

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.01.022

基于多目标非支配解提取法的电力系统无功优化*

马立新,王宏宇

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院,上海 200093)

摘要:针对传统的电力系统多目标粒子群优化算法采用权重系数法将多目标转化为单目标,从而忽视了各目标函数间的竞争关系这一问题,提出将非支配解提取法运用到电力系统多目标无功优化中,并设定了一套提取规则,以电力系统中的有功网损、电压偏差和电压稳定裕度为目标,使目标在充分竞争的情况下得出 Pareto 最优解,利用 IEEE-14 节点系统对多目标非支配解提取法的电力系统无功优化进行了仿真测试。研究表明,该算法一次运行可以得出多组非支配解,既有偏向单个目标的解也有兼顾所有目标的解,克服了权重系数法的盲目性和单一性,可使电力决策者根据实际问题选择最优解,具有较好的灵活性与多样性。

关键词:多目标粒子群优化算法;电力系统无功优化;非支配解提取法;Pareto 最优解

中图分类号:TM743

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)01-0118-05

Multi-objective power system reactive power optimization based on extracting non-dominated solution

MA Li-xin, WANG Hong-yu

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering University
Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at solving the problem that traditional multi-objective particle swarm optimization algorithm uses the weight coefficient method to transform multi-objective optimization into single objective optimization while ignoring the competitive relationship between the objectives, the method of extracting non-dominated solution was applied to power system reactive power optimization to obtain Pareto optimal solutions with the three objectives—the power system active power loss, voltage deviation and voltage stability margin—competing enough. A simulation experiment has been done based on the IEEE-14 bus system. The results indicate that the algorithm can bring out many groups of non-dominated solutions every single run, including solutions inclined to single objective and solutions giving consideration to all the three objectives, so the algorithm overcomes the blindness and singleness of traditional method. Power system decision-makers can choose the optimal solution in terms of actual requirements, which has a good flexibility and variety.

Key words: multi-objective particle swarm optimization; power system reactive power optimization; the method of extracting non-dominated solution; Pareto optimal solution

0 引 言

无功功率优化是提高电能质量的关键措施,能够

有效地保证电力系统运行的安全性、可靠性以及经济性。传统无功优化通常是以有功网损最小为目标,着重考虑的是经济性,而忽视了电压质量以及电压安全

收稿日期:2014-08-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(F050304);国家科技部政府间科技合作资助项目(2009014)

作者简介:马立新(1960-),男,陕西安康人,教授,工学博士,主要从事电力系统稳定性,配电网规划与优化配置,电力负荷需求分析与预测方法,调速系统智能控制等方面的研究。E-mail:malx_ain@sina.com

问题^[1-2]。在现代大型电力系统中,电压水平已成为供电侧与用户侧极其关心的问题,因此减少电压偏差已成为无功优化的重要任务。超高压、大容量、远距离电能的传输和电力市场化等因素使电压稳定问题成为严重威胁电力系统安全稳定的主要隐患之一^[3]。为此,本研究建立了综合考虑系统有功网损最小、电压偏差最少和电压稳定裕度最大的多目标无功优化模型,利用基于 Pareto 最优解概念的多目标粒子群算法,并针对其特点进行了一些改进,将其应用到电力系统多目标无功优化问题的实际求解中。

传统的粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 通过对目标函数权衡分析,使用权重系数将多目标问题转化成单目标问题,从而获取最优解,这样会降低解的多样性与可靠性,并且会带来调试方面的麻烦。

本研究采用非支配解提取法,针对三目标的特点自行设定了非支配解的提取规则,可同时获取多组非支配解,并且分布均匀,收敛性和鲁棒性好,保证多目标电力系统无功优化问题的多样性。笔者通过在 IEEE14 节点测试系统进行多目标电力系统无功优化的仿真实验,与现有的经典算法进行对比。

1 多目标无功优化模型

1.1 多目标无功优化的目标函数

本研究建立的多目标无功优化模型主要包括以下 3 个方面的目标:

有功网损 P_{loss} 最小:降低系统中的有功功率损耗,以提高经济性,目标函数的表达式如下:

$$f_1(X) = P_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^N G_k(i, j) [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (1)$$

式中: N —支路数; $G_k(i, j)$ —线路 ij 的电导; V_i —节点电压; δ —电压相角。

电压偏差 d_v 最少:尽可能地减少电压偏差以提高电压水平,目标函数表达式如下:

$$f_2(X) = d_v = \sum_{k=1}^n \left(\frac{V_i - V_i^{\text{spec}}}{\Delta V_i^{\text{max}}} \right)^2 \quad (2)$$

式中: n —节点数目; ΔV_i^{max} —最大电压偏差; V_i^{max} 与 V_i^{min} —各节点最大与最小电压; 即 $\Delta V_i^{\text{max}} = V_i^{\text{max}} - V_i^{\text{min}}$; V_i^{spec} —期望电压幅值,本研究取 $V_i^{\text{spec}} = (V_i^{\text{max}} + V_i^{\text{min}})/2$ 。

电压稳定裕度最大:目前对于电力系统电压稳定裕度的计算方法主要有连续潮流法、崩溃点法和非线性规划法^[4]。本研究选用潮流雅克比矩阵的最小奇

异值最大化来衡量电压稳定指标^[5],目标函数表达式如下:

$$f_3(X) = \max(\lambda_{\min}) \quad (3)$$

式中: λ_{\min} —雅克比矩阵最小奇异值。

1.2 变量及其约束条件

无功优化的变量包括发电机机端电压 V_G 、可调变压器变比 T 、补偿电容 C 等 3 个控制变量,以及以发电机无功出力 Q_G 和负荷节点电压 V_L 为主的两个状态变量。约束条件又包括等式约束和不等式约束。

等式约束如下:

$$P_{G_i} - P_{L_i} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (4)$$

$$Q_{G_i} + Q_{C_i} - Q_{L_i} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (5)$$

式中: P_{G_i} —发电机发出的有功功率, P_{L_i} —负荷消耗的有功功率, Q_{C_i} —补偿电容发出的无功功率, Q_{L_i} —负荷消耗的无功功率, B_{ij} —线路 ij 上的电纳。

不等式约束如下:

$$\begin{cases} V_{G_{\min}} \leq V_{G_i} \leq V_{G_{\max}} & i = 1, 2, \dots, N_G \\ T_{j_{\min}} \leq T_j \leq T_{j_{\max}} & j = 1, 2, \dots, N_T \\ C_{k_{\min}} \leq C_k \leq C_{k_{\max}} & k = 1, 2, \dots, N_C \\ V_{L_{\min}} \leq V_{L_i} \leq V_{L_{\max}} & i = 1, 2, \dots, N_D \\ Q_{G_{j_{\min}}} \leq Q_{G_j} \leq Q_{G_{j_{\max}}} & j = 1, 2, \dots, N_G \end{cases} \quad (6)$$

式中: N_G —发电机节点数, N_T —可调变压器节点数, N_C —补偿电容节点数, N_D —负荷节点数。

2 基于非支配解的多目标粒子群算法

2.1 粒子群算法

粒子群算法 (PSO) 的特点是简单清晰,需要调整的参数较少,较易实现,并且迭代收敛速度快,精度高。根据参考文献[6], PSO 算法中粒子根据以下公式来更新自己的速度和在解空间的位置:

$$v_{id}^{(k+1)} = \omega v_{id}^{(k)} + c_1 r_1 (p_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) + c_2 r_2 (G_d^{(k)} - x_{id}^{(k)}) \quad (7)$$

$$x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k)} \quad (8)$$

式中: m —种群规模; k —当前进化代数; $d = 1, 2, \dots, n$; $i = 1, 2, \dots, m$; r_1, r_2 —均匀分布于 $[0, 1]$ 之间的随机数; c_1, c_2 —加速系数; ω —惯性权重; v_{id} —第 i 个粒子速度向量中的第 d 个分量; p_{id} —第 i 个粒子最优位置向量中的第 d 个分量; G_d —群体最优位置向量中的第 d 个分量; x_{id} —第 i 个粒子位置向量中的第 d 个分量。

2.2 非支配解提取规则

目前针对多个目标进行无功优化的方法大多是采用权重系数法将多目标优化问题转化为单目标优化问题,虽然这种方法直接而有效,但是要确定权重系数的具体数值需要大量的先验知识,具有一定的盲目性,而且一组确定的权重系数可能偏向于某个目标而不利于其他的目标,所以这样的解缺乏多样性。

因此,本研究弃用权重系数法,而采用提取非支配解的方法进行解的评价。对于一个非线性优化问题,假设 X_1 和 X_2 为其中两个解,如果对于每一个目标函数来说, X_1 都优于 X_2 ,则称 X_1 支配 X_2 ,如果 X_1 没有被其他任意解所支配,则称 X_1 为非支配解,亦称 Pareto 解。这些非支配解较其他解而言拥有最少的目标冲突,可提供决策者一个较佳的选择空间。

根据非支配解的评价方法和多目标优化问题的特点,本研究设定了一组针对三目标优化的非支配解提取规则。设由 m 个解构成解集 $X = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_m)$,对于其中任意一个解 X_i 进行判定,判定条件(共 7 条)如下:

$$\left\{ \begin{array}{lll} f_1(X_i) > f_1(X_j) & f_2(X_i) > f_2(X_j) & f_3(X_i) < f_3(X_j) \\ f_1(X_i) \approx f_1(X_j) & f_2(X_i) > f_2(X_j) & f_3(X_i) < f_3(X_j) \\ f_1(X_i) \approx f_1(X_j) & f_2(X_i) > f_2(X_j) & f_3(X_i) \approx f_3(X_j) \\ f_1(X_i) \approx f_1(X_j) & f_2(X_i) \approx f_2(X_j) & f_3(X_i) < f_3(X_j) \\ f_1(X_i) > f_1(X_j) & f_2(X_i) \approx f_2(X_j) & f_3(X_i) < f_3(X_j) \\ f_1(X_i) > f_1(X_j) & f_2(X_i) \approx f_2(X_j) & f_3(X_i) \approx f_3(X_j) \\ f_1(X_i) > f_1(X_j) & f_2(X_i) > f_2(X_j) & f_3(X_i) \approx f_3(X_j) \end{array} \right.$$

其中: X_j — X 中的任意解, $j \neq i$; $f_1(X)$ —有功网损的适应度函数; $f_2(X)$ —电压偏差的适应度函数; $f_3(X)$ —电压稳定裕度的适应度函数。

若上述 7 条判定条件有任一一满足,则表明 X_i 不能成为非支配解;若上述 7 条判断条件都不满足,则表明 X_i 不受解集 X 中所有其他的解支配,即为非支配解。非支配解的集合称为非支配解集。

2.3 多目标无功优化步骤

(1) 导入参数以及系统数据,进行潮流计算;

(2) 随机生成一个种群,初始化粒子的位置、速度、个体最佳位置、群体最佳位置以及粒子的有功网损最优值、电压偏差最优值和电压稳定裕度最优值;

(3) 计算每个粒子的有功网损适应度值、电压偏差适应度值和电压稳定裕度适应度值,并初始提取非支配解,形成非支配解集;

(4) 从非支配解集中随机选取一个粒子的位置作为群体最佳位置,根据式(6,7)更新粒子的位置和速度;

(5) 更新粒子的有功网损适应度值、电压偏差适应度值和电压稳定裕度适应度值,再根据提取非支配解的方法更新粒子有功网损最优值、电压偏差最优值和电压稳定裕度最优值;

(6) 将最优值与非支配解集合并,再根据非支配解提取规则筛选出新的非支配解集,并去除其中重复的解;

(7) 判断算法的迭代是否达到终止条件,若是则进行下一步,否则转至步骤(4);

(8) 输出优化结果即非支配解集,结束。

3 实验及结果分析

本研究采用 IEEE-14 节点系统进行仿真实验以验证算法的可行性和有效性,仿真环境为 Matlab7.0,并将仿真结果和现有的典型优化算法的结果进行比较。算法的种群规模选为 100,迭代次数 30 次,两个实数相等精度选为 $1e-3$ 。

算例中的系统数据取自参考文献[7],各变量的范围也与参考文献相同。算例中负荷节点都属于 PQ 节点,基准功率为 100 MVA,该系统初始状态时有功损耗、电压偏差、电压稳定裕度分别为 0.133 8、2.945、0.518 0^[8]。PQ 节点电压变化允许范围为 0.95 ~ 1.10,变压器的变比范围取 0.90 ~ 1.10,步长为 0.012 5,补偿容量可取范围为 0 ~ 0.50,步长为 0.05。

3.1 优化结果分析

本算法得出的非支配解集如图 1 所示。从图 1 中可以清晰地看出有功损耗、电压偏差与电压稳定裕度不能同时达到最优值,三者之间是相互竞争的。

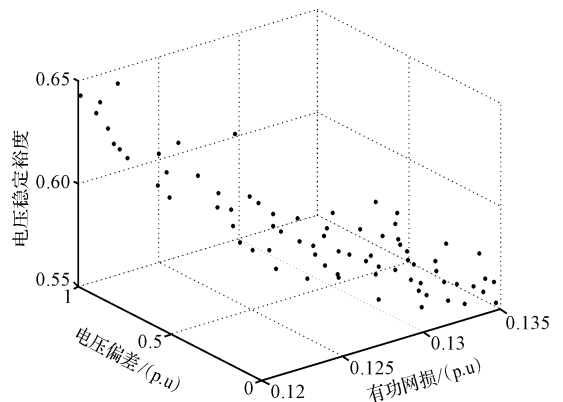


图 1 非支配解集的分布

因为在优化过程中,每一次迭代都会将个体最优值与上一代的非支配解集先合并再筛选出新的非支配解集,从而使得非支配解集中解的数量有了很大的提升,大大提高了决策者的选择空间。而从解的分布来看,非支配解的分布也比较均匀,具有良好的多样性和可选择性。

4组具有代表性的非支配解如表1所示。4组解的有功网损、电压偏差、电压稳定裕度3项指标较优化前均得到明显的改善。

表1 一组非支配解

标号	有功网损 /(p.u)	电压偏差 /(p.u)	电压稳定 裕度	电压超限 个数
1	0.123 9	0.916 3	0.593 6	0
2	0.130 1	0.252 7	0.554 5	0
3	0.124 3	1.178 9	0.601 1	0
4	0.128 8	0.355 3	0.563 6	0

第1组解的有功网损最小,适用于对经济性要求较高的场合;第2组解的电压偏差最小,侧重于电压水平的提高;第3组解的电压稳定裕度最大,适用于以电压安全为主要目标的场合。这几组解为电力决策者提供了可根据实际问题需要而选择的方案。第4组解相对适中,有功网损较优化前下降了3.74%,电压偏差减少了87.94%,电压稳定裕度较优化前提高了8.80%,可以看出优化效果是很明显的。

该算法优化后节点电压与系统优化前各节点电压的分布情况如图2所示。图2中虚线为优化前的系统电压幅值(p.u),实线为本算法优化后的系统电压幅值(p.u),通过比较可以看出:应用该算法优化后系统各节点电压值更接近额定值,电压偏差更小,系统的电压水平得到了显著提高。

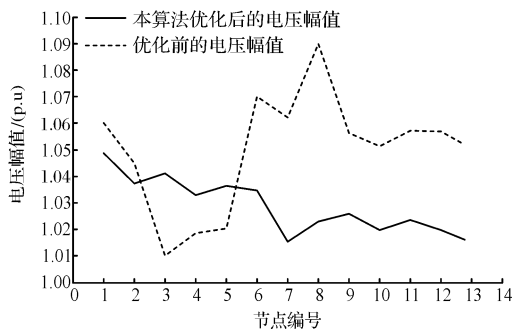


图2 本算法优化前后系统节点电压分布

3.2 与现有经典算法的比较

该算法与NSGA-II的比较如表2所示。笔者从文

献[8]中选出了该算法所得解中最适中的一组解,与本研究所得的第4组解进行对比。可以看出:两种算法的优化结果都比系统优化前的结果有了明显的改善。与NSGA-II相比,该算法的有功网损略高,但是电压偏差更小,电压稳定裕度更大,而且根据不同的实际要求,都可以从表1中选出更适合的一组解。所以该算法的可行性还是显而易见的。

表2 与经典算法的比较

算法	有功网损/(p.u)	电压偏差/(p.u)	电压稳定裕度
优化前	0.133 8	2.945	0.518 0
NSGA-II	0.123 9	0.365 1	0.538 4
本算法	0.128 8	0.355 3	0.563 6

3.3 国际上最新相关研究成果

鉴于无功优化对于电力系统的意义重大,国际上关于无功优化的研究成果也与时俱进。文献[9]提出混合型人工蜂群辅助差分进化算法(DE-ABC),将人工蜂群算法的一些局部搜索和全局搜索的思想加入到差分进化算法中,以克服后者在优化时需要的种群数量较大这一缺点,从而大大提高了算法的迭代时间;文献[10]将DE算法与PSO算法相结合,提出了优先交叉差分进化粒子群算法(PSOPDE),该算法中粒子的平均位置和平均速度与 P_{best} 和 G_{best} 共同指引粒子寻找最优解,同时将DE算法的交叉操作和一些算子嵌入到PSO算法中,增强了粒子的多样性并有助于算法获得全局最优;文献[11]将量子论引入到PSO算法中,提出量子粒子群算法(QPSO),加强了粒子的多样性,避免粒子过早收敛;文献[12]中的基于罚函数的非线性求解法(PBNS)利用罚函数将非线性无功潮流问题中的离散变量转化为连续且可微,获得了良好的优化结果。该算法取得的最优有功网损与上述算法的比较如表3所示。

表3 与最新研究成果的比较

算法	有功网损/(p.u)	优化目标个数
DE-ABC	0.123 7	1
PSOPDE	0.122 6	1
QPSO	0.128 5	1
PBNS	0.122 7	1
本算法	0.123 9	3

从表3中可以看出,DE-ABC,PSOPDE与PBNS的有功网损比本算法的有功网损略低,但是考虑到表中所列其他算法的数据均为单目标优化结果,而本算法的优化目标是3个,在优化有功网损的同时还要尽可

能地降低电压偏差和提高电压稳定裕度,所以本研究优化结果还是具有一定可取性的。

在一般情况下,电压水平好,安全性高时,经济性可能较差;当满足经济性要求时,电压水平或电压安全不一定能得到保证。同时使每个目标函数都取得最优化的可能性很小,电力决策者可根据经验和实际问题出发,从得出的非支配解集中选择合适的解。这种方法灵活多变,且容易实现,为真正意义上的多目标电力系统无功优化提供了依据,也体现了多目标优化工程的实际意义。

4 结束语

本研究将非支配解提取法应用到粒子群算法中以寻求多目标电力系统无功优化的 Pareto 最优解,解决了传统的权重系数法在解的多样性上的不足。

仿真结果表明:本研究提出的方法能够降低有功网损,减小电压偏移,提高电压稳定裕度,能够有效地保证电力系统安全、可靠、优质、经济地运行。

参考文献 (References):

- [1] 马立新,屈娜娜,单冠华,等. 电力系统无功优化的柯西粒子群算法[J]. 控制工程,2011,18(5):758-761.
- [2] 张聪誉,陈民铀,罗辞勇,等. 基于多目标粒子群算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(20):153-158.
- [3] 任保瑞,蔡兴国. 基于相量测量的电压稳定裕度在线评估[J]. 电网技术,2009,33(3):39-43.
- [4] 李国庆,杨宏伟,于紫南. 计及静止同步串联补偿器的线路 P-Q 曲线电压稳定分析[J]. 电网技术,2012,36(5):

258-262.

- [5] 李如琦,李芝荣,王维志,等. 基于差分策略的多目标电力系统无功优化[J]. 电网技术,2012,36(12):170-175.
- [6] 马立新,孙进,彭华坤,等. 多目标差分进化算法的电力系统无功优化[J]. 控制工程,2013,20(5):953-956.
- [7] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析(第2版)[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [8] 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.
- [9] LI Yuan-cheng, WANG Yi-liang, LI Bin. A hybrid artificial bee colony assisted differential evolution algorithm for optimal reactive power flow[J]. **Electrical Power and Energy Systems(S0142-0615)**, 2013(52):25-33.
- [10] MOHAMMAD Y A, KAAMRAN R. Reactive Power Optimization Based on Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm[C]. 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2012.
- [11] CHANDRAGUPTA M K S, THANUSHKODI K, SAKTHISUGANYA A. Reactive power optimization using quantum particle swarm optimization[J]. **Journal of Computer Science(S1549-3636)**, 2012,8(10):1644-1648.
- [12] EDILAINE M S, EDUARDO N A, GERALDO R M D C. Penalty-based nonlinear solver for optimal reactive power dispatch with discrete controls[J]. **IEEE Transactions on Power Systems(S0885-8950)**, 2013,28(3):2174-2182.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

马立新,王宏宇. 基于多目标非支配解提取法的电力系统无功优化[J]. 机电工程,2015,32(1):118-122.

MA Li-xin, WANG Hong-yu. Multi-objective power system reactive power optimization based on extracting non-dominated solution[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(1):118-122.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>