

DOI: 10.7667/PSPC151176

# 基于模拟退火遗传算法的交直流系统无功优化 与电压控制研究

黄俊辉<sup>1</sup>, 汪惟源<sup>2</sup>, 王海潜<sup>1</sup>, 李海坤<sup>3</sup>

(1. 江苏省电力公司电力经济技术研究院, 江苏 南京 210024; 2. 江苏省电力公司, 江苏 南京 210024;  
3. 北京清软创新科技有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 交流与直流输电配合进行的混合输电系统不断建设, 逐渐成为远距离输电以及区域互联的主要方式之一, 其对无功平衡和电压稳定也提出了新的要求。提出了一种基于模拟退火遗传算法的交直流系统的无功优化以及电压控制方法。建立了交直流混合输电系统潮流计算模型。给出了混合输电系统的无功优化模型: 以网损和无功经济成本最小为目标函数, 约束考虑了直流换流器变比、控制角、节点电压限制以及潮流约束。然后给出了采用模拟退火遗传算法求解该模型的步骤。最后采用增加直流输电线路的 IEEE30 节点进行验证, 结果表明该方法具有收敛性好、结果更优等优点。

**关键词:** 模拟退火遗传算法; 交直流系统; 无功优化; 电压控制; 网损; 无功经济成本

## Study of hybrid genetic algorithm and annealing algorithm on reactive power optimization and voltage control in AC/DC transmission system

HUANG Junhui<sup>1</sup>, WANG Weiyuan<sup>2</sup>, WANG Haiqian<sup>1</sup>, LI Haikun<sup>3</sup>

(1. State Grid Jiangsu Economic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China; 3. Beijing Tsingsoft Innovation Technology Company Limited, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The AC/DC hybrid transmission system is developing fast, and it plays an important role in region connection. At the same time, it raises out new demands. A new method based on simulated annealing genetic algorithm is proposed to optimize reactive power and realize voltage control. Firstly, it builds the model of AC/DC transmission system, whose objective is the minimum of cost of power loss and reactive power generated by generators and reactive power compensation, the constraints consideration of DC converter, controlling angle, node voltage and power flow balance. Then it gives out the step to solve the model by simulated annealing genetic algorithms. At last, it uses IEEE30, which is added to DC transmission system, to prove that this paper's method is more effective and the results is better.

**Key words:** simulated annealing genetic algorithm; AC/DC hybrid transmission system; reactive power optimization; voltage control; network loss; reactive power economic cost

## 0 引言

近年来, 我国电力系统向着超高压、长距离、大容量方向发展, 而直流输电凭借其传输功率大、经济性好等方面的优势, 成为现在电力系统的一个重要组成部分。如南方电网目前已经形成“八交四直”十二条输电通道, 华中网和华东网通过葛洲坝-南桥直流线路实现互联, 超高压交直流混合输电系统在高压输电中扮演着重要的角色。

随着交直流混合系统逐渐增多, 直流给电网带来的影响也逐渐凸显出来, 如天广直流输电就出现电压波动大的问题<sup>[1]</sup>, 因此要对含交直流混合输电系统进行无功优化, 从而维持无功平衡, 实现对电压的控制。

然而目前国内外的无功优化和电压控制研究主要集中在纯交流电网上, 对交直流系统无功优化研究较少<sup>[2]</sup>。且采用的方法包含单纯形法、内点法、动态规划法等, 这些传统的方法容易产生“维数灾”<sup>[3]</sup>。

启发式算法逐渐被引入到无功优化领域<sup>[4-11]</sup>, 其中遗传算法(Genetic Algorithm, GA)和模拟退火法(Simulate Anneal Arithmetic, SAA)得到了广泛的应用<sup>[12-13]</sup>。然而遗传算法虽适合处理离散变量, 但容易陷入局部最优; 模拟退火法具有全局搜索能力, 但所需时间过长。单独使用其中一种方法具有很大的限制。文献[13]虽将两种方法结合起来, 但该方法仅限于纯交流系统, 且其目标函数仅考虑了网损, 并未考虑无功补偿以及发电机无功输出的成本。

本文结合交直流混合输电系统的特点, 采用模拟退火和遗传算法结合的方法, 使用退火法作为遗传求解过程中的个体替换策略, 从而避免陷入局部最优。并将该方法应用于增加直流输电系统的IEEE30节点系统, 优化结果与传统遗传算法进行了对比, 证明了本文方法的有效性和优越性。

## 1 交直流系统模型与潮流计算

### 1.1 交直流系统模型

交直流系统模型如图1所示<sup>[14-15]</sup>, 交流系统和直流系统通过换流站连接, 直流系统包含换流站、直流线路等, 换流站包含换流变压器和换流器。图中,  $P_{ac}$ 和 $Q_{ac}$ 分别表示交流侧向直流侧输入的有功和无功功率,  $U_i$ 表示交流侧母线电压,  $I_p$ 和 $I_s$ 分别表示换流变压器一次侧和二次侧电流,  $k_t$ 表示换流变压器变比,  $P_d$ 、 $I_d$ 和 $U_d$ 分别表示直流功率、直流电流、直流电压。

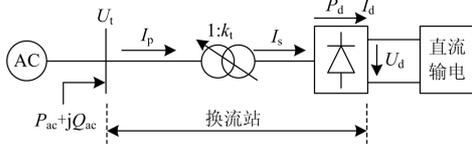


图1 交直流系统

Fig. 1 AC-DC transmission system

计及换流变压器电抗产生的压降, 直流侧电压为

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_t k_t U_i \cos\theta - \frac{3}{\pi} n_t X_C I_d \quad (1)$$

式中:  $U_d$ 与控制角 $\theta$ 有关;  $n_t$ 为换流桥数;  $X_C$ 为换流变压器等效电抗;  $I_d$ 为直流电流。

不考虑变压器损耗的情况, 直流侧和交流侧电压之间的关系为

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_y n_t k_t U_i \cos\varphi \quad (2)$$

式中:  $k_y$ 为反映换相压降影响的参数;  $\cos\varphi$ 为换流器的功率因数。

### 1.2 基准值的选取

交流侧和直流侧通过换流器传递功率, 因此两侧功率的基准值相同

$$P_{dB} = S_B = \sqrt{3} U_B I_B \quad (3)$$

式中:  $P_{dB}$ 和 $S_B$ 分别为直流侧和交流侧功率基准值;  $U_B$ 和 $I_B$ 分别为交流侧电压和电流基准值。

直流电压基准值为

$$U_{dB} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_t k_{tB} U_B \quad (4)$$

式中,  $k_{tB}$ 为换流站变压器变比基准值。

直流电流、电阻、电抗基准值为

$$I_{dB} = \frac{P_{dB}}{U_{dB}} \quad (5)$$

$$R_{dB} = \frac{U_{dB}}{I_{dB}} \quad (6)$$

$$X_{CB} = \frac{6}{\pi} n_t k_{tB} Z_B \quad (7)$$

式中:  $X_{CB}$ 为换流变电站电抗基准值;  $Z_B$ 为交流系统阻抗基准值。

### 1.3 交直流系统潮流计算

求解交直流系统的方法主要有统一迭代法和交替迭代法。统一迭代法是以极坐标下的牛顿法为基础, 将交流节点电压的幅值、相角和直流节点的电压、电流、换流器变比、控制角、功率因数角等变量进行统一迭代求解。交替迭代法是将直流系统和交流系统分别求解, 每次迭代中, 直流系统为交流系统提供等值负荷, 交流系统为直流系统提供电压值。本文采用交替迭代法计算交直流混合系统潮流。

首先进行直流潮流计算

$$U_{di} = U_{d1} + \sum_j^{n_d-1} r_{ij} I_{dj} \quad (j=1, 2, \dots, n-1) \quad (8)$$

式中:  $U_{di}$ 为第 $i$ 个节点的电压;  $r_{ij}$ 为线路电阻;  $I_{dj}$ 为直流电流控制量。

通过式(8)可以得到电流控制节点电压值, 之后通过网络电流和为0求得各电压控制节点电流, 通过式(9)可得各节点功率为

$$P_d = U_d I_d \quad (9)$$

根据 $U_d$ 、 $I_d$ 、电抗 $X_C$ 以及由交流侧得到的母线电压 $U_i$ , 通过式(1)算得各节点的控制角 $\theta$ , 并通过式(2)可求得 $\varphi$ 值。将以上所求的值带入到式(10)中得到各节点无功功率。

$$Q_d = U_d I_d \tan\varphi \quad (10)$$

然后将直流潮流中得到的换流器的功率代入到交流系统进行交流潮流计算, 并继续迭代, 同时保证求得的换流器变比不超过其上下界。

## 2 交直流系统无功优化模型

无功优化通常以网损最小为目标函数<sup>[16-17]</sup>, 随着电力市场的逐渐开放, 无功辅助服务的相关成本逐渐开始被考虑<sup>[18-19]</sup>。本文从整个社会效益出发, 除考虑网损外, 同时考虑增加无功设备以及发电机端发出无功的成本, 并且为使网损值与其他成本公平比较, 本文目标函数中将网损使用成本值来表示。

### 2.1 目标函数

$$\min F = EC(P_{\text{Loss}}) + \sum_{i \in NG} EC(Q_{Gi}) + \sum_{j \in NC} EC(Q_{Cj}) \quad (11)$$

式中:  $EC(P_{\text{Loss}})$  为网损成本;  $EC(Q_{Gi})$  为节点  $i$  发电机的无功成本;  $NG$  为发电机节点总数;  $EC(Q_{Cj})$  为节点  $j$  无功补偿器成本;  $NC$  为无功补偿节点总数。本文将无功补偿装置、发电机安装成本摊到每一个小时, 使用单位小时总成本。

$$EC(P_{\text{Loss}}) = P_{\text{Loss}} \times I_{\text{Loss}} \quad (12)$$

$$P_{\text{Loss}} = P_{\text{Loss(AC)}} + P_{\text{Loss(DC)}} \quad (13)$$

$$P_{\text{Loss(AC)}} = \sum G_{ij} [U_i^2 + U_j^2 - 2 \times U_i U_j \cos \theta_{ij}] \quad (14)$$

$$P_{\text{Loss(DC)}} = \sum I_d^2 R_d \quad (15)$$

式中:  $I_{\text{Loss}}$  为单位有功功率边际价格;  $n$  为电网总节点数;  $G_{ij}$  为连接节点  $i, j$  的电导;  $U_i$ 、 $U_j$  分别为节点  $i$ 、 $j$  的电压;  $\theta_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  的相角差。

本文的无功成本仅考虑显性成本<sup>[13]</sup>。

$$EC(Q_G) = EC(P_G) \times \tan \varphi \quad (16)$$

$$EC(P_G) = \frac{I_G}{af \times lf \times yrg \times 8760} \quad (17)$$

式中:  $\varphi$  为功率因数角;  $EC(P_G)$  为发电机的有功成本;  $I_G$  为发电机安装成本;  $af$  为利用系数;  $lf$  为负载系数;  $yrg$  为发电机使用寿命。

$$EC(Q_C) = \frac{I_C}{yrc \times \gamma \times 8760} \quad (18)$$

式中:  $I_C$  为无功补偿装置的安装成本;  $yrc$  为无功补偿装置使用寿命;  $\gamma$  为无功补偿装置平均使用率。

### 2.2 等式约束

$$P_{Gi} - P_{Li} - P_{Di} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (19)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_{Di} + Q_{Ci} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (20)$$

式中: 等式约束即为潮流方程<sup>[20]</sup>;  $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$  为节点

$i$  的有功和无功负荷;  $Q_{Ci}$  为无功补偿功率;  $B_{ij}$  为  $i$ 、 $j$  节点之间的电纳。

### 2.3 电压控制方法及不等式约束

电力系统主要的调整电压措施有: 改变发电机端电压、改变变压器变比、无功功率补偿。

#### 1) 改变发电机端电压

同步发电机既是有功电源也是无功电源, 发电机端调压是最直接最经济的手段, 应当优先考虑。在发电机直接向负荷供电的简单系统中, 供电线路一般不是很长, 发电机采用逆调压的方式可以满足负荷对电压质量的要求。然而, 由发电机经多级变压器向负荷供电的大型复杂电力系统中, 线路较长, 从发电厂到最远处负荷之间损耗与电压浮动较大, 这时, 需要靠其他方式控制电压。

#### 2) 改变变压器变比

变压器变比的适当选择, 可以把电压变化幅度对于次级额定电压的相对位置进行适当的调整, 且通过装设带负荷调压变压器, 在最大负荷和最小负荷时的电压变化幅度超出分接头可能调整的范围, 或者调压要求的变化趋势与实际相反(例如逆调压时)时, 可有效对电压进行调节控制。

#### 3) 无功功率补偿

以上两种调压方式均适合无功功率充裕的场合, 在无功功率不足时, 需添加无功设备进行调压, 这些设备主要包含电容器、调相机、静止补偿器。高压电网中, 无功功率传输引起电压降所占比例较大, 这种情况, 较少无功传输可取得显著效果。

本文采取以上三种方式同时优化对电压实行控制, 因此不等式约束主要包含控制变量和状态变量的上下限, 控制变量包含发电机节点电压、无功补偿点补偿容量、可调变压器变比、定电压控制换流器电压、定电流控制器电流、定控制角换流器控制角, 状态变量包含发电机无功出力、各节点电压、支路无功潮流、换流器变压器的变比。

## 3 模拟退火遗传算法对模型求解

### 3.1 简单遗传算法

简单遗传算法(SGA)是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型, 是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法, 目前 GA 已经成为电力系统优化应用最多的一个分支。GA 的主要优点有: 多初点多路径寻找全局最优、可同时处理种群中的多个个体、方法通用等, 然而该算法容易出现“过早收敛”和“GA 欺骗”问题。

目前针对应用在无功优化的遗传算法, 相关研

究主要集中在如何解决遗传算法的缺陷问题。最常用的即为对该算法自身进行改进，或者与其他算法相结合，如改进的遗传算法、遗传算法与内点法结合等。

### 3.2 模拟退火法

模拟退火法是利用模拟金属退火的原理，利用随机搜索技术在一个大的搜寻空间内找寻命题的最优解的通用概率演算法。在高温条件下，粒子的能量较高，可自由移动并重新排列；低温条件下，粒子能量较低。从高温开始将粒子缓慢降温，则粒子可以在每个温度下达到平衡，并在温度最低时，粒子的状态达到固定。根据 Metropolis 准则，粒子在温度  $T$  时趋于平衡的概率为  $e^{-\Delta E/kT}$ ， $E$  为固体在温度  $T$  时的内能， $\Delta E$  为物体内能该变量， $k$  为 Boltzmann 常数。

模拟退火法具有脱离局域最优陷阱的能力，并同时具有局部搜索能力，但该算法要想较优的结果，需要反复迭代，会消耗很长的时间。

### 3.3 模拟退火遗传算法

本文结合两种算法的特点，将模拟退火遗传算法应用到交直流混合输电的系统中，求解无功优化问题。优化过程中包含了遗传算法的复制、交叉、变异以及模拟退火法的状态产生函数等不同的邻域搜索结构。模拟退火法在优化过程中实现状态的全局大范围迁移以及局部小范围趋化性移动，增强算法的探索能力和效率。无功优化的变量包含变压器变比离散变量以及无功补偿和发电机电压连续变量，因此本文对编码形式进行改进，采用混合编码的方式，可以更快的速度寻找到最优解。

本文采用交替迭代法计算交直流混合系统潮流，将直流系统两端节点电压代入到直流系统并采用高斯迭代法求解，得到直流两端节点有功和无功功率，并将该功率带入到交流系统采用牛顿法求解，直到收敛为止。

具体步骤如下。

1. 初始化：初始化遗传算法遗传代数、变异概率、种群数目以及模拟退火的初始温度、终止温度以及每个温度下迭代次数等。
2. 随机产生初始种群：对交直流混合输电系统无功补偿位置、变压器变比采用整数编码，无功补偿容量、发电机端电压采用实数编码。
3. 将种群中的每个个体带入交直流潮流计算程序，计算得到各节点电压、网损等状态变量值。
4. 带入适应度函数，评价每个种群的适应度。
5. 对个体进行交叉、变异操作。
6. 使用模拟退火法对个体进行选择操作：

1) 对第 5 步得到的所有个体带入目标函数，计算目标值；

2) 按照邻域函数，每个个体产生新解，并计算新解的目标值；

3) 将新目标值与原目标值做差得到  $\Delta E$ ，若  $\Delta E < 0$ ，则接受新解，反之，判断  $T(i)$  与临界温度  $T_{set}$  之间的关系，如果  $T(i) > T_{set}$ ，在  $0 \sim 1$  之间随机产生一个值  $c$ ， $e^{-\Delta E/kT(i)} > c$ ，则接受新解，反之，保留原解，如果  $T(i) < T_{set}$ ，则直接保留原解；

4) 判断是否达到该温度下最大迭代次数，达到，则执行退火操作并进入第 7 步，反之，进入 2) 步。

7. 判断是否达到最大代数，如果满足，则计算结束，不满足，则将步骤 6 得到的个体重新进行步骤 3 操作。

## 4 算例验证

### 4.1 算例数据

本文以 IEEE30 节点<sup>[21]</sup>算例为基础，原来的 2-6 交流支路使用直流线路替代，形成含有直流输电线路的交直流混合输电系统。2 节点为整流侧，6 节点为逆变侧，换流站内部装有无功自补偿装置。本文第一运行方式为整流侧采用定功率控制，逆变侧定电压控制，第二运行方式为整流侧采用定触发角控制，逆变侧定功率控制。整流和逆变侧最小控制角分别为  $9^\circ$  和  $16^\circ$ ，换流变压器变比变化浮动均为  $\pm 10\%$ ，换相电抗标幺值分别为 0.1 和 0.07，线路电阻标幺值均为 0.005。

因原始 IEEE30 节点最低电压标幺值为 1.008 0，无功补偿意义较小，因此本文将节点负荷统一加重为 1.5 倍，此时各节点电压见图 2。

该算例中，所有节点电压标幺值下限为 0.95，PQ 和平衡节点上限为 1.05，PV 节点为 1.1。由图 1 可以看出，加负荷后 26、30 节点电压值低于下限，并有部分节点接近于下限，需无功补偿进行电压控制。为简化考虑，本文无功补偿装置均使用电容器。

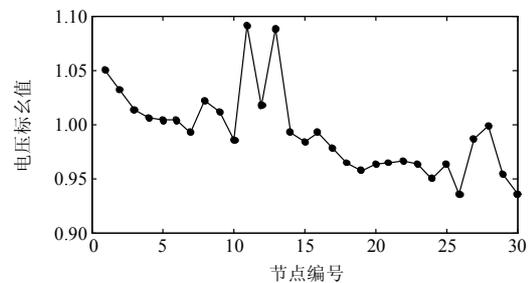


图 2 加负荷后 IEEE30 各节点电压标幺值

Fig. 2 IEEE30 every node's voltage per unit value after adding load

### 4.2 优化结果

本文遗传算法种群数设为 50, 代数设为 50; 模拟退化法初始温度为 100, 终止温度为 1, 分界温度  $T_{set}$  设置为 50。表 1 给出了使用模拟退火遗传算法与传统遗传算法优化的变量、目标函数对比结果, 表 1、表 2 的结果均使用标么值表示, 成本基准值为 1 000 \$。

表 1 优化结果数据及对比  
Table 1 Optimal results and comparison

控制量	上限	下限	优化结果	
			传统遗传算法	模拟退火遗传算法
$P_2$	0.7	0.2	0.205	0.240
$U_6$	1.2	1.0	1.039 8	1.043 5
$k_2$	1.1	0.9	1.075	1.050
$k_6$	1.1	0.9	1.100	1.075
$Q_{c7}$	0.3	0	0.012	0.058
$Q_{c18}$	0.3	0	0.033	0.010
$Q_{c19}$	0.3	0	0.003	0.048
$Q_{c21}$	0.3	0	0.132	0.112
$Q_{c23}$	0.3	0	0.008	0.019
$Q_{c24}$	0.3	0	0.030	0.090
$Q_{c26}$	0.3	0	0.012	0.031
$Q_{c29}$	0.3	0	0.006	0.012
$Q_{c30}$	0.3	0	0.017	0.027
$T_{6-9}$	1.1	0.9	1	1.000 0
$T_{6-10}$	1.1	0.9	0.987 5	0.962 5
$T_{4-12}$	1.1	0.9	0.987 5	1.000 0
$T_{28-27}$	1.1	0.9	0.975	0.962 5
$U_2$	0.95	1.1	1.033	1.029
$U_5$	0.95	1.1	1.030	1.023
$U_8$	0.95	1.1	1.032	1.033
$U_{11}$	0.95	1.1	1.087	1.072
$U_{13}$	0.95	1.1	1.092	1.065
$U_1$	0.95	1.05	1.05	1.050

表 1 中,  $P_2$ 、 $k_2$  分别为 2 节点处整流站的功率及变比,  $U_6$ 、 $k_6$  分别为 6 节点处逆变站的电压和变比,  $Q_{c7}$ 、 $Q_{c18}$ 、 $Q_{c19}$ 、 $Q_{c21}$ 、 $Q_{c23}$ 、 $Q_{c24}$ 、 $Q_{c26}$ 、 $Q_{c29}$ 、 $Q_{c30}$  分别为各节点无功补偿量,  $T_{6-9}$ 、 $T_{6-10}$ 、 $T_{4-12}$ 、 $T_{28-27}$  分别为各变压器变比,  $U_2$ 、 $U_5$ 、 $U_8$ 、 $U_{11}$ 、 $U_{13}$ 、 $U_1$  分别为各发电机节点电压。

优化后直流系统各状态变量如表 2 所示。

表 2 中, 各状态变量均在合理的范围内。且本文使用的模拟退火遗传算法优化出的触发角及关断角相对传统遗传算法较小。根据直流系统运行理论, 换流器消耗的无功功率随控制角的减小而减少, 证明本文方法优化结果使得换流器消耗更少的无功功率。

各节点电压如图 3 所示。

表 2 优化后直流系统各状态变量值及对比

Table 2 Optimal DC system results and comparison

状态变量	优化后	
	传统遗传算法	模拟退火遗传算法
$U_4$	1.060 3	1.050 5
整流侧触发角	9.638	9.003 2
逆变侧关断角	16.857	16.048

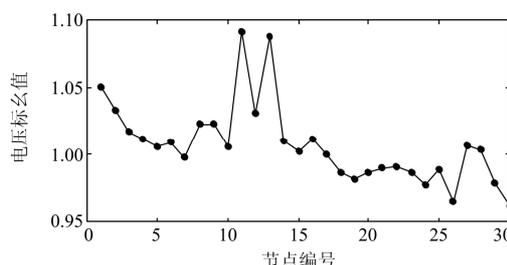


图 3 优化后各节点电压标么值

Fig. 3 Every node's voltage per unit value after adding load

由图 3 对比图 2 可以看出, 19~26、29、30 在优化前电压较低, 其中 26 与 30 节点已经低于电压下限, 在经过优化及各种控制方法调节后, 26 与 30 节点电压恢复到约束范围以内, 且其他节点电压也得到了明显改善。

### 4.3 对比分析

两种算法优化的目标值如表 3 所示。

表 3 优化后各目标值及对比

Table 3 Optimal objective results and comparison

目标值	优化前	优化后	
		传统遗传算法	模拟退火遗传算法
网损标么值	0.271 7	0.268 3	0.260 9
单位小时总成本	4.651	4.433	4.171
标么值			

由以上结果可以看出, 交直流混合输电系统的 IEEE30 节点算例在经过无功优化后, 网损和单位小时总成本明显变小, 本文使用的模拟退火遗传算法在优化结果上明显优于传统遗传算法。图 4 展示了两种算法目标函数与遗传代数之间的关系。

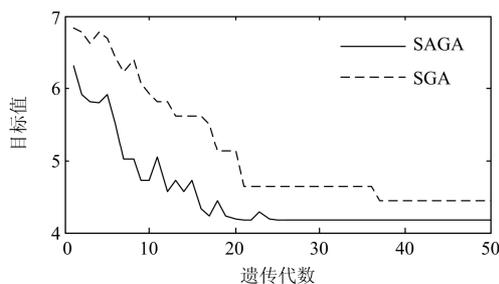


图 4 目标值与遗传代数关系

Fig. 4 Relation between objective and genetic algebra

由图 4 可以看出, 模拟退火遗传算法由于加入退火操作, 在初期选择比目标值差的几率较大, 然而整体收敛速度较快, 在 19 代时, 已寻找到最优解, 在 25 代以后, 达到分界温度, 不会再选择比目标值差的解。简单遗传算法前期收敛速度较快, 但到 21 代之后, 陷入局部最优, 在 37 代寻找大最优解, 该最优解明显低于模拟退火遗传算法寻找到的最优解。

通过以上分析, 模拟退火遗传算法与简单遗传算法相比有以下几个优点:

1) 具有更好的摆脱局部最优, 实现全局寻优的能力, 优化得到更好的结果。

2) 在相同的算法设置条件下, 具有更好的收敛能力和更快的收敛速度, 以更少的代数寻找到了更优的解。

## 5 结论

本文提出了一种使用模拟退火遗传算法对交直流系统进行无功优化和电压控制的方法, 建立了包含网损、发电机和无功补偿器发出无功在内的单位小时总成本为目标的无功优化模型, 并给出了模拟退火遗传算法求解步骤。最后通过带有直流输电系统的 IEEE30 节点的输电模型对本文方法进行验证, 通过与传统遗传算法优化结果对比, 证明了本文方法可以较大的概率寻找到全局最优解, 收敛速度更快。

然而本文混合算法中使用的为简单遗传算法, 虽和模拟退火法结合实现了全局寻优, 然而应用到实际系统中时间仍然较长。如果能在选择、交叉、变异、适应度函数等对遗传算法本身进行改进, 再与模拟退火法进行结合, 可以对该算法的性能进行进一步改进。

## 参考文献

- [1] 林俊昌, 莫文雄. 天广直流输电系统对广东电网的影响[J]. 广东电力, 2003, 16(1): 10-13.  
LIN Junchang, MO Wenxiong. Influence of TianGuang DC transmission system on Guangdong power network[J]. Guangdong Electric Power, 2003, 16(1): 10-13.
- [2] IBA K. Reactive power optimization by genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 685-692.
- [3] 聂永辉, 李天云, 刘凤兰, 等. 基于非线性内点理论的交直流系统无功优化新模型[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 35-40.  
NIE Yonghui, LI Tianyun, LIU Fenglan, et al. A new AC-DC reactive optimal power flow model based on nonlinear interior point method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 35-40.
- [4] 马玲, 于青, 刘刚, 等. 基于量子差分进化算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 39-43.  
MA Ling, YU Qing, LIU Gang, et al. Power system reactive power optimization based on quantum DE algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 39-43.
- [5] LEE K Y, BAI X, PARK Y M. Optimization method for reactive power planning by using a modified simple genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(4): 1843-1850.
- [6] 刘方, 颜伟, YU D C. 基于遗传算法和内点法的无功优化混合策略[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 67-72.  
LIU Fang, YAN Wei, YU D C. A hybrid strategy based on GA and IPM for optimal reactive power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 67-72.
- [7] 张勇军, 苏杰和, 羿应棋. 基于区间算术的含分布式电源电网无功优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 21-26.  
ZHANG Yongjun, SU Jiehe, YI Yingqi. Reactive power optimization based on interval arithmetic with distributed power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 21-26.
- [8] 赵晋泉, 吉跃瑾, 戴则梅. 一种多分区互联电网分布式无功优化算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 9-15.  
ZHAO Jinquan, JI Yongjin, DAI Zeimei. A distributed reactive power optimization method for multi-area interconnected power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 9-15.
- [9] 蔡游明, 李征, 蔡旭. 风电场群无功电压优化控制[J]. 电器与能效管理技术, 2016(5): 53-58.  
CAI Youming, LI Zheng, CAI Xu. Wind farm cluster voltage and reactive power coordination optimization control strategy[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(5): 53-58.
- [10] 陈光宇, 何健, 施蔚锦, 等. 基于量子混合蛙跳算法的含分布式电源配电网无功优化[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(5): 36-41.  
CHEN Guangyu, HE Jian, SHI Weijin, et al. Reactive power optimization in distribution network with distributed generators based on quantum shuffled frog leaping algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(5): 36-41.
- [11] 雷鸣东, 杨跃辉, 杨钦泽, 等. 兴—安直流低负荷无功优化功能运行分析[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 200-204.

- LEI Mingdong, YANG Yuehui, YANG Qinze, et al. Operation analysis of Xing-An HVDC low load reactive power optimization function[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 200-204.
- [12] 周晓娟, 蒋炜华, 马丽丽. 基于改进遗传算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 38-41.  
ZHOU Xiaojuan, JIANG Weihua, MA Lili. Reactive power optimization of power system based on improved genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 38-41.
- [13] 刘科研, 盛万兴, 李运华. 基于改进遗传模拟退火算法的无功优化[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 13-19.  
LIU Keyan, SHENG Wanxing, LI Yunhua. Research on reactive power optimization based on improved genetic simulated annealing algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 13-19.
- [14] 蒋平, 梁乐. 基于内点法和遗传算法相结合的交直流系统无功优化[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 724-729.  
JIANG Ping, LIANG Le. Reactive power optimization of hybrid AC/HVDC power system combining interior point algorithm and genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 724-729.
- [15] 蒋平, 严栋, 刘盛松. 基于 GD-FNN 的特高压直流输电暂态稳定控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 1-6.  
JIANG Ping, YAN Dong, LIU Shengsong. Transient stability control of UHVDC based on generalized dynamic fuzzy neural network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 1-6.
- [16] 姚煜, 蔡燕春. 离散粒子群与内点法结合的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 48-52.  
YAO Yu, CAI Yanchun. A hybrid strategy based on DPSO and IPM for optimal reactive power flow[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 48-52.
- [17] 李战鹰, 任震, 陈永进. 直流输电系统网损研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(1): 9-12.  
LI Zhanying, REN Zhen, CHEN Yongjin. Loss study of HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(1): 9-12.
- [18] 戴彦, 倪以信, 文福栓, 等. 电力市场下的无功电价研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(5): 9-14, 53.  
DAI Yan, NI Yixin, WEN Fushuan, et al. Analysis of reactive power pricing under deregulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(5): 9-14, 53.
- [19] 吴国丙, 任震, 祁达才. 电力市场下的无功服务及其成本分析[J]. 继电器, 2002, 30(8): 14-17, 32.  
WU Guobing, REN Zhen, QI Dacai. The analysis of reactive power service and its cost under electricity market environment[J]. Relay, 2002, 30(8): 14-17, 32.
- [20] FARAHM H, RASHIDINEJAD M, MOUSAVI A, et al. Hybrid mutation particle swarm optimization method for available transfer capability enhancement[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 42(1): 240-249.
- [21] LEE K Y, PARK Y M, ORTIZ J L. A united approach to optimal real and reactive power dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, PAS-104(5): 1147-1153.

收稿日期: 2015-07-09; 修回日期: 2015-08-04

作者简介:

黄俊辉(1965-), 男, 本科, 高工, 研究方向为电网规划研究及管理; E-mail: 13851474795@139.com

汪惟源(1975-), 男, 硕士, 高工, 研究方向为电网规划与自动控制; E-mail: 13813930378@139.com

王海潜(1963-), 男, 本科, 高工, 研究方向为电网规划研究。E-mail: 15951900696@139.com

(编辑 葛艳娜)