

基于改进和声搜索算法的电网多目标差异化规划

宋春丽, 刘涤尘, 吴 军, 王浩磊, 赵一婕, 潘旭东, 董飞飞

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为提高电网的抗灾能力需对电网进行差异化规划。用全寿命周期内的新增成本和减损效益对规划的经济性和可靠性进行量化, 建立了多目标差异化规划优化模型。根据 Pareto 支配关系制定寻优准则, 以效益成本比最大为目标从 Pareto 解集中选择最优的差异化规划方案。将和声搜索算法应用于模型的求解, 引入混沌映射、动态参数设置、改进的音高调整策略以及和声寻优信息共享机制使其能够解决 0-1 规划问题, 并提高其搜索性能。对 IEEE 30 节点算例的分析表明, 该模型正确合理, 能得到最优规划方案。与常规的遗传算法和粒子群优化算法进行对比, 改进和声搜索算法收敛速度快, 具有较好的适应性和鲁棒性。

关键词: 电力系统; 规划; 多目标差异化规划; 成本; 减损效益; 改进和声搜索算法; 可靠性; 经济性; 模型

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.11.022

0 引言

随着国家电网公司《电网差异化规划设计指导意见》^①的下发, 以“普遍提高, 重点加强”为原则的差异化规划设计逐渐用于电网的规划和改造。采用科学方法指导并构建电网的差异化规划方案, 提高网架重要线路的抗灾标准, 当重大灾害发生时, 保障电网稳定运行及重要负荷的持续供电, 可以极大降低大面积停电事故造成的经济损失和严重社会影响, 对建设坚强电网具有重要意义^[1-3]。

常规的电网规划一般主要考虑规划方案的经济性和可靠性目标^[4-5], 而目前国内外对电网差异化规划的研究主要集中在理论研究^[6]和抗灾型电网的规划设计^[7]上。文献[8]在重要线路的辨识方法研究基础上进行了差异化规划方案设计; 文献[9]提出了“特级网络”和“特级负荷”的概念, 对电网差异化规划的优化模型进行了分析。这些研究成果对电网的差异化规划具有一定意义, 但是都侧重于提高电网的抗灾能力并保证灾后电网运行的可靠性方面, 而忽视了规划方案构建时的投资及运行和维护成本, 即未充分考虑规划方案的经济性; 同时差异化规划与常规的电网规划一样, 也具有系统性、长期性的特点^[10], 因此需要从全寿命周期的角度, 探索出一种充分协调经济性与可靠性的多目标差异化规划优化模型。

电网规划多目标优化包含了电力系统运行约束, 确定性的优化算法难以进行求解。近几年, 遗传算

法 GA(Genetic Algorithm)^[11]、粒子群优化 PSO(Particle Swarm Optimization)算法^[12]等智能算法虽然在电网规划中得到了广泛的应用, 但都存在计算复杂度高、容易陷入局部极小值的缺陷。和声搜索 HS(Harmony Search)算法^[13]是近年发展起来的一种新的智能算法, 具有实现简单和寻优精度高的优点, 目前已成功应用于计算工程领域的各种优化问题, 包括电能经济调度、河流模型参数优化、构架结构设计等^[14-16], 但也存在收敛速度慢等缺陷, 本文对标准和声搜索算法进行了改进, 并将其用于求解多目标差异化规划模型。

本文立足于差异化规划基本原则和需求, 结合全寿命周期成本 LCC(Life Cycle Cost)理论^[17], 用全寿命周期内差异化规划后的新增成本反映差异化规划的经济性目标, 用差异化规划后的减损效益量化其可靠性目标, 结合电网稳定约束及连通性约束建立多目标差异化规划优化模型, 并根据 Pareto 支配关系制定寻优准则, 以效益成本比最大来确定最优的差异化规划方案。同时, 将和声搜索算法用于多目标电网规划问题的求解, 为了适应电网 0-1 规划问题, 提高算法的收敛性, 对标准和声搜索算法进行了离散化并提出了一系列改进策略, 算例分析结果验证了该算法的有效性和合理性。

1 电网差异化规划多目标分析

1.1 差异化规划经济性目标分析

考虑电网规划的长期性, 本文应用全寿命周期成本理论对差异化规划的经济性进行量化, 与常规的电网规划不同, 差异化电网规划的经济性主要考虑因为差异化设计所新增的一次投资、运行和维护以及报废成本, 即提高电网设防标准后的“加强”成本, 不包含常规的故障成本, 差异化后的全寿命周期成本计算模

收稿日期: 2013-09-12; 修回日期: 2014-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51207114); 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG029-2012) Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51207114) and State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid(SGCC-MPLG029-2012)

① 国家电网公司. 电网差异化规划设计指导意见. 2008.

型如下:

$$F_{LCC} = F_{CI} + F_{CO} + F_{CM} + F_{CD} \quad (1)$$

其中, F_{LCC} 为总的新增成本,包括新增的一次投资成本 F_{CI} 、运行成本 F_{CO} 、维护成本 F_{CM} 以及报废成本 F_{CD} 。

具体各新增成本要素如表 1 所示。

表 1 新增成本要素
Table 1 Elements of additional cost

成本	成本费用细则
F_{CI}	主要考虑输电线路因提高电网设计标准的新增投资
F_{CO}	提高设防标准后相应设施运行过程中新增的人工成本、能源损耗等
F_{CM}	提高设防标准后设备新增的日常维护、调试、巡检等费用
F_{CD}	提高设防标准后电网设备处理成本和残值

各新增成本的计算方法为:

$$F_{CI} = \sum_{j \in \Omega} C_j l_j Z_j \quad (2)$$

$$F_{CO} + F_{CM} = k_1 F_{CI} \quad (3)$$

$$F_{CD} = k_2 F_{CI} - \frac{F_{CI}}{(1+r)^N} \quad (4)$$

其中, C_j 为需要进行差异化线路新增的单位成本; l_j 为差异化线路长度; Z_j 为 0-1 变量,表示线路的投运状态; Ω 为线路集; k_1 和 k_2 分别为运行维护系数和处理系数; r 为年均折旧系数; N 为规划周期。

1.2 差异化规划可靠性目标分析

电网差异化规划的可靠性目标主要考虑发生重大自然灾害时,差异化设计后电网的坚强程度,根据“有无对比”原则,用无差异化设计时灾害场景下的损失,即进行了差异化设计后所能挽回的损失——减损效益来进行量化。减损效益越大,反映差异化设计后的网架越坚强。

$$F_{TR} = F_{DB} + F_{IB} \quad (5)$$

其中, F_{TR} 为总的减损效益; F_{DB} 和 F_{IB} 分别为直接和间接减损效益。

减损效益要素如表 2 所示。各效益要素的计算方法如式(6)~(9)所示。

表 2 减损效益要素
Table 2 Elements of loss-reduction benefit

减损效益	效益费用细则
抗灾抢修费用 F_{DB1}	因差异化设计而避免进行抢修、重建在灾害中受损的重要电网设施所带来的效益
重要负荷与电源保障效益 F_{DB2}	在重大自然灾害或严重故障下,保障对重要负荷的供电而得到的效益以及使得重要电源的电能“送出去”,避免发生核电站停堆、大型火电站非计划停机、重要水电厂弃水等带来的效益
普通负荷与电源保障效益 F_{DB3}	与 F_{DB2} 对应,对普通负荷和普通电源的保障效益
F_{IB}	社会救援费、防止衍生灾害和隐形的社会效益等

$$F_{DB1} = F'_{CI} = \sum_{j \in \Omega} C'_j l_j Z_j \quad (6)$$

$$F_{DB2} = (\lambda_2 - \lambda_1) \sum (L_{imload} T) + \sum (N_{imc} R_1) \quad (7)$$

$$F_{DB3} = (\lambda_2 - \lambda_1) \sum (L_{load} T) + \sum (N_C R_2) \quad (8)$$

$$F_{IB} = a_1 F_{DB2} + a_2 F_{DB3} \quad (9)$$

其中, C'_j 为在灾害场景下修复至未加强前的建设标准时线路的单位造价; λ_2 和 λ_1 分别为售电电价和发电成本; T 为累积停电时间; L_{imload} 和 N_{imc} 分别为重要负荷容量和重要电源数; L_{load} 和 N_C 分别为普通负荷容量和普通电源数; R_1 和 R_2 分别为重要电源和普通电源的单位重启费用;间接效益根据不同重要性负荷的不同影响来进行估算, a_1 为重要负荷和电源的保障系数, a_2 为一般负荷和电源的保障系数。

2 多目标电网差异化规划模型

2.1 目标函数

差异化规划的最优方案,需要充分协调经济性和可靠性,力图在尽可能小的全寿命周期新增成本下,减损效益尽可能大。

经济性最优目标函数为:

$$\min f_1 = F_{LCC} = F_{CI} \frac{s(1+s)^N}{(1+s)^N - 1} + F_{CO} + F_{CM} + F_{CD} \frac{s}{(1+s)^N - 1} \quad (10)$$

可靠性最优目标函数为:

$$\max f_2 = F_{TR} = F_{DB} + F_{IB} = \sum_{j=1}^3 F_{DBj} + a_1 F_{DB2} + a_2 F_{DB3} \quad (11)$$

其中, F_{LCC} 和 F_{TR} 分别为新增成本和减损效益; s 为资金年利率。考虑资金的时间价值,引入资金回收系数 $\frac{s(1+s)^N}{(1+s)^N - 1}$ 和偿还基金系数 $\frac{s}{(1+s)^N - 1}$ 将资金折算为等年值进行求和。

电网规划的经济性和可靠性是对立的,降低差异化投资成本,由于减少灾害损失而带来的效益也会随之降低,即式(10)和式(11)无法同时达到最优解,故多目标的电网差异化规划的 Pareto 最优解集包含多个解,因为需要选择一个最终的规划方案,本文用效益成本比 δ_{IR} 来确定最优的规划方案, δ_{IR} 越大,反映单位新增成本带来的减损效益越大,其目标函数为:

$$\max f_3(\alpha) = \delta_{IR} = \frac{F_{TR}(\alpha)}{F_{LCC}(\alpha)} \quad (12)$$

$$\text{s.t. } \alpha \in \alpha_f$$

其中, α 表示某种规划方案; $F_{LCC}(\alpha)$ 和 $F_{TR}(\alpha)$ 分别为规划方案 α 下的新增成本和减损效益; α_f 为可行解集。

在多目标寻优过程中,结合具体优化算法和 Pareto 支配关系制定了相应的寻优准则,具体内容见 4.1 节。

2.2 约束条件

除需满足经济性和可靠性的最优外,差异化规划后的电网还需满足安全运行的基本要求。

a. 满足电网安全运行约束。最终构建的差异化

规划网架要满足基本的功率平衡约束和不等式约束。

b. 满足网络拓扑连通性约束,网络拓扑结构配置合理。

本文利用图论的知识保证网络的拓扑连通性,相应数学模型表示如下:

$$\text{s.t. } \phi(Z) = 1 \quad (13)$$

$$g(Z) = 0 \quad (14)$$

$$h(Z) \leq 0 \quad (15)$$

其中, $\phi(Z)$ 为连通性判断函数,子图连通时 $\phi(Z)=1$,子图不连通时 $\phi(Z)=0$ 。式(14)是电网潮流方程;式(15)是电网潮流的不等式约束。

至此,通过式(10)~(15)构建了电网差异化规划多目标优化的完整模型,涉及到离散、受约束的混合规划问题,本文采用改进和声搜索 IHS (Improved Harmony Search) 算法对该模型进行求解,寻求最优的差异化规划方案。

3 改进和声搜索算法

3.1 和声搜索算法的原理及实现过程

和声搜索算法的基本思想源于对音乐演奏中通过调和音符达到最优演奏效果的模拟^[18]。算法首先确定和声库大小 S_{HM} ,随机产生 S_{HM} 个初始和声存放于和声记忆库 M_H 中,以和声记忆选择概率 p_{HMCr} 在 M_H 中选择新解,以概率 $1-p_{HMCr}$ 在变量可行域中随机选择新解,然后以音高调整概率 p_{PAR} 判断是否对新解进行局部扰动,最后根据目标函数值判断新解是否优于 M_H 中的最差解,若是,则替换,否则重复以上步骤直至达到终止条件^[19]。

M_H 初始化过程为:

$$x_i^j = x_i^l + \text{Random}(0, 1)(x_i^u - x_i^l) \quad (16)$$

其中, x_i^j 为决策变量; x_i^u, x_i^l 分别为第 i 维变量取值上、下界; $j=1, 2, \dots, S_{HM}$; $\text{Random}(0, 1)$ 为0~1之间的随机数。

$$M_H = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_N^1 & F(x^1) \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_N^2 & F(x^2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_1^{S_{HM}} & x_2^{S_{HM}} & \dots & x_N^{S_{HM}} & F(x^{S_{HM}}) \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中, $F(x^j)$ 为第 j 个和声变量下的目标函数值。

标准和声搜索算法中新和声向量由3个规则产生:记忆选择;音高调整;随机选择。产生一个新的和声被称为即兴演奏,此操作使用 p_{HMCr} 参数:

$$x_i^j = \begin{cases} x_i^j \in \{x_i^1, \dots, x_i^{S_{HM}}\} & p = p_{HMCr} \\ x_i^j \in X_i & p = 1 - p_{HMCr} \end{cases} \quad (18)$$

其中, p 为随机概率; X_i 为和声库外变量可行域。

每个经过选择的变量将被进一步检验决定是否需要音高调整,此操作使用参数 p_{PAR} :

$$x_i^j = \begin{cases} x_i^j \pm \text{Random}(0, 1)b_w & p = p_{PAR} \\ x_i^j & p = 1 - p_{PAR} \end{cases} \quad (19)$$

其中, b_w 为一个任意的带宽。

3.2 改进和声搜索算法

标准和声搜索算法存在收敛不稳定、收敛速度慢的缺点,且主要用于连续性函数的寻优问题,为提高搜索结果全局最优化的稳定性,同时适用于电力系统差异化0-1规划问题,本文对算法进行了改进,提出一种改进和声搜索算法。

a. 采用混沌映射进行 M_H 的初始化。

式(16)为连续问题的初始化,对0-1规划问题,采用混沌序列的Logistic映射来产生 M_H ,利用混沌变量的遍历性和随机性特点,可以使初始和声具有更好的性能。式(16)改为:

$$x_i^j = \begin{cases} 0 & \text{Random}(0, 1) \leq \text{chaotic}(t) \\ 1 & \text{Random}(0, 1) > \text{chaotic}(t) \end{cases} \quad (20)$$

其中, $\text{chaotic}(t)$ 变量由Logistic映射的输出得到,定义为混沌状态并且分布在0~1之间。

$$\text{chaotic}(t) = \mu \text{chaotic}(t-1) [1 - \text{chaotic}(t-1)] \quad (21)$$

其中, μ 为映射参数,取 $\mu=4$ 。

b. 引入动态参数设置。

标准和声采用固定的 p_{HMCr} 和 p_{PAR} ,而由于 p_{HMCr} 决定新和声的产生方式, p_{PAR} 控制局部搜索过程,在迭代初期,需选取适宜的 p_{HMCr} 和 p_{PAR} ,尽可能扩大搜索范围寻求可行解;在迭代后期,为避免结果陷入局部最优,可减小 p_{HMCr} 并增大 p_{PAR} 以跳出局部最优解,扩大搜索范围,增强搜索效率,故引入如下动态参数:

$$p_{HMCr} = p_{HMCr_{\max}} - \frac{p_{HMCr_{\max}} - p_{HMCr_{\min}}}{M} k \quad (22)$$

$$p_{PAR} = p_{PAR_{\min}} + \frac{p_{PAR_{\max}} - p_{PAR_{\min}}}{M} k \quad (23)$$

其中, M 为迭代总数; k 为当前迭代次数; $p_{HMCr_{\max}}$ 和 $p_{HMCr_{\min}}$ 分别为记忆库内搜索概率最大和最小值; $p_{PAR_{\max}}$ 和 $p_{PAR_{\min}}$ 分别为调节概率最大和最小值。

c. 改进音高调整策略。

对和声音高调整标量 b_w 进行改进。根据全局最优和声的位置和局部最优和声的位置,动态调整音高标量,增强了向最优和声靠近的能力,并采用离散化的音高调整策略。在每次迭代时,和声库中的被选变量对应的音高调整标量先按照如下公式变化:

$$b_w^{k+1} = w b_w^k + c_1(x_g^{\text{best}} - b_w^k) + c_2(x_g^{\text{best}} - b_w^k) \quad (24)$$

其中, b_w^k 为第 k 次迭代时被选和声的音高调整标量; w 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子; x_g^{best} 和 x_g^{best} 分别为局部最优和声和全局最优和声的位置,则音高调整策略改为:

$$x_i^j = \begin{cases} 1 & \text{rand}() \leq \text{sig}(b_w) \\ 0 & \text{rand}() > \text{sig}(b_w) \end{cases} \quad (25)$$

$$\text{sig}(b_w) = \frac{1}{1 + \exp(-b_w)}$$

其中, $\text{rand}()$ 为随机数。

d. 进行和声寻优信息共享。

为提高算法的收敛性,减少无效迭代的次数,当一次迭代未找到较优和声时,将和声库中最优和声与新产生的较差和声进行异或操作,实现新增和声与和声库中寻优信息的共享,保证全局搜索结果的最优性和多样性。

$$x'_i = x^{best} \oplus x_i^j \quad (26)$$

其中, x^{best} 为和声库中的最优和声;“ \oplus ”为异或操作符号。

4 基于改进和声搜索算法的多目标电网差异化规划

4.1 多目标差异化规划的寻优准则

将改进和声搜索算法应用于电力系统差异化规划,针对多目标优化寻求 Pareto 最优前沿问题和支配关系的概念^[20],定义如下寻优准则。

设 $G(f'_1, f'_2, f'_3)$ 为新解的目标函数值, $F(f_1, f_2, f_3)$ 为和声库中解向量的目标函数值。

a. 若 $f'_1 < f_1, f'_2 > f_2$, 表示解 G 支配于解 F , 则解 G 为非支配解且优于 F , 用新解 G 替代 F 。

b. 若新解 G 支配于多个和声库中的解向量, 则用新解替代所有被支配解中目标函数 f_3 最小的解向量。

c. 若 $f'_1 > f_1, f'_2 > f_2, f'_3 > f_3$, 则选择效益成本比大的为较优方案, 即解 G 优于解 F 。

d. 若出现 $f'_1 > f_1, f'_2 > f_2, f'_3 = f_3$ 的情况, 则根据差异化规划“重点加强”的原则, 选择新增成本小的为较优方案, 即解 F 优于解 G 。

利用上述寻优准则, 动态调整和声库, 可以实现完全的信息共享, 保证搜索到尽可能多的非支配解。

4.2 改进和声搜索算法的具体步骤

以下为算法的实现过程, 图 1 为具体流程图。

a. 确定待规划电网参数和算法相关参数。

b. 严格初始化和声记忆库, 此时记忆库内为初始的 Pareto 解。

c. 根据目标函数值, 确定局部最优和声位置和全局最优和声位置, 同时更新和声记忆搜索概率 p_{HMCR} 和调节概率 p_{PAR} 。

d. 根据 p_{HMCR} 产生新和声。每个解向量都通过混沌映射、记忆内选择、音高调整这 3 种方法产生。

e. 产生新和声后, 根据 p_{PAR} 进行相应的音高调整、寻优判断及最优和声寻优信息共享等。

f. 判断迭代终止条件, 输出所得到的 Pareto 最优前沿解集, 并最终确定最优规划方案。

5 算例分析

为了验证本文所提方法的有效性, 对 IEEE 30 节点系统进行了基于改进和声搜索算法的多目标差异

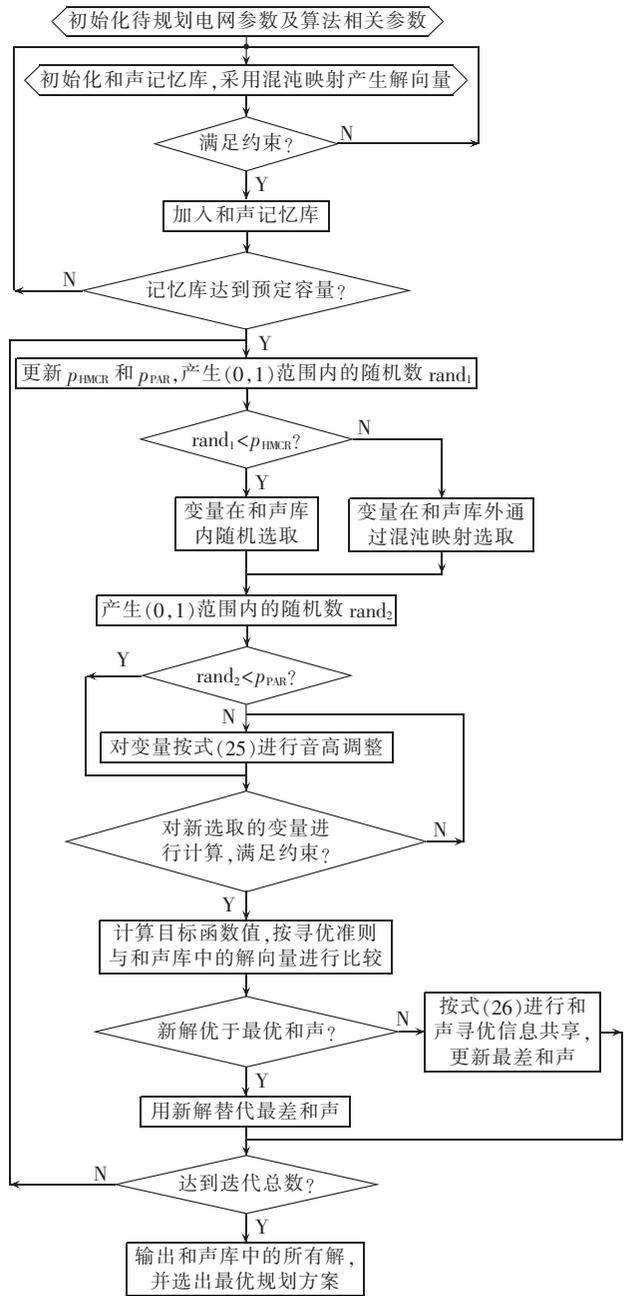


图 1 改进和声搜索算法流程图
Fig.1 Flowchart of IHS algorithm

化规划。设定规划场景为将差异化规划后的网架抗灾标准由 30 a 一遇提高到 50 a 一遇, 因为算例中只有支路阻抗而无线路长度, 本文根据文献^[21]的方法对各条线路长度进行估算, 设定资金年利率 s 为 5%; 售电电价 λ_2 为 600 元/(MW·h), 发电成本 λ_1 为 100 元/(MW·h); k_1, k_2 分别取值为 0.10、0.05; 年均折旧系数 r 取 0.12。由于大面积停电的综合影响远大于停电本身造成的单纯电量损失, 且重要负荷的停电影响远远大于一般负荷的停电损失, 故 a_1 取 100, a_2 取 10。重要电源和普通电源的单位重启费用 R_1 和 R_2 分别为 50 万元/台和 30 万元/台; 设计标准是抗 30 a 一遇冰灾的线路单位造价为 104.19 万元/km,

根据工程经验,抗 50 a 一遇初期投资约为抗 30 a 一遇投资的 3 倍^[22],冰灾持续时间为 3 d,规划周期为 25 a,灾害场景下,差异化规划后的电网所能保留的负荷中,90%为重要负荷,10%为普通负荷。

改进和声搜索算法参数设置如下:和声库容量 S_{HM} 为 10;惯性权重 w 为 0.4;学习因子 c_1 和 c_2 均为 0.2;迭代总数为 200 次; $p_{HMCr} \in [0.80, 0.99]$, $p_{PAR} \in [0.20, 0.30]$ 。

在统一的灾害场景和相同计算前提下,对和声库中输出的 10 组解向量进行整理,按 δ_{IR} 从大到小依次设为方案 1—10,表 3 列出了前 5 种规划方案,剩下 5 组差异化规划方案的减损效益小于加强成本,效益成本比均小于 1。

表 3 和声库部分输出结果

Table 3 Part of harmony memory outputs

方案	规划方案	$F_{LCC}/$ 万元	$F_{IR}/$ 万元	δ_{IR}
1	30-25,30-1,1-2,25-26,2-3, 3-4,3-27,6-3,7-2,7-9,8-9, 9-12,6-11,6-15,18-19,19-20, 19-21,21-22,21-24,3-22	163 150	184 950	1.1336
2	30-25,30-1,1-2,25-26,2-3, 3-4,3-27,6-3,7-2,7-8,7-9, 9-12,6-11,6-15,18-19,19-20, 19-21,21-22,21-24,3-22	170 080	184 970	1.0875
3	30-1,1-2,25-26,2-3,26-4,3-4, 3-27,6-3,7-2,7-8,7-9,9-12, 6-11,6-15,18-19,19-20, 19-21,21-22,21-24,3-22	177 460	184 990	1.0424
4	30-25,30-1,1-2,25-26,2-3, 3-4,6-3,7-2,7-8,7-9,9-12, 6-11,6-15,6-16,16-18,18-19, 19-20,21-22,21-24,3-22	179 962	184 992	1.0280
5	30-25,30-1,1-2,25-26,2-3, 3-4,3-27,6-3,5-6,7-2,7-8, 7-9,9-12,6-11,6-15,18-19, 19-20,19-21,21-22,21-24, 3-22	184 080	185 000	1.0050

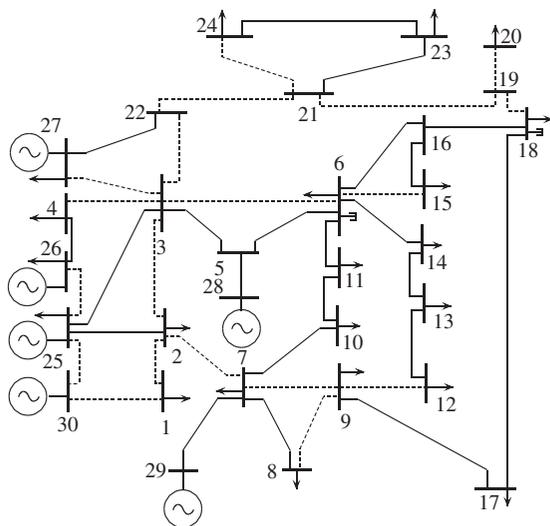
图 2 为 IEEE 30 节点系统差异化规划后效益成本比最大的规划方案。对图 2 和表 3 进一步分析,可得到如下结论:

a. 和声库中输出的均为 Pareto 非支配解,加强成本大的减损效益也大,故单独的加强成本或减损效益无法准确反映方案的优劣,需根据效益成本比选出最优的差异化规划方案,从而验证了模型的正确性;

b. 对最优方案进行分析,当发生强度为 30~50 a 一遇之间的冰灾时,加强线路稳定运行,未加强线路断开,即图 2 中只有与虚线相连的节点所带负荷与电源保留,对比标准数据,发现失去的负荷节点所带负荷相对较少,断开的电源出力也相对较小,进一步证明了规划方案的合理性;

c. 改进和声搜索算法能快速搜索到全局最优解,并通过动态调整和声库保证了解的多样性,验证了算法的适用性与有效性。

为进一步验证本文算法的有效性,用研究较多的



--- 加强线路, — 未加强线路, ⇨ 母线分段常闭开关

图 2 IEEE 30 节点系统最优差异化规划方案
Fig.2 Optimal differential planning scheme for IEEE 30-bus system

遗传算法和粒子群优化算法对本文所提的差异化规划问题进行求解,算法种群规模均设置为 10,最大迭代次数为 200。计算结果如图 3 和图 4 所示。

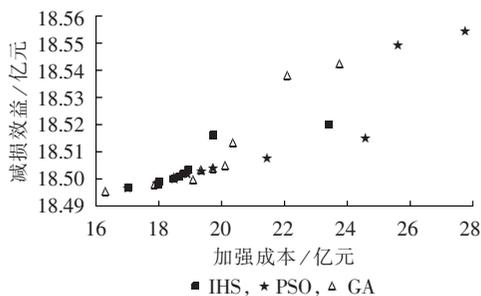


图 3 3 种算法的 Pareto 解集分布
Fig.3 Distribution of Pareto solution set for three algorithms

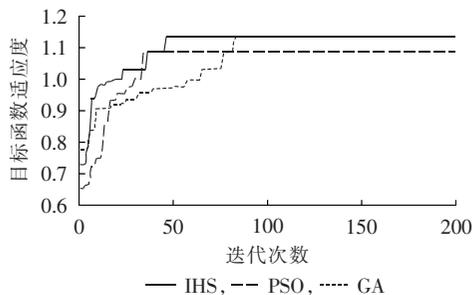


图 4 迭代收敛过程

Fig.4 Process of iterative convergence

从图 3 中最优解质量上分析,改进和声搜索算法搜索到的 Pareto 解向量包含或支配另外 2 种算法搜索到的部分解向量,且分布更靠近最优解;从图 4 中收敛速度的对比上而言,改进和声搜索算法收敛速度较快,在迭代第 46 次就实现了算法收敛,粒子群优化算法虽然也很快实现了收敛,但是陷入了局部最优,而遗传算法通过交叉与变异操作跳出了局部最优解,

但是相对而言收敛速度较慢,在迭代第 82 次才收敛于最优解。由此看出改进和声搜索算法相比于传统的粒子群优化算法和遗传算法能更快地搜索到最优解,具有较好的适应性和鲁棒性。

6 结论

a. 用差异化全寿命周期新增成本和减损效益对差异化规划的经济性和可靠性进行量化,建立了多目标差异化规划优化模型,并根据效益成本比最大选出最优规划方案,仿真结果证明了该模型的合理性,对电网差异化规划问题进行了有益的探索。

b. 将和声搜索算法用于解决电网差异化规划问题并对其进行一系列改进,提出了改进和声搜索算法。制定了差异化规划的多目标寻优准则,避免了多个目标之间相互冲突的问题,动态调整和声库,保证了了解的多样性,并提高其搜索性能。

c. 将改进和声搜索算法与遗传算法以及粒子群优化算法的仿真结果进行对比,反映出该算法无论在搜索最优解的质量上还是收敛速度上均具有优越性,表明该算法在解决电网规划问题上具有良好的应用前景。

参考文献:

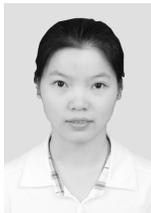
- [1] 李成榕,吕玉珍,崔翔,等. 冰雪灾害条件下我国电网安全运行面临的问题[J]. 电网技术,2008,32(4):14-22.
LI Chengrong,LÜ Yuzhen,CUI Xiang,et al. Research issues for safe operation of power grid in China under ice-snow disasters[J]. Power System Technology,2008,32(4):14-22.
- [2] 杨永全. 近年电网冰灾事故分析及抗防对策[J]. 电力建设,2008,29(9):35-37.
YANG Yongquan. Analysis of recent icing-caused grid accidents and its countermeasures[J]. Electric Power Construction,2008,29(9):35-37.
- [3] 刘有飞,蔡斌,吴素农. 电网冰灾事故应急处理及反思[J]. 电力系统自动化,2008,32(8):10-13.
LIU Youfei,CAI Bin,WU Sunong. Emergency management for the ice disaster in power grids and some suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(8):10-13.
- [4] 翟海保,程浩忠,陈春霖,等. 输电网络优化规划研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2004,16(2):17-23.
ZHAI Haibao,CHENG Haozhong,CHEN Chunlin,et al. Review of transmission network optimal planning[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2004,16(2):17-23.
- [5] 范宏,程浩忠,金华征,等. 考虑经济性可靠性的输电网二层规划模型及混合算法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(16):1-7.
FAN Hong,CHENG Haozhong,JIN Huazheng,et al. Transmission network bi-level programming model considering economy and reliability and hybrid algorithm[J]. Proceeding of the CSEE,2008,28(16):1-7.
- [6] 刘建琴,孙珂,李晖,等. 推行差异化设计以提高电网抗灾能力[J]. 华北电力技术,2009,39(5):41-44,54.
LIU Jianqin,SUN Ke,LI Hui,et al. Practicing different design for improving grid ability against calamity[J]. North China Electric Power Technology,2009,39(5):41-44,54.
- [7] 徐国新,夏清,康重庆. 电网抗灾投资决策方法研究[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):22-27.
XU Guoxin,XIA Qing,KANG Chongqing. Research on investment decision-making method of disaster-proof power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):22-27.
- [8] 徐国新,夏清,康重庆. 抗灾型电网规划模式与模型[J]. 电力系统自动化,2010,34(3):17-21.
XU Guoxin,XIA Qing,KANG Chongqing. Research on mode and model of anti-disaster transmission network expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(3):17-21.
- [9] 黎灿兵,梁锦照. 电网差异化规划新方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(24):11-15.
LI Canbing,LIANG Jinzhao. A new method of power grid differential planning[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(24):11-15.
- [10] 柳璐,程浩忠,马则良,等. 考虑全寿命周期成本的输电网多目标规划[J]. 中国电机工程学报,2012,32(22):46-54.
LIU Lu,CHENG Haozhong,MA Zeliang,et al. Multi-objective transmission expansion planning considering life cycle cost[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(22):46-54.
- [11] 赵亮,吕剑虹. 基于改进遗传算法的风电场多目标无功优化[J]. 电力自动化设备,2010,30(10):84-88.
ZHAO Liang,LÜ Jianhong. Multi-objective reactive power optimization of wind farm based on improved genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(10):84-88.
- [12] 张宪,苑津莎,杨薛明,等. 基于粒子群算法的配电网网架规划[J]. 华北电力大学学报,2006,33(3):14-17.
ZHANG Xian,YUAN Jinsha,YANG Xueming,et al. Distribution network planning based on particle swarm optimization[J]. Journal of North China Electric Power University,2006,33(3):14-17.
- [13] GEEM Z W,KIM J H,LOGANATHAN G V A. New heuristic optimization algorithm:harmony search[J]. Simulation,2001,76(2):60-68.
- [14] SANTOS C L,de ANDRADE B D L. An improved harmony search algorithm for synchronization of discrete-time chaotic systems[J]. Chaos,Solitons & Fractals,2009,41(5):2526-2532.
- [15] GEEM Z W. Optimal cost design of water distribution networks using harmony search[J]. Engineering Optimization,2006,38(3):259-277.
- [16] ERDAL F,SAKA M P. Effect of beam spacing in the harmony search based optimum design of grillages[J]. Asian Journal of Civil Engineering,2008,9(3):215-228.
- [17] 江修波,吴文宣,陈祥伟. 区间分析法在电力变压器全寿命周期成本模型中的应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):50-53.
JIANG Xiubo,WU Wenxuan,CHEN Xiangwei. Transformer life cycle cost model based on interval analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(9):50-53.
- [18] GEEM Z W. Novel derivative of harmony search algorithm for discrete design variables[J]. Applied Mathematics and Computation,2008,199(1):223-230.
- [19] 李亮,迟世春,林皋. 混沌和声搜索算法及其在土坡局部安全系数法中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(增刊1):2763-2769.
LI Liang,CHI Shichun,LIN Gao. Chaos harmony search method and its application to local factor of safety method for soil

- slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supplement 1): 2763-2769.
- [20] 赵简, 龚庆武, 陈道君, 等. 基于模糊支配的生物地理学优化算法及其在含风电场电力系统调度中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 123-128.
- ZHAO Jian, GONG Qingwu, CHEN Daojun, et al. Fuzzy-dominance combined biogeography-based optimization algorithm and its application in dispatch of power system with wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 123-128.
- [21] 苏海峰, 张建华, 梁志瑞, 等. 基于 LCC 和改进粒子群算法的配电网多阶段网架规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 118-125.
- SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Power distribution network multi-stage planning optimization based on LCC and improved PSO[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 118-125.
- [22] 张勇军, 黄慧, 唐捷. 基于非序贯蒙特卡罗冰灾重现期线路经济性

性比较[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 119-123.

ZHANG Yongjun, HUANG Hui, TANG Jie. Economy comparison of line's ice disaster cycle based on non-sequential Monte Carlo [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 119-123.

作者简介:



宋春丽

宋春丽(1989—), 女, 湖北随州人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制 (E-mail: songchunligogo@163.com);

刘涤尘(1953—), 男, 湖北红安人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事电力系统分析与控制、电力自动监控、电力电子技术应用等方面的研究;

吴军(1977—), 男, 上海人, 讲师, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制。

Multi-objective differential planning based on improved harmony search algorithm for power network

SONG Chunli, LIU Dichen, WU Jun, WANG Haolei, ZHAO Yijie, PAN Xudong, DONG Feifei

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The differential planning of power network should be carried out for enhancing its resilience to disasters. An optimal multi-objective differential planning model is established for power network, which applies the additional cost and the benefit of loss reduction covering whole life cycle to quantify its economy and reliability. The optimization criteria is set according to the Pareto dominate relation, which takes the maximum benefit-cost ratio as its objective to select the optimal differential planning scheme from the Pareto solution set. The harmony search algorithm is applied to solve the model and new technologies are adopted to improve its search performance and solve the 0-1 planning problem, such as chaotic mapping, dynamic parameter setting, improved pitch adjustment strategy, harmony optimization information sharing, etc. Analysis of IEEE 30-bus case shows that, being correct and reasonable, the model can obtain the optimal planning scheme. Compared with the traditional genetic algorithm and the particle swarm optimization algorithm, the improved harmony search algorithm has better convergence speed, adaptability and robustness.

Key words: electric power systems; planning; multi-objective differential planning; costs; loss-reduction benefit; improved harmony search algorithm; reliability; economics; models

(上接第 128 页 continued from page 128)

Calculation of theoretical line loss based on quasi real-time data of smart distribution network

LI Bin, DU Mengyuan, WEI Wei, WEI Hua

(Department of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Because the coverage rate of distribution network automation is low and less data can be acquired, a method based on the quasi real-time data is proposed to calculate the theoretical line loss. A model of theoretical line loss calculation is built based on the state estimation and the upper and lower bounds of its inequality constraints are determined according to the historical data. The interior point method is applied to get its solution. The state of distribution network power flow is estimated according to the injecting power of line head node and the measurements of partial transformer measuring terminals. Case study shows that, the proposed model estimates the state of power flow more precisely with less measurements.

Key words: electric power distribution; state estimation; electric lines; electric losses; calculations; models; measurements; interior point method