

基于改进和声搜索算法线路过载控制策略研究

王健¹,李国平²

(1. 三峡大学 湖北省微电网工程技术研究中心,湖北 宜昌 443002;

2. 湖北能源鄂州发电有限公司,湖北 鄂州 436000)

摘要: 为避免因切除故障线路引起潮流转移造成其它正常线路过载的问题,提出了一种基于改进和声搜索算法的线路过载控制策略。首先,构建包含发电机组与用户负荷有功调整最小和电压偏移最低的双目标优化控制模型;然后,根据所建模型的特点引入基本和声搜索算法,为进一步提高算法收敛性和搜索速度,采用均匀分布的初始和声库及变维数和声记忆库对其进行改进,并应用于该模型的求解,得到线路过载控制策略;最后,采用陕西省实际电网作为算例验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 潮流转移;线路过载控制策略;有功调整最小;电压偏移最低;改进和声搜索算法

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22277

Research on Line Overload Control Strategy Based on Improved Harmony Search Algorithm

WANG Jian¹, LI Guoping²

(1. Hubei Microgrid Engineering Technology Research Center, Three Gorges University,

Yichang 443002, Hubei, China; 2. Hubei Energy Ezhou Power

Generation Co., Ltd., Ezhou 436000, Hubei, China)

Abstract: In order to avoid overload of other normal lines caused by power flow transfer caused by fault line removal, a line overload control strategy based on improved harmony search algorithm was proposed. Firstly, a double objective optimization control model with minimum active power adjustment and minimum voltage offset was constructed. Then, according to the characteristics of the model, the basic harmony search algorithm was introduced. In order to further improve the convergence and search speed of the algorithm, the uniformly distributed initial harmony database and variable dimension harmony memory database were used to improve the algorithm, and were applied to the model. Finally, an actual power grid was taken as an example to verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: power flow transfer; line overload control strategy; minimum active power adjustment; minimum voltage offset; improved harmony search algorithm

保护动作于电网故障线路,使得该线路上的有功功率转移到其它线路上,可能会导致其它线路出现过载,若过负荷保护动作,将引发连锁跳闸事故。因此需采取紧急控制措施快速消除线路过载问题,避免大范围停电。

目前在线路过载控制研究领域得到广泛认可的主要有灵敏度法^[1-2]、控制策略^[3-6]和优化方法^[7-9]。其中,灵敏度的优势在于无需迭代,也不必考虑收敛,同时能保证参与调控的机组数量少

且切机总量小;基于数学模型得到调整措施的优化方法在求取调整方案时,将所有线路的功率方程作为约束条件,保证各线路在调整后,线路上的功率均在安全范围内,所得调整结果更符合实际电网的运行要求。

然而,基于灵敏度分析的控制策略选择仅以过载程度最大的线路为研究对象,没有充分考虑对其它线路的影响;而基于优化算法的控制策略会出现调整设备过多的问题。因此,本文将用户

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51877122)

作者简介: 王健(1991—),男,硕士,Email:1548188601@qq.com

通讯作者: 李国平(1990—),男,硕士,助理工程师,Email:513232531@qq.com

负荷损失和参与调整的机组减出力调整最少、控制区域内节点电压偏移最小作为目标函数,以机组有功出力的上下限、节点电压上下限等因素为约束条件,构建线路过载控制的双目标数学模型。结合所建立模型的特点,在原始和声搜索算法上进行改进,并应用到所建立控制模型的求解中,得到基于改进和声搜索算法的线路过载紧急控制策略。

1 线路过载控制的数学模型

1.1 目标函数

结合电网实际情况,从机组有功调整量并尽可能保证负荷以及防止电压越限进行考虑,建立目标函数。

1.1.1 保证用电负荷,且机组有功调整最小

在实际电力系统中,常采用切机、切负荷措施解决系统稳定问题。而从供电可靠性的角度出发,往往更偏向于先切机,若仍无法消除过载问题,才考虑切负荷。同时综合系统运行时的经济性要求,在消除过载问题时期望参与调整的机组总有功出力最小。所以应将尽量少切或不切用电负荷作为目标函数的考量条件之一。为了在数学模型中反映用户负荷尽量少切或者不切这一情况,引入一个较大值的惩罚因子 μ ,对负荷节点功率变化量进行惩罚。因此,所建立的第一个目标函数为

$$f_1 = \left[\sum_{i \in G^-} \frac{|P_{G^-i} - P_{G^-i}^{(0)}|}{P_{G^-i,N}} + \mu \cdot \sum_{j \in L} \frac{|P_{Lj} - P_{Lj}^{(0)}|}{P_{Lj,N}} \right]^2 \quad (1)$$

式中: $P_{G^-i}^{(0)}$ 为发电机节点*i*在切机前的有功出力; P_{G^-i} 为发电机节点*i*在切机后的有功出力; $P_{Lj}^{(0)}$ 为负荷节点*j*在切负荷前的有功出力; P_{Lj} 为负荷节点*j*在切负荷后的有功出力; $|P_{Lj} - P_{Lj}^{(0)}|$ 为切负荷量; $P_{G^-i,N}$ 为发电机节点*i*的额定出力; $P_{Lj,N}$ 为负荷节点*j*的额定有功功率; G^- 为发电机节点集合; L 为负荷节点集合。

1.1.2 电压偏移

当发生线路过载时,系统电压会出现下跌,若电压低于线路整定的节点低压风险警戒阈值,就有可能发生低压问题,危及系统的安全稳定。因此,期望进行过载控制策略时,节点的电压偏差尽可能小,故所建立的第二个目标函数为

$$f_2 = \sum_{k \in n} \left[\frac{U_k - U_k^{(0)}}{U_k^{(0)}} \right]^2 \quad (2)$$

式中: $U_k^{(0)}, U_k$ 分别为节点*k*在调整前、后电压额定值; n 为控制过程中所涉及到的节点集合。

1.1.3 多目标间的协调

上述模型属于典型的多变量、多目标的非线性优化控制问题,如何将所建立的两个目标函数更好、更合理地联系起来,不仅影响模型最终的求解,更关系着其工程应用中的实用性。为了降低由人为主观确定权重系数所带来的影响,采用层次分析法来获得权重,使得两个目标的优化运行模型转化为单目标优化模型,如下式所示:

$$\min F = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 \quad (3)$$

其中 $\omega_1 = 0.265 \quad \omega_2 = 0.735$

同时,在建立目标函数时已做归一化处理,可解决量纲不一致的问题。

1.2 约束条件

数学模型的建立需综合各控制量和状态量之间的耦合关系,并满足相应的约束条件。在所建立的线路过载紧急控制数学模型中除了满足传统网络潮流等式约束外,还应考虑各种不等式约束条件。

1.2.1 等式约束

等式约束为

$$\sum_{i \in G^-} |P_{G^-i} - P_{G^-i}^{(0)}| = \sum_{j \in L} |P_{Lj} - P_{Lj}^{(0)}| + \sum_{z \in G^+} |P_{G^+z} - P_{G^+z}^{(0)}| \quad (4)$$

式中: $P_{G^+z}^{(0)}, P_{G^+z}$ 分别为发电机节点*z*在增发有功前、后的出力值; $|P_{G^+z} - P_{G^+z}^{(0)}|$ 为有功增量。

1.2.2 不等式约束

不等式约束如下:

1) 发电机节点功率约束为

$$\begin{cases} P_{G^-i,\min} \leq P_{G^-i} \leq P_{G^-i,\max} \\ P_{G^+z,\min} \leq P_{G^+z} \leq P_{G^+z,\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{G^-i,\max}, P_{G^-i,\min}$ 分别为切机节点*i*允许发的最大、最小有功功率; $P_{G^+z,\max}, P_{G^+z,\min}$ 分别为增发出力有功的发电机节点*z*允许发的最大、最小有功功率。

2) 负荷节点功率约束为

$$0 \leq \Delta P_{Lj} \leq P_{Lj,\text{III}} \quad (6)$$

式中: ΔP_{Lj} 为负荷节点*j*的切负荷量; $P_{Lj,\text{III}}$ 为负荷节点*j*中的三级负荷总量。

3) 节点电压约束。节点电压是状态变量,当其电压超越允许的最大或最小值时,必须采取电压调节措施调整电压,以避免系统崩溃,约束为

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (7)$$

式中: $U_{i,\max}$, $U_{i,\min}$ 分别为节点 i 电压的允许最大值和允许最小值。

上述所构建的应用于电网线路过载的控制模型,属于多目标、非线性的优化问题,由于模型中涉及到的控制变量和约束条件偏多,所以选择对于求解条件更为松弛、适用性更强的和声搜索智能优化算法^[10-11]。

2 线路过载控制模型求解算法的改进

传统和声搜索算法中的各参数在计算过程中都是保持恒定的,不会随着寻优过程进行匹配调整,所以传统和声搜索算法的收敛性能亟待提高。考虑到建立的模型具有双目标、多变量等特点,为改善搜索结果全局最优化的稳定性,并适用于本文所建立的式(1)~式(7)的优化模型求解,对基本和声搜索算法进行如下两方面的改进:

1) 采用均匀分布的和声库进行初始化。和声记忆库的初始化在很大程度上会影响算法的收敛速度,由于随机性的缘故,可能导致迭代过程出现收敛速度慢甚至陷入局部最优的情况。因此,考虑将随机性与均匀分布相结合,保证初始和声记忆库中的元素具有更好的性能,即

$$\begin{cases} x_i^j = x_{i,\min} + \text{Random}(0,1)(x_{i,\max} - x_{i,\min}) & j = 1 \\ x_i^j = x_i^{j-1} + (x_{i,\max} - x_{i,\min})/HMS & j = 2, \dots, q \end{cases} \quad (8)$$

式中: x_i^j 为决策变量; $x_{i,\min}$, $x_{i,\max}$ 分别为第 i 维变量的最小、最大取值; $\text{Random}(0,1)$ 为 $[0,1]$ 范围内的随机数; HMS 为和声记忆库的大小。

2) 引入变维数和声库。传统和声搜索算法原理是在形成新和声后,通过比较目标函数值,将初始和声记忆库中的最差解用新解代替。所以,如果新和声比初始和声记忆库中的若干个解更优,每次也只能更替掉1个和声向量。这种寻优方式在很大程度上会影响算法的收敛速度。因此采用变维数的和声库方式,即

$$\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_q, \lambda_{q+1}) \quad (9)$$

$$\lambda_{q+1} > \lambda_j \quad j = 1, \dots, q \quad (10)$$

式(9)中,前 q 个元素表示初始和声记忆库中各向量所对应的目标函数值, λ_{q+1} 表示新形成和声所对应的目标函数值,逐次对比 λ_{q+1} 与初始和声记忆库中各和声的目标函数值,舍弃掉满足式(10)的 λ_j 及对应的和声,同时在初始和声记忆库中补充新的和声向量来更新和声库。

采用上述变维数的形式,原始和声向量总数

将随迭代次数呈现反向变化,可以保证尽早将性能较差的和声高效剔除出和声记忆库。这样将有助于加快迭代的收敛速度,提高算法的全局寻优能力。

3 线路过载控制策略研究

将改进和声搜索算法用于所建线路过载控制模型的求解,得到线路过载控制策略,如下:

步骤1:初始化电网及算法的参数。

步骤2:生成电网和声记忆库。

$[\Delta P_{G_1}, \dots, \Delta P_{G_m} \quad \Delta P_{L_1}, \dots, \Delta P_{L_n} \quad \Delta P_{G_1}, \dots, \Delta P_{G_h}]^T$ 为所建模型的控制变量,包含 m 个机组的切机量, n 个负荷节点的切负荷量, h 个机组的功率增量。因此可将用于求解控制策略的改进和声搜索算法初始和声库表示为

$$H = \begin{bmatrix} X_1^1 & \dots & X_m^1 & \dots & X_{m+n}^1 & \dots & X_{m+n+h}^1 \\ X_1^2 & \dots & X_m^2 & \dots & X_{m+n}^2 & \dots & X_{m+n+h}^2 \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_1^q & \dots & X_m^q & \dots & X_{m+n}^q & \dots & X_{m+n+h}^q \end{bmatrix} \quad (11)$$

为了应对线路过载问题,需进行预防性部署,将事先计算好每个时段所应切除的发电机组有功增、减出力和负荷切除量。因此,和声搜索库中的每行元素代表一个控制策略,即

$$\begin{aligned} [X_1^t, \dots, X_m^t, X_{m+1}^t, \dots, X_{m+n}^t, X_{m+n+1}^t, \dots, X_{m+n+h}^t] = \\ [\Delta P_{G_1}^t, \dots, \Delta P_{G_m}^t, \Delta P_{L_1}^t, \dots, \Delta P_{L_n}^t, \Delta P_{G_1}^t, \dots, \Delta P_{G_h}^t] \quad i \in [1, m] \quad j \in [1, n] \\ z \in [1, h] \quad t \in [1, HMS] \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\Delta P_{G_i}^t$ 为第 t 个控制时间段内第 i 个发电机组的切机值; $P_{L_j}^t$ 为第 t 个控制时间段内第 j 个负荷节点的切负荷量; $\Delta P_{G_z}^t$ 为第 t 个控制时间段内第 z 个发电机组的有功增量。

步骤3:形成新解。比较和声记忆库搜索概率 O 与随机生成的概率 V 的大小。如果 V 值不超过 O , 则从当前和声库内随机抽取所有和声的第 i 个元素作为新和声的第 i 个元素;若大于 O , 则根据初始和声记忆库中元素的形成方法形成第 i 个元素,如下式所示:

$$x_i^j = \begin{cases} x_i^j \in \{x_i^1, \dots, x_i^q\} & V \leq O \\ x_i^j \in X_i & V > O \end{cases} \quad (13)$$

形成新和声向量中的元素后,需要进一步判断是否对其进行微调。将音调微调概率 P_{ar} 与随机生成的概率 V 的大小进行对比,如下式:

$$x_i^j = \begin{cases} x_i^j \pm \text{Random}(0,1)b_w & V \leq P_{ar} \\ x_i^j & V > P_{ar} \end{cases} \quad (14)$$

式中: b_w 为带宽。

若 V 不超过 P_{ar} ,则对新元素以 $\text{Random}(0,1) \times b_w$ 进行调整;若大于 P_{ar} ,则维持恒定,便可形成满足约束条件的新和声向量。

步骤4:更新和声记忆库。利用式(10)将新形成的和声与初始和声记忆库中的和声进行对比,若新和声优于初始和声记忆库中的当前和声,则用新和声替换库中当前和声以及所对应满意度;若初始和声记忆库中当前的所有和声优于新和声,则丢弃新产生的和声。

步骤5:当迭代次数达到所设置的最大迭代次数时,停止迭代并得到最优控制方案。

控制方案流程如图1所示。

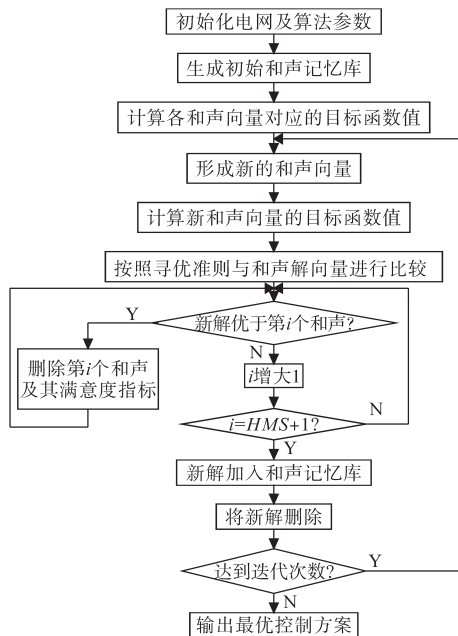


图1 基于改进和声搜索算法的线路过载紧急控制策略
Fig.1 Emergency control strategy of line overload based on improved harmony search algorithm

4 算例测试与结果分析

为验证所提控制策略的有效性,以陕西省实际电网数据为研究对象,在PSASP仿真软件上进行计算。以榆—延输电断面为例,线路榆横—洛川双回线设置 $N-2$ 故障,保护动作于跳闸,其潮流转移到系统中的其它线路上,系统失去稳定性。为保证一般性,设置初始和声为20,和声记忆库搜索概率为0.85,音调微调概率为0.6,频带宽度为0.1,迭代次数取为400,确定好参考机,通

过第2节阐述的改进算法和第3节控制策略和迭代步骤。得到线路榆横—洛川双回线的过载控制策略,具体如表1所示。

表1 榆横—洛川双回线潮流转移控制方案

Tab.1 Power flow transfer control scheme of Yuheng—Luochuan double circuit line

发电厂、负荷	切机/切负荷量/ MW	发电厂、负荷	切机/切负荷量/ MW
延热	205.34	华风	195.26
鲁风	188.47	李风	187.21
榆厂	204.36	双河	194.84
店塔	200.76	负荷	7.42
		总计	1 393.66

分别从线路功率、母线电压以及发电机功角三个方面对所给出策略的有效性进行验证,如图2所示,在线路榆横—洛川双回线发生 $N-2$ 故障后,分布式安全稳定控制装置经15个周波后按照所给出的控制策略下达切机、切负荷命令,线路上的有功功率 P 、母线节点的电压 U (标么值)以及发电机的功角 δ 都得到控制,波动幅度逐渐减小,进而恢复到稳定状态。

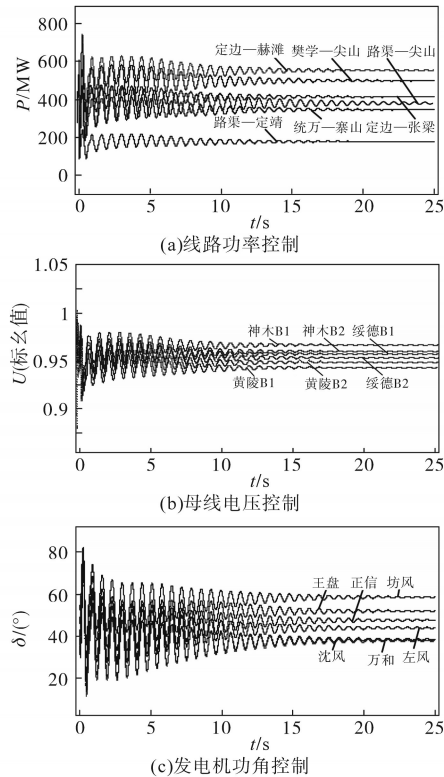


图2 榆横—洛川双回线的安全稳定控制方案
Fig.2 Safety and stability control scheme of Yuheng—Luochuan double circuit line

分别将改进和声搜索算法(improved harmony search, IHS)、传统和声搜索算法(harmony

search, HS)和粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)三种优化方法进行对比,其迭代收敛过程如图3所示,可知IHS算法的收敛速度与寻优能力优于HS算法和PSO算法,可以找到更接近全局最优的解,可以证明改进和声搜索算法(IHS)相比于传统和声搜索算法(HS)和粒子群算法(PSO)的优越性。

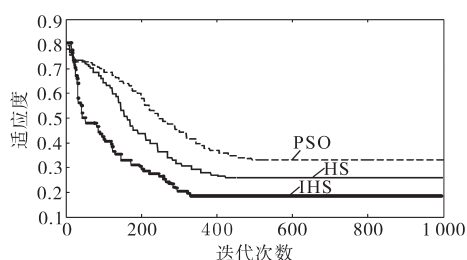


图3 算法对比

Fig.3 Algorithm comparison

采用所提线路过载控制策略对其它输电断面因潮流转移引起线路过载进行控制,结果如表2所示。

表2 实际电网关键线路潮流转移控制方案

Tab.2 Power flow transfer control scheme of key lines in actual power grid

故障线路	调整的机组和负荷	调整量/MW
定靖—富县双回线	周湾、强风、王盘、坊风、沈风、部分负荷	420.31
洛川—信义双回线	韩二、西柳、黄热、沮河、蒲城、部分负荷	1 034.27
安北—信义双回线	户二、灞厂、西热、灞热、渭河、渭热部分负荷	910.28
宝鸡—乾县双回线	彬长、瑶池、杨热、宝二31、宝二G5、部分负荷	1 203.59
乾县—信义双回线	彬长、瑶池、秦岭、韩二、韩三、蒲城、部分负荷	1 564.86
宝鸡—南山	户二、宝二31、宝二G5、宝热、西热、部分负荷	1 589.32
金州—柞水双回线	安康、灞厂、陕安小机、部分负荷	301.48

从线路功率、母线电压以及发电机功角三个方面进行仿真测试,各断面中的关键线路引起的过载现象经所提出的线路过载控制策略均由大幅度波动恢复到稳定状态,说明该线路过载控制

策略能够对实际电网的薄弱环节起到调整作用,可以消除系统线路过载现象,验证了基于改进和声搜索算法的线路过载控制策略的有效性。

5 结论

本文提出了一种基于改进和声搜索的线路过载控制策略。在保证系统恢复稳定运行状态的基础之上,尽可能保证用户供电的可靠性;此外,对和声搜索算法进行改进,提高计算收敛性和搜索速度,并采用某实际电网验证了所提控制策略的有效性。后期考虑将所提控制策略应用于新能源接入、交直流混联系统中。

参考文献

- [1] 任建文,凌霞. 基于最佳灵敏度向量和差异系数的线路过载紧急控制策略[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(4): 13-18.
- [2] 徐岩, 郅静. 基于功率灵敏度的线路过载划区域紧急控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 60-72.
- [3] 陈浩, 张英敏, 曾琦, 等. 真双极 MMC-HVDC 系统线路过载紧急控制策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 107-114.
- [4] 程若发, 付鑫. 多支路同时断开潮流转移输电断面快速搜索[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(7): 62-71.
- [5] 任建文, 何培成, 何宸. 基于虚拟控制单元与启发式搜索的线路过载紧急控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 33-38, 69.
- [6] 徐岩, 郅静. 基于直流潮流和虚拟母线的多控制节点防连锁过载跳闸策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 77-86.
- [7] 任建文, 魏俊姣, 谷雨峰. 基于多目标粒子群优化算法的连锁跳闸预防控制[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 53-59.
- [8] 张旭隆, 王峰, 乔淑云, 等. 基于 PSO 优化支持向量机的 SRM 无传感器控制[J]. 电气传动, 2016, 46(2): 45-48, 54.
- [9] 梁杉, 毛弋, 刘小丽, 等. 改进和声搜索算法用于配电网重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(3): 90-95.
- [10] 张涛, 徐雪琴, 冉华军. 基于改进差分和声搜索算法的 FACTS 设备的多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 727-734.
- [11] Behrooz Keshtegar, Mahmoud Oukati Sadeq. Gaussian global-best harmony search algorithm for optimization problems[J]. Soft Computing, 2017, 21(24): 7337-7349.

收稿日期:2020-08-07

修改稿日期:2020-09-04