

# 收网算法及其在低压配电网潮流优化中的应用

刘皓明, 朱芳芳, 钱程晨

(河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 针对低压配电网存在三相不对称现象及有较多分布式电源的现状, 建立了综合考虑分布式电源、有载调压变压器、无功补偿器和插电式混合动力汽车的配电网优化模型。提出了一种新颖的由边界初始种群逐步向内压缩式搜索的启发式算法: 收网算法。给出了收网算法的更新迭代公式和计算步骤, 并从数学上严格推导证明了该算法的收敛性。为有效解决低压配电系统三相不对称或非全相运行问题, 提出一种改进的分相前推回代算法。将收网算法应用于某测试算例和 IEEE 123 节点系统, 优化结果表明所提算法有效可行。

**关键词:** 配电; 最优潮流; 分布式电源; 收网算法; 收敛性; 改进前推回代算法; 优化

**中图分类号:** TM 744

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.008

## 0 引言

配电网的潮流优化是保证其安全、经济运行的有效技术, 同时也是提高配电网电压质量的重要方法之一。本文以有载调压变压器 OLTC(On-Load Tap Changer)、无功补偿器、可控分布式电源和插电式混合动力汽车 PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle) 作为控制设备, 将现代配电网网损最小作为主要目标建立了优化模型, 并考虑系统各节点各相电压的限制, 对现代配电网进行潮流优化分析计算<sup>[1]</sup>。

针对配电网的潮流优化, 目前已提出一些解决方法。典型的传统优化法有线性规划法<sup>[2]</sup>、非线性规划法<sup>[3]</sup>和混合整数规划法<sup>[4]</sup>, 当初始解在最优解附近时, 这些方法通常具有良好的寻优能力, 但此类方法对系统目标函数及约束条件的连续性、可微性等方面有较高要求。而现代启发式智能优化算法, 如遗传算法<sup>[5-6]</sup>、粒子群算法<sup>[7-8]</sup>等, 以一组初始解代替一个初始解进行寻优, 对目标函数及约束条件的要求比较低, 能够较为方便地解决不可微、不连续等传统优化方法不能处理的问题, 已成功应用于电力系统无功设备优化配置<sup>[7]</sup>、经济负荷分配<sup>[8]</sup>等。通过精心选取启发式智能优化算法参数, 可以获得较高的优化性能。

本文以网损最小和电压分布合理为目标, 建立了现代低压配电网优化模型, 并提出了一种新颖的模拟渔民收网捕鱼的启发式智能优化算法: 收网算法 SNA(Shrinking Net Algorithm)。该算法从搜索空间边界出发, 逐步向空间内部进行压缩搜索, 需要设置的参数少, 全局收敛性强, 寻优效果好。本文从数学上证明了其具有良好的收敛性, 并将其用于三相不

对称的现代低压配电网优化问题, 取得较理想的优化结果。

## 1 现代低压配电网潮流优化模型

传统低压配电网一般只包含 2 种节点: 平衡节点和 PQ 节点。而随着配电网的发展, 多种分布式电源和新型负荷的增加, 低压配电网中增加了其他类型的节点。同时低压配电网还存在着三相线路阻抗不对称、负荷三相不平衡、阻抗比较大等因素。

本文优化模型以网损最小和节点电压优化分布为目标, 将节点电压越限作为惩罚项计入目标函数。计及潮流等式约束、并联电容无功补偿约束、变压器变比调节范围约束、可控分布式电源出力约束和 PHEV 充电功率约束, 建立优化模型如下:

$$\min f = \sum_i \sum_{j \in i} \sum_k I_{ij(k)}^2 Z_{ij(k)} + \lambda \sum_i \sum_k \frac{\Delta U_{i(k)}}{U_{i(k)}^{\max} - U_{i(k)}^{\min}} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } U_{j(k)} = U_{i(k)} - Z_{ij(k)} I_{ij(k)} \quad i, j = 1, 2, \dots, N_B \quad (2)$$

$$Q_{c(k)}^{\min} \leq Q_{c(k)} \leq Q_{c(k)}^{\max} \quad c = 1, 2, \dots, N_C \quad (3)$$

$$T_{t(k)}^{\min} \leq T_{t(k)} \leq T_{t(k)}^{\max} \quad t = 1, 2, \dots, N_T \quad (4)$$

$$P_{g(k)}^{\min} \leq P_{g(k)} \leq P_{g(k)}^{\max} \quad g = 1, 2, \dots, N_G \quad (5)$$

$$P_{p(k)}^{\min} \leq P_{p(k)} \leq P_{p(k)}^{\max} \quad p = 1, 2, \dots, N_P \quad (6)$$

其中,  $Z_{ij(k)}$  和  $I_{ij(k)}$  分别为支路  $ij$  第  $k$  相阻抗和流过的电流,  $k \in \{A, B, C\}$ ;  $j \in i$  表示下游节点  $j$  与上游节点  $i$  间存在支路直接相连;  $\lambda$  为惩罚系数, 可取一较大正数;  $U_{i(k)}$  和  $U_{j(k)}$  分别为节点  $i$  和  $j$  第  $k$  相电压;  $\Delta U_{i(k)}$ 、 $U_{i(k)}^{\max}$  和  $U_{i(k)}^{\min}$  分别为节点  $i$  第  $k$  相的电压越限量和电压上、下限;  $Q_{c(k)}$ 、 $T_{t(k)}$ 、 $P_{g(k)}$  和  $P_{p(k)}$  分别为第  $k$  相第  $c$  个无功补偿装置无功补偿量、第  $t$  个变压器分接头位置、第  $g$  个分布式电源的出力和第  $p$  个 PHEV 充电功率;  $Q_{c(k)}^{\max}$  和  $Q_{c(k)}^{\min}$ 、 $T_{t(k)}^{\max}$  和  $T_{t(k)}^{\min}$ 、 $P_{g(k)}^{\max}$  和  $P_{g(k)}^{\min}$ 、 $P_{p(k)}^{\max}$  和  $P_{p(k)}^{\min}$  分别为各自的上、下限;  $N_B$ 、 $N_C$ 、 $N_T$ 、 $N_G$  和  $N_P$  分别为系统节点数以及无功补偿装置、变压器、分布式电源和 PHEV 接入的节点数。

收稿日期: 2013-06-02; 修回日期: 2014-02-19  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51207044)  
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207044)

$$I_{ij(k)} = I_j(k) + \sum_{m \in j} I_{jm(k)} \quad (7)$$

$$\Delta U_{i(k)} = \begin{cases} U_{i(k)} - U_{i(k)}^{\max} & U_{i(k)} > U_{i(k)}^{\max} \\ 0 & U_{i(k)}^{\min} \leq U_{i(k)} \leq U_{i(k)}^{\max} \\ U_{i(k)}^{\min} - U_{i(k)} & U_{i(k)} < U_{i(k)}^{\min} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $I_{j(k)}$  为节点  $j$  第  $k$  相负荷电流。

由于惩罚项  $\lambda \sum_i \sum_k [\Delta U_{i(k)} / (U_{i(k)}^{\max} - U_{i(k)}^{\min})]$  的存在, 目标函数非线性且不可微, 群体智能优化算法比较适合于求解此类优化问题<sup>[9]</sup>。

## 2 现代低压配电网潮流计算方法

本文引入一种改进前推回代算法, 对含弱环的现代配电网进行开环点功率补偿迭代计算, 使之能够计算含新型分布式电源的配电网三相不对称潮流<sup>[10]</sup>。

### 2.1 负荷模型

#### 2.1.1 一般负荷

负荷一般可以等效成 3 类: 恒功率(PQ)、恒电流(I)和恒阻抗(Z)。

#### 2.1.2 分布式电源

分布式电源的种类较多, 根据其接入配电网后所表现出来的特性, 可以作以下分类<sup>[11]</sup>: 微型燃气轮机、燃料电池等可控分布式电源为 PV 型节点; 光伏、储能为 I 型节点; 工频热电联产异步机组为有功恒定而无功随着节点电压变化而变化的 PQ(V) 型节点; 工频热电联产同步机组等为 PQ 型节点。

对于 I 型节点和 PQ 型节点, 直接转换为节点注入电流进行前推回代算法计算。而对于 PV 型节点, 需要对前推回代法作相应改进。

#### 2.1.3 PHEV

PHEV 通常从电网吸收恒定的充电有功功率, 在特殊条件下也可服从电网调度, 充电功率大小可变甚至向电网释放电能。本文将其视为 PQ 型节点, 并从研究的角度出发, 假设其充放电功率可控<sup>[12]</sup>。

### 2.2 环网和 PV 型节点处理

传统前推回代法无法直接处理 PV 型节点和环网, 因此需要对其解环<sup>[13]</sup>。

假设配电网中存在  $n_1$  个环网和  $n_{PV}$  个 PV 型节点(与大电网相连的根节点除外), 将环网和 PV 型节点(后文统称为环网)都解开至纯辐射状, 则有  $n_1 + n_{PV}$  个开环点, 有:

$$\mathbf{Z}\mathbf{I} = \Delta\mathbf{U} \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{Z} = \mathbf{R} + \mathbf{j}\mathbf{X}$  为环网阻抗,  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{X}$  分别为环路电阻和环路电抗;  $\mathbf{I}$  为环路注入电流;  $\Delta\mathbf{U}$  为开环点两侧电压差。

假定相邻节点的电压幅值差较小, 并且都接近 1 p.u., 同时相角相差很小, 则有:

$$\mathbf{I} = \mathbf{S} \quad (10)$$

推导得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X} & \mathbf{R} \\ -\mathbf{R} & \mathbf{X} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{Q} \\ \Delta\mathbf{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{U}' \\ \delta\mathbf{U} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中,  $\mathbf{S}$  为环路注入视在功率;  $\Delta\mathbf{P}$  和  $\Delta\mathbf{Q}$  分别为开环点补偿的有功功率和无功功率;  $\Delta\mathbf{U}'$  和  $\delta\mathbf{U}$  分别为开环点电压差的横分量和纵分量,  $\Delta\mathbf{U} = \Delta\mathbf{U}' + \mathbf{j}\delta\mathbf{U}$ 。

在求解含 PV 型节点和环网的配电系统潮流时, 先计算解环后的潮流, 得到开环点电压差, 然后根据式(11)计算该点补偿功率。下一次迭代计算潮流时在该开环点上加上补偿功率, 重复计算, 直至开环点的电压差满足收敛条件。

### 2.3 潮流计算流程

潮流计算流程如下。

- a. 读取配电网数据, 形成节点支路关联矩阵。
- b. 判断环网和 PV 节点, 对其解环重新生成网络矩阵。
- c. 初始化电压。
- d. 计算末梢节点注入电流, 对于 I 型节点直接叠加, 其他几种类型的节点转换成恒功率节点, 等同于 PQ 型节点进行处理。
- e. 根据式(7)前推计算各支路电流。
- f. 根据式(2)回代求解各节点电压。
- g. 计算开环点  $\Delta\mathbf{U}'$  和  $\delta\mathbf{U}$ , 由式(11)计算补偿功率  $\Delta\mathbf{P}$  和  $\Delta\mathbf{Q}$ , 并叠加到相应的节点上。
- h. 检查所有开环点电压是否满足收敛条件, 若满足, 则停止计算, 输出结果; 否则, 返回步骤 d 继续进行迭代计算。

## 3 收网算法

为求解本文建立的优化模型, 提出了一种收网算法。它是一种从变量空间的边界出发, 向着全局最优解方向进行压缩式搜索的优化方法。

### 3.1 术语

维数: 优化变量的个数, 用  $D$  表示。

结点: 一个可行解, 记为  $\mathbf{X}_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD}]$ ,  $X_{id}$  表示第  $i$  个结点的第  $d$  维分量,  $d = 1, 2, \dots, D$ 。

顶点: 一类特殊的结点, 由各维变量上、下限的组合所构成, 对于  $D$  维搜索空间, 顶点中包含的结点数为  $2D$  个。

网面: 所有初始化结点构成的集合, 由顶点和在每一维上、下限处超平面所围成的边界面上选取的若干个随机结点构成, 若每个处于边界的超平面均取  $N$  个随机结点, 那么网面中包含的结点个数为  $P = 2^D + 2ND$ 。

最优结点: 当前迭代中出现的一个最优解。

收拢: 群体的一次更新迭代操作。

开拓系数: 收拢操作中影响群体变化的一个关键系数。

越界:一个结点的某一维在更新变化过程中超出其自身的上、下限。

### 3.2 基本流程

收网算法基本流程如下。

**a.** 初始化网面。当优化空间维数  $D$  较低时,网面由顶点和各维超平面处的随机结点构成;当优化空间维数较高时,为避免出现维数灾害,可将网面进行精简,忽略所有顶点,即网面仅由  $P=2ND$  个处于各维超平面上的随机结点构成。

**b.** 将网面上的各个结点代入目标函数进行计算,得到当前全局最优解  $\mathbf{X}^{\text{best}}$ 。

**c.** 收拢。对各结点按下式进行更新计算:

$$\mathbf{X}_i^{(m+1)} = \mathbf{X}_i^{(m)} + C \frac{m}{M} \tilde{\xi}^{(m)} (\mathbf{X}^{\text{best}} - \mathbf{X}_i^{(m)}) - (C-1) \frac{m}{M} \tilde{\zeta}^{(m)} (\mathbf{X}^{\text{best}} - \mathbf{X}_i^{(m)}) \quad (12)$$

其中,  $i=1,2,\dots,P$ ;  $m=1,2,\dots,M-1$ ;  $P$  为网面结点总数;  $M$  为最大迭代次数;  $\mathbf{X}_i^{(m)}$  为第  $m$  轮迭代中的第  $i$  个结点;  $\mathbf{X}^{\text{best}}$  为当前最优结点;  $C$  为开拓系数,其取值大小影响收网算法的全局和局部寻优能力;  $\tilde{\xi}^{(m)} = [\tilde{\xi}_1^{(m)}, \tilde{\xi}_2^{(m)}, \dots, \tilde{\xi}_D^{(m)}]$  和  $\tilde{\zeta}^{(m)} = [\tilde{\zeta}_1^{(m)}, \tilde{\zeta}_2^{(m)}, \dots, \tilde{\zeta}_D^{(m)}]$  分别为  $[0,1]$  之间均匀分布的随机向量。

**d.** 越界判断。若某次迭代更新后某些维超出自身的上、下限,则对其进行限值。

**e.** 返回流程 **b**,直至  $m=M-1$ ,输出优化结果。

由于每一轮的最优结点经过式(12)计算以后依然是其本身,因此只有在出现更优的结点时,此前的“最优结点”才会被更新,这一点保证了群体的非劣性。

### 3.3 收敛性分析

将式(12)进行整理,得:

$$\frac{\mathbf{X}^{\text{best}} - \mathbf{X}_i^{(m+1)}}{\mathbf{X}^{\text{best}} - \mathbf{X}_i^{(m)}} = 1 - C \frac{m}{M} \tilde{\xi}^{(m)} + (C-1) \frac{m}{M} \tilde{\zeta}^{(m)} \quad (13)$$

假设在迭代过程中,  $\mathbf{X}^{\text{best}}$  不变,对式(13)进行分析,并令:

$$\mathbf{Q}^{(m)} = 1 - C \frac{m}{M} \tilde{\xi}^{(m)} + (C-1) \frac{m}{M} \tilde{\zeta}^{(m)} \quad (14)$$

有:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_i^{(m+1)} &= \mathbf{X}^{\text{best}} (1 - \mathbf{Q}^{(m)}) + \mathbf{X}_i^{(m)} \mathbf{Q}^{(m)} = \\ & \mathbf{X}^{\text{best}} (1 - \mathbf{Q}^{(m)} \mathbf{Q}^{(m-1)}) + \mathbf{X}_i^{(m-1)} \mathbf{Q}^{(m)} \mathbf{Q}^{(m-1)} = \dots = \\ & \mathbf{X}^{\text{best}} \left( 1 - \prod_{j=1}^m \mathbf{Q}^{(j)} \right) + \mathbf{X}_i^{(1)} \prod_{j=1}^m \mathbf{Q}^{(j)} \end{aligned} \quad (15)$$

其中,  $\mathbf{Q}^{(m)}$  为当前结点在最近 2 次迭代中与最优个体间距离的比值。若  $|\mathbf{Q}^{(m)}| > 1$ ,表示随着迭代的进行,当前结点与最优结点的距离越来越远;若  $|\mathbf{Q}^{(m)}| < 1$ ,则表示当前结点与最优结点之间的距离越来越远。

根据式(14),  $\mathbf{Q}^{(m)} = [Q_1^{(m)}, Q_2^{(m)}, \dots, Q_D^{(m)}]$  中第  $d$  个

元素  $Q_d^{(m)} (d=1,2,\dots,D)$  可表示为:

$$Q_d^{(m)} = 1 - C \frac{m}{M} \tilde{\xi}_d^{(m)} + (C-1) \frac{m}{M} \tilde{\zeta}_d^{(m)} \quad (16)$$

由于  $\tilde{\xi}_d^{(m)}$  和  $\tilde{\zeta}_d^{(m)}$  都是在  $[0,1]$  上相互独立且均匀分布的随机数,因此其期望为:

$$\begin{aligned} E(Q_d^{(m)}) &= \\ & \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} Q_d^{(m)} = 1 - C \left( \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{m}{M} \right) \left( \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} \tilde{\xi}_d^{(m)} \right) + \\ & (C-1) \left( \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{m}{M} \right) \left( \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} \tilde{\zeta}_d^{(m)} \right) = \\ & 1 - \frac{1}{2} C \left( \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{m}{M} \right) + \frac{1}{2} (C-1) \left( \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{m}{M} \right) = \\ & 1 - \frac{1}{2} \frac{1}{M-1} \frac{1}{M} \frac{M(M-1)}{2} = 0.75 \end{aligned} \quad (17)$$

可以看出,只要  $m$  足够大,  $\prod_{j=1}^m \mathbf{Q}^{(j)}$  这一项即为 0,这一结论的成立不受开拓系数  $C$  取值的影响。由式(15)可知,  $\mathbf{X}_i^{(m+1)}$  最终趋向于  $\mathbf{X}^{\text{best}}$ ,并且与初始化时的  $\mathbf{X}_i^{(1)}$  无关。

$Q_d^{(m)}$  期望值为 0.75,说明网面上的各结点在期望上越来越靠近最优结点。实际上,  $Q_d^{(m)}$  取值与 2 个随机数  $\tilde{\xi}_d^{(m)}$  和  $\tilde{\zeta}_d^{(m)}$  以及开拓系数  $C$  的取值大小相关,合适的开拓系数能够加速收网算法的收敛。

### 3.4 开拓系数的选取

开拓系数  $C$  是收网算法唯一需要设置的参数,其值影响  $Q_d^{(m)}$  的大小,根据式(16),有:

$$Q_d^{(m)} \in \begin{cases} \left[ 1 + (C-1) \frac{m}{M}, 1 - C \frac{m}{M} \right] & C < 0 \\ \left[ 1 - \frac{m}{M}, 1 \right] & 0 \leq C \leq 1 \\ \left[ 1 - C \frac{m}{M}, 1 + (C-1) \frac{m}{M} \right] & C > 1 \end{cases} \quad (18)$$

当  $0 \leq C \leq 1$  时,  $Q_d^{(m)}$  处于  $(0,1]$  之间,表明  $\mathbf{X}_i^{(m+1)}$  是在同一个方向上逐渐逼近于  $\mathbf{X}^{\text{best}}$  的,反映了收敛算法的局部收敛能力;当  $C$  不在这个范围内时,  $Q_d^{(m)}$  的取值范围比较大,有可能出现小于 0 或大于 1 的情况,此时,反映了收网算法的全局寻优能力。

进一步分析最后若干轮的迭代情况。当  $m$  足够大,且  $C \in [0,1]$  时,  $Q_d^{(m)} \in (0,1]$ ,由于  $\tilde{\xi}_d^{(m)}$  和  $\tilde{\zeta}_d^{(m)}$  都是在  $[0,1]$  上相互独立且均匀分布的随机变量,那么可认为  $Q_d^{(m)}$  在其取值范围内也是均匀分布的。假设最后的若干轮迭代  $\mathbf{X}^{\text{best}}$  不再发生变化,若用  $\tilde{\alpha}^{(j)} = [\tilde{\alpha}_1^{(j)}, \tilde{\alpha}_2^{(j)}, \dots, \tilde{\alpha}_D^{(j)}]$  代替  $\mathbf{Q}^{(j)}$ ,则:

$$\mathbf{X}_i^{(m+1)} = \mathbf{X}^{\text{best}} \left( 1 - \prod_{j=1}^m \tilde{\alpha}^{(j)} \right) + \mathbf{X}_i^{(p)} \prod_{j=p}^m \tilde{\alpha}^{(j)} \quad (19)$$

由式(19)可以看出,在  $m$  足够大的情况下,  $\prod_{j=1}^m \tilde{\alpha}^{(j)}$  和  $\prod_{j=p}^m \tilde{\alpha}^{(j)}$  会趋于 0,因此无论前期最优结点的位置如

何变化,只要最后若干轮最优结点趋于稳定,所有结点均会收敛于最优结点。

由上述分析可以给出开拓系数  $C$  的选取原则:在前期迭代过程中设置较大值,例如  $C > 1$ ,以适当提高其全局寻优能力;在后期迭代中,设置为  $C \in [0, 1]$ ,以保证算法的局部收敛效果。

### 3.5 算法性能测试

为验证分析结果,选取典型的测试优化方法全局搜索性能的“Generalized Schwefel’s Problem”函数,函数表达式如下:

$$f(x, y) = -x \sin(\sqrt{|x|}) - y \sin(\sqrt{|y|}) \quad (20)$$

其中,  $x, y \in [-500, 500]$ 。测试函数搜索空间如图 1 所示。

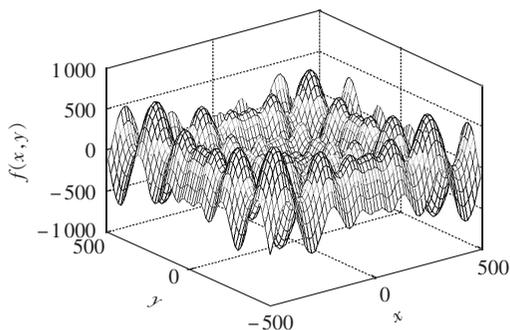


图 1 测试函数搜索空间

Fig.1 Search space of test function

使用收网算法与标准粒子群算法分别运行 200 次作对比测试,设置最大迭代次数  $M=50$ 。在收网算法中,2 维空间共有 4 个超平面(四边形共有 4 条边,见图 1)和 4 个顶点,在每个超平面上随机选择  $N=10$  个结点,则初始结点规模  $P=2^d+2ND=2^2+2 \times 10 \times 2=44$ ,设置 4 种定开拓系数和 1 种变开拓系数  $C=f(m)=20-19.5m/M$  情形;在粒子群算法中,同样取群体规模为 44,惯性权重  $\omega$  取值范围  $[0.5, 1.4]$ ,  $c_1=c_2=2^{[14]}$ 。2 种算法的对比结果如表 1 所示,其中粒子群算法仅列出收敛成功率最高的情况,此时惯性权重系数为  $\omega=0.7$ 。

表 1 优化结果统计

Tab.1 Statistics of optimization results

算法	最小值	平均值	标准差	成功率/%	
收网算法	$C=0.5$	-837.966	-812.056	45.927	77.5
	$C=5$	-837.966	-822.569	39.931	87.0
	$C=15$	-837.966	-833.886	20.969	98.5
	$C=30$	-837.966	-804.497	62.293	80.0
	$C=f(m)$	-837.966	-835.005	18.538	97.5
粒子群算法	-837.966	-753.529	89.557	46.5	

由表 1 可以得出以下结论。

a. 收网算法与粒子群算法均具备全局最优搜索能力,也会出现一定概率的陷入局部最优的情形。

b. 从整体上看,收网算法的全局寻优能力更强,

且稳定性好、精度高。

c. 当开拓系数为常数且小于 1 时,各个结点处于严格逼近于当前最优结点的过程中,因此损失了一定的全局寻优能力;随着开拓系数的增大,全局寻优能力得到显著的提高,当开拓系数选取过大时,会导致在搜索后期寻优精度降低,甚至会出现各结点在寻优过程中处于发散状态的情况,反而降低了寻优成功率。

d. 选取随着迭代次数自适应变化的开拓系数  $C$ ,既能使收网算法具有很高的全局寻优能力,又能保持较高的寻优精度,以此验证了 3.4 节中开拓系数  $C$  的选取原则。

## 4 算例分析

本文选择 IEEE 123 节点配电系统为算例<sup>[15]</sup>,网络拓扑如图 2 所示。在原系统 8 个节点上分别添加了若干可控分布式电源和 PHEV,本算例仅将 PHEV 作为普通可控负荷。此外,系统中还包含 2 类可控装置:有载调压变压器和无功补偿装置(Cap),具体参数如表 2 所示。计算中假设各节点各相电压上、下限分别为 1.05 p.u. 和 0.95 p.u.。

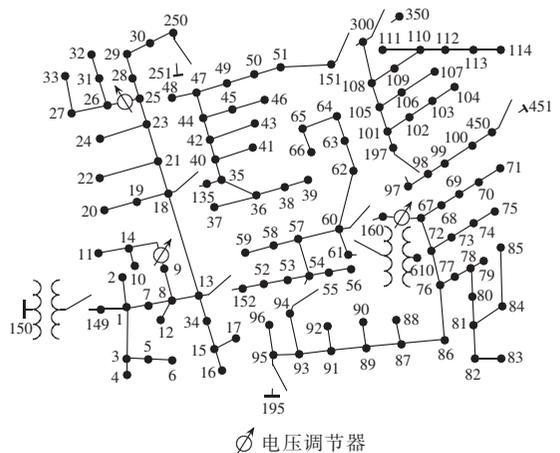


图 2 IEEE 123 节点系统

Fig.2 IEEE 123-bus system

利用本文建立的优化模型和提出的收网算法进行优化计算。设置最大迭代次数  $M=50$ ,选取开拓系数  $C=f(m)=20-19.5m/M$ 。对应 14 个可控设备,每个边界随机选择 2 个结点,则初始结点规模  $P=2^d+2ND=2^{14}+2 \times 2 \times 14=16440$ ,计算量很大。采用本文提出的降低初始结点规模的方法,忽略所有顶点,则初始结点规模为 56。收网算法收敛曲线见图 3。

该 123 节点系统满负荷状态运行时,系统有功网损为 96.103 kW,且各节点电压偏低,平均电压为 0.969 p.u.,节点 104 的 C 相电压最低,为 0.937 p.u.。经过优化后,系统有功网损为 65.208 kW,节点电压分布更合理,所有节点均满足电压上、下限限制,平

表 2 系统可控装置参数与优化结果  
Tab.2 Parameters of controllable devices  
in system and optimization results

节点	相别	类型	优化变量取值		
			范围	基态	优化后
26	C	DG	[0,280] kW	0 kW	226.337 kW
32	A	DG	[0,100] kW	0 kW	100 kW
60	A	DG	[0,40] kW	0 kW	40 kW
67	ABC	DG	[0,100] kW	0 kW	100 kW
76	ABC	DG	[0,100] kW	0 kW	100 kW
95	ABC	DG	[0,100] kW	0 kW	100 kW
36	B	PHEV	[-40,0] kW	-40 kW	0 kW
109	A	PHEV	[-4.8,0] kW	-4.8 kW	0 kW
83	ABC	Cap	[0,600] kvar	600 kvar	600 kvar
88	B	Cap	[0,50] kvar	50 kvar	50 kvar
90	B	Cap	[0,50] kvar	50 kvar	0 kvar
92	C	Cap	[0,500] kvar	50 kvar	50 kvar
150-149	ABC	OLTC	[0.9,1.1] p.u.	1 p.u.	1.0618 p.u.
61-610	ABC	OLTC	[0.9,1.1] p.u.	1 p.u.	1 p.u.

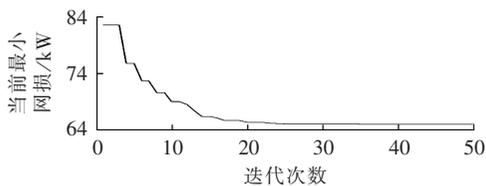


图 3 收网算法收敛曲线

Fig.3 Convergence curve of shrinking net algorithm

均电压为 1.017 p.u., 节点 114 的 A 相电压最低, 为 0.973 p.u.。优化后的各可控量优化结果见表 2。

优化后节点 90 无功补偿为 0 kvar, 这是因为在该节点注入无功会造成有功网损的增加, 同时经计算发现, 当节点 90 的 50 kvar 无功补偿全部投入后, 多个节点电压越限。

优化后 PHEV 充电功率降为 0 kW, 一方面降低了有功网损, 另一方面也显著提高了相邻各节点电压幅值。计算结果说明: 在低压配电网中, 由于线路电阻和电抗属于同一个数量级, 甚至电阻的幅值要大于电抗, 从而使得有功功率和无功功率对电压幅值都有较大影响。

优化后主变压器变比为 1.066 p.u., 从而提升了整个系统的电压水平, 而支路 61-610 上的变压器由于处于网络末端, 且二次侧无负荷, 因此变比不变, 仍为 1 p.u.。

## 5 结论

本文建立了含分布式电源的现代低压配电网潮流优化计算模型, 并针对性地提出了一种新颖的启发式智能优化算法: 收网算法。给出了收敛算法的更新迭代公式和计算步骤, 并证明了该算法具有良好的收敛能力, 通过 2 个算例得到如下结论。

a. 收网算法仅需要设置 1 个参数, 且具有良好的全局收敛能力和局部收敛速度, 选用合适的自适应

应开拓系数能提高收敛能力和收敛精度。

b. 对于含弱环的现代低压配电网, 使用改进的分相前推回代算法, 在开环点进行功率补偿的迭代计算, 可有效解决其三相不对称潮流问题。

c. 本文所提的收网算法能够很好地应用于现代低压配电网三相不对称潮流优化计算中, 精度高, 稳定性好, 并有望在电力系统优化问题中得到更为广泛的应用。

## 参考文献:

- [1] 李慧玲, 白晓民, 谭闻, 等. 电动汽车与分布式发电入网的协调控制研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2108-2115.  
LI Huiling, BAI Xiaomin, TAN Wen, et al. Coordination control for grid-connection of plug-in hybrid electric vehicles and distributed generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2108-2115.
- [2] 刘继春, 刘俊勇, 郑华. 基于线性规划灵敏度分析的发电机组市场力实时监控方法[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(10): 31-34.  
LIU Jichun, LIU Junyong, ZHENG Hua. Real time market power monitoring method based on linear programming OPF algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10): 31-34.
- [3] 王杨正, 蒋平. 基于约束非线性规划的励磁系统参数优化[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 65-68.  
WANG Yangzheng, JIANG Ping. Parameter optimization of excitation system based on constrained nonlinear programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 65-68.
- [4] ALGUACIL N, CONEJO A J. Multi period decomposition power flow using benders[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(7): 196-201.
- [5] 赵亮, 吕剑虹. 基于改进遗传算法的风电场多目标无功优化[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 84-88.  
ZHAO Liang, LÜ Jianhong. Multi-objective reactive power optimization of wind farm based on improved genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 84-88.
- [6] 洪博文, 郭力, 王成山, 等. 微电网多目标动态优化调度模型与方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 100-107.  
HONG Bowen, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Model and method of dynamic multi-objective optimal dispatch for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 100-107.
- [7] EAJAL A A, EL-HAWARY M E. Optimal capacitor placement and sizing in unbalanced distribution systems with harmonics consideration using particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1734-1741.
- [8] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 95-100.  
HOU Yunhe, LU Lijuan, XIONG Xinyin, et al. Enhanced particle swarm optimization algorithm and its application on economic dispatch of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 95-100.
- [9] 袁晓辉, 袁艳斌, 张勇传. 电力系统中机组组合的现代智能优化方法综述[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(2): 73-78.  
YUAN Xiaohui, YUAN Yanbin, ZHANG Yongchuan. A survey of modern intelligence optimization methods for unit commitment in electric power systems[J]. Electric Power Automation Equipment,

- 2003,23(2):73-78.
- [10] KHUSHALANI S,SOLANKI J M,SCHULZ N N. Development of three-phase unbalanced power flow using PV and PQ models for distributed generation and study of the impact of DG models[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(3):1019-1025.
- [11] LIU Haoming,CHENG Shun'an,HUANG Chunyan,et al. Unbalanced power flow calculation for low-voltage distribution systems including DGs[C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia. Tianjin,China:IEEE,2012:1-5.
- [12] 王建,吴奎华,刘志珍,等. 电动汽车充电对配电网负荷的影响及有序控制方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):47-52.  
WANG Jian,WU Kuihua,LIU Zhizhen,et al. Impact of electric vehicle charging on distribution network load and coordinated control[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):47-52.
- [13] 车仁飞,李仁俊. 一种少环配电网三相潮流计算新方法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(1):74-79.  
CHE Renfei,LI Renjun. A new three-phase power flow method for weakly meshed distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(1):74-79.
- [14] SHI Yuhui,EBERHART R. A modified particle swarm optimizer [C]//IEEE World Congress on Computational Intelligence. Anchorage,Alaska,USA:IEEE,1998:69-73.
- [15] IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee's Distribution Test Feeder Working Group. 123-bus test feeder case [EB/OL]. [2013-08-05]. <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>.

#### 作者简介:



刘皓明

刘皓明(1977-),男,江苏盐城人,副教授,博士,研究方向为智能电网、电力系统分析与控制、电力市场(**E-mail**:liuhaom@hhu.edu.cn);

朱芳芳(1989-),女,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为新能源发电并网运行;

钱程晨(1990-),男,江苏南通人,硕士

研究生,研究方向为配电系统优化控制。

## Shrinking net algorithm and its application in power flow optimization of low-voltage distribution system

LIU Haoming,ZHU Fangfang,QIAN Chengchen

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

**Abstract:** Aiming at the three-phase unbalance and multiple distributed sources in low-voltage distribution network,a distribution network optimization model is built,including distributed sources,on-load tap changers,reactive power compensators and plug-in hybrid electric vehicles. A kind of heuristic algorithm,the shrinking net algorithm,is proposed,which condenses gradually the search space inward from the initial boundary population. Its updating iterative formula and calculation steps are given and its convergence is mathematically derived. An improved forward backward sweep algorithm is proposed to effectively deal with the three-phase unbalance and incomplete-phase operation of low-voltage distribution network. The shrinking net algorithm is applied to a test case and IEEE 123-bus system. The optimization results show the proposed algorithm is effective and feasible.

**Key words:** electric power distribution; optimal power flow; distributed power generation; shrinking net algorithm; convergence; improved forward backward sweep algorithm; optimization