

快速多目标无功优化方法在实际系统中的应用

张 建¹, 牛 霞¹, 刘晓东¹, 张安安², 潘家和³

(1. 广汉供电局, 四川 广汉 618300; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

3. 宜宾电业局, 四川 宜宾 644002)

摘 要: 多目标进化算法 (MOEA) 已经被应用到电力系统无功优化这一问题的求解, 但是由于 MOEA 算法需要相当长的寻优时间, 同时其优化结果针对性不强, 因此难以用于电网的无功电压自动实时控制。将以 ϵ -支配域为基础的多目标优化方法应用到实际系统的无功电压自动实时控制中, 该方法包括多目标模糊评价函数、自适应 ϵ -MOEA 优化算法以及后评价模糊控制器。通过在一个实际 35 节点系统上的应用, 验证了所提方法的有效性与实用性。

关键词: 区域无功电压自动控制; 无功优化; 多目标优化; ϵ -MOEA

Abstract: The MOEA methods have been used in reactive power optimization but due to its shortcomings such as time consuming computation and poor applicability, it is difficult to be used in actual control. A fuzzy multi-objective reactive power optimization approach based on ϵ -domination including new fuzzy multi-objectives function, adaptive ϵ -domination algorithm and post-evaluation fuzzy logic controller has been used to overcome those shortcomings. Its application to a real 35 nodes system shows the method can maintain good search results and save a lot computation time.

Key words: area voltage/V ar control; reactive power optimization; multi-objective optimization; ϵ -MOEA

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0079-05

无功和电压控制问题对电力系统的安全运行和经济操作而言具有十分重要的意义。其本质是通过诸如发电机端电压、变压器挡位以及并联电容器组等控制变量的适度调节, 使得系统电压水平保持在可以接受的范围之内, 同时尽量减小系统网损。

对这样一个多目标、多约束非线性混合规划问题的求解, 国内外学者采用了大量的方法, 做了许多有益的尝试。根据其目标函数的处理方法, 这里将这些方法大致分为两类: 先评价方法和后评价方法。所谓先评价方法是指通过对多个目标函数的比较, 根据某种倾向度将这多个目标函数转化为单目标函数求解, 其最经典的方法就是权重法和罚函数法。权重法通过一组和为 1 的权重因子将多个目标函数合成为一个目标函数^[1, 2, 6, 7~9]; 罚函数法则将某些目标函数作为惩罚项与基本目标函数相加^[6], 是一种特殊化的权重法。但权重法在将多目标优化问题简单化时也带来了两个根本性的问题^[11]: ①难以选择一组合理的权重矢量, 使寻优结果收敛到 Pareto 最优解集前沿; ②权重法不能解决非凸空间寻优问题。而多目标无功优化问题的目标空间正是一个多维、离散并且不一定为凸的空间, 因而用权重法处理多目标无功优化问题并不是最好的选择。后评价方法是通过首先找

到问题的 Pareto 最优解集, 然后再根据具体要求选取最优的单个解。与先评价方法相比, 后评价方法具有以下优点: ①能得到优化问题的 Pareto 最优解集; ②对非凸、离散空间也有良好的搜索能力^[10]。目前, 一些学者分别运用了基于免疫算法的后评价方法^[3], 以及基于遗传算法 NSGA II^[4]、SPEA2^[5]的后评价方法求解了多目标无功优化问题, 而基于遗传算法的各种多目标进化算法 (Multi-Objective Evolutionary Algorithm, MOEA) 被公认为寻找 Pareto 最优解集, 能力最强, 应用也最为广泛。这里, 将一种基于 ϵ -支配域的 MOEA 方法应用于实际系统, 克服了目前后评价多目标优化方法普遍存在的寻优时间长的问題^[12], 并通过模糊控制器实现 Pareto 非受支配最优解的选择。

1 无功优化模型

1.1 模糊多目标函数

参考文献 [1] 所提出的模糊网损和电压水平模糊隶属度函数, 根据文中的具体应用将其做最小化调整, 0 代表满意度最大, 1 代表满意度最小。

(1) 网损模糊隶属度函数

$$F_p(p_i) = \begin{cases} 0 & (p_i \leq p_{min}) \\ 0.5 \times \frac{p_i - p_{min}}{p_{ori} - p_{min}} + 0.5 & (p_{min} < p_i \leq 2(p_{ori} - p_{min})) \\ 1 & (p_i > 2(p_{ori} - p_{min})) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_i 表示系统优化后的有功网损; P_{ori} 为系统优化前的网损; P_{min} 则是系统的理论最小网损, 根据文献 [1] 的定义, 可以用系统无功电流分量为 0 时的有功网损代替 P_{min} 。

(2) 电压合格水平模糊隶属度函数

$$F(V_i) = \begin{cases} 0 & (V_{L1} \leq V_i \leq V_{U1}) \\ 1 - \frac{V_{U0} - V_i}{V_{U0} - V_{U1}} & (V_{U1} \leq V_i \leq V_{U0}) \\ 1 - \frac{V_i - V_{L0}}{V_{L1} - V_{L0}} & (V_{L0} \leq V_i < V_{L1}) \\ 1 & (\text{others}) \end{cases} \quad (2)$$

$$F_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(V_i) \quad (3)$$

其中, V_i 为第 i 节点的电压幅值; V_{U0} , V_{L0} 分别为节点电压的“不能接受”上、下限; V_{U1} , V_{L1} 分别为“可以接受”的电压上、下限; N 为节点总数。最后得到的隶属度函数是各个节点电压水平的平均反应, 其值的大小直接反映了系统电压偏离期望电压上、下限的程度, 值越大, 则偏离程度越严重。图 1 是这两个隶属度函数的图形。

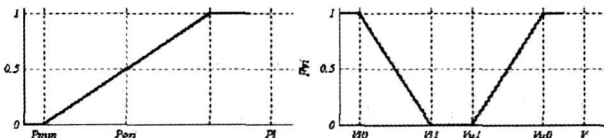


图 1 目标函数分量隶属度函数图形

1.2 约束条件

$$\begin{cases} P_i = P_{Li} + e_j \sum_{f \in i} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{f \in i} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ (i=1, \dots, N) \\ Q_{Gi} = Q_{Li} + f_i \sum_{f \in i} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_j \sum_{f \in i} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ (i=1, \dots, N) \\ T_{min} \leq T_i \leq T_{max} \quad (i=1, \dots, N_T) \\ V_{iD} \leq V_i \leq V_{i0} \quad (i=1, \dots, N) \\ Q_{Gmin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gmax} \quad (i=1, \dots, N_G) \\ Q_{Cmin} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Cmax} \quad (i=1, \dots, N_C) \\ V_{Gmin} \leq V_{Gi} \leq V_{Gmax} \quad (i=1, \dots, N_G) \end{cases} \quad (4)$$

上式中的等式约束为直角坐标下的潮流方程, e_j 与 f_j 分别为节点电压的实部和虚部, N 为节点总数,

N_T , N_G , N_C 分别为变压器支路数, 发电机节点数和并联无功补偿装置的节点数。 T_i , V_i , Q_{Gi} , Q_{Ci} , V_{Gi} 分别为变压器档位、节点电压幅值、发电机无功出力、补偿电容器无功容量以及发电机端电压。下标带有 max 和 min 的量表示对应变量的最大、最小值。

因此, 无功优化的总目标函数为:

$$\begin{cases} \min(F) = \min(F_p, F_v, F_s)^T \\ \text{s.t.} \quad (4) \end{cases} \quad (5)$$

2 自适应 ϵ -MOEA 算法

Deb 等人在 ϵ -支配域思想的基础上提出了一种 ϵ -MOEA 算法 [12]。但是将其应用到电力系统无功优化中时, 寻优结果有时并不能满足系统调节的实际需要。因此, 提出了一种针对系统各目标函数分量的受重视程度, 实现 ϵ 的自适应调节, 以改善寻优结果的方法。

2.1 ϵ -支配域

这里对 ϵ -支配域的定义与文献 [13] 定义相同, 只是采用的是最小化目标函数的形式。

定义 1: 对于 m 维矢量 $f, g \in R^m$, 对某一 $\epsilon_i > 0$, 如果对所有的 $f \in \{1, \dots, m\}$ 有 $f_i - \epsilon_i \leq g_i$, 则 f 被称为 ϵ -支配 g 表示为 $f \succ_{\epsilon} g$ 。

定义 2: 有矢量集 $F \subseteq R^m$ 及 $\epsilon > 0$, 如果任意矢量 $g \in F$ 都被至少一个 $f \in F_{\epsilon}$ 所 ϵ -支配, 则矢量集 F_{ϵ} 被称为 F 集的一个 ϵ -近似 Pareto 集。即 $\forall g \in F, \exists f \in F_{\epsilon}$ 使得, $f \succ_{\epsilon} g$ 。

经典的 MOEA 方法是力求在整个目标空间中找出一组 Pareto 非受支配解集, 即多目标优化的全局最优解集, 而基于 ϵ -支配域的方法则是搜索一组 ϵ -近似 Pareto 集。图 2 以一二维目标空间的例子说明了这一差异。解矢量 $P \in F_{\epsilon}$ 支配了整个目标空间 $ABCD$, 而根据经典 MOEA 对支配域的定义, P 只能支配空间 $PECF$ 。显然基于 ϵ -支配域的搜索计算复杂度较经典的 MOEA 大大降低了。

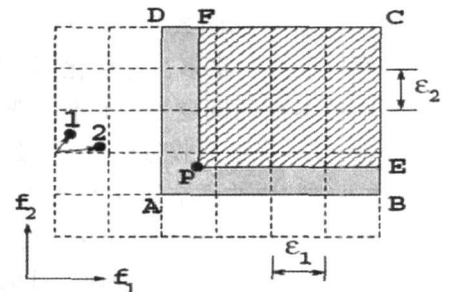


图 2 ϵ -支配域图形说明

2.2 自适应 ϵ -支配域

通过将目标空间按 ϵ_i 划分为一系列的“超格” (hyper-box), 简化了要搜索空间的复杂度。但是这样也出现了一个新的问题, 即应该怎样选择 ϵ_i 。根据 ϵ 的定义, ϵ_i 反映了对目标函数 f_i 的“容忍度”, 也就是说当两个解的第 i 维目标函数之差小于 ϵ_i 时, 对用户而言这两个解是没有差别的。结合电力系统多目标无功优化的实际情况, 显然这种“容忍度”不应该是固定不变的。例如, 当系统电压水平不理想, 或是运行中电压上下限值发生改变而使得电压靠近电压限值时, 对电压水平这一目标函数分量变化大小就应该更加敏感, 在电压水平目标函数分量方向上的搜索也应该更精细; 而当系统电压稳定裕度情况不理想时, 则应该降低对电压稳定裕度分量的“容忍度”。也就是说应该根据系统在进行优化时刻的各目标函数分量的水平, 动态地决定 ϵ 的取值。在这一思想基础上, 设计了如下的模糊逻辑控制器, 实现 ϵ 的自适应调整。首先根据第 1 节的模糊隶属度函数定义, 分别对三种目标函数分量的输入论域进行模糊划分, 定义三种语言变量分别为“正大”(PB)、“正中”(PM)和“零”(ZE), 如图 3(a)所示。同时, 再对 ϵ 的模糊输出论域进行模糊划分, 定义三种语言变量分别为“负小”(NS)、“负中”(NM)和“零”(ZE), 如图 3(b)所示, 其中横坐标 k 为以 10 为底的对数值, $\epsilon = 10^k$, $-n \leq k \leq 0$, n 为指定的一整数。

由以上所定义的输入与输出论域的模糊分区, 采用如表 1 的模糊规则。去模糊化采用质心法。这样, 就可以根据系统的各种不同运行情况得到不同的 ϵ_i , 并且由于该方法设计的模糊隶属度函数能准确地反映系统各目标函数分量的实际情况, 因此各 ϵ_i 的相互比较, 能反映出系统目前各目标函数分量的“受重视程度”的不同。

2.4 后评价模糊控制器

当完成对 ϵ -近似 Pareto 解集的搜索后, 只是完

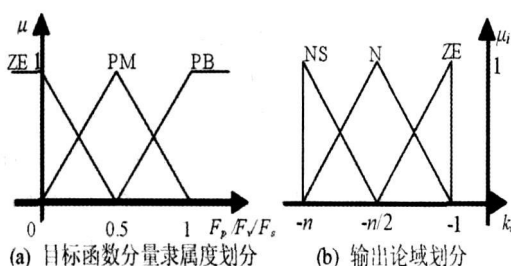


图 3 目标函数分量隶属度划分

表 1 ϵ 模糊规则

F_p, F_v 或 F_s	ZE	PM	PB
K	NS	NM	ZE

成了多目标优化问题最优解第一阶段的任务, 还应该通过对系统信息进一步的分析, 选取一个与所求解问题最适合的解^[10]。特别是将 MOEA 算法运用到实际问题的分析与处理中时, 如何选择最适合的解显得尤为重要。正如第 2.2 节指出的, 所设计的自适应 ϵ -支配域能反映出系统目前各目标函数分量的“受重视程度”, 因此可以将作为最优解选择的依据。考虑到网损是一个最基本的目标函数分量, 并且人们总是希望在保证系统稳定的基础上尽量减少网损, 因此这里将网损重要程度固定为 $1/3$ 。针对另外两个目标函数分量 F_v 和 F_s , 设计如图 4 所示的模糊权重输出分区以及如表 2 所示的模糊规则, 则 F_v 和 F_s 的模糊权重分别为 $\omega_{v/s} 2/3$ 和 $(1 - \omega_{v/s}) 2/3$ 。通过这样一个模糊逻辑控制器, 可在 ϵ -近似 Pareto 解集中选出一个最优解。

表 2 $\omega_{v/s}$ 模糊规则

$\omega_{v/s}$	F_v			
	ZE	PM	PB	
F_s	ZE	PB	PB	PR
	PM	PM	PM	PB
	PB	PS	PM	PM

3 实际应用

为了验证所提出的改进算法在电力系统电压无功优化计算中的有效性, 将自适应 ϵ -MOEA (表示为 AeMOEA) 算法以及 ϵ -MOEA (表示为 eMOEA) 的多目标无功优化程序针对某实际地区电网系统进行了优化计算仿真, 电网的接线图如图 5。该电网包括一座 220 kV 枢纽变电站和 7 座 110 kV 终端变电站, 两座 35 kV 变电站, 调节设备包括 14 台有载调压变压器和 24 组并联补偿电容器。220 kV 和 110 kV 母线电压范围限定为 $1.00 \sim 1.07$ (pu), 35 kV 和 10 kV 母线电压范围限定为 $0.98 \sim 1.07$ (pu)。功率基值都为 100 MVA, 编码方式与文献 [3] 相同。

优化计算前该电网有功损耗为 28.04 MW。表 3 列出了优化结果的比较情况, eMOEA 算法其网损下降率为 12.81%, 而且还以开关设备的频繁动作作为代价; 而 AeMOEA 算法的网损下降率为 18.34%, 开关

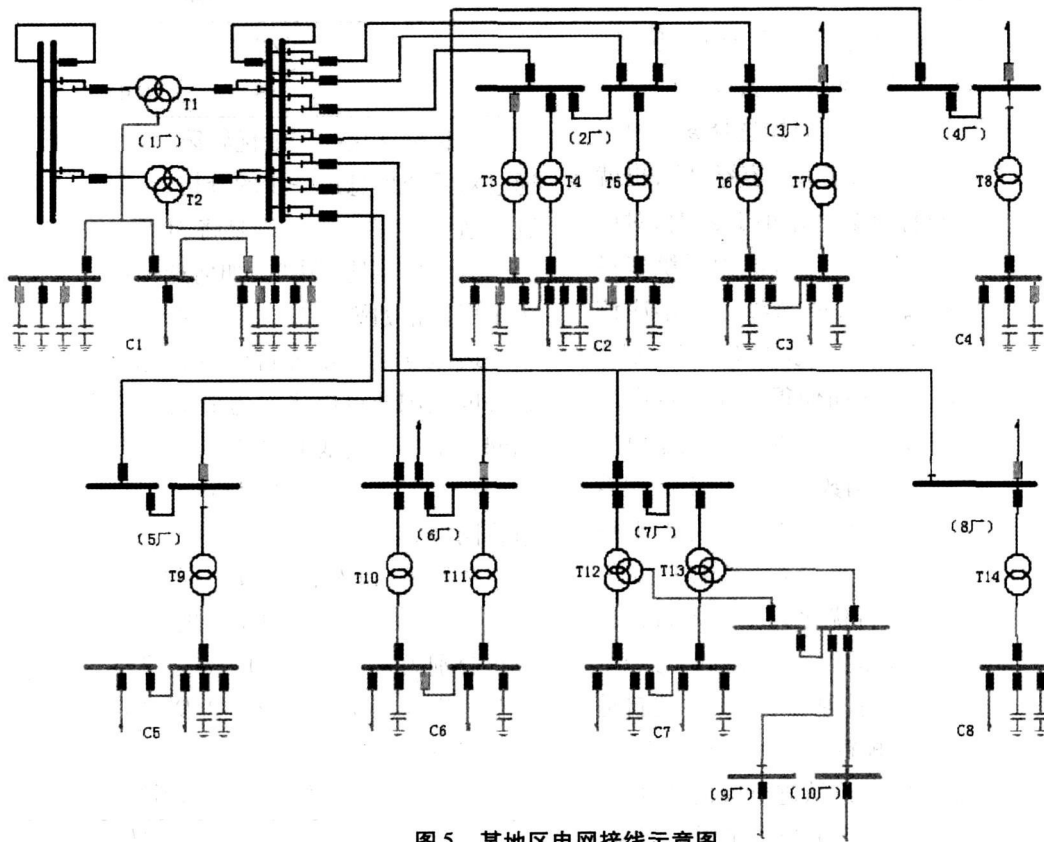


图 5 某地区电网接线示意图

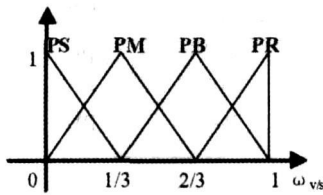


图 4 模糊权重输出分区

表 3 优化结果比较

方法	eMOEA	AeMOEA
损耗下降量 (MW)	3.59	5.14
变压器最大动作次数	65	5
电容器组最大动作次数	28	8
平均计算时间 (s)	56.47	53.18

设备的动作较少且较为平稳。AeMOEA 实时优化以较低的开关设备动作代价取得了较为满意的优化效果,既保证了电力系统的经济运行,又减少了开关设备故障率,确保了电网的稳定运行,其优化计算时间在分钟以内,基本满足了实时电压无功控制对计算时间的要求。

4 结 论

AeMOEA 和 eMOEA 都能满足实际运用的需要,并且 AeMOEA 方法优化结果更好,因此能很好地运

用于区域无功、电压自动控制系统。

参考文献

- [1] Jiachuan Shi and Yutian Liu. Fuzzy Evaluation Based Multi-objective Reactive Power Optimization in Distribution Networks [J]. Lecture Notes in Artificial Intelligence 2005, (3613): 11-19.
- [2] W. Zhang and Y. Liu. Fuzzy Logic Controlled Particle Swarm for Reactive Power Optimization Considering Voltage Stability [C]. IEEE 7th International Power Engineering Conference 2005, (1): 1-5.
- [3] 熊虎岗,程浩忠,李宏仲. 基于免疫算法的多目标无功优化 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (11): 102-108.
- [4] 冯士刚,艾 芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 146-151.
- [5] 冯士刚,艾 芊. 利用强度 Pareto 进化算法的多目标无功优化 [J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 115-119.
- [6] 姜素华,李 研,吴耀武,熊信银. 多目标电网无功优化的量子遗传算法 [J]. 高电压技术, 2005, 31(9): 69-83.
- [7] Xu Guiguang Wang Xing Yu Erkeng. A Fuzzy Multi-

- Objective Approach to Optimal Voltage/Reactive Power Control [C]. IEEE 1998 International Conference on Power System Technology 1998, vol 2, 1443-1447.
- [8] Lou Suhua, Wu Yaowu, Xiong Xinyin, Tu Guangyu. A Parallel PSO Approach to Multi-Objective Reactive Power Optimization with Static Voltage Stability Consideration [C]. IEEE Conference Proceeding of PES TD, 2006, 172-176.
- [9] Takahide Nimura, Ryuichi Yokoyama and Brian J. Cory. A Fuzzy Coordination Approach for Multi-objective Voltage and Reactive Power Schedule of An Electrical Power System [C]. Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems 1993, vol 1, 267-272.
- [10] Edmund K. B., Graham K. Search Methodologies - Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques [M]. Springer Science Business Media LLC.
- [11] K. Deb, A. Pratap, S. Agawal and T. Meyarivan. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II [J]. IEEE TRANS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 2002, 6(2): 182-197.
- [12] K. Deb, M. Mohan and S. Mishra. Evaluating the ϵ -Dominance Based Multi-Objective Evolutionary Algorithm for a Quick Computation of Pareto-Optimal Solutions [J]. Evolutionary Computation, 2005, 13(4): 501-525.
- [13] M. Laumanns, L. Thiele, K. Deb and E. Zitzler. Combining Convergence and Diversity in Evolutionary Multiobjective Optimization [J]. Evolutionary Computation, 2002, 10(3): 263-282.
- 作者简介:**
张安安 (1977-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多目标无功优化, 电压稳定与控制。
- (收稿日期: 2008-10-29)

《四川电力技术》投稿须知

《四川电力技术》是四川省电力公司主管, 四川省电机工程学会和四川电力试验研究院联合主办的国内外公开发行的综合性学术的电力科技期刊, 主要刊登电力生产、科研、设计、施工和设备运行、改造等方面的研究报告、专题论述、应用研究、经验交流、技术讨论等文稿。本刊热忱欢迎投稿。根据科技论文规范化的要求, 本刊对来稿提出以下要求。

(1) 文稿内容应具有实用性、内容切题、重点突出、论点明确、数据可靠、层次分明、文句简练、数学推导简明扼要, 篇幅不超过 5000 字。

(2) 文稿须写中文摘要、关键词。摘要内容包括研究目的、方法、结果和结论四要素。摘要在 150~300 字之内。关键词是反映论文的词组, 选 3~8 个。摘要及关键词、文章题目均附英文译文。同时, 文章附作者简介与联系电话。

(3) 文稿的表格、插图应结构简洁。插图应清晰, 少而精, 能用文字或表格描述的尽可能不用插图。表格上方应标有表序和表题, 插图下方应标有图序和图题。

(4) 来稿计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》和符号。

(5) 文中或公式中外文字母符号要注明文种、大小写、上下标、正体、斜体。

(6) 来稿须为清晰的打印稿, 并通过 E-mail 提供电子文件, 稿件上请注明详细地址、邮政编码、联系电话, 并请自留底稿, 本刊一律不退稿。作者在 6 个月内未见文章发表, 可自行处理。

(7) 本刊投稿自愿, 文责自负。对录用稿件编辑部有权进行必要的删改, 如不愿被删改, 请在原稿上注明。

(8) 本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网、北极星网站、万方数据库、《中国期刊全文数据库》等网站, 稿件一经录用, 作者著作权使用费及稿酬已一次付清, 如作者不同意收录, 请在来稿时提出声明, 本刊将作适当处理。

来稿请寄: 四川省成都市青华路 24 号 《四川电力技术》编辑部收

邮编: 610072 电话: (028)87082037 E-mail: cdsclj@163.com