考虑网络脆弱性的多目标配电网重构

基于复杂网络理论和电网结构脆弱性分析，建立以网络损耗最小、电压偏移量最小和网络效能最大的多目标配电网重构模型，兼顾网络经济性、电能质量和网络脆弱性，算法采用基于Pareto最优的带精英策略快速非支配排序遗传算法（NSGA－Ⅱ）。通过算例系统的计算验证了该方法的有效性，并对高介数故障下的恢复方案进行模拟与分析，合理优化了网络架构，对配电网络架构的规划和运行将具有一定的借鉴作用。

姜　江/南京供电公司

姜　江/工程师

关键词/Keywords
配电网重构·
复杂网络理论·
网络脆弱性·
多目标优化·
NSGA－Ⅱ算法·

0　引言

配电网重构是在满足节点电压降落要求、馈线容量要求和变压器容量要求等条件的前提下，通过合理安排配电网中分段开关和联络开关的开合状态，调整配电网架结构，从而实现均衡负荷、降低网损和快速恢复供电等目的，优化配电网运行。

配电系统处于电力系统末端，是电力系统向用户供应和分配电能的重要环节。传统的配电网重构主要是以维持电力网络的稳定运行、可靠供电和提高经济性等为目的，而忽略了网络拓扑结构自身的影响。而配电网具有网络结构多样、运行方式复杂多变及设备数量繁多等特点，是典型的复杂网络，网络结构的确定决定了电力网络内在、本质的特性[1]。电力系统脆弱性基于复杂网络理论，用来描述系统在正常运行情况或各种随机因素的作用下，系统承受干扰或故障的能力及系统不能维持正常运行的可能趋势及其影响[2]。随着配电网络规模的不断扩大，增强配电网在突发事件下的安全可靠持续供电越来越受到关注，研究配电网络的脆弱性对坚强智能配电网的规划和运行具有重大的意义。

数学上，配电网重构的求解是一个多目标非线性混合优化问题，目前主要的算法有数学优化方法[3]，启发式方法[4]如最优流模式法、支路交换法以及人工智能法[5]。对多目标优化问题，现有算法通常把多个目标函数通过加权等方式整合成单目标，将多目标优化问题转变为单目标优化问题，再利用较为成熟的单目标优化方法加以间接求解[6-7]。而基于Pareto多目标最优性的优化方法[8]不依赖于单目标优化方法，协调各目标函数之间的关系，避免了对方案多目标性的近似，并有助于决策者在多种方案中进行权衡，可以有效求解电力系统中一系列多目标优化问题。

本文主要研究考虑配电网脆弱性的网络重构问题，基于复杂网络理论，从网络拓扑结构着手，建立多目标配电网重构模型，兼顾网络经济性、电能质量和网络脆弱性，并采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法（NSGA－Ⅱ）进行求解，通过IEEE 33节点算例仿真计算得到合理的配电网重构方案。

1　基于复杂网络理论的配电网脆弱性评估

复杂网络脆弱性分析是从网络拓扑结构分析的角度，对网络本身结构的安全可靠性进行分析，通过对网络脆弱性指标的评估，度量网络系统承受干扰或故障的能力。配电网是一个强非线性的

复杂系统，具有复杂网络的基本特征，可以将配电网络拓扑结构抽象为由节点和边连接组成的网络图[9]。

借鉴复杂网络理论在大电网脆弱性分析中的基本思想，文献[10]采用全局效能E来度量网络遭受故障后的性能，其定义为

$$E=\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i\neq j}\frac{1}{d_{ij}} \tag{1}$$

式中，N为网络节点总数；d_{ij}为节点i与节点j之间的平均路径长度。

对于无向无权网络，网络中节点i与节点j之间的距离d_{ij}为连接这两个节点的最短路径所历经的边数[11]；对于无向加权网络，网络中节点i与节点j之间的距离则为连接这两个节点所经过的各边的权值之和的最小值。采用支路阻抗值作为对应各边的权值，表征的是节点i与节点j之间电气距离最短的路径，在电力系统中可以为潮流分布提供参考，即尽可能使潮流通过损耗最小的路径进行分布。

式（1）为基于最短路径建立的全局效能指标，数值越高则传输电能的效率越高，网络结构越坚强，发生故障后，网络对故障耐受能力越强，受影响的范围越小，从而增强网络对负荷安全可靠持续供电的能力。相对比高压主电网，配电网结构疏松，由式（1）计算出的网络全局效能数值也较小。

在复杂网络理论中，线路介数是指线路被网络中所有电源节点与负荷节点之间最短路径经过的次数。高介数线路的移除会改变电网的拓扑结构，导致大量最有效路径的重新分布，进而引起系统连锁故障，是电力网络的脆弱环节。因此，在原有网络状态下选择并移除网络中线路介数最高的一条线路，研究网络在模拟故障下的各项性能指标。

2 考虑网络脆弱性的多目标配电网重构模型

2.1 目标函数

以多目标配电网重构为数学模型，综合考虑了配电网运行经济性、电压质量和安全稳定性。模型的目标函数为网络损耗、节点电压偏移量最小以及网络全局效能指标最大。

$$\begin{cases} f_1=\min\sum_{l=1}^{N_L}k_lR_l\left|I_l\right|^2=\sum_{l=1}^{N_L}k_lR_l\dfrac{P_l^2+Q_l^2}{U_l^2} \\ f_2=\min\sum_{i=1}^{N_B}\left(\dfrac{U_i-U_N}{U_N}\right)^2 \\ f_3=\max E \end{cases} \tag{2}$$

式中，f_1为网络损耗；N_L为网络支路总数；l为支路编号；k_l为支路l开关的状态，0表示断开，1表示闭合；R_l为支路l的电阻；P_l、Q_l分别为支路l的末端有功功率和无功功率；U_l为支路l的末端节点电压；f_2为网络总的节点电压偏移量；N_B为网络节点总数；i为节点编号；U_i、U_N分别为节点i的实际电压和额定电压；f_3为式（1）所示的网络全局效能。

2.2 约束条件

配电网重构需要考虑的约束条件有潮流方程等式约束、节点电压约束和支路传输功率约束，即

$$\begin{cases} f(P_i,Q_i,U_i)=0 \\ U_{i\min}\leqslant U_i\leqslant U_{i\max} \\ S_l\leqslant S_{l\max} \end{cases} \tag{3}$$

式中，P_i、Q_i分别为节点i的有功功率和无功功率；U_i为节点i的电压；$U_{i\min}$、$U_{i\max}$分别为节点i电压的下限和上限；$S_{l\max}$为支路l的潮流上限。

此外，还应满足网络拓扑约束，即重构后的配电网应保持辐射状，不存在孤岛。

3 算法及流程

3.1 NSGA－II算法

在多目标优化算法中，基于Pareto多目标最优性的优化方法是严格意义上的多目标优化方法，其不依赖于单目标优化方法，利用向量优化方法进行多目标寻优，权衡各个目标的重要程度和相互关系，有效避免权重法等间接求解方法在多目标量纲和数量级处理上的困难。带精英策略的快速非支配排序遗传算法（NSGA－Ⅱ）[12-13]是一种

基于Pareto最优的多目标进化算法，是在非支配排序遗传算法（NSGA）的基础上改进而来的，采用Pareto非支配快速排序、精英保留策略、基于解的非支配排序等级和拥挤距离的选择算子，提高了算法的运算速度和鲁棒性，以及非劣解的均匀分布。

NSGA－Ⅱ算法的基本流程[13]为：随机产生规模为N_p的初始种群，非支配排序后通过遗传算法的选择、交叉和变异3个基本操作得到第一代种群；从第二代开始，将父代种群与子代种群合并成规模为$2N_p$的种群，进行快速非支配排序，对同一非支配排序等级的个体进行拥挤度计算，根据个体间的非支配关系以及个体拥挤度选取相应的个体组成新的父代种群，再通过遗传算法的基本操作产生新的子代种群。NSGA－Ⅱ算法的流程图如下图所示。

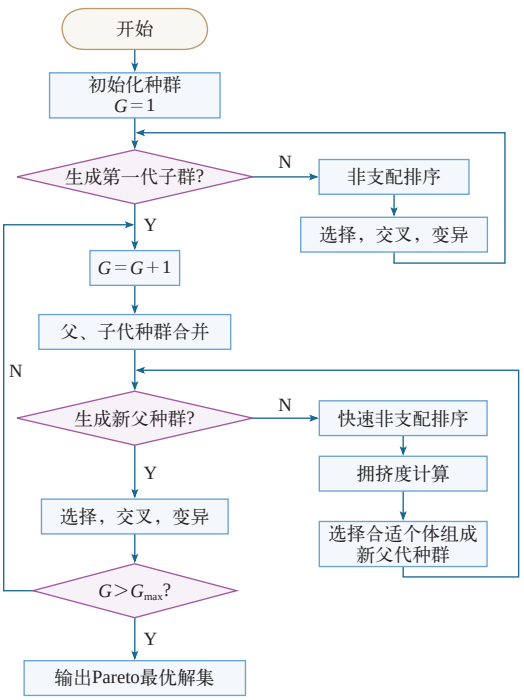

图　NSGA－Ⅱ算法基本流程

采用NSGA－Ⅱ算法得到的Pareto最优解集，即该算法最后一次迭代生成的种群中非支配排序等级为1的解的集合。而实际运行中，最终实施的方案一般只有一个，因此决策者需要从Pareto最优解集中选取出一个最优折衷解，根据模糊集理论来确定该最优折衷解[14]。每个Pareto解中各目标函数对应的满意度可用模糊隶属度函数来表示为

$$h_m=\begin{cases}1 & f_m\leqslant f_{m\min}\\ \dfrac{f_{m\max}-f_m}{f_{m\max}-f_{m\min}} & f_{m\min}<f_m<f_{m\max}\\ 0 & f_m\geqslant f_{m\max}\end{cases}\tag{4}$$

式中，f_m为目标函数，$m\in\{1,2,\cdots,N_{\text{obj}}\}$；$f_{m\max}$、$f_{m\min}$分别为第$i$个目标函数的最大和最小值。

再求得Pareto解集中各解的满意度为

$$h=\sum_{m=1}^{N_{\text{obj}}}h_m\tag{5}$$

通过比较，选取出具有最大h值的Pareto最优解作为最优折衷解。决策者也可以进一步根据实际系统的需求，通过对$f_{m\max}$和$f_{m\min}$的偏好设定，或通过在最优解集中根据对不同最优化目标的重视程度设定优先级，进行最优解的选择，不同的偏好设定和选取原则可能导致最终折衷解的不同。

3.2　多目标配电网重构的NSGA－Ⅱ算法求解步骤

运用NSGA－Ⅱ算法求解多目标配电网重构问题的步骤如下。

1）输入原始数据，包括网络拓扑、线路参数、节点参数以及算法需要的控制参数。

2）对开关状态进行编码，形成初始种群。为简化编码，采用文献[15]的编码方式，以网络中环路数量为染色体长度，环路开关号为染色体内容的编码方式。

3）采用遗传进化算法的交叉和变异机制形成新子代种群。

4）父、子代种群合并，计算个体对应的各目标函数，根据个体间的非支配关系，对种群快速非支配排序，计算个体的拥挤距离。计算前先进行网络拓扑结构检验，如果网络辐射状或存在孤岛则抛弃该方案，若规划方案不满足约束条件的要求，则通过惩罚项将该个体自然淘汰。

5）基于Pareto最优的精英选择操作。依据4）的计算结果，选择非支配等级高的和个体拥挤度大的个体形成满足种群数量要求的下一代个体。

6）如满足中止条件，则进行7），否则返回3）。

7）从Pareto解集中选出一个最优折衷的可行方案。

4 算例及分析

以IEEE 33节点系统[16]为例进行计算，该系统是一个额定电压为12.66 kV的配电网络，有33个节点、37条支路及5个联络开关{S_{33}，S_{35}，S_{34}，S_{37}，S_{36}}，总负荷为3 715 kW＋j2 300 kvar。

运用NSGA－II算法求解多目标配电网重构问题，以网络损耗、节点电压偏移量和全局效能为目标函数，可以得到一组Pareto最优解集，每个Pareto最优解对应一个多目标重构方案。应用式（4）、式（5）求得Pareto解集中各解的满意度，表1中列出了满意度最高的3组方案。其中，方案1为具有最大满意度值的最佳折衷方案。基于Pareto最优的多目标优化算法能够为决策者提供更多的选择方案，决策者可以根据实际系统的需求，选取适宜的重构方案。

表1 多目标配电网重构结果

方案	开断支路集合	网络损耗/kW	电压偏移	全局效能
方案1	S_7，S_9，S_{14}，S_{28}，S_{36}	123.86	0.039 3	0.446 6
方案2	S_7，S_9，S_{14}，S_{28}，S_{32}	122.68	0.040 8	0.446 0
方案3	S_7，S_{10}，S_{14}，S_{28}，S_{36}	124.38	0.039 8	0.447 7
重构前	S_{33}，S_{34}，S_{35}，S_{36}，S_{37}	202.68	0.113 3	0.400 2

根据线路介数的定义，应用复杂网络理论对重构前和最优方案的网络进行分析，介数最高的线路均为18。移除线路18，考察网络在极端故障下的恢复情况，同时考虑开关操作次数最少，网络重构情况和性能如表2所示。计算结果表明，高介数线路的移除对网络损耗、电压偏移和全局效能均具有很大的影响，是网络的脆弱环节，而最优方案下的网络结构可以加强网络对最严重故障的耐受能力，最大程度减少故障对网络性能的影响。

表2 高介数线路故障下重构结果

方案	开断支路集合	网络损耗/kW	电压偏移	全局效能
最优方案下	S_9，S_{14}，S_{18}，S_{28}，S_{36}	190.19	0.104 4	0.366 4
重构前方案下	S_{18}，S_{34}，S_{35}，S_{36}，S_{37}	237.48	0.165 1	0.347 9

5 结束语

配电网络是电力系统向用户供应和分配电能的最后环节，网络重构优化关系着配电系统安全稳定经济优质运行。基于复杂网络理论，从电力系统网络拓扑结构的角度展开研究，在配电网重构问题中引入网络脆弱性指标，建立综合考虑重构方案的经济性、电能质量以及网络脆弱性的多目标配电网重构模型，采用基于Pareto最优的NSGA－Ⅱ算法进行求解。IEEE 33节点系统算例结果和对高介数故障模拟与分析，验证了该方法的有效性，合理优化了网络结构，并为决策者提供了更多的重构方案选择，对配电网络架构的规划和运行有一定的借鉴意义。

参考文献

[1] 肖军，刘天琪．复杂网络理论在电力系统中的运用与研究 [J]．四川电力技术，2009，32 (2)：28-32．

[2] 魏震波，刘俊勇，朱国俊，等．电力系统脆弱性理论研究 [J]．电力自动化设备，2009，29 (7)：38-43．

[3] Roytelman I，Melnik V，Lee S S，et al．Multiobjective feeder reconfiguration by distribution management system [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1996，11 (2)：661-667．

[4] Glamocanin V．Optimal loss reduction of distribution networks [J]．IEEE Transactions on Power System，1990，5 (3)：774-782．

[5] 刘莉，陈学允．基于模糊遗传算法的配电网络重构 [J]．中国电机工程学报，2000，20 (2)：66-69．

[6] 刘志勇，刘杨华，林舜江，等．基于模糊多目标协调优化的配电网络重构研究 [J]．电力系统保护与控制，2014，42 (4)：133-138．

[7] 翁嘉明，刘东，何维．基于层次分析法的配电网运行方式多目标优化 [J]．电力系统自动化，2012，36 (4)：56-61．

[8] 郑金华．多目标进化算法及其应用 [M]．北京：科学出版社，2007．

[9] 杨丽徙，曾新梅，方强华，等．基于抗毁性分析的中压配电网络拓扑结构 [J]．电力系统自动化，2013，37 (8)：65-69．

(下转第32页)

[2] 杨辉，文福拴，刘永强，等．适用于配电系统潮流计算的新的前推回代算法 [J]．电力系统及其自动化学报，2010，22 (3)：123-127．

[3] 汪芳宗，杨力森，高学军，等．基于松弛牛顿法的互联电网并行分布式潮流计算方法 [J]．电力系统保护与控制，2007，35 (16)：18-22．

[4] 刘波．计及分布式电源的电力系统潮流及可靠性与稳定性研究 [D]．上海：上海交通大学，2009：28-43．

[5] 孙羽．含分布式发电的电力系统复合式网络模型潮流计算方法研究 [D]．沈阳：东北大学，2009．

[6] 夏沛，徐俊明．改进牛顿法大规模电力系统潮流计算 [J]．计算机技术与自动化，2010，29 (4)：59-62．

[7] 江岳文，陈冲，温步瀛．含风电场电力系统的潮流计算 [J]．华东电力，2008，36 (2)：86-88．

[8] 夏沛，汪芳宗．大规模电力系统快速潮流计算方法研究 [J]．电力系统保护与控制，2012，40 (9)：38-40．

[9] 李小兰．含分布式发电的电网潮流计算及无功补偿辅助决策系统 [D]．沈阳：东北大学，2010．

[10] 汤伟，吴昊．基于网络拓扑结构的全网潮流计算模型自动生成 [J]．现代电力，2013，30 (2)：13-16．

[11] 王渝红，张彪，李兴源，等．基于边界节点量测信息的两端口网络等值方法 [J]．四川大学学报：工程科学版，2014，40 (5)：127-132．

[12] Phebe A M S，Satayanarayana B P S M．Comparison of general and fuzzy set load estimation in radial distribution network power flow [C]．International Conference on Adrances in Power Conversion & Energy Technologies，2012：1-5．

[13] 尹璐，舒彬，张璞，等．统一潮流控制器在电力系统中的 PSD-BPA 和Matlab联合建模与仿真方法 [J]．电工技术学报，2015，30 (1)：383-388．

[14] 沙浩洁，杨天梅．分布式风力发电技术分析及经济评估 [J]．华东电力，2009，37 (2)：300-302．

[15] 陈海炎，陈金富，段献忠．含分布式电源的配电网潮流计算 [J]．电力系统自动化，2006，30 (l)：35-40．

（收稿日期：2016－03－08）EA

(上接第27页)

[10] Holme P，Kim B J，Yoon C N，et al．Attack vulnerability of complex networks [J]．Physical Review E，2002，65 (5)：056109．

[11] 汪小帆，李翔，陈关荣．复杂网络理论及其应用 [M]．北京：清华大学出版社，2006．

[12] Srinivas N，Deb K．Multiobjective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms [J]．Evolutionary Computation，1994，2 (3)：221-248．

[13] Deb K，Pratap A，Agarwal S，et al．A fast and elitist multiobjective genetic algorithm：NSGA-II [J]．IEEE Transactions on Evolutionary Computation，2002，6 (2)：182-197．

[14] Farina M，Amato P．A fuzzy definition of “optimality” for many-criteria optimization problems [J]．IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics，Part A，2004，34 (3)：315-326．

[15] 刘自发，葛少云，余贻鑫．一种混合智能算法在配电网络重构中的应用 [J]．中国电机工程学报，2005，25 (15)：73-78．

[16] Goswami S K，Basu S K．A new algorithm for reconfiguration of distribution feeders for loss minimization [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1992，7 (3)：1484-1491．

（收稿日期：2016－05－24）EA