RDS集成了三个490、390和1690kW的DG，如所述，分别最佳地放置在11、18和61号母线上，它们同时提供真实和无功功率。除3个DG外，系统还集成了3个无功电源，最佳放置在21、61和64号母线，如图2所示。系统中有3个DG和3个RPS机组，为了使径向分布系统的总电压变化、有功损耗和RPS机组的总投资最小，利用FTPOA算法得到6个控制变量。



图2 IEEE-69总线系统节点图

Fig.1 IEEE-69 bus system node diagram

4.1.1案例a：PL和TVV最小化

为了减少IEEE 69-RDS中有功功率的损耗和电压的变化，采用了FTPOA、NSGA-Ⅱ、POA和MOPSO算法。

4.1.2 方案B：PL和TCRPS最小化

本文以最小化IEEE69总线中的PL和TCRPS为目标。采用FTPOA、NSGA-Ⅱ、POA和MOPSO算法来优化无功功率。

4.1.3 方案C：PL、TVV和TCRPS最小化

本文三个目标函数用于最小化有功功率损耗、RPS机组总投资和总电压变化。在IEEE 69-RDS中实现了FTPOA、NSGA-Ⅱ、POA和MOPSO算法。进行无功优化。

# 结论