

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.03.013

# 基于树木生长算法的含 UPFC 的最优潮流计算

欧阳晨, 卫志农, 孙国强

(河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:**最优潮流(OPF)计算是一个非凸优化问题,统一潮流控制器(UPFC)的引入增加了 OPF 问题的非凸程度,使得基于内点法的传统优化算法难以获取全局最优解。文中提出基于树木生长算法(TGA)的计及 UPFC 的最优潮流计算方法,将发电成本与有功网损、电压偏移加权作为目标函数,并考虑网络与 UPFC 设备的安全运行约束,优化了 OPF 模型。最后基于 IEEE 30 节点系统以及南京西环网 116 节点实际系统进行算例测试,对比 TGA、粒子群与内点法的结果,并使用蒙特卡洛方法对不同的启发式算法分别进行 50 次计算,验证了 TGA 具有更好的求解精度与鲁棒性。

**关键词:**统一潮流控制器(UPFC);最优潮流(OPF);元启发式算法;树木生长算法(TGA);非线性规划

**中图分类号:**TM732

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2020)03-0084-08

## 0 引言

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)可通过运行参数的调整实现母线电压与线路潮流的灵活控制,改善电网潮流分布不均,提高分区供电能力和系统运行稳定性<sup>[1-8]</sup>。我国陆续投运了南京西环网 UPFC 工程<sup>[9]</sup>、苏州 500 kV UPFC 工程,文中就计及 UPFC 的最优潮流计算(optimal power flow, OPF)问题展开研究,具有重要的理论意义与工程实用价值<sup>[10-13]</sup>。

OPF 是复杂电网调度的基础问题<sup>[14]</sup>。OPF 通过数学规划工具求解电力系统中的控制变量,在满足电网安全稳定约束的前提下,保证目标函数最优。文献[15-16]采用线性化算法求解含 UPFC 的 OPF 问题。文献[17-18]应用原对偶内点法求解 OPF,具有求解效率高、收敛性能好等优点,然而对于非凸性较强的优化问题,内点法对于迭代初始点的选取较敏感,初值选取不当会导致算法收敛性变差甚至无法收敛。此外,这类传统的梯度方法难以处理实际系统的非线性特性,如:发电机组的阀点效应、分段二次成本函数等<sup>[19]</sup>。OPF 问题本身具有非凸的性质,而 UPFC 的加入加剧了 OPF 问题的非凸性,此时,OPF 全局最优解的获取是亟需解决的问题之一。

近年来,元启发式算法受到学者们的广泛关注。这类算法对初值不敏感、能处理复杂的约束与目标函数,同时能够高效地得到全局最优解。元启发式算法中,粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)<sup>[20-22]</sup>、遗传算法(genetic algorithm, GA)等已被应用到电力系统问题的研究当中。文献[23-24]参考飞蛾趋光性的特性,将飞蛾扑火优化算法应用于 OPF 问题中。树木生长算法(tree growth algorithm, TGA)是一种新型的元启发式算法<sup>[25]</sup>,该算法的全局勘探与局部开发分区进行,能够确保解的全局最优。文献[25]通过将 TGA 与 PSO、GA、禁忌搜索(tabu search, TS)等多种常见智能算法进行比较,验证了 TGA 的优越性。此外,文献[25]对 TGA 进行了收敛性分析及非参数的显著性检验,验证了该算法的高效性与鲁棒性。基于以上分析,文中首先建立计及 UPFC 的 OPF 数学模型,接着阐述基于 TGA 的 OPF 问题的基本理论和求解流程。最后对 IEEE 30 节点系统以及 116 节点南京西环网实际系统进行算例测试,验证该方法的有效性。

1 含 UPFC 的 OPF 模型

1.1 UPFC 三节点功率注入模型

典型的 UPFC 拓扑如图 1(a)所示,串联变压器和并联变压器接于同一母线。但将该典型拓扑应用于南京 UPFC 工程时,无法反映 UPFC 并联侧通过变电站与母线 1 相连的拓扑,故演变了适用面更广的新型 UPFC 拓扑<sup>[9]</sup>,如图 1(b)所示。该拓扑相对于典型拓扑而言,UPFC 的串联支路与并联支路不接于同一节点。同时典型拓扑可以被认为是新型拓扑的一种特例,文中采用新型 UPFC 拓扑进行研究。

## 1 含 UPFC 的 OPF 模型

### 1.1 UPFC 三节点功率注入模型

图 2(a)为 UPFC 等效电路, $m, n, r$  为 UPFC 接入支路的 3 个节点; $\dot{U}_m, \dot{U}_n, \dot{U}_r$  分别为  $m, n, r$  节点

收稿日期:2019-11-01;修回日期:2019-12-12

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904500)

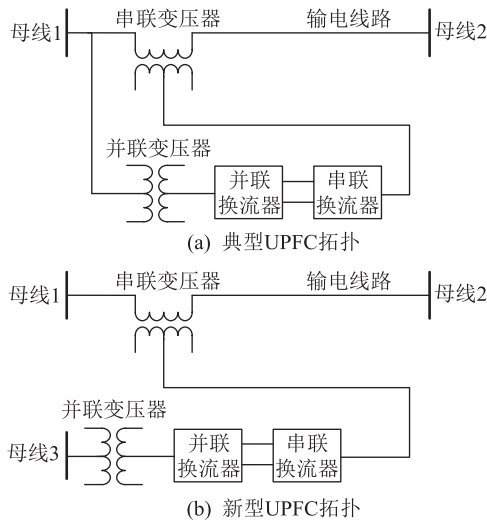


图 1 2 种 UPFC 拓扑

Fig.1 Two kinds of UPFC topology

处的电压;  $\dot{U}_B$ ,  $\dot{U}_E$  分别为 UPFC 等效的串联、并联电压源; 并联电压源  $\dot{U}_E$  通过电抗  $X_E$  与节点  $r$  相连;  $\dot{U}_B$  与  $\dot{U}_E$  之间通过换流器交换功率;  $P_B$  为串联侧流入 UPFC 的有功功率;  $P_E$  为并联侧流入 UPFC 的有功功率;  $i_{mn}$ ,  $i_{rE}$  分别为 UPFC 等效的串联和并联支路电流;  $Z_1, B_1$  分别为 UPFC 串联侧所在线路的阻抗和对地导纳。

根据电路的叠加原理, 将模型中 UPFC 对所安装支路的影响等效为原电路 3 个节点的额外注入功率, 如图 2(b) 所示。图中,  $P_{m0}, P_{n0}, P_{r0}$  分别为 UPFC 对节点  $m, n, r$  的等效注入有功功率;  $Q_{m0}, Q_{n0}, Q_{r0}$  分别为 UPFC 对节点  $m, n, r$  的等效注入无功功率。

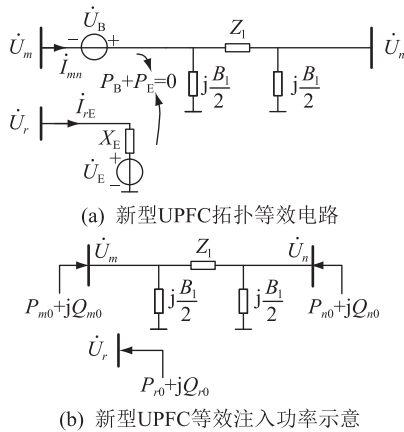


图 2 UPFC 三节点功率注入模型

Fig.2 Three-bus power injection model of UPFC

图 2 中的模型避免了电网由于支路解耦而分裂成 2 个孤岛系统, 从而避免了雅可比矩阵奇异导致潮流无法收敛的情况。同时, 功率注入模型未改动

原网络结构, 无需修改节点导纳矩阵, 故能简化程序设计。由图 2(b) 得到等效注入功率如下:

$$\begin{cases} P_{m0} = -U_m U_B [g_{mn} \cos \theta_{mB} + (B_1/2 + b_{mn}) \sin \theta_{mB}] \\ Q_{m0} = -U_m U_B [g_{mn} \sin \theta_{mB} - (B_1/2 + b_{mn}) \cos \theta_{mB}] \\ P_{n0} = U_n U_B (g_{mn} \cos \theta_{nB} + b_{mn} \sin \theta_{nB}) \\ Q_{n0} = U_n U_B (g_{mn} \sin \theta_{nB} - b_{mn} \cos \theta_{nB}) \\ P_{r0} = -U_r U_E \sin \theta_{rE} / X_E \\ Q_{r0} = U_r U_E \cos \theta_{rE} / X_E \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_B, U_E, U_m, U_n, U_r$  分别为  $\dot{U}_B, \dot{U}_E, \dot{U}_m, \dot{U}_n, \dot{U}_r$  的幅值;  $g_{mn}, b_{mn}$  分别为支路  $m-n$  的等效电导、电纳;  $\theta_{mB}$  为节点  $m$  的电压相角与等效串联电压源相角的差值;  $\theta_{nB}$  为节点  $n$  的电压相角与等效串联电压源相角的差值;  $\theta_{rE}$  为节点  $r$  的电压相角与并联等效电压源相角的差值。

UPFC 稳态状态下的直流侧电容电压保持为常数, 这使得并联侧的输入有功功率与串联侧的输出有功功率相同, 确保 UPFC 既不向电力系统注入也不从电力系统吸收有功功率<sup>[26]</sup>。因此, 对于计及 UPFC 的 OPF 问题, 还需满足这一内部功率等式约束, 即  $P_E + P_B = 0$ , 展开后如下:

$$U_r U_E \sin \theta_{rE} / X_E + U_B^2 g_{mn} - U_m U_B [g_{mn} \cos \theta_{mB} + (B_1/2 + b_{mn}) \sin \theta_{mB}] + U_n U_B (g_{mn} \cos \theta_{nB} + b_{mn} \sin \theta_{nB}) = 0 \quad (2)$$

## 1.2 计及 UPFC 的 OPF 模型

OPF 问题在数学上是一个非线性规划问题。在给定网架结构、系统负荷, 并满足系统各类约束的前提下, 通过调整发电机有功无功出力、无功补偿装置以及变压器分接头等, 找到最优解。OPF 典型的目标函数为系统发电成本、有功网损、节点电压偏差等。该优化问题的一般表现形式为:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \text{s.t. } g(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0 \\ h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f$  为目标函数;  $\mathbf{x}, \mathbf{u}$  分别为状态变量和控制变量;  $g$  为等式约束;  $h$  为不等式约束。控制变量  $\mathbf{u}$  可表示如下:

$$\mathbf{u}^T = [U_{sw}, P_2, \dots, P_n, Q_2, \dots, Q_n, T_1, \dots, T_N, U_r, U_B, \theta_B] \quad (4)$$

式中:  $U_{sw}$  为平衡节点电压幅值;  $P_2, \dots, P_n$  为平衡节点以外节点的有功出力;  $Q_2, \dots, Q_n$  为平衡节点以外节点的无功出力;  $T_1, \dots, T_N$  为有载调压变压器变比;  $n$  为网络节点数;  $N$  为可调变压器的数量;  $\theta_B$  为 UPFC 等效串联电压源  $\dot{U}_B$  的相角。

式(3)中的等式约束  $g(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0$  为系统潮流的功率平衡方程和 UPFC 的内部功率平衡, 如式(5)~式(7)所示:

$$P_E + P_B = 0 \quad (5)$$

$$P_{Gi} - P_{Di} + P_{UPFC} =$$

$$U_i \sum_{j=1}^n U_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (6)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} + Q_{UPFC} =$$

$$U_i \sum_{j=1}^n U_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (7)$$

式(5)表示 UPFC 并联侧与串联侧功率平衡, 具体展开为式(2)。式(6)与式(7)分别表示节点  $i$  处有功、无功功率平衡;  $P_{Gi}, Q_{Gi}$  分别为发电机  $i$  发出的有功、无功功率;  $P_{Di}, Q_{Di}$  分别为节点  $i$  的负荷有功、无功功率;  $G_{ij}, B_{ij}$  分别为节点  $i, j$  之间的电导、电纳;  $U_i, U_j$  分别为节点  $i, j$  处的电压幅值;  $\delta_i, \delta_j$  分别为节点  $i, j$  处的电压相角。

考虑 UPFC 三节点注入模型的影响, 节点  $m, n, r$  处的式(6)、式(7)需要根据式(1)确定  $P_{UPFC}, Q_{UPFC}$  对应值。而当节点  $i$  为非 UPFC 接入节点时,  $P_{UPFC}, Q_{UPFC}$  取值为 0。

式(3)中的不等式约束  $h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0$  包括控制变量、状态变量约束。其中控制变量约束为:

$$\begin{cases} U_{sw, \min} \leq U_{sw} \leq U_{sw, \max} \\ P_{i, \min} \leq P_i \leq P_{i, \max} & i = 2, \dots, n \\ Q_{i, \min} \leq Q_i \leq Q_{i, \max} & i = 2, \dots, n \\ T_{i, \min} \leq T_i \leq T_{i, \max} & i = 1, \dots, N \\ U_{r, \min} \leq U_r \leq U_{r, \max} \\ U_{B, \min} \leq U_B \leq U_{B, \max} \\ \theta_{B, \min} \leq \theta_B \leq \theta_{B, \max} \end{cases} \quad (8)$$

状态变量约束包括非平衡节点的电压幅值约束、平衡节点的功率出力约束以及线路的容量约束:

$$\begin{cases} U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max} & i = 2, \dots, n \\ P_{sw, \min} \leq P_{sw} \leq P_{sw, \max} \\ Q_{sw, \min} \leq Q_{sw} \leq Q_{sw, \max} \\ |S_L| \leq S_{L, \max} & L = 1, \dots, l \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_{sw}, Q_{sw}$  分别为平衡节点发电机输出的有功功率与无功功率;  $S_L$  为支路  $L$  功率的输送容量。为了保证求得的解为满足约束的潮流可行解, 除了满足控制变量约束, 还需满足状态变量约束。故利用罚函数法将各状态变量对目标函数进行扩展, 得到目标函数为:

$$f_p = f + \mu_i \sum_{i=2}^n [\varphi(U_i - U_{i, \max}) + \varphi(U_{i, \min} - U_i)] + \mu_{p0} [\varphi(P_{sw} - P_{sw, \max}) + \varphi(P_{sw, \min} - P_{sw})] +$$

$$\mu_{q0} [\varphi(Q_{sw} - Q_{sw, \max}) + \varphi(Q_{sw, \min} - Q_{sw})] \quad (10)$$

式中:  $f$  为原优化问题目标函数;  $f_p$  为增广后目标函数;  $\mu_i, \mu_{p0}, \mu_{q0}$  为各状态变量的惩罚因子, 取值分别为  $5 \times 10^6, 1 \times 10^6, 1 \times 10^6$ ;  $\varphi(x) = [\max(x, 0)]^{2.5}$ 。

### 1.3 计及 UPFC 的 OPF 目标函数

OPF 问题根据关注的性能指标不同, 具有多种不同的目标函数, 常用的包括电力系统经常关注的经济指标和稳定性指标, 如发电成本、有功网损、电压偏移等。文中考虑如下 3 种目标函数。

目标 1 为发电成本:

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^m (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) \quad (11)$$

目标 2 为发电成本与有功网损加权之和:

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^m (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) + w_2 P_{\text{loss}} \quad (12)$$

目标 3 为发电成本与电压偏移加权之和:

$$\min f_3 = \sum_{i=1}^m (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) + w_3 \sum_{i=1}^n |U_i - 1.0| \quad (13)$$

式中:  $m$  为发电机数;  $n$  为节点数;  $a_i, b_i, c_i$  为第  $i$  台发电机的成本系数;  $w_2, w_3$  为各自目标函数的权重系数;  $U_i$  为电压标么值。目标 2 与目标 3 都是综合考虑 2 个目标的目标函数, 在考虑发电成本的基础上, 额外考虑电网的有功网损或电压偏移。

## 2 TGA

### 2.1 算法基本原理

Armin Cheraghalipour 根据树木生长的特点, 于 2017 年提出了一种新的元启发式优化算法——TGA<sup>[25]</sup>。该算法将初始一定数量的树木种群按照解的适应度从高到低排序, 分成  $N_1, N_2, N_3, N_4$  4 组具有不同功能的种群。每次迭代分别进行处理, 算法流程如图 3 所示。

适应度最好的第一组为  $N_1$ , 即“最优组”, 这一组负责搜索附近的局部最优解。考虑到电力系统的变量具有严格约束的实际情况, 将  $N_1$  中的每个解的控制量都按照式(14)迭代, 如果得到适应度更好的解则取代之前的解。

$$\mathbf{x}_{i, j+1} = \mathbf{x}_{i, j} + w \mathbf{R}_{-v, v} \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{x}_{i, j}$  为第  $j$  次迭代中第  $i$  个树木的位置向量;  $\mathbf{R}_{-v, v}$  为  $-v$  到  $+v$  的随机向量;  $v$  为控制量移动速度的限值, 需考虑电力系统控制量约束与算法本身的取舍;  $w$  为松弛因子, 随迭代次数而逐渐减少, 限制搜索范围。式(14)考虑控制量的约束, 在解的附近进

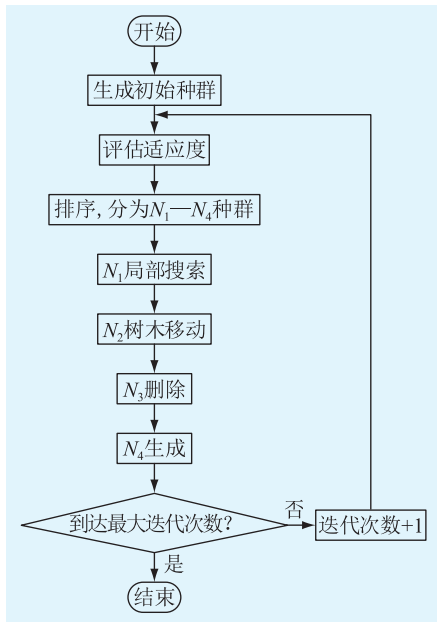


图3 TGA 流程

Fig.3 Flow chart of tree growth algorithm

行小范围随机搜索。

排序从高到低第二组为  $N_2$ , 即“争光组”。首先从  $N_1$  与  $N_2$  之中找到离自己最近的 2 棵树 (不含这棵树本身), 将 2 棵近树的向量设为  $x_1$  与  $x_2$ , 然后通过式 (15) 得到该树移动的方向与距离:

$$\begin{cases} y = \lambda(x_1 - x_{N_2,j}) + (1 - \lambda)(x_2 - x_{N_2,j}) \\ x_{N_2,j+1} = x_{N_2,j} + R \cdot y \end{cases} \quad (15)$$

式中: 参数  $\lambda \in [0, 1]$ ;  $R$  为 0 到 1 之间的随机数, 服从均匀分布。式 (15) 表示的树木移动如图 4 所示。

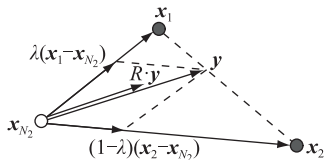


图4 以一定角度向相邻的两棵树移动

Fig.4 Moving between two adjacent trees with angle

第三组为  $N_3$ , 即“删除组”。该组的树木将被删除并以同等数量随机生成新的树木。

第四组为  $N_4$ , 即“繁殖组”。该组代表着  $N_1$  最优组衍生出的新的种群。部分参数继承母树的参数, 剩下的参数随机产生新参数。

图 3 中, 当每轮迭代中 4 个组的计算均完成后, 需要再一次评估解的适应度并排序分组, 之后进入新一轮的迭代计算。

## 2.2 算法流程

基于图 3, 采用 TGA 求解含 UPFC 的 OPF 问题, 具体流程如下:

(1) 输入各项系统参数及其约束;

(2) 确定待求目标函数, 同时按照式 (10), 将有状态量约束的 OPF 问题转化为包含罚函数的无状态量约束非线性规划问题;

(3) 确定 TGA 中的各项初始参数: 单个潮流解的控制变量维度  $d$ ; 种群的树木数量  $N$ ; 各子种群树木数量; 最大迭代次数  $G_{er}$ ; 决定向量移动方向的参数  $\lambda$  等;

(4) 在控制变量上下限范围内随机生成初始种群, 潮流计算后评估每棵树对应的适应度大小, 从优到劣排序, 并分为  $N_1, N_2, N_3$  子种群;

(5)  $N_1$  种群根据式 (14) 进行局部搜索;

(6)  $N_2$  种群根据式 (15) 移动树木, 使之靠近附近的 2 棵树;

(7) 删除较差的解  $N_3$ , 并随机生成新解替代;

(8) 额外生成  $N_4$  新解, 新解一部分参数继承于  $N_1$ , 另一部分参数随机生成;

(9) 将  $N_1, N_2, N_3, N_4$  种群当作新的种群, 排序并重新分层, 并保留  $N$  数量的解。未达到最大迭代次数之前, 回到步骤 (5) 继续下一次的迭代。

## 3 算例测试

为了验证文中所提算法的有效性, 针对计及 UPFC 的 IEEE 30 节点网络以及南京西环网 116 节点网络进行算例测试。设定树木生长算法的最大迭代次数  $G_{er}$  为 100; 树木数量  $N$  为 100;  $N_1$  与  $N_4$  数量均为 30;  $N_2$  数量为 40;  $N_3$  数量为 30;  $\lambda$  为 0.7;  $N_1$  种群中的每个解局部搜索的次数  $L$  为 2。

### 3.1 含 UPFC 的 IEEE 30 节点测试系统

含 UPFC 的 IEEE 30 节点测试系统如图 5 所示, 系统包含 6 台发电机组, 41 条支路, 总的电力负荷为 189.2 MW。UPFC 安装于 21—22 支路, UPFC 并联侧接于节点 21 上, 形成了二节点 UPFC 模型。

为了验证 TGA 应对多种目标函数的算法适用性和有效性, 考虑式 (11) 一式 (13) 的 3 个目标函数。其中  $w_2, w_3$  分别取值 50, 5。分别对 3 个目标函数求解, 结果如表 1 所示。

表 1 给出了各控制变量与结果值, 其中包括平衡节点电压幅值  $U_{G1}$ ; 平衡节点以外的发电机有功出力  $P_{G2}—P_{G6}$  以及无功出力  $Q_{G2}—Q_{G6}$ ; 而 UPFC 的变量包括该支路通过的有功功率  $P_{mn}$ , 无功功率  $Q_{mn}$  以及并联支路电压  $U_r$ ; 目标函数包括电压偏移之和  $U_D$ , 有功网损之和  $P_{loss}$  以及总发电成本  $C$ 。

由表 1 可知, 对于不同的目标函数, TGA 均能在满足潮流约束的前提下得到最优解。对比上述结果看出, 单一目标的目标函数 1 可以得到 3 个目标

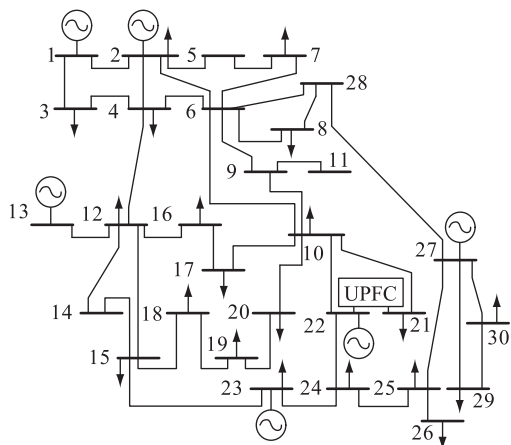


图5 含 UPFC 的 IEEE 30 节点系统

Fig.5 IEEE 30-bus power system with UPFC

表 1 3 种目标下基于 TGA 的 OPF 解

Table 1 OPF solution obtained by TGA under three kinds of objective functions

变量与结果	初始值	目标 1	目标 2	目标 3
$U_{G1}/p.u.$	1.00	1.05	1.04	1.02
$P_{G2}/MW$	60.97	58.79	48.56	57.47
$P_{G3}/MW$	21.59	23.17	28.13	22.54
$P_{G4}/MW$	26.91	32.39	33.89	34.28
$P_{G5}/MW$	19.20	16.45	19.69	16.77
$P_{G6}/MW$	37.00	17.30	28.07	17.33
$Q_{G2}/Mvar$	32.00	30.52	7.49	36.77
$Q_{G3}/Mvar$	39.57	10.57	20.18	4.053
$Q_{G4}/Mvar$	10.54	13.00	14.00	19.10
$Q_{G5}/Mvar$	7.95	10.24	7.46	7.18
$Q_{G6}/Mvar$	11.35	18.25	29.07	14.35
$U_r/p.u.$	0.99	1.05	1.04	1.01
$P_{mn}/MW$	-19.78	-20.51	-24.09	-22.32
$Q_{mn}/Mvar$	-22.97	-0.48	-9.49	7.47
$U_D/p.u.$	0.54	1.12	0.90	0.36
$P_{loss}/MW$	2.44	2.42	2.02	2.60
$C/\text{美元}$	593.45	574.51	583.61	575.23

函数中最优的发电成本 574.51 美元,而目标 2 与目标 3 的加权多目标能在优化发电成本的同时,兼顾其他指标。目标 2 在降低发电成本的同时还降低了系统的有功网损。目标 3 相对于目标 1 发电成本无明显增加,但电压偏移得到了显著的改善,各节点电压情况如图 6 所示。

IEEE 30 节点系统算例中,各节点电压幅值下限为 0.95 p.u.,PV 节点的电压幅值上限是 1.1 p.u.,其他节点上限为 1.05 p.u.。由图 6 可知,目标 1 的各节点电压并未越限,但相对于目标 3 的电压幅值整体偏高,并且更大幅度地偏离 1 p.u.的基准。由表 1 可得:目标 3 的电压偏移之和  $U_D$  为 0.36,显著

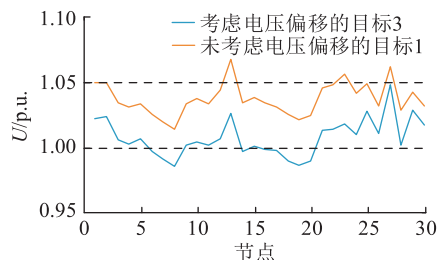


图 6 电压优化效果

Fig.6 Voltage optimization effect

优于目标 1 的 1.12。

为进一步研究算法的性能,考虑以发电成本最小为目标函数,选取多种算法进行对比。结果如表 2 所示。

表 2 IEEE 30 节点系统多种方法结果对比

Table 2 Comparison of different algorithm results in IEEE 30-bus system

变量与结果	TGA	PSO	内点法
$U_{G1}/p.u.$	1.05	1.03	0.98
$P_{G2}/MW$	58.79	58.34	55.40
$P_{G3}/MW$	23.17	21.81	22.74
$P_{G4}/MW$	32.39	32.62	39.91
$P_{G5}/MW$	16.45	16.11	16.27
$P_{G6}/MW$	17.30	17.79	16.20
$Q_{G2}/Mvar$	30.52	29.35	1.675
$Q_{G3}/Mvar$	10.57	6.55	34.20
$Q_{G4}/Mvar$	13.00	17.45	31.75
$Q_{G5}/Mvar$	10.24	13.42	6.96
$Q_{G6}/Mvar$	18.25	23.88	35.93
$U_r/p.u.$	1.05	1.03	1.01
$P_{mn}/MW$	-20.51	-20.17	-21.97
$Q_{mn}/Mvar$	-0.48	-0.75	-22.87
$C/\text{美元}$	574.51	575.04	576.89

由表 2 可知,TGA 相对于传统的内点法有获取全局最优解的能力,内点法得到的局部最优解为 576.89 美元,而 TGA 的解为 574.51 美元,优于内点法。同样是元启发式算法,TGA 相对于 PSO 有着更强的搜索性能与搜索精度,在算法计算时间接近的前提下,TGA 的解为 574.51 美元,优于 PSO 的解 576.89 美元。

为了进一步更验证 TGA 的有效性,利用蒙特卡洛方法,针对 IEEE 30 节点系统分别应用 TGA 与 PSO 计算 50 次,目标函数为最小发电成本。采用箱形图描述这 50 个解的分布情况,如图 7 所示。

由图 7 可知,TGA 的 50 次计算均能得到优化的可行解,相较于 PSO 有着更低的中位数,所得的解更加集中,故 TGA 有着更大的概率得到比 PSO 更优的解。

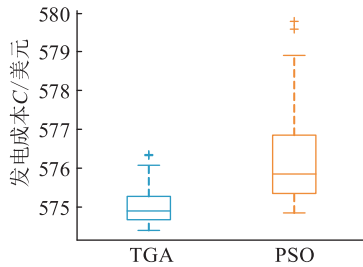


图7 IEEE 30 节点系统发电成本 50 次实验结果比较

Fig.7 Comparison of fifty experiments results of cost in IEEE 30-bus system

### 3.2 含 UPFC 的南京西环网 116 节点测试系统

为了验证算法在实际电网中的效果,对南京西环网 116 节点系统进行分析,南京西环网 UPFC 接入点附近拓扑结构如图 8 所示。

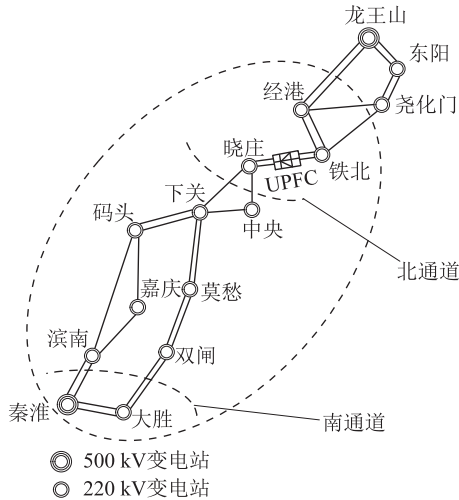


图8 南京西环网 UPFC 接入点附近拓扑结构

Fig.8 Topology structure near UPFC access point of Nanjing western ring network

该实际网络具有 12 台发电机组,194 条支路,总负荷为 3 857.8 MW。该系统中,UPFC 安装于南京西环网 220 kV 铁北变电站,包含 3 个换流器,额定容量  $3 \times 60 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,通过调整铁北—晓庄线路有功与无功潮流,调整南京西环网南北通道断面潮流。使用 TGA 求解实际系统的最优潮流问题,目标函数选取为最低发电成本,所得结果如表 3 所示。

表3 116 节点系统多种算法结果对比

Table 3 Comparison of different algorithm results in 116-bus system

变量与结果	TGA	PSO	内点法
$P_{mn}/\text{MW}$	-254.55	-303.75	-254.03
$Q_{mn}/\text{Mvar}$	-59.09	35.01	-118.74
$U_i/\text{p.u.}$	1.06	1.06	1.05
$C/\text{美元}$	151 038.15	151 143.61	151 129.96

从表 3 可以看出,TGA 能够计及实际系统中 UPFC 的影响,充分利用其搜索能力得到优于内点

法的最优解。PSO 采用 300 个粒子迭代 100 次,才使得求解效率与 TGA 相近。PSO 由于缺乏变异机制且粒子过快聚集,因而难以应对更为复杂的 116 节点实际系统算例,无法得到满足罚函数中状态量约束的有效潮流解。综上,TGA 在实际系统应用中具有有效性与优越性。

## 4 结论

文中采用 TGA 求解含 UPFC 的电力系统最优潮流问题,基于文中的算例测试结果可以得到以下结论:

(1) TGA 能有效应对优化问题中复杂的等式约束与不等式约束,适用于复杂的非线性、非凸优化问题的求解;

(2) 相对于依赖初值选取的内点法,TGA 在求解全局最优解上更有优势,相对于 PSO,TGA 有着更高的求解精度;

(3) TGA 能够有效解决含 UPFC 的 OPF 问题,并能够适用于实际网络,具有一定的工程潜力。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“基于可控移相器(TSPST)的柔性交流潮流运行控制技术”资助,谨此致谢!

### 参考文献:

- [1] 钱锋,王永,胡剑锋,等. 基于 PSS/E 的统一潮流控制器仿真建模[J]. 广东电力,2017,30(11):61-66.  
QIAN Feng, WANG Yong, HU Jianfeng, et al. Simulation modeling for unified power flow controller based on PSS/E[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(11): 61-66.
- [2] 陈峰,江道灼,周洋,等. 基于故障电流控制的新型 UPFC-FCL 设计[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):145-150.  
CHEN Feng, JIANG Daozhuo, ZHOU Yang, et al. Design of UPFC-FCL based on fault current control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 145-150.
- [3] 黄方能,黄成军,陈陈,等. UPFC 稳定控制器的研究及应用[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):101-105.  
HUANG Fangneng, HUANG Chengjun, CHEN Chen, et al. Study and application of UPFC stabilizer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 101-105.
- [4] SAMAL S K, PANDA P C. Damping of power system oscillations by using unified power flow controller with POD and PID controllers[C]//International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies. IEEE, 2015:662-667.
- [5] 刘黎明,康勇,陈坚,等. UPFC 交叉耦合控制及潮流调节能力分析[J]. 中国电机工程学报,2007,27(10):42-48.  
LIU Liming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Cross-coupling control scheme and performance analysis for power flow control of UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 42-48.
- [6] 张曼,张春朋,姜齐荣,等. 统一潮流控制器多目标协调控制

- 策略研究[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1008-1013.  
ZHANG Man, ZHANG Chunpeng, JIANG Qirong, et al. Study on multi-objective coordinated control strategy of unified power flow controller [J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1008-1013.
- [7] 刘前进, 宋永华. UPFC 潮流控制与优化的研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(18): 23-26.  
LIU Qianjin, SONG Yonghua. A study of power flow control and optimization by UPFC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(18): 23-26.
- [8] 王薪苹, 李群, 刘建坤, 等. 计及 UPFC 的 220 kV 分区电网运行可靠性研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 39-42.  
WANG Xinpang, LI Qun, LIU Jiankun, et al. Operating reliability research of 220 kV divisional power grid considering UPFC [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 39-42.
- [9] 国网江苏省电力公司. 统一潮流控制器工程实践——南京西环网统一潮流控制器示范工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 19-20.  
State Grid Jiangsu Electric Power Company. Unified power flow controller engineering practice——Nanjing western ring network UPFC demonstration project [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 19-20.
- [10] 朱梓荣, 卫志农, 赵静波, 等. 基于内点半定规划法的含 UPFC 的最优潮流[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 98-105.  
ZHU Zirong, WEI Zhinong, ZHAO Jingbo, et al. Optimal power flow with UPFC based on semi-definite programming method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 98-105.
- [11] 陈刚, 区允杰, 孙景涛. 一种基于 VSC-MTDC 互联系统的多目标潮流优化方法[J]. 广东电力, 2019, 32(4): 69-78.  
CHEN Gang, OU Yunjie, SUN Jingtao. A multi-objective power flow optimization method based on VSC-MTDC interconnected system [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(4): 69-78.
- [12] 李生虎, 齐涛, 尚昱锟, 等. 含潮流控制器的多端柔性直流配电系统协调优化[J]. 供用电, 2019, 36(5): 21-28.  
LI Shenghu, QI Tao, SHANG Yukun, et al. Coordination optimization for multi-terminal voltage source converter based direct current distribution system with power flow controller [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(5): 21-28.
- [13] 刘克文, 张国芳, 袁琛, 等. 基于图计算的快速非线性迭代法求解潮流计算[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(10): 19-24.  
LIU Kewen, ZHANG Guofang, YUAN Chen, et al. Fast nonlinear iterative method based on graph calculation for power flow calculation [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(10): 19-24.
- [14] BYNUM M, CASTILLO A, WATSON J P, et al. Tightening McCormick relaxations toward global solution of the ACOPF problem [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 814-817.
- [15] 臧海祥, 何天雨, 刘建坤, 等. 热启动环境下含统一潮流控制器的线性化最优潮流模型[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3517-3523.  
ZANG Haixiang, HE Tianyu, LIU Jiankun, et al. Linear optimal power flow model with unified power flow controller in hot-start environment [J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3517-3523.
- [16] 何天雨, 石睿智, 张泽, 等. 含统一潮流控制器的拟线性化动态最优潮流[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 91-97.  
HE Tianyu, SHI Ruizhi, ZHANG Ze, et al. Quasi-linearized dynamic optimal power flow with unified power flow controller [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 91-97.
- [17] 周玲, 王宽, 钱科军, 等. 计及 UPFC 的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 37-41.  
ZHOU Ling, WANG Kuan, QIAN Kejun, et al. Power system reactive power optimization considering UPFC installation [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 37-41.
- [18] 钱臻, 刘建坤, 陈静, 等. 计及风电不确定性的含 UPFC 电力系统的两阶段最优潮流[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 86-92.  
QIAN Zhen, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. Two-stage OPF considering wind-power uncertainty for power system with UPFC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 86-92.
- [19] DUMAN S, GÜVENÇ U, SÖNMEZ Y, et al. Optimal power flow using gravitational search algorithm [J]. Energy Conversion and Management, 2012(59): 86-95.
- [20] 陈浩, 王健. 基于差分粒子群算法的变电站选址定容规划[J]. 电力工程技术, 2018, 37(3): 118-122.  
CHEN Hao, WANG Jian. The optimization of substation locating and sizing based on DEPSO algorithm [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3): 118-122.
- [21] 鲁裕婷, 赵天乐, 都洪基, 等. 基于改进粒子群算法的含 DG 配电网无功优化[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 69-74.  
LU Yuting, ZHAO Tianle, DU Hongji, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generation based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 69-74.
- [22] 林子杰, 刘建坤, 陈静, 等. 基于粒子群算法的 MMC-UPFC 参数优化[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6): 23-26.  
LIN Zijie, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. A PSO algorithm based approach for optimizing MMC-UPFC control system parameters [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6): 23-26.
- [23] 王子琪, 陈金富, 张国芳, 等. 基于飞蛾扑火优化算法的电力系统最优潮流计算[J]. 电网技术, 2017(11): 253-259.  
WANG Ziqi, CHEN Jinfu, ZHANG Guofang, et al. Optimal power flow calculation with moth-flame optimization algorithm [J]. Power System Technology, 2017(11): 253-259.
- [24] 王子琪. 基于飞蛾扑火优化算法的电网最优潮流研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.

- WANG Ziqi. Research on optimal power flow of power grid based on moth-flame optimization algorithm [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [25] CHERAGHALIPOUR A, HAJIAGHAEI-KESHTELI M, PAYDAR M M. Tree growth algorithm (TGA): a novel approach for solving optimization problems [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2018(72):393-414.
- [26] 任必兴, 杜文娟, 王海风, 等. UPFC 接入对江苏特高压交流混联电网的动态交互影响研究 [J]. *电网技术*, 2016, 40(9):2654-2661.
- REN Bixing, DU Wenjuan, WANG Haifeng, et al. Dynamic interaction investigation on a UPFC connecting to Jiangsu UHV

AC/DC hybrid power system [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(9):2654-2661.

作者简介:



欧阳晨

欧阳晨(1994),男,硕士在读,研究方向为电力系统最优潮流(E-mail:hhuouyangchen@163.com);

卫志农(1962),男,博士,教授,研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化;

孙国强(1978),男,博士,副教授,研究方向为电力系统运行分析与控制。

## Optimal power flow with UPFC based on tree growth algorithm

OUYANG Chen, WEI Zhinong, SUN Guoqiang

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** Optimal power flow (OPF) is generally a non-convex optimization problem. The integration of unified power flow controller (UPFC) increases the nonlinearity of the original OPF problem. As a result, it is hard to obtain a global optimal solution using the traditional interior point method. Tree growth algorithm (TGA) is proved to be efficient and robust in solving complex engineering problems. TGA can globally search for optimal solutions to solve the OPF model that considers UPFC. In this model, the power generation cost, active power loss, and voltage deviation are included in the objective function, while the secure operation constraints of the power system integrated with UPFC are considered. Finally, numerical results on the IEEE 30-bus system and an actual system of Nanjing west ring network are carried out. The optimal solutions obtained from TGA, particle swarm optimization and interior point method are compared. At the same time, different heuristic algorithms are calculated 50 times using Monte Carlo method. These results verify the effectiveness of proposed approach and better accuracy and robustness of TGA.

**Keywords:** unified power flow controller (UPFC); optimal power flow (OPF); heuristic algorithm; tree growth algorithm (TGA); nonlinear programming

(编辑 吴楠)