综合开关次数分析的配电网多目标动态重构

孙惠娟,彭春华,袁义生

(华东交通大学 电气与电子工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:为使得配电网重构更为合理而有效,提出一种配电网多目标动态重构新方法。以降低网损和减少开 关操作次数为综合优化目标构建配电网多目标动态重构模型,采用基于图论中代数连通度的网络连通性判 别方法快速消除无效解,采用基于独立环路的实数编码策略大幅降低变量维数。针对该复杂模型的求解, 设计一种新型的复合型微分进化多目标优化算法,通过融合不同特点的变异策略,兼顾个体多样性和收敛 速度,解决了群智能进化算法存在的寻优深度与速度之间的矛盾。最后以 IEEE 33 节点配电系统为例进行 多目标动态重构,通过对求得的 Pareto 最优解集以及开关操作性价比进行分析,验证了该方法的有效性和 优越性。

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.09.007

0 引言

配电网络中包含较多的分段开关和联络开关, 并具有环状结构和开环运行的特点,通过对网内各 开关进行操作可调整网络结构实现网络的重构。配 网重构作为配电网络优化运行的重要内容,可起到 平衡负荷、消除过载和降低网损的作用^[1-2]。

配网重构一般可分为静态重构和动态重构,其 中静态重构只是基于单个时段的配网负荷数据进行 优化重构,而动态重构则是需要考虑多个连续时段 内配网负荷数据的变化进行全局性优化重构。以往 关于配电网重构的研究大多是以最小化有功损耗为 目标的单目标静态重构[2-4].研究内容主要集中在优 化算法的改进方面,取得了较好的效果。此外还有一 些研究考虑了多个优化目标进行配网静态重构,如 文献[5]以减少网损和降低节点电压偏差为目标研 究了含风电配电网的多目标重构问题:文献[6]考虑 了系统失电负荷量、电网有功损耗、线路负荷分配失 衡度和开关操作次数等多个目标构造了舰船电网重 构模型:文献「7]则综合考虑系统平均停电频率、平 均供电不可靠率和有功网损,建立了配网重构多目 标评价函数模型。但若将以上这些只是基于配网实 时负荷数据的静态重构方法应用于实际,由于系统 中各节点的负荷时刻都在发生变化,不同时刻的最 优网络结构不可能固定不变,而是随时都需要优化

收稿日期:2013-12-10;修回日期:2014-07-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51167005);教育部人 文社科青年基金项目(14YJCZH135);江西省科技支撑计划 项目(20142BBE50001);江西省教育厅科技基金资助项目 (GJJ14386)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51167005), Humanity & Social Science Youth Foundation of Ministry of Education(14YJCZH135), Science & Technology Pillar Program of Jiangxi Province(20142BBE50001) and Education Science Research Funds of Jiangxi Province(GJJ14386) 调整,这不仅要求必须快速完成优化计算以及网络 重构过程以满足实时性要求,而且还将导致需要快 速频繁地操作开关,这无疑在经济和技术层面上都 是不现实的。而配网动态重构由于不仅考虑了网络 的负荷波动特性,而且还需考虑供电可靠性、开关操 作次数等实际运行中的约束条件,可实现有计划地 进行网络重构,因此尽管计算更为复杂,但也更具实 用价值和研究意义^[8-10]。

配网动态重构需要考虑多个甚至数十个连续时 段的网络结构变化,常会因变量维数显著增加而导 致"维数灾"。为了降低寻优复杂度,目前对于配网动 态重构的研究,一般会预先人为设定好重构周期内 开关的最大动作次数作为约束条件,然后以在重构 周期内的整体降损效果最好为优化目标进行多时段 网络重构[10-12]。然而,在实际应用中开关的最大动作 次数不应主观设为定值,而应考虑开关操作的性价 比和实际情况,综合降损效果、操作费用、使用寿命 和线路供电可靠性要求等因素来灵活确定,即不同 情况下开关的最大可动作次数并不一定相同。此外, 降损效果和开关动作次数的度量标准并不一致,同 时两者又会相互制约。为了得出动态重构过程中降 损效果和开关操作次数的协调优化关系,本文将以 降低配网有功损耗和减少开关操作次数为综合优化 目标对配电网多目标动态重构进行研究,并进一步 根据优化结果对每次增加开关操作次数的性价比进 行分析。

1 配电网多目标动态重构模型

配电网动态重构需要考虑多个连续时段内各节 点负荷数据的变化进行全局性优化,本文以整个重 构周期内总网损最少化和开关动作总次数最少化构 建多目标优化模型。

a. 总网损目标函数。

总网损最少化目标函数表达如下:

$$\min L = \sum_{i=1}^{T} \sum_{k=1}^{K} (L_{k,i} \Delta t_i) = \sum_{t=1}^{T} \sum_{k=1}^{K} \left(\frac{P_{k,i}^2 + Q_{k,i}^2}{U_{\mathbf{L}_{k,i}}^2} r_k \Delta t_i \right)$$
(1)

其中,*T* 为重构周期内的时段数;*K* 为网络中的闭合 支路数; $L_{k,i}$ 为在*i* 时段支路*k* 的有功功率损耗; $P_{k,i}$, $Q_{k,i}$ 和 $U_{L_{k,i}}$ 分别为在*i* 时段支路*k* 同一端的有功、无 功功率和电压; r_k 为支路*k* 的电阻; Δt_i 为*i* 时段的时 间长度。

b. 开关动作总次数目标函数。

若以 s_{j,i}表示开关 j 在 i 时段的状态,其值为 0 时代表打开,为1 时代表闭合,则重构周期内开关动 作总次数最少化目标函数可表达如下:

$$\min N = \sum_{j=1}^{J} \sum_{i=1}^{T} |s_{j,i} - s_{j,i-1}|$$
(2)

其中,J为网络中的可用开关总数。

c. 约束条件处理。

本文配网潮流采用前推回代法计算。为了保证 配网安全运行,所得到的网络重构后各节点电压 U_{n,i} 和各支路传输功率 S_{k,i} 应满足如下约束条件:

$$\begin{cases} U_n^{\min} \leqslant U_{n,i} \leqslant U_n^{\max} \\ S_{k,i} \leqslant S_k^{\max} \end{cases}$$
(3)

其中, U^{max} 和 U^{min} 分别为网络中节点 n 的电压上、下限; S^{max} 为网络中支路 k 的容量上限。上述节点电压和支路传输功率约束可通过施加越限惩罚进行处理。越限惩罚项 P_{ul} 构造如式(4)所示:

$$P_{ul} = \mu_{1} \sum_{i=1}^{T} \sum_{n=1}^{M} \left[\max(U_{n}^{\min} - U_{n,i}, 0) + \max(U_{n,i} - U_{n}^{\max}, 0) \right] + \mu_{2} \sum_{i=1}^{T} \sum_{k=1}^{K} \max(S_{k,i} - S_{k}^{\max}, 0)$$
(4)

其中,M为网络节点总数;µ1和µ2为惩罚因子。

此外,重构后的网络还应满足辐射状网络拓扑 约束条件。对于该约束条件,本文提出了一种基于网 络连通性判别的快速处理方法。

网络呈辐射状的一个简单前提条件为网络节点 数必须正好等于支路数加1,即:

$$M = K + 1 \tag{5}$$

考虑到当网络重构后所包含的孤岛和环网数量 正好相同时式(5)也同样会满足,因此若要保证重构 后网络为辐射状,在上述前提下同时还必须满足网 络中所有节点都连通,即不能存在孤岛,这种情况下 自然也不会有环网存在,否则将不满足式(5)。

本文应用图论中代数连通度来对网络节点的连 通性进行判断^[13]。将配电网络看作一个简单图 *G*, 可表示为:

$$\begin{cases} G = (V, E) \\ V = \{v_1, v_2, \cdots, v_M\} \\ E = \{e_1, e_2, \cdots, e_K\} \end{cases}$$
(6)

其中,点集 V 包含 M 个节点;边集 E 包含 K 条支路。 根据各节点的邻接关系可以构造图 G 的邻接矩阵 A(G)如下:

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{G}) = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,M} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{M,1} & a_{M,2} & \cdots & a_{M,M} \end{bmatrix}$$
(7)

当节点 *i* 与 *j* 相邻连接时,则元素 *a_{i,j}* 为 1,否则 为 0。由此进一步可根据式(8)构造出图 *G* 的 Laplacian 矩阵 *L*₀(*G*):

$$\boldsymbol{L}_{p}(G) = \operatorname{diag}(\operatorname{sum}(\boldsymbol{A}(G))) - \boldsymbol{A}(G)$$
(8)

其中,sum()为求和;diag()为提取对角矩阵; $L_p(G)$ 为一个对称的半正定奇异矩阵,设 $L_p(G)$ 的特征值排序如下:

$$0 = \lambda_1 \leqslant \lambda_2 \leqslant \lambda_3 \leqslant \dots \leqslant \lambda_M \tag{9}$$

在图论中图的 Laplacian 矩阵的次小特性值 λ₂ 称为代数连通度,它能反映图的连通性,已证明:当 且仅当图是连通的,其代数连通度大于零^[13-14]。由此 得出,若配电网是连通的,则其 Laplacian 矩阵只能 有一个零特性值,即有:

$$\operatorname{rank}(\boldsymbol{L}_{\mathrm{P}}(G)) = M - 1 \tag{10}$$

其中,rank()为求矩阵的秩。

结合式(5)和式(10)即可构造网络不满足辐射 状网络拓扑约束条件的惩罚项 Pa,如式(11)所示:

$$P_{u2} = \begin{bmatrix} \mu_3(M-1-\operatorname{rank}(L_p(G))) & M=K+1\\ \mu_3|M-K-1| & \ddagger \& \end{bmatrix}$$
(11)

其中,惩罚因子μ3可定为一个较大的数。

融合上述各式最终建立配电网多目标动态重构 模型如下:

$$\min: \begin{cases} L + P_{u1} + P_{u2} \\ N + P_{u1} + P_{u2} \end{cases}$$
(12)

由于添加了越限惩罚项,在寻优过程中,一旦解 不满足约束条件,必然会导致其目标函数值显著增 大,从而使得该解适应度极差,很快便会被淘汰。

2 模型求解

2.1 复合型微分进化多目标优化算法

上述配电网多目标动态重构模型中配网有功损 耗和操作开关次数这2项优化指标的度量标准不一 致,且会相互冲突,一般不存在使所有指标都同时达 到最优的绝对最优解。对该多目标优化问题的求解 实际上是设法找到尽可能多的 Pareto 最优解,且对 应的各目标向量在 Pareto 前沿中能均匀分布,以使 得决策者的可选择域更大。近年来,多目标优化算法 发展很快,如改进型非劣排序遗传算法(NSGA-II)、 多目标粒子群优化(MOPSO)、非劣排序多目标微分 进化(NSDE)算法等群智能进化算法已被广泛采用, 其中基于微分进化的 NSDE 算法已被验证在寻优速 度、收敛稳定性、Pareto 最优解集的准确性及均匀分 布性等方面具有明显的优越性^[15-16]。NSDE 算法基本 流程在文献[15]中有详细描述,其中的微分进化(DE) 过程主要包括变异和交叉操作。标准的微分进化变 异操作可表示如下.

$$Y_{i,G+1} = X_{b,G} + F(X_{r_1,G} - X_{r_2,G})$$
(13)

其中, $Y_{i,G+1}$ 为变异操作产生的中间个体; $X_{r,G}$ 为第 G 代第 r 个个体向量, r_1,r_2 均随机选取,且 $i \neq r_1 \neq r_2 \neq b$; 可随机选取某个体或以当前最优个体向量作为变异 基向量 $X_{b,C}$;等号右端第 2 项为变异差分项,F为变 异尺度因子。

实际应用中可采用不同的变异策略,一般用 DE/ rand/1、DE/rand/2、DE/best/1、DE/local-to-best/1 等 名称加以区分^[17],若采用 DE/rand/1、DE/rand/2 等 变异策略,由于变异基向量是随机选择的,有利于保 证进化个体的多样性进行全局搜索,但收敛速度缓慢, 且不能进行局部细致搜索;反之,若采用 DE/best/1、 DE/local-to-best/1 等变异策略,由于是以当前最优 个体作为变异基向量,进化方向性强,则收敛速度较 快,但种群会较快失去多样性而使得变异操作中差 分项过早趋于零,从而导致进化停滞而陷入早熟。为 了进一步提高微分进化的寻优性能,近年来许多学者 做了大量的研究[15-18],然而,算法个体多样性与收敛 速度难以兼顾,寻优速度与寻优深度之间的矛盾始终 没能得到较好的解决,这也是目前群智能进化算法 普遍存在的问题。鉴于配电网多目标动态重构问题 因变量维数很高而导致求解复杂度显著增高,该问 题的求解对算法的寻优速度及深度提出了更高的要 求。为此,本文设计了一种新型的复合型微分进化 多目标优化(MOCDE)算法流程如图1所示。

在 MOCDE 算法中,主要包括个体排序、种群分 割、复合微分进化和种群重组一系列操作。种群每次 经过 Pareto 非劣排序操作后会被分割成优部群落和 劣部群落,然后对优部群落的变异基向量采用随机 选择的方法,以增加个体多样性;对劣部群落采用当 前最优个体作为变异基向量,以增强进化的方向性。 这样,若个体进化过快则会自动升入优部群落并通 过 DE/rand/1 策略随机变异加速分化;若个体进化 缓慢则会自动跌入劣部群落并通过 DE/best/1 策略 定向变异加速进化。即在每次循环迭代过程中,各个 体会根据自身进化特点自动选择适宜的变异策略, 由此可实现微分进化不同变异策略的优势互补,兼 顾个体多样性和收敛速度。MOCDE 算法通过上述策 略融合技术巧妙地解决了群智能进化算法普遍存在 的寻优深度与速度之间的矛盾。



图 1 MOCDE 算法流程 Fig.1 Flowchart of MOCDE algorithm

在通过 MOCDE 算法获得了 Pareto 最优解集 后,实际运作中决策者还需要从中选取出一个最优 折中解作为调度方案实施。在此可参考文献[15]中 的方法,根据模糊集理论求得 Pareto 解集中各解的 标准化满意度,然后将具有最大满意度的 Pareto 最 优解确定为最优折中解。

2.2 重构方案编码过程

配电网动态重构方案需要考虑多个时段的开关 组合,因此个体编码比单个时段静态重构更长也更 为复杂。编码的位数和解码复杂度对配电网动态的 寻优效率有重要影响。若采用常规的用"0"和"1"分 别代表各开关的开合状态的二进制编码方式,如果 网络中有 K 个可操作开关,重构周期内的时段数为 T, 则二进制编码就需要 KT 位,必然会因变量维数过高 而导致搜索空间激增和寻优效率低下。为了降低变 量维数,同时适应微分进化的实数运算操作,本文采 用基于独立环路的实数编码策略。重构前首先将配 电网中所有联络开关虚拟闭合,可形成若干个独立 环路。以图 2 所示 IEEE 33 节点配电系统为例^[19],联 络开关均闭合后可形成 5 个独立环路。

若要使得网络重构后呈辐射状拓扑结构,则每 个独立环路中必须只能有一条支路断开,且同一条 支路不能重复断开^[3]。当网络重构时无开关被重复 断开时,式(5)即可满足。对于不在任何环路内的支 路上开关,由于其在配网运行时必须闭合,因此编码 时无需考虑。假定重构前总共可形成 *R* 个独立环路, 则配电网在 *T* 个时段内的动态重构方案可采用如下



图 2 IEEE 33 节点测试系统 Fig.2 IEEE 33-bus test feeder

T×R 维矩阵形式进行编码:

 $\boldsymbol{U} = \begin{bmatrix} u_{1,1} & u_{1,2} & \cdots & u_{1,R} \\ u_{2,1} & u_{2,2} & \cdots & u_{2,R} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{T,1} & u_{T,2} & \cdots & u_{T,R} \end{bmatrix}$ (14)

相比于二进制编码,矩阵 U 的维数大为降低。 其中每行代表一个时段内各独立环路的编码组合, 各元素 u_{ij} 为在[0,1]间随机产生的实数;若已知第j个独立环路所包含的支路集合为 $\{r[1],r[2],\cdots,$ $r[K_j]\},对元素 <math>u_{ij}$ 进行解码后即可得到对应i时段 第j 个独立环路中需要断开的支路为 $r[ceil(u_{i,j}K_j)]$ (其中 ceil 表示向上取整)。在个体编码和微分进化 操作中则无需考虑各环路包含的支路数及开关编 号,应用非常方便。

3 算例及分析

为验证本文方法的有效性,在此以如图 2 所示 IEEE 33 节点配电系统为例,进行以降低配网有功损 耗和减少操作开关次数为综合目标的配电网多目标 动态重构。该系统额定电压为 12.66 kV,包含 33 个 节点、37 条支路,其中 5 个联络开关(标号分别为 33—37)在初始状态为全部断开,其余支路闭合。以 文献[19]中的 IEEE 33 节点负荷数据作为初始时段 各节点负荷值,并设本例中负荷包含商业负荷、居民 负荷和工业负荷 3 种类型,各类型的日负荷曲线如图 3 所示^[8],平均功率因数分别为 0.9、0.95 和 0.85,图 中横轴刻度值 4 对应时段 03:00—04:00,其他依此 类推。各节点负荷组成如图 4 所示^[20]。





Fig.4 Load proportions for different buses

基于本文方法对上述系统进行多目标动态重构。MOCDE算法的最大迭代次数设定为6000,种群规模为120,种群分割比例度为0.5。为了对比,还分别采用了常规NSDE算法^[15]和常用的NSGA-II算法(最大迭代次数和种群规模均与MOCDE算法相同,NSGA-II中遗传操作交叉概率为0.95,变异概率为0.05)对该配电网多目标动态重构问题进行求解。上述3种算法均分别运行10次后得到的最佳Pareto前沿对比如图5所示。



由图 5 可见,针对求解高度复杂的配电网多目标动态重构问题,MOCDE 算法优势明显,相比于常规 NSDE 算法和 NSGA-II算法,能更有效地避免陷入局部最优,可找到更为准确的 Pareto 前沿。进一步分析优化结果可知,若不改变初始开关状态,即开关切换次数 N 为 0 时,24 个时段的总网损达 8852 kW; 由 MOCDE 算法可得当开关切换次数达 10 次时,总网损可降到 6 388 kW,此时的配网动态重构方案如表 1 所示,经验证,表 1 中各时段方案正好与分时段静态重构的最优方案一致。说明 MOCDE 算法准

表 1 配电网动态重构方案(N=10) Tab.1 Distribution network dynamic reconfiguration scheme(N=10)

时段	断开开关编号	时段	断开开关编号	时段	断开开关编号
1	7/14/9/32/37	9	7/14/9/31/28	17	7/14/9/31/28
2	7/14/9/32/28	10	7/14/9/31/28	18	7/14/9/31/37
3	7/14/9/32/37	11	7/14/9/31/28	19	7/14/9/32/37
4	7/14/9/32/28	12	7/14/9/31/28	20	7/14/9/32/37
5	7/14/9/32/28	13	7/14/9/31/28	21	7/14/9/32/37
6	7/14/9/32/28	14	7/14/9/31/28	22	7/14/9/32/37
7	7/14/9/32/28	15	7/14/9/31/28	23	7/14/9/32/37
8	7/14/9/31/28	16	7/14/9/31/28	24	7/14/9/32/37

确地找到了该问题 Pareto 前沿的端点,而 NSDE 和 NSGA-Ⅱ算法均未能找到该端点。

图 5 中体现出在一定范围内可通过增加开关切 换次数,得到网络损耗更低的优化重构方案。由于每 次切换开关都会带来人工费、设备损耗以及断电损 失等费用,若假设切换一次开关的代价为 \$ 20,电价 为 0.12 \$/(kW·h),可得到其中的综合最优重构方案 如表 2 所示,这和采用文献[15]中模糊集方法计算 所得的最优折中解一致。此时开关切换次数为 5 次,综合运行费用为 \$ 892.08。

表 2 配网动态重构方案(N=5) Tab.2 Distribution network dynamic reconfiguration scheme(N=5)

时段	断开开关编号	时段	断开开关编号	时段	断开开关编号
1	33/34/8/36/28	9	33/34/11/36/28	17	7/34/11/36/28
2	33/34/8/36/28	10	33/34/11/36/28	18	7/34/11/36/37
3	33/34/8/36/28	11	7/34/11/36/28	19	7/34/11/36/37
4	33/34/8/36/28	12	7/34/11/36/28	20	7/34/11/36/37
5	33/34/8/36/28	13	7/34/11/36/28	21	7/34/11/36/37
6	33/34/8/36/28	14	7/34/11/36/28	22	7/34/11/36/37
7	33/34/11/36/28	15	7/34/11/36/28	23	7/34/11/36/37
8	33/34/11/36/28	16	7/34/11/36/28	24	7/34/11/36/37

然而,在不同情况下开关操作代价往往并不相 同或很难准确计算,此时可定义开关操作性价比为 总降损量除以切换开关次数,则根据优化结果可得 到最优性价比随开关切换次数的变化如图 6 所示。 可见,在开关切换次数由 0 次增加到 1 次、由 4 次增 加到 5 次和由 7 次增加到 8 次时降损效果较明显, 其中以开关切换 1 次的效果最好,最优可降低网损 1498 kW,此时的配网动态重构方案如表 3 所示。而



图 6 开关操作最优性价比

Fig.6 Optimal performance-cost ratio of switching operation

表 3 配电网动态重构方案(N=1) Tab.3 Distribution network dynamic reconfiguration scheme(N=1)

		0			
时段	断开开关编号	时段	断开开关编号	时段	断开开关编号
1	33/34/35/36/37	9	33/34/8/36/37	17	33/34/8/36/37
2	33/34/35/36/37	10	33/34/8/36/37	18	33/34/8/36/37
3	33/34/35/36/37	11	33/34/8/36/37	19	33/34/8/36/37
4	33/34/35/36/37	12	33/34/8/36/37	20	33/34/8/36/37
5	33/34/35/36/37	13	33/34/8/36/37	21	33/34/8/36/37
6	33/34/35/36/37	14	33/34/8/36/37	22	33/34/8/36/37
7	33/34/35/36/37	15	33/34/8/36/37	23	33/34/8/36/37
8	33/34/35/36/37	16	33/34/8/36/37	24	33/34/8/36/37

开关切换次数由 8 次增加到 10 次时却只能使网损降低 1 kW,因此增加这 2 次开关切换是完全没有必要的,同时也说明了若采用分时段静态重构得到如表 1 所示的 24 个时段内切换开关 10 次的方案实用价值不大,而只有进行全时段动态重构才能得到更为合理可行的方案。

4 结论

本文提出了一种以降低网损和减少开关操作次数为综合优化目标的配电网多目标动态重构新方法;在重构计算过程中,通过引入基于图论的代数连 通度理论和基于独立环路的实数编码策略,提高了 求解效率;并设计出新型的复合型微分进化多目标 优化算法实现了对上述配电网多目标动态重构问题 的有效求解。由此可一次性得出多种 Pareto 最优重 构方案,同时确定出配网重构降损效果与开关操作 次数之间的最优均衡关系,并能计算每次增加开关 操作次数的最优性价比,从而可根据实际情况灵活 选择最为合理有效的重构方案。本文方法可为配电 网多目标动态重构提供科学的指导。若将目标函数 作适当调整,该方法还可推广到求解其他优化目标 类型的配网动态重构问题。

参考文献:

- CARRENO E M,ROMERO R,PADILHA-FELTRIN A. An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008,23(4):1542-1551.
- [2] 王淳. 基于化学反应算法的配电网重构[J]. 电网技术,2012,36 (5):209-214.

WANG Chun. Distribution network reconfiguration based on chemical reaction optimization [J]. Power System Technology, 2012,36(5):209-214.

- [3] 刘继栋,王锡淮,肖健梅. 基于十进制编码的差分进化算法在配电网重构中的应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):94-97.
 LIU Jidong,WANG Xihuai,XIAO Jianmei. Distribution network reconfiguration based on differential evolution algorithm using decimal encoding [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(5):94-97.
- [4] 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.
- [5] 李秀卿,李文,杨云鹏.含有风力发电机组配电网多目标重构的研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(8):63-67.
 LI Xiuqing,LI Wen,YANG Yunpeng. Distribution network multi-objective reconfiguration with wind turbines [J]. Power System Protection and Control,2012,40(8):63-67.
- [6] 蒋燕君,姜建国,张宇华.采用多目标网格进化算法并面向对象的舰船电网重构[J].电力自动化设备,2013,33(3):26-32.
 JIANG Yanjun,JIANG Jianguo,ZHANG Yuhua. Object-oriented recon-figuration of shipboard power network using multi-objective

grid evolutionary algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):26-32.

[7] 卫健, 吕林, 魏震波, 等. 计及可靠性因素的配电网多目标重构算 法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 71-75.

WEI Jian, LÜ Lin, WEI Zhenbo, et al. Multi-objective reconstruction algorithm of distribution network considering the reliability factors [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13):71-75.

- [8] YIN S A,LU C N. Distribution feeder scheduling considering variable load profile and outage costs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2):652-660.
- [9] SHARIATKHAH M H,HAGHIFAM M R,SALEHI J,et al. Duration based reconfiguration of electric distribution networks using dynamic programming and harmony search algorithm [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2012, 41(1):1-10.
- [10] 江东林,刘天琪,李樊. 采用时段动态划分和分层优化策略的配 电网重构[J]. 电网技术,2012,36(2):153-157.
 JIANG Donglin,LIU Tianqi,LI Fan. Distribution dynamic distribution network reconfiguration based on dynamic partition of time intervals and hierarchical optimization[J]. Power System Technology,2012,36(2):153-157.
- [11] 熊宁,程浩忠. 基于开关组的禁忌算法在配电网动态重构中的应用[J]. 电力系统自动化,2008,32(11):56-59.
 XIONG Ning, CHENG Haozhong. Switch group based tabu algorithm-applied in distribution network dynamic reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(11): 56-59.
- [12] 李振坤,陈星莺,赵波,等. 配电网动态重构的多代理协调优化 方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(34):72-79.
 LI Zhenkun,CHEN Xingying,ZHAO Bo,et al. Dynamic reconfiguration of the distribution network based on multi-agent systems[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(34):72-79.
- [13] FIEDLER M. Algebraic connectivity of graphs[J]. Czechoslovak Mathematical Journal, 1973, 23(2):298-305.
- [14] 管宇,张晓东,徐光辉. 树的变形与代数连通度[J]. 应用数学学报,2011,34(2):341-352.

GUAN Yu,ZHANG Xiaodong,XU Guanghui. Deformation and algebraic connectivity of weighted trees[J]. Acta Mathematicae

Applicatae Sinica, 2011, 34(2): 341-352.

- [15] 彭春华,孙惠娟. 基于非劣排序微分进化的多目标优化发电调度[J]. 中国电机工程学报,2009,29(34):71-76.
 PENG Chunhua,SUN Huijuan. Multi-objective optimization power dispatch based on non-dominated sorting differential evolution[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(34):71-76.
- [16] PENG C,SUN H,GUO J,et al. Multi-objective optimal strategy for generating and bidding in the power market [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 57(1):13-22.
- [17] MENDES R, MOHAIS A S. DynDE: a differential evolution for dynamic optimization problems [C] // Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. [S.I.]:IEEE, 2005:2808-2815.
- [18] DAS S,ABRAHAM A,CHAKRABORTY U K,et al. Differential evolution using a neighborhood-based mutation operator [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2009,13 (3): 526-553.
- [19] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2):1401-1407.
- [20] 杨胡萍,彭云焰,熊宁. 配网动态重构的静态解法[J]. 电力系统 保护与控制,2009,37(8):53-57.
 YANG Huping,PENG Yunyan,XIONG Ning. A static method for distribution network dynamic reconfiguration[J]. Power System Protection and Control,2009,37(8):53-57.

作者简介:



孙惠娟(1982-),女,江西南昌人,讲师, 硕士,主要从事配电网重构、智能电网优化运 行等方向的研究(E-mail:hjsun@ecjtu.edu.cn); 彭春华(1973-),男,江西乐平人,教授, 博士,主要从事电力系统优化运行、动力经 济与电力市场等方向的研究(E-mail: chinapch@163.com);

孙惠娟

袁义生(1974-),男,江西上高人,副教 授,博士,主要从事电力电子技术方向的研究。

Multi-objective dynamic distribution network reconfiguration considering switching frequency

SUN Huijuan, PENG Chunhua, YUAN Yisheng

(School of Electrical & Electronics Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: A multi-objective dynamic distribution network reconfiguration method is proposed to improve its rationality and effectiveness. The reconfiguration model is built, which takes the minimum network loss as its comprehensive optimization objective. The network and switching frequency connectivity discrimination method based on the algebraic connectivity of graph theory is adopted to quickly eliminate the ineffective solutions. The real number coding strategy based on the independent loop is used to significantly reduce the variable dimension. For solving the complex model, an optimal, compound, multiobjective differential evolution algorithm is designed, which integrates different mutation strategies and considers both individual diversity and convergence speed to solve the contradiction of group smart evolution algorithm between the searching depth and optimization speed. As an example, the multiobjective dynamic reconfiguration of IEEE 33-bus distribution network is carried out. The optimal Pareto performance-cost ratio of switching operation are analyzed, which solution set obtained and the demonstrates the effectiveness and superiority of the proposed method.

Key words: electric power distribution; reconfiguration; dynamic reconfiguration; optimization; compound differential evolution; models

46