

# 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化

王新刚<sup>1</sup>, 艾芊<sup>1</sup>, 徐伟华<sup>1</sup>, 韩鹏<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 山西省电力公司电力调度中心, 山西 太原 030001)

**摘要:** 在详细分析了分布式电源特性和优化目标数学模型的基础上, 针对微电网中分布式电源出力的优化管理, 提出了一种基于小生境进化的多目标免疫算法。该算法将优化的多目标函数作为抗原, 优化问题的可行解作为抗体, 构造多个小生境以增强抗体种群的多样性并保存优良抗体。在小生境进化过程中, 依据抗体对抗原的适应度以及抗体之间的亲和力对可行解进行评价和选择, 反复通过选择、交叉、变异等操作完成对最优解的搜索。应用此算法对一个微电网的多个分布式电源进行能量管理, 通过与其他优化算法的比较证明了该算法的有效性。

**关键词:** 微电网; 分布式发电; 能量管理; 免疫算法; 小生境

## Multi-objective optimal energy management of microgrid with distributed generation

WANG Xin-gang<sup>1</sup>, AI Qian<sup>1</sup>, XU Wei-hua<sup>1</sup>, HAN Peng<sup>2</sup>

(1. Electrical Engineering Department, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Power Dispatching and Communication Center, Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** To carry out the optimal management of the distributed generation, this paper presents a multi-objective niche evolutionary immune algorithm (MO-NEIA) based on detailed analysis of the distributed generations' characteristics and the optimization objectives' math models. The algorithm, using the objective function as antigen and the solution of the problem as antibody, builds some niches to enhance the variability of the antibody and restore the good antibody. In the process of niche evolution, the optimal solution can be obtained through the antibodies selection, crossover and mutation according to the affinity between antibody with antigen and the affinity between antibodies. The proposed algorithm is applied to the management of the distributed generations in a microgrid system and the results compared to another optimal algorithm demonstrate its feasibility.

This project is supported by State 863 High-tech program (No.2007AA05Z458) and National Natural Science Foundation of Shanghai(No.08ZR1409700).

**Key words:** microgrid; distributed generation; energy management; immune algorithm; niche

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0079-05

## 0 引言

随着人们环境意识的增强, 分布式发电 (DG-distributed generation) 得到了越来越多的重视与应用, 由小容量分布式电源形成的微电网研究则更加令人关注<sup>[1-3]</sup>。这类微电网中的分布式电源主要包括风力发电机、太阳能光伏电池、燃料电池、微型燃气轮机等, 而不同种类的分布式电源又有着不同的运行特性。在确保微电网正常运行时, 如何对这些分布式电源进行合理的管理, 以保证微电网在不同时段都能满足负荷的电能质量要求并且获得

最理想的经济效益, 是研究微电网技术的关键问题之一。

本文针对分布式电源的运行特性, 将不同类型的电源区别对待, 以达到整个微电网的最优化运行。由于分布式电源的功率输出并不像传统电网中的发电机那样稳定, 这对优化算法的实时性要求就比较高, 常规的优化算法很难在优化结果和计算速度之间取得一个较好的平衡点。本文采用改进的多目标免疫算法, 它吸收了 NSGA-II 算法<sup>[4]</sup>的优势并与基于小生境进化<sup>[5-8]</sup>的免疫算法相结合, 即基于小生境进化的多目标免疫算法。它利用了小生境技术防止早熟、提高搜索速度和精度的优点, 通过不断度量抗体之间的相似性来限制相似抗体的数量, 维持了种群的多样性, 能够快速、准确地完成多目标优化。

**基金项目:** 国家 863 高技术基金项目 (2007AA05Z458); 上海自然科学基金项目 (08ZR1409700)

经过多次算例验证此方法在微电网能量优化管理方面有一定的先进性,特别是多目标优化方面。

## 1 微电网优化问题的描述

### 1.1 优化的目标函数

微电网能量管理的优化问题一般包括技术目标和经济目标。其中技术目标主要反应在电能质量方面,包括各负荷节点的电压水平最好,即电压偏差最小,而经济目标则包括系统的网损最小,微电网中分布式电源的运行效率最高。因此,最优能量管理的目标函数表达式为

$$F = \begin{cases} \min(\Delta V) \\ \min(\Delta S_L) \\ \max(E) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\Delta V$  为电压偏差;  $\Delta S_L$  为系统网损;  $E$  为分布式电源的运行效率。

电压偏差的目标函数就是将各节点的电压偏差总和最小化,其表达式为

$$\min(\Delta V) = \sum_{i=1}^n \frac{\Phi(|\Delta V_i| - \delta V_i)}{V_i} \quad (2)$$

式中:  $n$  为微电网的节点数;  $V_i$  为节点  $i$  的电压,  $\Delta V_i$  为节点  $i$  的电压偏差量,标幺化以后,则  $\Delta V_i = V_i - 1$ ;  $\delta V_i$  为节点  $i$  允许的最大电压偏差量; 设  $x$  为电压偏差超越允许的最大电压偏差量,则函数  $\Phi(x)$  可以表示为

$$\Phi(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ x, & x > 0 \end{cases} \quad (3)$$

我国低压电网电压偏差的允许范围为  $-10\% \sim +7\%$ , 本文取电压偏差为  $-5\% \sim +5\%$ , 当电压偏差在这个范围内时认为电压合格。网损优化的目标就是通过控制微电网的潮流使系统的有功、无功损耗最小化,其表达式为

$$\min(\Delta S_L) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n |\Delta P_L| \\ \sum_{i=1}^n |\Delta Q_L| \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $n$  为系统支路数;  $|\Delta P_L|$ 、 $|\Delta Q_L|$  为线路上的有功、无功损耗。

运行效率的目标函数就是使微电网中分布式电源获得最好的经济效益,在保证电压合格的前提下,尽可能地提高分布式电源的功率因数。在不考虑无功补偿的情况下,通过改变换流器的控制参数实现分布式电源有功  $P_{dgi}$  和无功  $Q_{dgi}$  的独立控制,为了使

分布式电源的功率因数达到最大,可以取目标函数为

$$\min\left(\frac{1}{E}\right) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{P_{dgi}}{\sqrt{P_{dgi}^2 + Q_{dgi}^2}} \quad (5)$$

式中:  $N$  为分布式电源的个数。

因此,在微电网正常运行时,不考虑分布式电源的暂态特性,能量管理优化的总目标函数为

$$\min(F) = \min(\Delta V, \Delta S_L, \frac{1}{E}) \quad (6)$$

### 1.2 约束条件

微电网能量管理优化的约束条件主要有变量约束和潮流约束,其中变量约束分为:每个分布式电源输出的有功功率约束,补偿电容器的无功容量约束,以及各节点的运行电压约束。其不等式表示如下

$$\begin{cases} P_{k\min} \leq P_k \leq P_{k\max} \\ Q_{k\min} \leq Q_k \leq Q_{k\max} \\ V_{j\min} \leq V_j \leq V_{j\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_{k\min}$ 、 $P_{k\max}$ 、 $Q_{k\min}$ 、 $Q_{k\max}$  分别为节点  $k$  上分布式电源和电容器注入的有功功率和无功功率的最小、最大值;  $V_{j\min}$ 、 $V_{j\max}$  表示节点  $j$  运行电压的最小、最大值。

上述变量约束条件都必须满足潮流方程的约束,潮流约束如下

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{is} - \sum_{j \in i} V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{is} - \sum_{j \in i} V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $n$  为系统节点数,  $i=1,2,\dots,n$ ,  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  和  $\theta_{ij}$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  之间的导纳和相角差;  $j \in i$  表示与节点  $i$  相连的节点。

### 1.3 最优解的确定

在进行多目标优化时,很难使所有目标同时达到最优,于是解决这类问题的方法通常就是在各个目标之间进行协调和折衷,使目标函数尽可能达到最优。基于权重系数的多目标优化算法是求解这类问题最直接有效的方法,但权重系数的确定比较困难;基于 Pareto 可行解形成的 Pareto 非支配边界有效解决了这一问题,但是计算时间较长,很难满足微电网能量实时管理的要求。

本文在 Pareto 非支配解的思想对基于权重系数的优化算法进行改进,通过一定的方向改变权重

系数  $W_i$  来获得一组在不同权重下的最优解  $F_i$ 。在确定了一个目标范围（如网损小于某一定值且功率因数大于某一定值）以后，搜索满足这一范围内的最优解。若存在这样一个最优解，就将它作为此次优化的最优解输出；若不存在，则通过与这一目标范围最近的两个最优解进行插值运算，获得满足要求的权重系数，将多目标化为单目标再通过优化算法计算得到最优解。

## 2 小生境进化的多目标免疫算法

### 2.1 小生境进化多目标免疫算法的描述

生物中的小生境是指特定环境下的一种生存环境，生物在其进化过程中，一般总与自己相同的物种生活在一起，生活在一个特定的地理区域中<sup>[9]</sup>。小生境进化多目标免疫算法基于免疫应答原理，其主要思想是将求解问题的多目标函数对应入侵免疫系统的抗原，多目标函数的可行解对应免疫系统产生的抗体，用抗体和抗原亲和力（适应度）来描述可行解和最优解的逼近程度<sup>[10]</sup>。小生境内抗体的数量是固定的，它通过更高适应度抗体的不断加入和最低适应度抗体的逐步淘汰完成其进化过程。通过引入小生境方法来增强群体多样性及保存优良抗体，提高搜索能力。

### 2.2 抗体的亲和力

在优化过程中，抗体的多样性是免疫算法一个非常重要的指标，如果某些抗体的亲和力相同，将会影响优化的搜索效率<sup>[11]</sup>。抗体的亲和力主要包括两个方面：抗体之间的亲和力，即相似性；抗体和抗原的亲和力，即适应度。

抗体的相似性可以通过抗体之间的欧氏距离来描述，记第  $i$  个抗体为  $X_i$ ，第  $j$  个抗体为  $X_j$ ，则  $\|X_i - X_j\|$  为  $X_i$  与  $X_j$  之间的欧氏距离。抗体对抗原的适应度可由式(6)目标函数的倒数来表示，抗体的目标函数值越小表明它越接近最优解，适应度就越高。对于距离小于某一定值  $L$  的抗体，比较两者适应度  $A(X_i)$  和  $A(X_j)$  的大小，如果  $A(X_i) > A(X_j)$ ，则对  $A(X_j)$  施加一个较强的惩罚函数，使其适应度变得极小，在以后的进化中  $X_j$  会以极大的概率被淘汰。

### 2.3 小生境进化多目标免疫算法流程

本文微电网能量管理多目标优化的改进免疫算法的求解流程如图 1 所示。

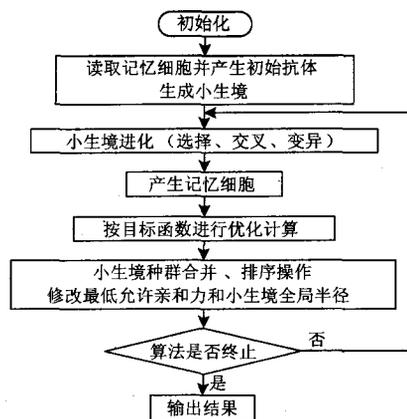


图1 算法流程框图

Fig.1 Flow process chart of algorithm

## 3 算例

本文通过对一个简单微电网中的多个分布式电源进行能量管理，实现能量的优化分配，微电网结构如图2所示。

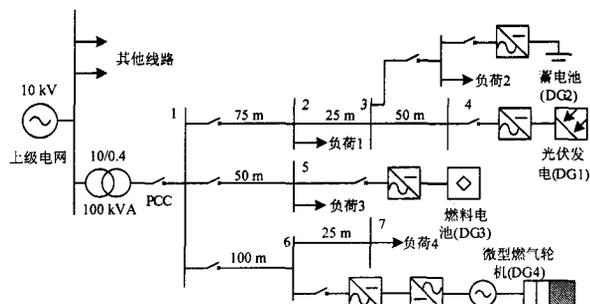


图2 微电网结构图

Fig.2 Diagram of the microgrid system

图中DG1为光伏电池，采用最大功率跟踪模式，不在优化算法的范围之内，DG2为蓄电池组，DG3为燃料电池，DG4为微型燃气轮机，都是可控电源，也是优化算法的主要控制对象。考虑到配电网辐射状的网络结构和低压线路参数的特点，取线路电阻  $R = 0.64 \Omega/\text{km}$ ，线路电抗  $X = 0.1 \Omega/\text{km}$ 。分布式电源和负载的一组参数列于表1。

表1 负载参数

Tab.1 Load parameters

名称	容量/kW	名称	功率/kVA
DG1	5	Load1	$7.5 + j0.95$
DG2	30	Load2	$30 + j3.8$
DG3	50	Load3	$30 + j3.8$
DG4	20	Load4	$15 + j1$

节点1连接配电网，潮流计算时看作松弛节点，同时取它的电压作为微电网的参考电压，标幺化以后为 $1\angle 0^\circ$ 。

本算例在保证电压合格的前提下，以网损最小和分布式电源运行效率最高为优化目标，采用小生境进化的多目标免疫算法进行寻优，算法的终止条件为两代抗体之间的最大适应度误差小于定值( $10^{-5}$ )，最大迭代次数为20，结果示于图3。为了更好地表现各个目标之间的关系，将对应的有功、无功网损加权平均化并取功率因数的倒数形式，图中不同权重的一组解形成一条凸向原点的曲线。左边部分的解表明系统运行的功率因数较高但网损较大，而右边部分的解则正好与之相反，这就给了控制系统一定的灵活性，根据不同的偏好可以选择不同的运行点。实际操作中可以预先确定一个优化的目标范围，这里取为网损小于1.13 kVA且功率因数

大于0.99，在图中表示为虚线与坐标轴围成的区域。由于在这一目标范围内不存在计算得到的最优解，需要对A、B两个解进行插值运算获得符合要求的权重，再通过所得的权重重新计算得到最终的最优解，如图中的 $\Delta$ 所示。

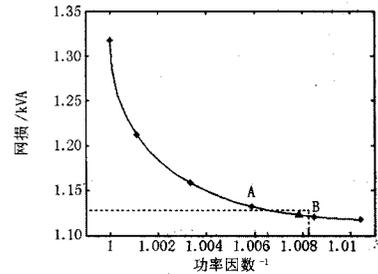


图3 小生境进化免疫算法的最优解集  
Fig.3 Optimal solutions based on NEIA

表2 一组不同权重的最优解

Tab.2 A set of optimal solutions based on different weight

解	$S_{dg2}$ /kVA	$S_{dg3}$ /kVA	$S_{dg4}$ /kVA	电压偏差 $\Delta V$	线路损耗/kVA	功率因数 $\cos \varphi$
1	22.057 + j4.342	30.041 + j3.451	15.787 + j0.944	0	1.106 + j0.173	0.991 0
2	22.081 + j4.196	30.055 + j3.327	15.790 + j0.888	0	1.108 + j0.173	0.991 6
3	22.104 + j4.048	30.066 + j3.190	15.793 + j0.832	0	1.109 + j0.173	0.992 2
4	22.130 + j3.888	30.077 + j3.058	15.796 + j0.774	0	1.111 + j0.174	0.992 9
5	22.158 + j3.721	30.088 + j2.911	15.797 + j0.719	0	1.115 + j0.174	0.993 5
6	22.208 + j3.349	30.109 + j2.594	15.797 + j0.605	0	1.124 + j0.176	0.994 8

表3 与NSGA-II相关结果的比较

Tab.3 Results comparing with NSGA-II

算法	$S_{dg2}$ /kVA	$S_{dg3}$ /kVA	$S_{dg4}$ /kVA	线路损耗/kVA	功率因数 $\cos \varphi$
NSGA-II	21.817 + j4.158	30.521 + j4.716	15.809 + j1.417	1.111 + j0.174	0.988 9
本文算法	22.104 + j4.048	30.066 + j3.190	15.793 + j0.832	1.109 + j0.173	0.992 2

算法	各节点电压(标幺值)						
	节点1	节点2	节点3	节点4	节点5	节点6	节点7
NSGA-II	1.0	0.992 70	1.002 60	1.048 36	1.002 12	1.003 11	0.978 32
本文算法	1.0	0.994 00	1.004 31	1.05	0.999 91	1.002 42	0.977 61

表2列出了一组不同权重下的最优解，从表中可以看出，在保证电压合格的前提下，系统的网损和功率因数是一对相互矛盾的目标。要减少网损必须以降低功率因数为代价，这就使得决策者可以根据不同的侧重目标选择最终的最优解，即在实际运行中，根据预期目标选择一个最优解。表3给出了本文的算法在满足网损小于1.13 kVA且功率因数大于0.99的条件下与NSGA-II算法结果的比较，其中NSGA-II算法取迭代20代的解。计算结果表明，通过本文算法计算得到的解在使系统网损达到最小

的同时功率因数高于NSGA-II算法，而且两种算法的各节点电压都在规定范围之内，负荷节点的电压都分布在额定值附近。由于本文的算法具有收敛速度快、计算步骤少等优点，使得其整体计算时间较短，可以满足微电网能量优化管理实时性的需求。

#### 4 结论

应用小生境进化免疫算法对微电网能量管理进行优化，解决了分布式电源的协调控制问题。与NSGA-II的比较结果表明，该算法以其抗体多样性、

小生境技术以及记忆功能等特点,使得整个微电网在每个分布式电源可调节范围内达到最优运行。当系统状态发生变化时,算法会立刻计算出新的结果,并通过能量管理系统重新整定,经过一个短暂的过程系统将稳定在新的运行点上。当涉及微电网与电力市场相结合等复杂情况时,本文所提出的多目标免疫算法将具有更大的优越性。

## 参考文献

- [1] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.  
WANG Cheng-shan, XIAO Zhao-xia, WANG Shou-xiang. Synthetical Control and Analysis of Microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [2] Laaksonen H, Saari P, Komulainen R. Voltage and Frequency Control of Inverter Based Weak LV Network Microgrid[A]. in: International Conference on Future Power Systems, 2005 [C]. 2005.
- [3] Katiraei F, Iravani M R. Power Management Strategies for a Microgrid with Multiple Distributed Generation Units[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(4): 1821-1831.
- [4] 冯士刚, 艾芊, 王伟, 等. 基于伪并行NSGA-II算法的火电站多目标负荷调度[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(3): 421-425.  
FENG Shi-gang, AI Qian, WANG Wei, et al. Multi-objective Load Dispatch of Power Plant Based on Pseudo-parallel NSGA-II Algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(3): 421-425.
- [5] 张敬平, 梁志瑞, 苏海锋, 等. 基于改进拥挤小生境遗传算法配网无功优化研究[J]. 继电器, 2007, 35(10): 19-22.  
ZHANG Jing-ping, LIANG Zhi-rui, SU Hai-feng, et al. Research on Reactive Power Optimization of Distribution Network Based on the Improved Crowding Niche Genetic Algorithm[J]. Relay, 2007, 35(10): 19-22.
- [6] 向铁元, 周青山, 李富鹏, 等. 小生境遗传算法在无功优化中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 48-51.  
XIANG Tie-yuan, ZHOU Qing-shan, LI Fu-peng, et al. Research on Niche Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 48-51.
- [7] 赵亮, 睢刚, 吕剑虹. 一种改进的遗传多目标优化算法及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 96-102.  
ZHAO Liang, JU Gang, Lü Jian-hong. An Improved Genetic Algorithm in Multi-objective Optimization and Its Application[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 96-102.
- [8] 郝晓丽, 谢克明. 基于小生境技术和聚类分析的人工免疫算法[J]. 计算机科学, 2007, 34(9): 135-138.  
HAO Xiao-li, XIE Ke-ming. Artificial Immune Algorithm Based on Niche Technology and Cluster Analysis[J]. Computer Science, 2007, 34(9): 135-138.
- [9] 王艳松, 陈国明, 张加胜, 等. 基于小生境遗传算法的配电网开关优化配置[J]. 电工技术学报, 2006, 21(5): 82-86.  
WANG Yan-song, CHEN Guo-ming, ZHANG Jia-sheng, et al. Optimal Switching Device Placement Based on Niche Genetic Algorithm in Distribution Networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(5): 82-86.
- [10] 李蔚, 刘长东, 盛德仁, 等. 基于免疫算法的机组负荷优化分配研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 241-245.  
LI Wei, LIU Chang-dong, SHENG De-ren, et al. Research on Optimization of Unit Commitment Based on Immune Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 241-245.
- [11] Lin C H, Chen C S, Huang M Y, et al. Optimal Phase Arrangement of Distribution Feeders Using Immune Algorithm[A]. in: International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, ISAP[C]. 2007.1-6.

收稿日期: 2008-11-06; 修回日期: 2008-12-19

作者简介:

王新刚(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定, 分布式发电和微电网技术; E-mail: srabbit23@sjtu.edu.cn

艾芊(1969-), 男, 博士, 副教授, 研究所所长, 主要研究领域为电能质量, 人工智能以及在电力系统中的应用, 电力系统元件建模, 分布式发电等;

徐伟华(1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统负荷建模, 智能算法。