计及 DG 与 STATCOM 的配电网重构优化策略

吴忠强,赵立儒,贾文静,吴昌韩
(燕山大学 电气工程学院 工业计算机控制工程河北省重点实验室,河北 秦皇岛 066004)

摘要:采用一种改进遗传算法(GA)实现配电网重构,其考虑了配电网近期的发展变化,将分布式发电(DG)与静止无功补偿器(STATCOM)引入配电网模型中,探讨它们对配电网重构和提高电能质量的影响。采用十进制与二进制混合编码方式和特殊的交叉与变异操作避免 GA 不可行解的产生,采用云算法改进交叉率与变异率以提高 GA 的收敛性。对 IEEE 33 节点配电网进行仿真,结果表明所提出的改进 GA 可有效地实现网络重构,DG 与 STATCOM 的引入能有效提高配电网的供电质量和可靠性。

关键词:网络重构;配电网;遗传算法;云模型;分布式发电;静止无功补偿器
中图分类号:TM 711　　**文献标识码**:A　　DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2016.01.016

0　引言

电网的重构能力代表着电网维持稳定运行和处理紧急事件的能力,是电网的重要性能指标。配电网是电网的重要组成部分,配电网的损耗占据了电网传输能耗的 40%,同时 80% 的电网故障出自配电网[1]。由此可见,配电网的网络损耗与故障问题极为重要。配电网重构 DNR(Distribution Network Reconfiguration)是故障发生后,通过改变网络的拓扑结构中的选择开关与联络开关实现的。在满足配电网的约束条件下,DNR 通过改变配电网的拓扑结构改变潮流方向,转移负荷,进而减小故障对电网的影响,在恢复非故障区域供电的同时,降低电网的网损,提高供电电压质量[2]。

DNR 的方法可分为四大类:数学优化法、最优流模式法、开关交换法与人工智能算法[3]。由于人工智能算法能有效地解决 DNR 中的“组合爆炸”和多目标优化问题,在近期发展迅猛。目前,最常用的人工智能算法有遗传算法(GA)、粒子群优化算法、蚁群算法、模拟退火(SA)算法、和声搜索算法和人工神经网络等。文献[4]把 GA 引入 DNR 的问题求解中,把网络重构问题转化为组合优化问题,利用 GA 解决组合优化问题的能力,并行地搜索最优解。其与数学规划和 SA 等算法相比,提高了搜索速度,缺点是没有对交叉操作与变异操作进行处理使其满足 DNR 问题的特殊性,导致出现大量不可行解,降低了算法的效率。文献[5]将 GA 引入配电网损耗优化过程中,给出了编码串和个体的适应度函数。文献[6]采用自适应方法改进交叉率与变异率,使收敛速度得到了提高,选择合适的种群数目与进化代数,能够保证收敛后得到最优解。文献[7]采用基于 GA 的协同进化算法解 DNR 问题时,为了避免孤岛与环网的出现,采用特殊的基因操作减少了不可行解的数量,同时使用“确定树”的方法对出现的不可行解进行修复,降低了陷入局部最优的概率。文献[8]进一步对 GA 进行改进,对交叉操作进行对应基因块的交换,避免了因为交叉操作产生的不可行解,缺点是虽然对交叉操作进行了改进,但是整体遗传操作完成后的可行解在解空间中所占比率依然很低。文献[9]采用十进制的编码方式减小了染色体长度,染色体的长度为可能参与重构的联络开关与选择开关的总和,但面对较大的网络时,编码的长度依然很大。文献[10]将分布式发电(DG)引入 DNR 问题中,采用和声搜索算法同时解决重构问题与 DG 在配电网中最佳引入位置问题。

本文解决配电网故障重构优化问题,在模型与算法上都进行了改进。模型上,将 DG 与静止无功补偿器(STATCOM)引入配电网中,分析其对 DNR 问题的影响。算法上对经典 GA 进行改进:采用十进制与二进制混合编码策略,并结合配电网的环网特性设计染色体,缩短染色体长度,简化基因操作,提高算法效率;采用特殊的交叉和变异操作保证每次遗传操作后的解均是可行的;采用云模型优化交叉率和变异率,提高算法的收敛速度。

1　目标函数

配电网支路上有 2 种开关:一种是选择开关,另一种是联络开关。选择开关是常闭开关,联络开关是常开开关。DNR 通过改变每条支路上的开关状态来改变配电网的拓扑结构,从而获得最优的拓扑结构,保证用户恢复供电的同时实现网络损耗最小。

网络损耗是 DNR 的重要指标,可利用每个节点的净注入功率求取,节点净注入功率(以 k 节点为例)

收稿日期:2015-02-15;**修回日期**:2015-10-16
基金项目:河北省自然科学基金资助项目(F2012203088)
Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province(F2012203088)

的求解式为[11]：

$$\boldsymbol{S}_k=\boldsymbol{U}_k\sum_{j=1}^{n}Y_{kj}^{*}\boldsymbol{U}_j^{*}W_{kj} \tag{1}$$

其中，$\boldsymbol{S}_k$ 为 k 节点的净注入复功率；$\boldsymbol{U}_k=e_k+\mathrm{j}f_k$ 为 k 节点的电压；Y_{kj}^{*} 为连接 k 节点与 j 节点支路导纳的共轭；$\boldsymbol{U}_j^{*}$ 为 j 节点电压的共轭；W_{kj} 为连接 k 节点与 j 节点支路上的开关状态(开为0，关为1)；n 为节点数。

网络总损耗为：

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{loss}}=\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{S}_k \tag{2}$$

优化目标是使网络总损耗最小：

$$\min(\boldsymbol{S}_{\mathrm{loss}})=\min\left(\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{S}_k\right) \tag{3}$$

DNR 需要满足如下约束条件。

a. 拓扑约束。

配电网是闭环设计、开环运行的。每个负荷都要有电源供电的特性，要求其拓扑结构中既不能出现环网也不能出现孤岛结构。

b. 电压约束。

在配电网中，各节点电压不能越限：

$$U_{\min}\leqslant U_k\leqslant U_{\max} \tag{4}$$

其中，$U_{\max}$、$U_{\min}$ 分别为 k 节点的电压上、下限。

c. 容量限制。

各条支路要满足各自的最大传输容量限制：

$$I_k\leqslant I_{k\max} \tag{5}$$

其中，I_k、$I_{k\max}$ 分别为 k 支路的电流实际传输容量与最大传输容量。

2 含 DG 与 STATCOM 的新潮流算法

2.1 含 DG 的潮流计算

随着光伏、风力发电机、燃料电池、微型燃气轮机等分布式电源作为新类型的 DG 节点引入电力系统，需要补充适合 DG 节点的新潮流算法。

若引入的分布式电源属于 PV 类型节点，且为 k 节点，则需将 $\mathrm{d}Q_k$ 的求解改为求解 $\mathrm{d}U_k^2$：

$$\mathrm{d}U_k^2=U_{gk}^2-(e_k^2+f_k^2) \tag{6}$$

其中，U_{gk} 为 PV 节点给定电压的幅值。

Jacobian 矩阵的计算需要将第 $2k$ 行、第 k 列的元素改为：

$$J_k(2k,k)=-2e_k \tag{7}$$

第 $2k$ 行、第 $2k$ 列的元素改为：

$$J_k(2k,2k)=-2f_k \tag{8}$$

Jacobian 矩阵第 $2k$ 行的其他元素值改为“0”。

2.2 含 STATCOM 的潮流计算

STATCOM 由于在提高电力系统暂态稳定性、电能质量和电压调节方面性能优越而得到广泛应用[12]。在潮流计算中可以等效为一个实部和虚部均可调的等值电势 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}=e_{\mathrm{s}}+\mathrm{j}f_{\mathrm{s}}$，设在 k 节点引入 STATCOM，如图1所示。

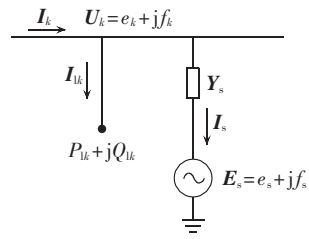

图1 STATCOM 等效图

Fig.1 Equivalent diagram of STATCOM

图1中，$\boldsymbol{I}_k$ 为净注入电流；$\boldsymbol{U}_k$ 为电压相量；$P_{1k}+\mathrm{j}Q_{1k}$ 为给定负荷；$\boldsymbol{I}_{1k}$ 为负荷支路的电流；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}$、$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{s}}$ 分别为 STATCOM 的支路电流和导纳。

在潮流建模中，一般把 STATCOM 接口节点设为 PV 节点，电压幅值设为 1 p.u.，这样处理没有考虑 STATCOM 的有功损耗，也没有对 STATCOM 提供的无功进行优化。本文进一步改进其潮流计算方式，考虑 STATCOM 有功损耗的同时，对其无功功率进行优化，潮流计算方法如下。

(1)根据配电网损耗与 STATCOM 接口节点给定电压幅值 U_{gk} 的关系优化给定电压的取值。依据国家规定的供电电压允许偏差范围，U_{gk} 的取值范围为[0.9，1] p.u.，根据需要的精度 ε，将其分为 $0.1/\varepsilon$ 份，在进行每次潮流计算前，根据式(9)对 U_{gk} 进行赋值。求取使配电网损耗最小的 U_{gk} 即为最优给定电压值。

$$U_{gk}=0.9+\varepsilon\tau \tag{9}$$

其中，τ 为潮流计算次数。

(2)设 k 节点为 PV 节点，进行潮流计算，得到该节点的无功功率 Q_k 和电压相角 $\arctan(f_k/e_k)$；再利用式(10)—(12)计算 STATCOM 的支路电流 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}$。

$$\boldsymbol{I}_k=\frac{P_{1k}-\mathrm{j}Q_k}{\boldsymbol{U}_k} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{I}_{1k}=\frac{P_{1k}-\mathrm{j}Q_{1k}}{\boldsymbol{U}_k} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}=\boldsymbol{I}_k-\boldsymbol{I}_{1k} \tag{12}$$

(3)由式(13)、(14)计算 STATCOM 的有功损耗和无功补偿功率，并作为潮流计算的给定功率：

$$P_{\mathrm{s}}=\mathrm{Re}(\boldsymbol{Y}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}^{*}) \tag{13}$$

$$Q_{\mathrm{gs}}=Q_k-Q_{1k} \tag{14}$$

其中，$\boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}^{*}$ 为 STATCOM 支路电流的共轭值。

(4)按式(15)将 STATCOM 有功损耗加入 k 节点的给定有功负荷中，然后将 k 节点设为 PQ 节点，再次进行潮流计算。收敛后得到 k 节点的新电压 $\boldsymbol{U}_k$ 和净注入电流 $\boldsymbol{I}_k$。再计算出负荷支路电流 $\boldsymbol{I}_{1k}$ 和 STATCOM 新的支路电流 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{s}}$。最后，由式(16)计算出 STATCOM 的等效电势 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}$。

$$P_{lk}=P_s+P_{lk} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{E}_s=\boldsymbol{U}_k+\boldsymbol{I}_s/\boldsymbol{Y}_s \tag{16}$$

3　GA 的改进及在 DNR 中的应用

配电网的拓扑结构要求保证开环且不能出现环网和孤岛，需对经典的 GA 进行改进。

结合图 2 所示 IEEE 33 节点系统[13-15]说明算法的改进。此系统有 38 条支路，即 38 个开关，其中 33 个选择开关(实线表示)，5 个联络开关(虚线表示)。所有节点直接用数字表示，所有支路用括号中的数字表示，取 1 节点为平衡节点。支路的编号取支路的末节点号减 1(较大编号的节点为末节点)，5 个联络开关支路单独编号(括号内编码)。三相功率的基准值 $S_b=10$ MV·A；线电压基准值 $U_b=12.66$ kV；系统总有功负荷 $P_{all}=3\,715$ kW；总无功负荷 $Q_{all}=2\,300$ kvar。设随机故障位于 15 与 16 节点间支路(15)上，用叉线表示。

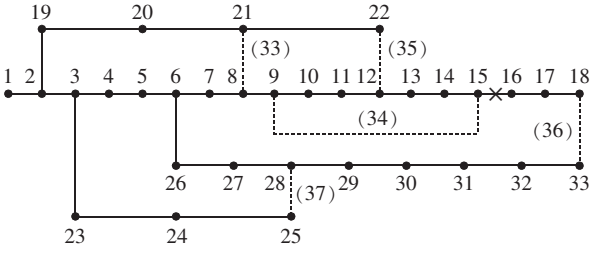

图 2 IEEE 33 节点配电网

Fig.2 IEEE 33-bus distribution network

3.1　编码的改进

定义 3 种染色体：Addresschrom(位置染色体)，十进制编码，其基因代表开关的位置编号；Executechrom(执行染色体)，二进制编码，其基因代表开关的状态，开为 0，关为 1；Openchrom(开状态染色体)，十进制编码，其基因代表打开开关的位置编号。

对于图 2 所示的配电网，当 5 个联络开关均打开时，可得 3 种染色体关系如图 3 所示。

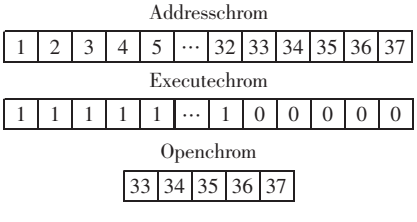

图 3 3 种染色体关系图

Fig.3 Relationship among three kinds of chromosome

为避免遗传操作中环网与孤岛的产生，结合 IEEE 33 节点系统的环网拓扑结构将 Addresschrom 分为 5 个环 loop$x$(x 取 1、2、3、4、5)，为避免重复将染色体中重复包含的基因剔除，得到：loop1=[(2)，(3)，(4)，(5)，(6)，(7)，(33)，(20)，(19)，(18)]；loop2=[(8)，(9)，(10)，(11)，(35)，(21)]；loop3=[(25)，(26)，(27)，(28)，(37)，(24)，(23)，(22)]；loop4=[(34)，(14)，(13)，(12)]；loop5=[(15)，(16)，(17)，(36)，(32)，(31)，(30)，(29)]。

3.2　交叉操作的改进

随机从 Addresschrom 的 loop$x$ 中选出交叉操作的基因位置，Executechrom 相应位置的基因以环为单位进行交叉操作。由于交叉操作是以环为单位进行的，能够保证交叉操作后的每个环网中有且只有一条支路开关是开状态，改进的交叉操作如图 4 所示。

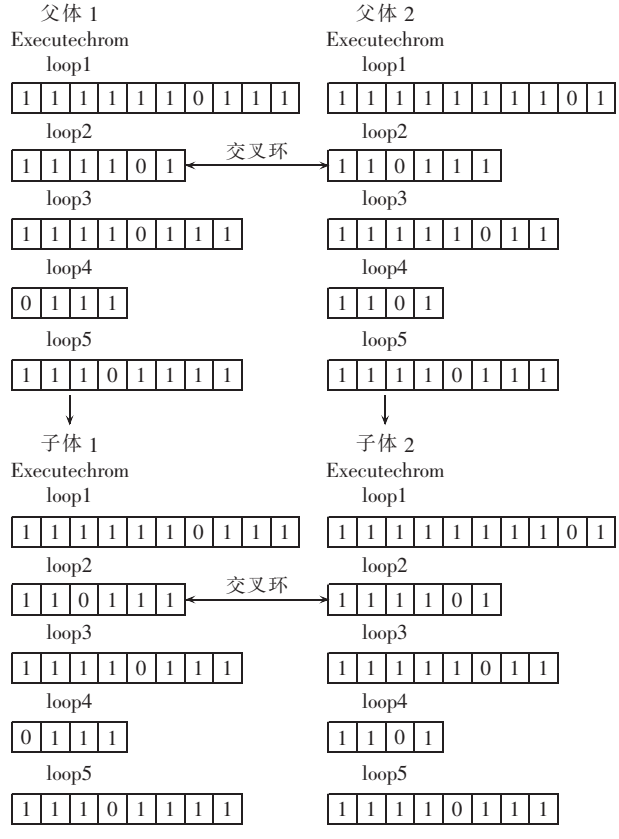

图 4 交叉操作

Fig.4 Crossover operation

3.3　变异操作的改进

改进的变异操作以环为单位进行修复：

a. 随机产生概率 R，并与 P_m(变异率)进行比较，若 $R<P_m$，则进行变异，即执行 **b**—**d** 的操作，否则不进行变异；

b. 随机选取 Openchrom 中的第 k 个基因，同时置 Executechrom 中相应基因状态为 1(即闭合 k 支路上的开关)；

c. 找到 k 所在 Addresschrom 中的 loop$x$，在此染色体中随机选取一个基因 j，并置 Executechrom 中相应基因状态为 0(即打开 j 支路上的开关)；

d. 在 Openchrom 中，用 j 代替 k，保证 Openchrom 中每个元素均是打开支路开关的编码。

3.4 采用云模型改进交叉率 P_c 与变异率 P_m

经典的交叉与变异操作,交叉率 P_c 和变异率 P_m 大多采用固定值,与自然进化原理不符。若 P_c 与 P_m 取值太小很容易出现“早熟”现象,只能得到局部优解;若 P_c 与 P_m 取值太大,则很难收敛,造成算法的稳定性差。对此,采用云模型对 P_c 与 P_m 进行改进。云模型是定性概念与定量表达的转换模型,它包括很多的云滴,每个云滴代表定性概念到定量表达域的一个映射[16]。云模型中的3个参数为:期望 E_x,代表云团的重心;熵 E_n,代表云团的离散度;超熵 H_e,代表云团的厚度[17]。

正态云的定义为:设 U 为一个定量的论域,A 是与 U 对应的定性的概念。X 既是 U 上的元素,又是 A 上的一次随机实现。正态云模型具有稳定的倾向性和普适性,假如:

$$E'_n \sim N(E_n, H_e) \tag{17}$$

$$X \sim N(E_x, E'_n) \tag{18}$$

则 X 对 A 的确定度 Y 为:

$$Y = e^{-(X-E_x)^2/(2E'_n)} \tag{19}$$

取 $E_x=0$、$E_n=2$、$H_e=0.2$ 生成10 000个云滴的云,如图5所示。

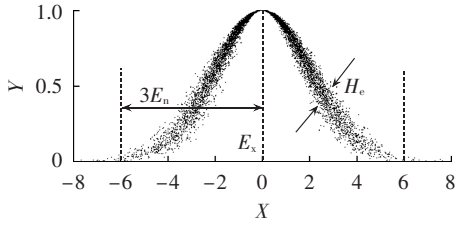

图5 正态云滴分布图

Fig.5 Normal distribution of cloud droplets

使用正态云发生器优化交叉操作 P_c 的步骤如下。

(1)计算交叉操作的 E_x:

$$E_x = (f_a + f_b)/2 \tag{20}$$

其中,f_a、f_b 为父代两交叉个体的适应度值。

(2)计算交叉操作的 E_n:

$$E_n = \frac{1}{h}(f_{max} - f_{min}) \tag{21}$$

其中,h 为参数系数,一般取值范围为 $6 \leqslant h \leqslant p$,$p$ 为种群数;f_{max}、f_{min} 分别为当代种群中最大、最小适应度值。

(3)计算交叉操作的 H_e:

$$H_e = \frac{E_n}{r} \tag{22}$$

其中,r 为参数系数,取值范围为 $5 \leqslant r \leqslant 15$。

(4)对应 E_n、H_e,由式(17)生成 E'_n。

(5)对应 E_x、E'_n,由式(18)生成 X。

(6)由式(19)和 X 可得到对应的 Y。

(7)每次交叉操作前,利用云模型计算 P_c:

$$P_c = \begin{cases} P_{cmin} Y & f_{big} \geqslant \bar{F} \\ P_{cmax} & f_{big} < \bar{F} \end{cases} \tag{23}$$

其中,P_{cmin}、P_{cmax} 分别为交叉率的最小值和最大值,$\bar{F}$ 为当代种群个体的平均适应度值;f_{big} 取 f_a 与 f_b 中较大的值。

使用正态云发生器产生云滴优化 P_m 的过程与优化 P_c 类似,区别在于:第(1)步中采用式(24),第(7)步中采用式(25)。

$$E_x = f_m \tag{24}$$

$$P_m = \begin{cases} P_{mmin} Y & f_m \geqslant \bar{F} \\ P_{mmax} Y & f_m < \bar{F} \end{cases} \tag{25}$$

其中,f_m 为变异个体的适应度值;P_{mmin}、P_{mmax} 分别为变异概率的最小值、最大值。

将上述改进GA应用到IEEE 33节点DNR中,分情况讨论如下。

云模型优化交叉与变异操作的参数设定为:$h=6$、$r=10$、$P_{cmin}=0.4$、$P_{cmax}=1$、$P_{mmin}=0.1$、$P_{mmax}=0.9$。

情况一:标准配电网(不含DG和STATCOM)故障前后潮流仿真曲线如图6所示(电压幅值为标幺值,后同)。

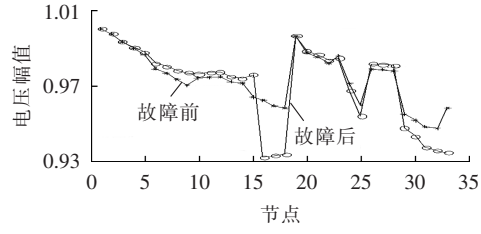

图6 标准配电网故障前后仿真曲线

Fig.6 Simulative curve of normal distribution network, before and after fault

故障前后得到的数据如表1所示。

表1 标准配电网故障前后仿真数据

Table 1 Simulative data of normal distribution network, before and after fault

参数	故障前	故障后
打开的开关组合	9、14、28、32、33	10、14、15、28、33
网络损耗/kW	145.33	162.96
最低电压	0.947 7	0.932 5

对图6和表1分析可知:在15、16节点之间的支路上出现故障,通过改进GA的DNR后,15节点的电压相对于故障前出现了明显的降低,最低电压由0.947 7 p.u.降低到0.932 5 p.u.,网络损耗增加了17.63 kW;但通过配电网故障重构后,保证了每个负荷的供电不间断,提高了配电网中每个用户的用电可靠性。

情况二:由图6可看出,故障前18节点的电压就比较低,故障重构后电压降落得更低,有可能越限,

故需探讨在 18 节点处引入 DG 的影响。在 18 节点处引入 DG 并定为 34 节点,34 节点与 18 节点的阻抗值取 32 节点与 33 节点之间的阻抗值。引入 DG 情况下,配电网故障前后潮流仿真曲线如图 7 所示。

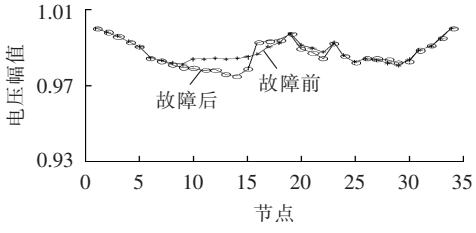

图 7 带 DG 的配电网故障前后仿真曲线

Fig.7 Simulative curve of distribution network with DG,before and after fault

故障前后得到的数据如表 2 所示。

表 2 带 DG 的配电网故障前后仿真数据

Table 2 Simulative data of distribution network with DG,before and after fault

参数	故障前	故障后
打开的开关组合	9、29、33、34、37	10、14、15、28、33
网络损耗/kW	64.60	67.15
最低电压	0.980 7	0.974 8

对比图 6 和图 7、表 1 和表 2 可见,DG 引入配电网 18 节点并成为 34 节点后,其电压始终为 1 p.u.,有效地提高了该节点电压。故障前 18 节点电压由 0.958 5 p.u. 上升到 0.992 4 p.u.,相对于未引入 DG 的情况,网络损耗减少了 80.73 kW,各节点的电压均有所提高;故障后通过重构,18 节点电压由 0.934 0 p.u. 上升到 0.994 1 p.u.,相对于未引入 DG 的情况,网络损耗减少了 95.81 kW,各节点的电压也均有所提高。DG 的引入使得配电网性能明显提高,有效地改善了供电质量。

情况三:由图 7 知 DG 的引入使各节点的电压均有所提高,此时 14 节点的电压为最低电压,为了进一步提高供电质量,探讨在 14 节点引入 STATCOM 的效果,采用本文提出的优化方案并与常规方案(把 STATCOM 接口节点设置为 PV 节点,电压幅值恒为 1 p.u.)进行比较。在优化方案中 14 节点给定电压 U_{g14} 的取值范围设定为 0.9~1 p.u.,精度设定为 $\varepsilon=0.01$。引入 STATCOM 的情况下,2 种方案配电网故障后的潮流仿真曲线如图 8 所示。

优化方案和常规方案的数据如表 3 所示(常规方案和优化方案中 14 节点电压 U_{g14} 分别设为 1 p.u. 和 0.982 p.u.)。

对比图 7 和图 8、表 2 和表 3 可见,故障后,STATCOM 引入配电网,采用优化算法,网络损耗又减少了 4.62 kW,并且最低电压提高了 0.016 4 p.u.。STATCOM 引入使各节点电压均得到提高,进一步增强了配电网的稳定性与可靠性。

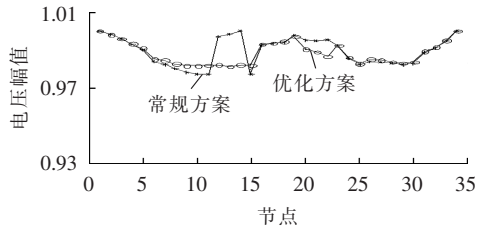

图 8 引入 DG 与 STATCOM 的配电网故障后仿真曲线

Fig.8 Simulative curves of distribution network with DG and STATCOM,after fault

表 3 引入 DG 与 STATCOM 的配电网故障后仿真数据

Table 3 Simulative data of distribution network with DG and STATCOM,after fault

参数	常规方案	优化方案
打开的开关组合	11、14、15、28、33	9、13、15、33、37
网络损耗/kW	72.21	63.53
无功补偿/kvar	454.61	202.34
最低电压	0.977 0	0.981 2

由图 8 和表 3 可知,采用优化方案和常规方案相比,配电网电压更加平稳,网络损耗降低了 8.68 kW,最低节点电压提高了 0.004 2 p.u.,所需提供的无功补偿减少了 252.27 kvar。常规方案为达到使该节点电压恒为 1 p.u. 需要 STATCOM 多提供一倍多的无功功率支持,既增加了网络损耗又增大了电压变化幅度。

情况四:为验证云优化的效果,并与简单 GA(采用固定交叉率和变异率的 GA,设 $P_c=0.9$,$P_m=0.05$)作比较。将简单 GA 应用到带 DG 与 STATCOM 的配电网系统中,故障后随机进行 10 次仿真,每次进行 100 代遗传操作,仿真曲线如图 9 所示。

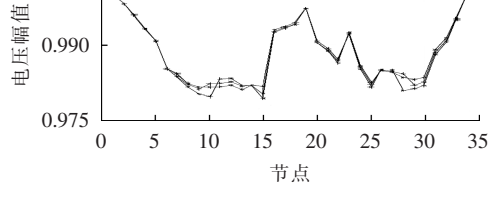

图 9 简单 GA 在配电网中应用仿真曲线

Fig.9 Simulative curves of distribution network by simple GA

由图 9 可看出潮流收敛于 3 种不同的解:2 个局部优解、1 个最优解,如表 4 所示。

经 10 次随机仿真验证,简单 GA 每次进行 100 代遗传操作,6 次收敛于最优解,4 次收敛到局部优解,收敛到全局最优解的概率为 0.6。当遗传操作代数扩大到 150 代时,没有明显改善。而采用带云模型的 GA 后,每次 100 代遗传操作,以概率 0.8 收敛到全局最优解,将遗传代数扩大到 150 代时,以概率接近 1 收敛到全局最优解,仿真曲线为图 8 中采用优化方案的曲线。采用带云模型的 GA,增强了全局

表4 简单GA在配电网中应用仿真数据

Table 4 Simulative data of distribution network by simple GA

参数	局部优解	局部优解	最优解
开关组合	10、14、15、27、33	9、14、15、28、33	9、13、15、33、37
收敛次数	2	2	6
网络损耗/kW	62.90	64.20	63.53
无功补偿/kvar	161.08	141.14	202.34
最低电压	0.9817	0.9803	0.9812

寻优能力,提高了收敛性。

4 结论

基于GA策略对配电网故障重构问题进行了研究。针对经典GA应用到DNR时出现的编码过长与拓扑结构不可行问题,对经典的GA进行了编码、交叉、变异操作的改进,彻底避免了环网和孤岛问题,使得遗传操作后的每个个体均满足配电网的放射状拓扑约束,即解空间内的每个解都是可行解,提高了GA的进化效率。针对经典GA的收敛性较差问题,将GA与云模型相结合,融合云模型的稳定倾向性和随机性的特点,克服了经典GA采用固定的P_c与P_m所产生的"早熟"和不收敛等问题。

结合电力系统中DG和柔性交流输电技术,将STATCOM与DG引入DNR优化中,提高了DNR的供电质量,减小了电压的波动,降低了网络损耗,有效地解决了配电网故障重构问题。

参考文献:

[1] GUPTA N,SWARNKAR A,NIAZI K R. Distribution network reconfiguration for power quality and reliability improvement using genetic algorithms[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2014,54:664-671.

[2] KAYAL P,CHANDA S,CHANDA C K. An ANN based network reconfiguration approach for voltage stability improvement of distribution network[C]//Power and Energy Systems(ICPS),2011 International Conference on. [S.l.]:IEEE,2011:1-7.

[3] 毕鹏翔,刘健. 配电网络重构的研究[J]. 电力系统自动化,2001,25(14):54-60.
BI Pengxiang,LIU Jian. Research on distribution network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(14):54-60.

[4] NARA K,SHIOSE A,KITAGAWA M,et al. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1992,7(3):1044-1051.

[5] SUBBURAJ P,RAMAR K,GANESAN L,et al. Distribution system reconfiguration for loss reduction using genetic algorithm[J]. Journal of Electrical Systems,2006,2(4):198-207.

[6] 王毅. 基于改进自适应遗传算法的配电网络重构[J]. 电力自动化设备,2005,25(12):45-48.
WANG Yi. Refined adaptive genetic algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(12):45-48.

[7] 欧帝宏,陈皓勇,荆朝霞. 基于协同进化算法的配电网络重构方案[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):108-113.
OU Dihong,CHEN Haoyong,JING Zhaoxia. Distribution network reconfiguration based on co-evolution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):108-113.

[8] 毕鹏翔,刘健. 配电网络重构的改进遗传算法[J]. 电力系统自动化,2002,26(2):57-61.
BI Pengxiang,LIU Jian. A refined genetic algorithm for power distribution network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(2):57-61.

[9] 欧阳武,程浩忠,张秀彬,等. 基于随机生成树策略的配网重构遗传算法[J]. 高电压技术,2008,34(8):1726-1730.
OUYANG Wu,CHENG Haozhong,ZHANG Xiubin,et al. Genetic algorithm based on random spanning trees in distribution network reconfiguration[J]. High Voltage Engineering,2008,34(8):1726-1730.

[10] RAO R S,RAVINDRA K,SATISH K,et al. Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(1):317-325.

[11] ACHA E,FUERTE-ESQUIVEL C R,AMBRIZ-PEREZ H,et al. FACTS:modelling and simulation in power networks[M]. Chippenham,UK:John Wiley & Sons,2004:170-178.

[12] VITTAL V,BERGEN A R. Power systems analysis[M]. Upper Saddle River,USA:Prentice Hall,1999:323-326.

[13] 徐青山. 分布式发电与微电网技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2011:88-92

[14] 吴登国,李晓明. 基于极限学习机的配电网重构[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):47-51.
WU Dengguo,LI Xiaoming. Distribution grid reconfiguration based on extreme learning machine[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):47-51.

[15] 孙惠娟,彭春华,袁义生. 综合开关次数分析的配电网多目标动态重构[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):41-46.
SUN Huijuan,PENG Chunhua,YUAN Yisheng. Multi-objective dynamic distribution network reconfiguration considering switching frequency[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):41-46.

[16] CHAOYUN A G,RAN L. Study on short term load forecast based on cloud model[C]//Power Tech,2007 IEEE. Lausanne,Switzerland:IEEE,2007:1797-1801.

[17] 雷将锋,彭敏放,沈美娥,等. 基于云遗传算法的接地网优化设计[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):119-123.
LEI Jiangfeng,PENG Minfang,SHEN Meie,et al. Optimal design of grounding grid based on cloud algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):119-123.

作者简介:

吴忠强

吴忠强(1966—),男,上海人,教授,博士,研究方向为配电网重构优化(**E-mail**:mewzq@163.com);

赵立儒(1988—),男,河北石家庄人,硕士,研究方向为配电网重构优化(**E-mail**:prioritymail@126.com);

贾文静(1988—),女,河北石家庄人,硕士,研究方向为配电网重构优化(**E-mail**:jiera123@163.com);

吴昌韩(1987—),男,山东青岛人,硕士,研究方向为配电网重构优化(**E-mail**:wch573@163.com)。

(下转第122页 continued on page 122)

WANG Gang,JIANG Jie,TANG Kunming,et al. Ultra-short-term load forecasting based on adaptive bidirectional weighted least squares support vector machines[J]. Power System Protection and Control,2010,38(19):142-146.

[15] 董西成. Hadoop技术内幕:深入解析YARN架构设计与实现原理[M]. 北京:机械工业出版社,2014:60-120.

[16] Europe Network on Intelligent Technologies for Smart Adaptive Systems. World-wide competition within the EUNITE network [EB/OL]. (2001-12-14)[2013-09-05]. http://neuron.tuke.sk/competition/.

[17] CASTILLO E,GUIJARROB,ALONSO A. Electricity load forecast using functional networks[R]. Puerto de la Cruz,Spain:[s.n.],2001.

[18] 王保义,赵硕,张少敏. 基于云计算和极限学习机的分布式电力负荷预测算法[J]. 电网技术,2014,38(2):526-531.
WANG Baoyi,ZHAO Shuo,ZHANG Shaomin. A distributed load forecasting algorithm based on cloud computing and extreme learning machine[J]. Power System Technology,2014,38(2):526-531.

[19] 曾飞,苗世洪,尚亚男,等. 分解协调式节点阻抗矩阵生成算法的并行实现[J]. 电网技术,2011,35(9):99-104.
ZENG Fei,MIAO Shihong,SHANG Yanan,et al. Parallel implementation of node-impedance matrix generation algorithm based on decomposition and coordination[J]. Power System Technology,2011,35(9):99-104.

作者简介:

王保义

王保义(1964—),男,山东栖霞人,教授,博士,主要研究方向为电力信息化与信息安全(**E-mail**:wangbaoyi@126.com);

王冬阳(1988—),男,河南开封人,硕士研究生,主要研究方向为电力信息化与信息安全(**E-mail**:wdy_newdays@163.com);

张少敏(1965—),女,河北保定人,教授,博士,主要研究方向为电力信息化与信息安全(**E-mail**:zhangshaomin@126.com)。

Distributed short-term load forecasting algorithm based on Spark and IPPSO_LSSVM

WANG Baoyi,WANG Dongyang,ZHANG Shaomin

(School of Control and Computer Engineering,North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: Aiming at the insufficient resource of single computer,a short-term load forecasting model based on LSSVM(Least Squares Support Vector Machine) optimized by IPPSO(Improved Parallel Particle Swarm Optimization) algorithm is proposed to improve the accuracy of load forecasting. A Spark-on-YARN memory computing platform is introduced and the IPPSO is operated there to optimize the uncertain parameters of LSSVM,which are then applied in the load forecasting. The parallel and distributed computation is adopted to improve the accuracy of forecasting algorithm and the capability of massive high-dimensional data processing. Experiment and analysis are carried out with the actual load data provided by EUNITE on an 8-bus cloud computing platform and results show that,the proposed algorithm has better accuracy than the generalized traditional neural network algorithm and better efficiency than the MR-OSELM-WA(MapReduce-Online Sequential Extreme Learning Machine-Weighted Averaged) algorithm.

Key words: Spark; IPPSO; LSSVM; electric load forecasting; short-term forecasting; support vector machines; parallel processing; optimization

(上接第116页 continued from page 116)

Optimal reconfiguration of distribution network with DG and STATCOM

WU Zhongqiang,ZHAO Liru,JIA Wenjing,WU Changhan

(Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province,College of Electrical Engineering,Yanshan University,Qinhuangdao 066004,China)

Abstract: An improved GA(Genetic Algorithm) is applied to realize the DNR(Distribution Network Reconfiguration),which introduces DG(Distributed Generation) and STATCOM into the distribution network model to include its recent development. The influences of DG and STATCOM on DNR and power quality improvement are discussed. The hybrid binary and decimal coding method and the special crossover and mutation operation are adopted to avoid the infeasible solutions of GA. The cloud algorithm is applied to improve the crossover rate and mutation rate for enhancing the convergency of GA. The simulative results for IEEE 33-bus distribution network prove that the proposed method realizes the DNR effectively and the application of DG and STATCOM enhances the power quality and reliability successfully.

Key words: network reconfiguration; distribution network; genetic algorithms; cloud model; distributed power generation; STATCOM