

配电网电容器优化投切的制约进化策略

郝文波, 于继来

(哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江省哈尔滨市 150001)

摘要: 针对传统进化规划方法寻优效率低的问题, 提出了配电网电容器优化投切的制约进化策略。利用配电网物理规则求得投切点无功补偿容量调节范围, 用于约束解的产生和进化, 缩小寻优空间。通过在解空间中心点附近合理配置初始点, 避免初始解不可行。采用小种群多代进化方式, 避免求解过程产生大量不可行解。最后选择适合电容器优化投切问题的随机动态步进方式, 在寻优的不同阶段, 采用不同的步长, 使优化效果和效率得到明显改善。使用制约进化策略对不同的配电系统进行分析, 结果表明: 制约进化策略在保证优化精度的同时, 具有更高的优化效率, 可以适应在线应用。

关键词: 配电网; 电容器投切; 启发式规则; 进化规划

中图分类号: TM76; TM727.2

0 引言

配电网电容器投切是降低功率损耗和提高电压质量的一种有效而经济的手段。该问题属于多约束非线性整数优化问题, 可使用传统的数学规划方法和人工智能方法进行求解。二次规划法^[1]、非线性规划法^[2]、动态规划法^[3]属于传统数学规划方法, 计算速度快, 但易陷入局部最优解。20世纪90年代以来, 逐步开始使用禁忌搜索或主动禁忌搜索^[4]、粒子群算法^[5]以及遗传算法^[6]等人工智能方法解决配电网电容器优化投切问题。人工智能方法从理论上可以保证达到全局最优解, 但普遍存在效率低下的不足。文献[7]参照变电站“九区图”规范各子代理 (Agent) 的行为, 对补偿电容器等进行适当的投切, 从而对配电网无功/电压进行在线控制。

进化规划 (EP—evolutionary programming) 算法属于现代全局优化算法, 具有较强的全局寻优能力。20世纪60年代, 文献[8]提出 EP 算法, 到80年代中期文献[9]做了大量改进, 形成了现在的 EP 算法。EP 算法通常用来求取实值函数的极小值 (极大值) 问题, 除了在代码的生成以及遗传操作方面存在不同外, EP 算法与遗传算法原理相似, 都是本着“优胜劣汰”的原则。传统的 EP 算法在初始种群形成及进化操作上遵从随机方式, 容易产生大量不可行解, 严重影响计算效率。本文在利用 EP 算法解决配电网电容器优化投切问题时, 引入适当

的物理制约规则迅速淘汰大量不可行解, 促使计算效能得到显著提高。另外, 本文还在进化算子、种群规模等方面对传统 EP 算法做了改进, 使算法的寻优效率得到进一步提高。

1 电容器优化投切的数学模型

配电网电容器优化投切的目的是通过选择合适的投切地点和投切容量, 在满足系统安全和质量约束的条件下尽可能减少系统的有功功率损耗。

1.1 目标函数

$$\min \Delta P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in i} V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (1)$$

式中: ΔP_{loss} 为系统有功损耗; 节点 i, j 的电压幅值为 V_i 和 V_j , 对应的相角差为 δ_{ij} ; G_{ij}, B_{ij} 为节点 i, j 之间互电导、互电纳; $j \in i$ 表示与 i 相关联的节点集。

1.2 常规约束条件

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_{Gi} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - \\ P_{Li} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_i &= Q_{Ci} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) - \\ Q_{Li} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (4)$$

$$Q_{ij} \leq Q_{ij}^{\max} \quad (5)$$

$$Q_{Ci}^{\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{\max} \quad (6)$$

$$Q_{Ci} = k Q_{Ci0} \quad (7)$$

式(2)、式(3)为节点有功、无功功率平衡约束;

式(4)为节点电压上、下限约束;式(5)为支路传送无功功率约束;式(6)、式(7)为电容器投放点的可投无功容量约束; Q_{Ci} 为电容器组的无功补偿容量, Q_{Ci0} 为投放点*i*的单台电容器容量; k 为投切组数。

上述约束是问题的基本约束,对制约寻优起作用,但还不够,还需要进一步引入其他物理制约规则,才有可能对无效寻优实施强劲制约作用。

2 制约进化策略

2.1 基于物理规则或运行经验的制约措施

EP算法为了寻找最优解,要求初始解的产生以及变异过程尽可能随机,但完全的随机搜索又会导致出现大量的不可行解,它们或者不满足各种约束,或者明显偏离最优解,造成计算效率明显低下。式(6)只从静态约束方面给出了补偿容量范围,制约能力不足。下文进一步利用配电网的物理规则和运行经验求出各补偿点无功补偿容量的大致范围,使解的搜索空间缩小,在保证优化效果的前提下,提高算法效率。

2.1.1 系统总无功功率平衡规则

配电系统中,负荷的无功主要由根节点以及系统中投放的电容器组供给。系统总的无功功率应满足:

$$\sum Q_{Gi} + \sum Q_{Ci} - \sum Q_{Li} - \Delta Q_{\text{loss}} = 0 \quad (8)$$

式中: Q_{Gi} 为根节点的无功输出功率; Q_{Li} 为无功负荷; ΔQ_{loss} 为系统无功功率损耗; Q_{Ci} 电容器组的无功补偿容量,是控制变量,其调节量将直接影响根节点的无功输出以及系统中的节点电压和支路上的传输功率,其调节量应受到式(8)的约束。

由系统无功功率平衡原则可求出整个系统投放电容器组的总无功补偿容量调节范围:

$$Q_{\text{CmaxWP}} = \sum Q_{Li} + \Delta Q_{\text{loss}}^{\text{max}} - \sum Q_{\text{Gimin}} \quad (9)$$

$$Q_{\text{CminWP}} = \sum Q_{Li} + \Delta Q_{\text{loss}}^{\text{min}} - \sum Q_{\text{Gimax}} \quad (10)$$

各无功补偿点的补偿容量调节范围也应包含在上述范围之内:

$$Q_{Ci}^{\text{min}} \leq Q_{Ci} \leq Q_{\text{CmaxWP}} \quad (11)$$

式中: $Q_{\text{CimaxWP}} = \min(Q_{Ci}^{\text{max}}, Q_{\text{CmaxWP}})$ 。

需要说明的是,系统中各补偿点的无功容量调节范围不仅与节点自身的可投放容量限制有关,还受系统总无功补偿容量的制约。由于在总的补偿容量上有限制,所以进化过程中各补偿点的容量是相互制约的,而不是任意地随机生成,考虑到这一点,可以避免很多不可行解的产生,加快搜索过程。

2.1.2 无功就地平衡规则

在适当位置配置合理的电容器,目的在于使其

满足附近的无功需求,从而减少无功功率在线路中的大量流动,并进而减少有功损耗。由此思想以及配电网辐射状的特点可知:电容器投放点的投放容量至少应满足本节点下游各顺流节点的无功需求,即

$$Q_C \geq Q_{\text{CiminJD}} = \sum_{j \in M} Q_{Lj} \quad (12)$$

式中: M 表示补偿点*i*及其向下各顺流节点集合。

以上是针对一条路径上只有1个投切点的情况。若一条路径上有多个投切点,则从最靠近末节点的投切点开始,向上依次确定各个投切点的补偿容量调节范围。其步骤为:

1)从末节点开始查找,找到第1个补偿点,记为*i*,根据式(12)确定最小调节容量 Q_{CiminJD} 。

2)从*i*向上找到第2个补偿点,记为*i-1*,在*i-1*的子节点中,找到和*i*同一路径上的子节点,记为*k*,求出从末节点到*k*的所有无功负荷之和:

$$Q_{Lk}^S = \sum_{j \in N} Q_{Lj} \quad (13)$$

式中: N 为从末节点到*k*的所有负荷节点集合。

因为*i-1*的负荷以及*i-1*下方的其他支路上的负荷无功(不包括*i*所在的支路)由*i-1*上的电容器平衡更能减少有功网损,这样得到了补偿点*i*的最大容量调节限值,即

$$Q_{Ci} \leq Q_{\text{CimaxJD}} = \min(Q_{Ci}^{\text{max}}, Q_{Lk}^S) \quad (14)$$

同时计算*i-1*所有下游节点集合*H*的无功负荷之和 Q_{Li-1}^S :

$$Q_{Li-1}^S = \sum_{j \in H} Q_{Lj} \quad (15)$$

得到补偿点*i-1*的无功容量调节范围的下限 $Q_{\text{Ci-1,minJD}}$:

$$Q_{\text{Ci-1}} \geq Q_{\text{Ci-1,minJD}} = Q_{Li-1}^S - Q_{\text{CimaxJD}} \quad (16)$$

如果在同一路径上电容器投放点*i-1*下面有2个或者多个投切点,可以如下处理。

按式(12)求得*i-1*下游各投放点*k*的无功补偿容量下限值 Q_{CkminJD} ,同时按式(13)、式(14)可得到它们的无功补偿容量的上限值 Q_{CkmaxJD} 。而*i-1*的无功补偿容量下限值按下式求得:

$$Q_{\text{Ci-1,minJD}} = Q_{Li-1}^S - \sum_{k \in G} Q_{\text{CkmaxJD}} \quad (17)$$

式中: G 为*i-1*下游各补偿点节点集合。

3)从*i-1*再向上找,若还有补偿点,设为*i-2*,与步骤2一样,可以得到*i-1*的无功容量调节范围的上、下限。同时,也可求得补偿点*i-2*的最小调节范围。如果没有补偿点了,停止寻找。

参照上述方法,可得网络其他点的补偿容量调节范围。

2.1.3 支路传输功率约束规则

补偿点的无功,除了部分满足本节点的负荷外,其余都要输入网络,满足附近其他负荷需求,因此,补偿容量不可避免地还要受到线路最大传输功率的限制。设补偿点 i 逆流线路最大传输功率为 $Q_{iNL}^{\max}$ 、顺流线路最大传输功率 $Q_{iSL}^{\max}$,则考虑支路传输功率限制后 i 的补偿容量最大调节范围为:

$$Q_{Ci} \leq Q_{CimaxGX} = Q_{Li} + Q_{iSL}^{\max} + Q_{iNL}^{\max} \quad (18)$$

2.1.4 无功补偿容量调节范围的确定

至此,配电网中每个无功补偿点的无功容量调节范围主要由上述 3 个物理规则和各个补偿点电容器组自身的静态容量限制确定,即联立不等式(6)、式(11)、式(12)、式(14)(若节点 i 所在路径上方没有其他补偿点,则不联立式(14))以及式(18),得到:

$$Q_{Cimin}' \leq Q_{Ci} \leq Q_{Cimax}' \quad (19)$$

式中:

$$Q_{Cimin}' = \max(Q_{Ci}^{\min}, Q_{CiminJD})$$

$$Q_{Cimax}' = \min(Q_{CimaxJD}, Q_{CimaxGX}, Q_{CimaxWP})$$

如果补偿点 i 下游还有其他补偿点,则用式(16)代替式(12)。

除此之外,系统所有补偿点的无功调节容量总和要满足式(9)和式(10),否则就要被淘汰。

在用 EP 算法求解电容器优化投切问题时,按照上面求得的无功容量调节范围指导初始解的产生以及制约进化过程。对于一个配电系统,只需计算 1 次各补偿点及系统的无功容量调节范围,当运行方式变化后,只要修改相应补偿点的容量调节范围上、下限,而无需重新全部计算,故此部分的计算量非常有限。

2.2 初始解及种群规模的制约措施

用列向量形式表示电容器优化问题解的种群:

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_i, \dots, \mathbf{X}_n\}$$

$$\mathbf{X}_i = [Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{ik}, \dots, Q_{im}]^T$$

式中: n 为种群规模; $\mathbf{X}_i$ 为第 i 个个体; m 为系统中电容器投放点的节点总数。

通常,算法的初始可行解在式(19)范围内随机产生。但是,当电容器投放点较多时,部分随机产生的初始解容易超出式(9)界定的范围。为避免此现象,本文采取在解空间的“中心点” $\mathbf{X}_{cet}$ 附近随机产生初始解的制约策略:

$$\mathbf{X}_{cet} = [Q_{cet1}, Q_{cet2}, \dots, Q_{cetk}, \dots, Q_{cetm}]^T$$

式中: $Q_{cetk} = (Q_{Ckmax}' - Q_{Ckmin}')/2$ 。

设 $Q_{cet}^S = \sum_{k=1}^m Q_{cetk}$, 如果投放点多,每个投放点的容量调节范围较大,则此值将远大于 Q_{CmaxWP} 。为控制初始点的取值范围,可定义系数 K :

$$K = \frac{Q_{CmaxWP}}{Q_{cet}^S}$$

使 $\mathbf{X}_{cet0} = K\mathbf{X}_{cet}$ 。 $\mathbf{X}_{cet0}$ 的无功补偿容量和 Q_{CmaxWP} 相当。初始种群中其他解 $\mathbf{X}_{i0}$ 将在 $\mathbf{X}_{cet0}$ 的基础上产生:

$$Q_{ik} = \begin{cases} KQ_{cetk} + r_1(Q_{Ckmax}' - Q_{cetk}) & r_3 > A \\ KQ_{cetk} - r_2(Q_{cetk} - Q_{Ckmin}') & r_3 \leq A \end{cases}$$

式中: r_3 为 $(0,1)$ 之间产生的随机数, $A \in (0,1)$, 考虑到中心点的无功补偿量已经等于 Q_{CmaxWP} , 所以让 A 大于 0.5, 即初始解的无功补偿容量尽可能小于或接近 Q_{CmaxWP} ; r_1, r_2 为 $(0,B)$ 内的随机数, $B \in (0,1)$, B 值小,产生的初始解距离 $\mathbf{X}_{cet0}$ 相对近些, B 值大则相对远些。

按上述方法产生的初始解,对不同规模的配电系统进行计算,相比随机产生初始解的方式,在优化效率上均有不同程度的提高。

除初始解的选取对计算性能有影响外,种群规模也将影响 EP 算法的效率。本文利用物理规则制约了初始点及寻优空间,并在 2.3 节对变异算子做了改进。实践证明,采取小种群多代进化的方式,更利于避免在求解过程中产生过多的不可行解。因此,本文采用小种群方式制约寻优。

2.3 变异量的随机动态步进策略

对配电网电容器优化投切问题中的整数约束,本文采取在进化过程中每步归整的策略,保证了优化后得到的整数解就是系统的最优整数解,与中间过程采取非整数求得结果最后再归整相比,优化效果更好。

在使用 EP 算法求解问题时,若步长(变异量)选取过大,则当逼近最优解时,归整运算很可能使其跳过最优解而陷入附近的局部最优点,且问题维数越高,此可能性就越大;若步长过小,搜索就会较慢,影响效率。由计算发现,使用 EP 算法解决电容器优化投切问题时,过程开始阶段搜索较快,网损下降多;在接近最优解时,速度变慢,网损下降趋缓。在综合考虑每步归整和优化过程先急后缓的特点后,本文采用如下随机动态步进方式进行变异:

$$Q_{i+n} = Q_i + Q_{i0} \left[\frac{N_i(0, \sigma^2)}{Q_{i0}} \right] \quad (20)$$

式中: $[\cdot]$ 表示小于或等于 x 的整数; Q_{i0} 表示补偿点 i 投放的单组电容器容量;

$$N_i(0, \sigma^2) = \beta \frac{f_i}{f_{\max}} (Q_{Ckmax}' - Q_{Ckmin}') \left(\sum_{j=1}^{12} r_j - 6 \right) \quad (21)$$

式中: β 为变异尺度因子; r_j 为 $(0,1)$ 内均匀分布的随机数; f_i 为个体 i 的适应度值, $f_{\max}$ 为种群中最大的适应度值。

变变量 $N_i(0,\sigma^2)$ 由 4 项构成:第 1 项为 β ;第 2 项为 $f_i/f_{\max}$,在迭代若干次后,其值接近 1;第 3 项为 $Q_{C_{\max}}'-Q_{C_{\min}}'$,是每个无功补偿点的容量调节范围,在迭代过程中为定值;第 4 项为 $\sum_{j=1}^{12}r_j-6$,为随机数。本文通过 β 的变化实现对 $N_i(0,\sigma^2)$ 的控制:在进化过程初期, β 取值较大,让变异量大些;在搜索过程趋缓时,调小 β 值,使变异量适当减小。搜索过程放缓时,预示着已逐渐向最优解逼近,这时让 $N_i(0,\sigma^2)$ 大概保持在 1 台或 2 台电容器容量大小,这样更利于寻找到更好的解,而不会由于步长过大导致越过最优解而陷入局部最优点。由于第 4 项为一随机数,其值出现在 1 附近的概率较大,故让 $\beta(Q_{C_{\max}}'-Q_{C_{\min}}')=Q_{C_{i0}}$,由此求得过程趋缓时的 β 值。不同的系统以及同一系统的不同投切点因其无功补偿容量调节范围不同, β 的取值也应不同。由于 β 按上述方法求取,保证了步长不致过大,又由于有第 4 项随机数的存在,使进化过程可以保持适当的随机,这样更利于优化问题的求解。

本文对 IEEE 123 节点系统进行了计算,该系统基准电压为 7.2 kV。表 1 列出了 3 种 β 取值策略的计算结果。选择在 5 个补偿点投放电容器,最大迭代次数为 5 000 次,最终得到的有功网损为 165.364 0 kW。由随机抽取的 5 次计算结果可见:策略 1 取 $\beta=0.1$,步长较大,优化性能较差;策略 2 为全程使用本文方法计算得到的 β 值(0.02),5 次计算都搜索到了最优解,计算时间也显著降低;策略 3 采用本文提出的随机步进策略,且初期阶段 β 取 0.1,后期取 0.02,与策略 2 相比,在保证寻找到最优解的同时,计算时间又有所降低。

表 1 3 种策略优化效果比较

Table 1 Comparison of three kinds of optimization results

次 数	策略 1		策略 2		策略 3	
	网损/kW	优化时间/s	网损/kW	优化时间/s	网损/kW	优化时间/s
1	165.364 0	94.787	165.364 0	17.555	165.364 0	11.908
2	165.364 9	664.265	165.364 0	22.062	165.364 0	17.766
3	165.365 2	640.872	165.364 0	37.574	165.364 0	10.154
4	165.365 2	559.575	165.364 0	31.786	165.364 0	10.104
5	165.364 0	90.470	165.364 0	11.256	165.364 0	8.011

另外,使用 EP 算法求解电容器优化投切问题时发现,寻优过程易陷入某些解而停滞不前。与上述问题不同,上述问题是进化过程比较缓慢,而本问题却是在搜索到当前解后往往要继续迭代几百次甚至上千次才能搜索到下一个适应度更大的解。比较这 2 个解发现:两者在多数投切点上的投切容量相同,只是在个别投切点上数值稍有不同,一般为 1 台

或 2 台单台电容器容量的差距。为此,对进化过程做如下改进:当搜索过程陷于某个解停滞不前时,利用当前解 X_{op} 产生一对新解 X_+,X_- ,使它们和 X_{op} 只在某一位上多 1 台(或少 1 台)单台电容器容量,其他位上完全相同,即

$$X_{+i} = \begin{cases} X_{opi} + Q_{i0} & i = N_{rd1} \\ X_{opi} & i \neq N_{rd1} \end{cases} \quad (22)$$

$$X_{-i} = \begin{cases} X_{opi} - Q_{i0} & i = N_{rd2} \\ X_{opi} & i \neq N_{rd2} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $i \in m$, m 为系统电容器投切点数; N_{rd1},N_{rd2} 为随机生成的整数,其值介于 1 和 m 之间。

新生成的 2 个个体将和父代个体以及按算法正常生成的子代个体一起竞争。要注意,这些过程产生的个体要满足 2.1.4 节确定的调节范围,否则直接淘汰。

上面改进的本质是强制进化当前解的某一位,使其更快地逼近更优的解,甚至直接达到最优解,避免自然进化造成更多的时间浪费。对 IEEE 123 节点系统重新计算,效率又有提高。改进后的优化过程时间对应表 1 中的次数分别为 6.038 s,9.814 s,7.191 s,6.689 s,7.071 s。

3 电容器优化投切的制约进化算法

算法具体步骤如下:

- 1)利用制约规则求出每个电容器投切点的无功补偿容量调节范围以及系统的最大无功补偿容量 $Q_{C_{\max}WP}$ 。
- 2)根据求得的容量调节范围找到解空间的中心点,在中心点附近制约性地随机产生初始解。
- 3)进行配电网潮流计算,求得每个解的适应度值。
- 4)利用本文提出的随机动态步进方式对父代个体进行变异,形成子代个体,并计算其适应度值。
- 5)计算出种群中每个个体对应的权重。
- 6)按权重将所有个体排序,把权重大的个体保存到下一代。另外,采用最佳个体保存原则,即进化过程中适应度值最大的解自动保存到下一代。
- 7)若进化代数达到预先设定的最大进化代数或者满足收敛精度的要求,则停止搜索;否则返回步骤 4 继续。

4 算例

4.1 IEEE 69 节点系统

以 IEEE 69 节点配电系统为例,该系统基准容量 $S_B=1\,000\text{ kVA}$,基准电压 $V_B=12.66\text{ kV}$,其他数据参见文献[10]。优化后得到各投切点的电容器

投切组数(见表 2)和投切后的各种效益指标(见表 3)。

表 2 69 节点系统电容器投切表

Table 2 Schedule for capacitor of IEEE 69-node system

电容器编号	所在节点	单组容量/ kvar	容量上限/ kvar	投切 组数/组
1	18	50	300	6
2	47	30	1 000	11
3	52	30	1 000	33

表 3 69 节点系统优化结果比较

Table 3 Comparison of optimization results of IEEE 69-node system

算法	原始 网损/kW	优化后 网损/kW	网损下 降量/kW	下降 比例/(%)	优化前 最低电压	优化后 最低电压
本文 算法	225.00	147.72	77.28	34.35	0.909	0.931
文献[1] 算法	225.00	148.30	76.7	34.10	0.909	0.930

由表 3 可见,与文献[1]二次规划算法相比,本文网损略有降低,最低电压略有抬升。

图 1 给出了种群规模为 10 时传统 EP 算法和本文制约 EP 算法的进化历程。可以看出:传统 EP 算法需要进化 8 次才能达到最优解,而制约 EP 算法只需 4 次,效率明显提高。

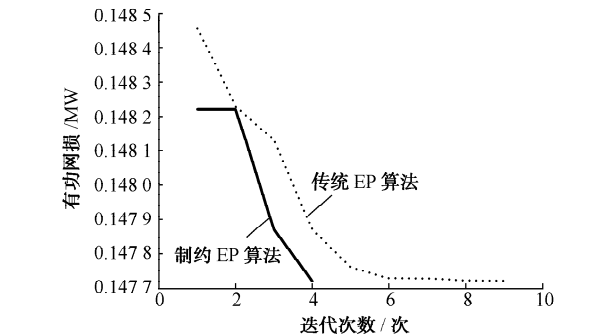


图 1 2 种算法的逐次迭代结果
Fig.1 Successive iteration results of the two methods

4.2 382 节点系统

为进一步考核方法求解更大规模配电系统的能力,本文构建了一个 382 节点、371 条支路、47 个电容器投放点的配电网。电容投放前系统有功网损为 1.092 2 MW,最低节点电压为 0.886 9(标么值)。使用改进后的制约进化策略对此系统随机进行 5 次电容器优化投切计算,结果见表 4。

由表 4 可见,用改进后的制约进化策略计算所得的网损下降 26.70%,最低节点电压也有所提升。对这样一个 400 节点左右的配电系统,计算时间稳定在 60 s 左右,按在线周期 5 min 考虑,本文提出的

方法完全可以应用到大型配电网的在线计算中。

表 4 优化结果

Table 4 Optimization results

计算 次数	有功 网损/MW	最低电压	网损 下降率/(%)	优化 时间/s
1	0.800 59	0.909 7	26.70	65.187
2	0.800 55	0.909 7	26.70	64.922
3	0.800 52	0.909 7	26.71	64.844
4	0.800 53	0.909 7	26.70	48.750
5	0.800 53	0.909 7	26.70	42.375

5 结语

EP 算法是一种全局寻优的现代智能算法,本文对传统 EP 算法施加物理约束规则求解配电网电容器优化投切问题,与传统 EP 算法相比,效果得到明显改善。

在进化过程中根据配电网的特点,利用适当的约束规则,求得各投切点的可调容量范围,在此范围内指导初始解的产生、约束解的变异,从而缩小了解的搜索空间。选择小种群规模合理配置初始点,能够使算法更快收敛到最优解。针对配电网电容器优化投切问题的特点设计的随机动态步进方式,在保证优化效果的同时,使计算效率得到明显提高。不同系统的测试表明,本文算法对电容器优化投切问题是非常有效的,具有在线应用前景。

参 考 文 献

[1] WANG Jincheng, CHIANG H D, MIU K N, et al. Capacitor placement and real time control in large scale unbalanced distribution systems: loss reduction formula, problem formulation, solution methodology and mathematics justification. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(2): 953-958.

[2] BARAN M E, WU F F. Optimal sizing of capacitors placed on radial distribution system. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(1): 735-743.

[3] HSU Y Y, KUO H C. Dispatch of capacitors on distribution system using dynamic programming. IEE Proceedings-C, 1993, 140(6): 433-438.

[4] 杨银国,张伏生,贺春光,等. 配电网无功电压优化控制求解的一种新方法. 电力系统自动化. 2005,29(9):45-49.

YANG Yinguo, ZHANG Fusheng, HE Chunguang, et al. A novel method for volt/var control in distribution systems. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9): 45-49.

[5] 方兴,郭志忠. 配电网时变无功电压优化方法. 电力系统自动化, 2005,29(9):40-44.

FANG Xing, GUO Zhizhong. Optimal time-varying reactive power and voltage control in distribution systems. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9): 40-44.

[6] 胡泽春,王锡凡. 配电网无功优化的分时段控制策略. 电力系统自动化, 2002,26(6):45-49.

- HU Zechun, WANG Xifan. Time-interval based control strategy of reactive power optimization in distribution networks. *Automation of Electric Power Systems*, 2002, 26(6): 45-49.
- [7] 刘志宏, 吴福保, 范敏, 等. 基于多 Agent 的配电网电压无功优化控制及其应用. *电力系统自动化*, 2003, 27(16): 74-77.
- LIU Zhihong, WU Fubao, FAN Min, et al. Voltage and reactive power optimization control for distribution systems based on multi-agent. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(16): 74-77.
- [8] SCHWEFEL H P. *Evolution and optimum seeking*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1995.
- [9] FOGEL L J, OWENS A J, WASH M J. *Artificial intelligence* through simulated evolution. New York, NY, USA: John Wiley, 1996.
- [10] BARAN M E, WU F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1989, 4(1): 725-734.

郝文波(1976—),男,博士研究生,研究方向为配电网优化运行. E-mail: hwb04510708@sina.com

于继来(1965—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统分析与控制. E-mail: yupwrs@hit.edu.cn

Restricted Evolutionary Strategy for Optimal Capacitor Switching in Distribution Systems

HAO Wenbo, YU Jilai (Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To reduce the computing time and improve the efficiency of traditional evolutionary programming, this paper proposes a restricted evolutionary strategy for the optimal capacitor switching in distribution systems. The reactive power compensation ranges are obtained by the physical constraints of the distribution network, and thus the initialization and evolution are restricted to a reduced optimization space. The algorithm's starting points proposed are arranged around the center of the optimization space to prevent infeasibility of the initial solutions. The smaller population and more generations strategy are used to reduce large numbers of infeasible solutions during the optimizing process. Based on the randomly dynamic-step evolutionary method, which takes different steps during different stages of the optimization, the effectiveness and efficiency of optimization are greatly improved. The strategy proposed is tested by different distribution systems, its high efficiency demonstrating its promising online application.

This work is supported by Heilongjiang Natural Science Foundation of China (No. E0326).

Key words: distribution system; capacitor switching; heuristic rule; evolutionary programming