

基于改进灰狼算法的交直流混联电网 经济调度方法

袁泉¹,周鑫¹,周毓敏¹,吴云亮¹,张德亮²,郭少青²

(1. 南方电网公司电力调度控制中心,广东 广州 510000;

2. 北京清大科越股份有限公司,北京 100084)

摘要:为提升交直流混联电网经济调度问题求解效率,提出了一种基于改进灰狼算法的日前经济调度方法。直流输电线路与交流输电线路在网损表达式、传输特性等方面存在较大差别,造成交直流混联电网经济调度模型较传统交流电网更为复杂。由于该问题涉及大量的混合整数规划变量,传统智能算法容易陷入局部最优解,难以获得满足要求的最优解。通过引入初始对立搜索、自适应局部搜索等改进措施,提出了一种改进灰狼算法,并将其应用于含网损的交直流混联电网日前经济调度问题中。基于IEEE RTS-96三区域节点系统的算例表明,相比于粒子群算法、飞蛾扑火算法,改进算法能保证相近的求解效率基础上,避免陷入局部最优解,具有更强的搜索能力。

关键词:交直流混联电网;经济调度;改进灰狼算法;局部最优

中图分类号:TM743 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22412

A Novel Economic Dispatch Method for AC-DC Hybrid Power Grid Based on Improved Grey Wolf Algorithm

YUAN Quan¹, ZHOU Xin¹, ZHOU Yumin¹, WU Yunliang¹, ZHANG Deliang², GUO Shaoqing²

(1. China Southern Grid Power Dispatch Center, Guangzhou 510000, Guangdong, China;

2. Beijing QU Creative Technology Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of economic dispatch in AC-DC hybrid power grid, a day-ahead dispatching method based on an improved gray wolf algorithm was proposed. There are great differences between DC and AC transmission lines in terms of network loss expression and transmission characteristics, which makes the economic dispatch model of AC-DC hybrid power grid more complex than that of traditional AC power grid. Because this problem involves a large number of mixed integer programming variables, the traditional intelligent algorithm is easy to fall into the local optimal solution and difficult to obtain the optimal solution that meets the requirements. An improved gray wolf algorithm was proposed by introducing initial opposition search and adaptive local search and it was applied to the day-ahead economic dispatch problem of AC-DC hybrid power grid with network loss. A case study based on IEEE RTS-96 three region buses system shows that compared with particle swarm optimization and moth flapping algorithm, the improved algorithm can guarantee similar solving efficiency with avoiding falling into local optimal solution, which has stronger searching ability.

Key words: AC-DC hybrid grid; economic dispatch; improved grey wolf algorithm; locally optimal

随着电力电子技术的发展,直流输电系统得到了越来越广泛的研究和应用。无论微电网还是区域互联电网,交直流混联已成为现代电力系统重要的输电形式。由此,交直流混联电网的经

济调度问题也成为当前研究的重点^[1-2]。

直流输电系统的网损特性、传输能力等均与传统交流输电系统存在显著差异。当不考虑网损等因素时,可将直流输电系统等效为两个节

基金项目:南方电网公司技改项目(000000GS6119007)

作者简介:袁泉(1987—),男,硕士,高级工程师,Email:18939241278@189.cn

通讯作者:张德亮(1983—),男,本科,高级工程师,Email:zdl20002@163.com

点,其中潮流输出端可等效为负荷节点,潮流输入端可等效为发电节点。等效处理后,就可以采用传统交流系统的经济调度优化方法对其进行求解^[3]。然而随着电力市场发展,市场成员对电网经济调度准确性的要求日益提高,考虑网损差异的电网经济调度成为当前市场运行的支撑技术。上述等效处理方法已难以满足实际运行的要求。传统交流电网处于正常运行状态下,各节点电压与其额定电压偏差较小时,各交流输电线路的网损与其传输潮流呈近似正比关系^[4]。而对于直流系统,其传输网损与其潮流则呈二次函数关系,即当潮流增加时,网损将显著提高。因此当需要精细化考虑网损影响时,交直流电网经济调度问题将转化为非线性规划问题。由于现代电力系统规模较大,如何高效求解上述大规模非线性问题成为该领域的研究重点。文献[5]提出了分段线性化的简化处理方式,通过将直流线路的网损函数在其可行区间范围内划分为多个线性分段,将上述模型转化为混合整数线性规划问题。文献[6-7]则采用局部线性化的方式,用等效线性函数替代该非线性函数,对上述非线性问题迭代处理。然而由于上述线性化处理方式实现过程较为复杂,越来越多的研究集中于智能算法领域。文献[8-10]分别介绍了基于飞蛾扑火算法、粒子群算法等的交直流混联电网智能算法。如何避免智能算法陷入局部最优,提升算法的求解效率也成为当前交直流混联电网经济调度研究的重要问题。

为此,本文提出一种基于改进灰狼算法的交直流混联电网经济调度方法。首先介绍含网损的交直流混联电网经济调度模型,接着分析灰狼算法的改进策略及应用于交直流混联电网后的实施方法,最后基于IEEE RTS-96节点系统构造算例,验证上述改进算法的有效性。

1 考虑网损影响的交直流混联电网经济调度模型

考虑网损影响后,交直流混联电网经济调度优化目标主要包括三个部分,分别为发电成本最低、直流网络和交流网络网损最低^[11],可表示为

$$\begin{aligned} \text{Min}(Fun) = & \alpha_1 \sum_{t=1}^{NT} \sum_{g=1}^{NG} c_g(PG_{g,t}) + \alpha_2 \sum_{t=1}^{NT} \sum_{al=1}^{NAL} PL_{al,t} + \\ & \alpha_2 \sum_{t=1}^{NT} \sum_{dl=1}^{NDL} PL_{dl,t} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: Fun 为优化目标函数; Min 为该经济调度模型为最小化优化问题; α_1, α_2 分别为发电成本优化目标和网损优化目标的权重系数,由人工设定; NT 为该优化目标中时段数; NG 为发电机组台数; NAL, NDL 分别为交、直流输电线条数; $PG_{g,t}$ 为发电机组 g 在时段 t 的发电功率, $c_g(PG_{g,t})$ 为该机组在该时段的发电成本,一般为二次函数; $PL_{al,t}, PL_{dl,t}$ 分别为直流输电线 al 、交流输电线 dl 在时段 t 的损耗。

直流输电线损耗和交流输电线损耗存在较大差异。交流输电线损耗与线路两端节点电压、相角差、线路电阻等因素有关,考虑到电网正常运行时,节点电压一般与其额定电压偏差不超过10%^[12],在近似计算时,可将节点电压幅值设定为额定电压。据此,交流线路损耗可表示为

$$\begin{aligned} PL_{al,t} = & (U_{b1(al),t}^2 + U_{b2(al),t}^2)g_{al} - \\ & 2U_{b1(al),t}U_{b2(al),t}g_{al}\cos(\theta_{b1(al),t} - \theta_{b2(al),t}) \\ \approx & (U_{b1(al),t} - U_{b2(al),t})^2g_{al} + \\ & U_{b1(al),t}U_{b2(al),t}g_{al}(\theta_{b1(al),t} - \theta_{b2(al),t})^2 \\ \approx & U_{set}^2g_{al}(\theta_{b1(al),t} - \theta_{b2(al),t})^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $U_{b1(al),t}, U_{b2(al),t}$ 分别为交流输电线 al 首端节点 $b1(al)$ 、末端节点 $b2(al)$ 时段 t 的电压幅值; $\theta_{b1(al),t}, \theta_{b2(al),t}$ 分别为两端节点该时段的电压相角; g_{al} 为该交流输电线导纳; U_{set} 为系统节点额定电压。

考虑到输电线路两端节点相角差范围,可对其进行泰勒展开。取展开式前两项后,可将该交流输电线损耗转化为式(2)中第一个近似项形式;考虑到节点电压与额定电压的偏差较小,对其进行第二次简化,得到最终的简化表达式,可以看出在系统电压处于正常水平下,交流输电线损耗与两端节点的相角差平方成正比。

而对于处于双极运行状态的直流输电线,其损耗与其传输功率平方成正比,可表示为^[13]

$$PL_{dl,t} = \frac{PF_{dl-b1,t}^2 g_{dl}}{2U_{b1(al),t}^2} \approx \frac{PF_{dl-b1,t}^2 g_{dl}}{2U_{set}^2} \quad (3)$$

式中: PF_{dl-b1} 为直流输电线 dl 首端 $dl(b1)$ 时段 t 送出潮流功率; $U_{b1(al),t}$ 为首端对应时刻电压; g_{dl} 为该直流输电线单级导纳。

忽略其电压波动,可对其简化,表示为传输功率平方形式。

参考文献[4]中的做法,将直流输电线等效为两个具有功率相关性的节点后,可将交直流混联电网经济调度中约束条件表示为

$$\sum_{g \in b} PG_{g,t} - \sum_{b1(al) \in b} PF_{al-b1,t} + \sum_{b2(al) \in b} PF_{al-b2,t} - \sum_{b1(dl) \in b} PF_{dl-b1,t} + \sum_{b2(dl) \in b} PF_{dl-b2,t} - PD_{b,t} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{PF_{al-b1,t} - PF_{al-b2,t}}{2} = \frac{\theta_{b1(al),t} - \theta_{b2(al),t}}{x_{al}} \quad (5)$$

$$PFD_{al} \leq \frac{PF_{al-b1,t} + PF_{al-b2,t}}{2} \leq PFU_{al} \quad (6)$$

$$PFD_{dl} \leq \frac{PF_{dl-b1,t} + PF_{dl-b2,t}}{2} \leq PFU_{dl} \quad (7)$$

$$PF_{al-b1,t} - PF_{al-b2,t} \geq g_{at}(\theta_{b1(al),t} - \theta_{b2(al),t})^2 \quad (8)$$

$$PF_{dl-b1,t} - PF_{dl-b2,t} \geq PL_{dl,t} \quad (9)$$

$$PGD_g \leq PG_{g,t} \leq PGU_g \quad (10)$$

$$PPGD_g \leq PG_{g,t} - PG_{g,t-1} \leq PPGU_g \quad (11)$$

式中: $PF_{al-b1,t}, PF_{al-b2,t}$ 分别为交流输电线 al 首端节点 $b1(al)$ 的送输出功率和末端节点 $b2(al)$ 的注入功率; $PF_{dl-b1,t}, PF_{dl-b2,t}$ 分别为直流输电线 dl 首端节点 $b1(dl)$ 送输出功率和末端节点 $b2(dl)$ 注入功率; $PD_{b,t}$ 为节点 b 时段 t 的负荷需求; $g \in b$ 表示发电机组 g 与节点 b 相连; $b1(al) \in b, b1(dl) \in b$ 分别表示节点 b 为直流输电线路 al 和交流输电线 dl 的首端节点; $b2(al) \in b, b2(dl) \in b$ 分别表示节点 b 为直流输电线 al 和交流输电线 dl 的末端节点; x_{al} 为交流输电线 al 的阻抗; PFU_{al}, PFD_{al} 分别为交流输电线 al 的传输功率上、下限; PFU_{dl}, PFD_{dl} 分别为直流输电线 dl 的传输功率上、下限; PGU_g, PGD_g 分别为发电机组 g 发电功率上、下限; $PPGU_g, PPGD_g$ 分别为发电机组 g 爬坡能力上、下限。

以式(1)作为优化目标、以式(4)~式(11)作为约束条件,即可构建以电网运行成本和网损最低为目标,满足交直流电网运行约束的经济调度模型,可发现该模型本质上为大规模非线性规划问题^[13-14]。

2 基于改进灰狼算法的求解方法

2.1 灰狼算法简介

灰狼算法是一种基于模拟灰狼种群等级制度下狩猎行为的智能算法,其基本思想是将种群划分为4组: α, β, χ 和 δ , 由前3组指导第4组搜索,以扩大搜索范围,灰狼算法包括围猎、追捕、攻击3个步骤^[15-16]。

2.1.1 围猎

围猎用于模拟灰狼根据猎物位置调整其自

身位置的过程,可表示为

$$X(t+1) = X^p(t) - AD \quad (12)$$

$$D = CX^p(t) - X(t) \quad (13)$$

其中

$$C = 2r_2 \quad (14)$$

$$A = 2ar_1 - a \quad (15)$$

$$a = 2 - 2 \times \frac{t}{\max N} \quad (16)$$

式中: $X(t+1), X(t)$ 分别为第 $t+1$ 轮及第 t 轮迭代过程中灰狼位置向量; $X^p(t)$ 为第 t 轮猎物位置,用该轮种群的最优解等效替代; D 为灰狼与猎物间的距离向量; C, A 分别为灰狼位置调整的控制变量; r_1, r_2 为取值为 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数; a 为调控收敛过程中收敛速度的系数,随着迭代发展,取值由 2 逐步减少至 0; $\max N$ 为设定的最大迭代次数,当达到最大迭代次数时, a 取值为 0。

2.1.2 追捕

追捕用于模拟围猎结束后,灰狼种群根据新的位置重新猎寻猎物位置的过程。围猎结束后,计算种群个体适应度函数。根据适应度排序,统计灰狼种群最优解、次优解和第三优解。根据种群最优解、次优解、第三优解更新 α, β, χ 三组种群的灰狼位置,并由这三个种群的位置指导 δ 组种群灰狼调整位置。该过程可表示为

$$X_\alpha = X_1 - AD_1 \quad (17)$$

$$X_\beta = X_2 - AD_2 \quad (18)$$

$$X_\chi = X_3 - AD_3 \quad (19)$$

$$X_\delta = \frac{X_\alpha + X_\beta + X_\chi}{3} \quad (20)$$

式中: X_1, X_2, X_3 依次为种群中最优解、次优解、第三优解的位置; D_1, D_2, D_3 分别为最优解、次优解、第三优解代入式(13)后所得的距离向量; $X_\alpha, X_\beta, X_\chi$ 分别为 α, β, χ 三组种群的灰狼位置; X_δ 为 δ 组种群的灰狼位置,其值为 α, β, χ 三组种群的灰狼位置的平均值。

2.1.3 攻击

攻击用于模拟当猎物已停止移动,即被灰狼群包围后,捕获猎物的过程。根据收敛条件,判定得到最优解位置固定后,即确认捕获最优解。

2.2 改进策略

为了提升灰狼算法的全局搜索能力和搜索精度,本文中采用镜像搜索策略、 δ 扰动搜索策略、自适应局部搜索策略对传统灰狼算法进行了改进。

2.2.1 镜像搜索策略

镜像搜索策略用于改善初始值设定合理性。灰狼算法的搜索能力与其初始值设定关系密切,传统算法中初始值往往采用随机数方式生成。为此,采用镜像搜索对初始值设定进行改进,其做法是对比随机选择的初始位置与其镜像位置适应度函数取值,将适应度函数取值大的位置作为算法搜索的初始位置。任一位置的镜像位置可表示为

$$\overline{X(0)} = U + L - X(0) \quad (21)$$

式中: $X(0)$, $\overline{X(0)}$ 分别为随机选择的初始值与其镜像位置; U,L 分别为搜索空间上、下边界。

2.2.2 δ 摄动搜索策略

δ 摄动搜索策略通过在 δ 组灰狼位置迭代中增加一个自适应的局部摄动变量,提升算法搜索精度,改进后的 δ 组灰狼位置可表示为

$$X'_\delta = X_\delta + r_3 r_4 \quad (22)$$

其中

$$r_4 = X_\delta - X'_\delta \times \frac{t}{T_{\max}} \quad (23)$$

式中: X_δ , X'_δ 分别为摄动改进前、后的 δ 组灰狼位置; r_3 为取值在 $[-1, 1]$ 内均匀分布的随机数,主要用于控制摄动调整方向; r_4 为随迭代次数增加取值逐步减少的自适应距离系数; T_{\max} 为人工设定的最大摄动距离系数,一般取值为1。

改进前位置 X_δ 由式(20)计算得到。

2.2.3 α 局部搜索策略

α 局部搜索的目的在于避免陷入局部最优解。其实施策略是给最优解增加一个邻域范围内的随机扰动,以发现潜在的更优位置。在获得最优解对应位置 X_1 后,引入一个随机扰动,可在其邻域范围内获得一个新位置,可表示为

$$X'_1 = X_1 + \varepsilon Rand \quad (24)$$

式中: X'_1 为在最优解 X_1 邻域内引入随机扰动后获得的新位置; $Rand$ 为 d 维随机扰动,每个元素均为取值在 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数; ε 为自适应系数,初始取值为1。

随迭代过程逐步减小, ε 可表示为

$$\varepsilon = \frac{1}{T_{\max}} \quad (25)$$

2.3 求解步骤设计

利用本文所提出的改进灰狼算法解决上述交直流混联电网经济调度问题实施步骤包括:

1)根据待求解电网实际数据,列写经济调度

模型,并将其转化为拉格朗日函数形式,作为算法判断的适应度函数^[17-18];

2)设置种群规模、最大迭代次数、待求解问题维度等基本参数;

3)随机选定种群初始位置,并采用镜像搜索策略,对比该位置和其镜像位置的适应度函数,确定种群初始位置;

4)对种群个体排序,选定最优解、次优解、第三优解,对最优解采用 α 局部搜索策略进行改进,根据 α 局部搜索策略确定的最优解,原种群中次优解、第三优解确定 α, β, χ 三组种群的灰狼位置;

5)根据 α, β, χ 三组种群的灰狼位置利用式(20)计算 δ 组灰狼初始位置,并利用 δ 摄动搜索策略对其位置进行改进;

6)判断是否满足终止条件,若满足则结束,否则返回步骤4)直至收敛。

3 算例分析

3.1 基础数据

本文将IEEE RTS-96节点三区域系统构造算例,以验证所提出方法的有效性。该算例系统共有节点96个,由3个网架结构相同的区域电网镜像对称互联构成。各区域间联络线为直流输电线路,共6条,区域内联络线为交流联络线,共114条。

算例中,系统负荷如图1中堆积图所示,最高负荷为9 386 MW,最低负荷为4 970 MW。三个区域中,区域1、区域2负荷相对较低,最大负荷分别为2 786 MW,2 344 MW,区域3负荷较高,最大负荷为4 468 MW。

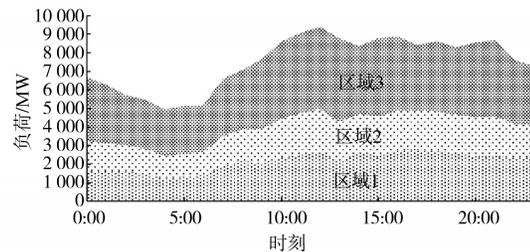


图1 系统负荷曲线

Fig.1 System load curves

电源基本信息如表1所示,全网共有发电厂30座,总装机容量达9 900 MW,三个区域装机均为3 300 MW。从发电成本来看,区域1到区域3依次增加,分别为0.34元/(kW·h),0.35元/(kW·h),0.36元/(kW·h)。

表1 电源基本信息表

Tab.1 Basic information of power supply

区域	节点	装机/ MW	最小出力/ MW	发电成本/ [元·(kW·h) ⁻¹]
区域1	114,116,118,121	100	50	0.34
	107,113,123	300	150	
	101,102	400	200	
	115,122	600	300	
区域2	214,216,218,221	100	50	0.35
	207,213,223	300	150	
	201,202	400	200	
	215,222	600	300	
区域3	314,316,318,321	100	50	0.36
	307,313,323	300	150	
	301,302	400	200	
	315,322	600	300	

三个区域网架结构相同,每个区域中装机小的电源靠近其所在区域负荷需求节点,而装机较大的电源则靠近外送通道。从各区域负荷需求及电源分布情况可以看出,区域3供不应求且发电成本最高,将作为受端电网,接纳区域1、区域2供电;而区域1、区域2则将综合考虑发电成本、网损两方面影响优化调度安排发电。

3.2 测试结果

根据所提出改进算法的求解实施步骤,设置种群规模为50个,最大迭代次数为50次,优化目标中发电机组目标项系数 α_1 设置为1,网损目标项系数 α_2 设置为2,以适当放大网损对优化结果的影响,确保全网整体发电损耗最低。

参照2.3节所涉及的求解步骤,利用所提出的改进算法对其求解,经过24轮迭代即可收敛,每轮迭代过程中最优值变化如图2所示。可以发现,本文所提出的改进算法,具有较强的收敛性能,仅24轮即能满足收敛条件,最优解收敛过程变化率呈先快后慢的变化特性,同时随着逐步逼近最优解,每一轮求得的最优解变化率出现一定波动,表明该算法不仅具有较强的收敛速率,同时在逼近最优解过程中具有较强的搜索能力,能够有效避免陷入局部最优解问题。

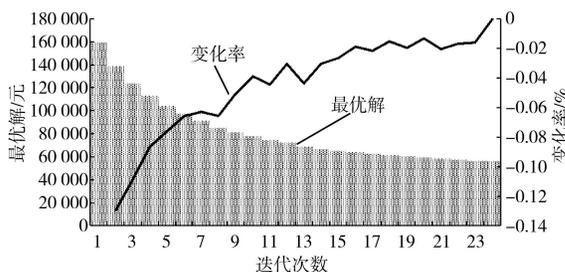


图2 迭代收敛过程

Fig.2 Iterative convergence process

经上述求解过程所得的各发电厂出力如图3所示。对比三个区域发电厂发电计划曲线,可以发现,区域3发电厂尽管发电成本最高,但其利用小时数也最高,达到22.3 h,其原因在于尽管区域3电厂发电成本较高,但由于靠近负荷需求中心,网损较小,因此综合成本较低,利用率较高;而区域1与区域2相比,区域1发电厂利用小时数达20.1 h,较区域2高3.6 h,主要原因在于区域1电厂的发电成本较低,且以上两个区域为镜像结构互联构成,各区域间传输损耗率基本相同。

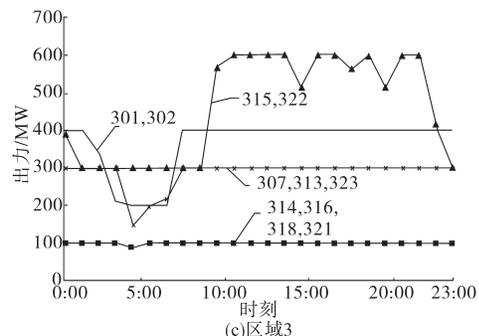
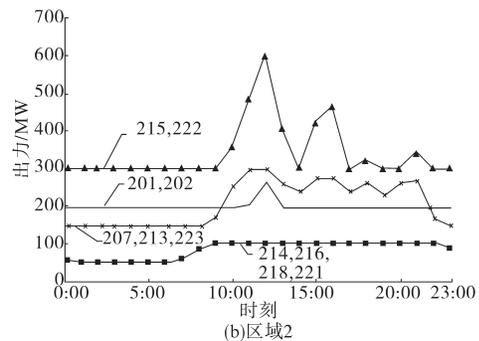
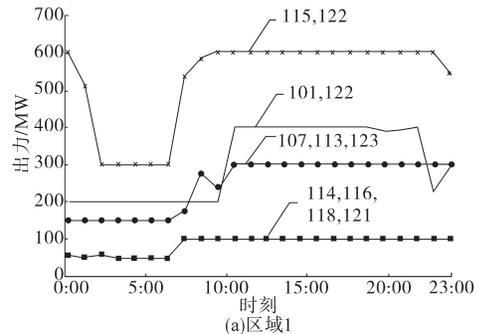


图3 发电厂发电计划

Fig.3 Generation units' generation schedule

图4中进一步对比了区域1中各装机水平的电厂利用小时数差异,可以发现,装机为100 MW及装机为600 MW的电厂利用小时数较高,而装机为300 MW或400 MW的电厂相对较低。上述现象的原因在于装机100 MW的电厂贴近区域1负荷中心,网损较小,因此优先发电,满足本地需求;而装机600 MW的电厂考虑外送通道,区域间传输需求优先由其满足,因此也获得较高的利用

率。以上数据分析结论与算例基本情况一致,表明上述优化结果的合理性。

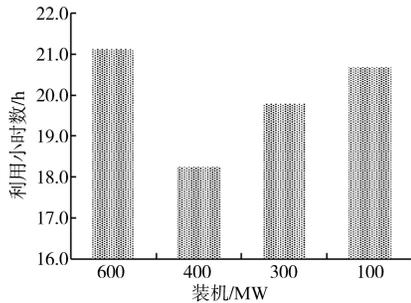


图4 区域1发电厂利用小时数

Fig.4 Utilization time of generation plant in area 1

3.3 对比分析

为进一步说明所提出算法的有效性,将对本文所提出的改进算法、改进粒子群算法^[9]、改进飞蛾扑火算法^[8]的计算结果。如表2所示,从求解结果来看,本文所提出方法的最优解目标值为56 423元,明显低于改进粒子群算法与飞蛾扑火算法;而从计算时间来看,以上三种方法基本一致。实际上本文所提出的方法对初始值、搜索过程均进行了改进,因此对整个算法的求解效率与寻优能力均有显著提升,能够在提升求解效率的基础上,避免陷入局部最优解,对提升算法求解结果具有显著效应。

表2 优化方法对比分析

Tab.2 Comparative analysis of optimization methods

方法	最优解/元	计算时间/s
本文方法	56 423	21.4
改进粒子群算法	57 434	20.3
飞蛾扑火算法	57 654	22.5

4 结论

为实现对大规模交直流混联电网经济调度的高效求解,本文提出了一种基于改进灰狼算法的高效求解方法。该方法通过对初始值、求解过程两个方面的改进,能够在保证较高求解效率的前提下避免陷入局部最优解,提升对交直流混联电网求解能力,对提高电网调度运行水平具有显著促进作用。

参考文献

[1] 王硕,杨镜非,王冠男,等.考虑多元用户报价的交直流混合配电网动态经济调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):82-94. Wang Shuo, Yang Jingfei, Wang Guannan, *et al.* Dynamic economic dispatch of AC/DC hybrid distribution network considering multi-user bidding[J]. Electric Power Automation Equip-

ment, 2020, 40(2): 82-94.
 [2] 史光耀,邱晓燕,李星雨,等.考虑需求侧资源的含风电电力系统两阶段优化调度[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(5): 229-235. Shi Guangyao, Qiu Xiaoyan, Li Xingyu, *et al.* Two stage optimal scheduling model of wind power system considering demand side resources[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(5): 229-235.
 [3] 林琳,马超,王朋.基于储能电量控制的交直流混合微网实时经济调度方法[J]. 智慧电力, 2017, 45(9): 1-6. Lin Lin, Ma Chao, Wang Peng. Real time economic dispatch method of AC/DC hybrid microgrid based on energy storage control[J]. Smart Power, 2017, 45(9): 1-6.
 [4] Zhong H, Xia Q, Wang Y, *et al.* Dynamic economic dispatch considering transmission losses using quadratically constrained quadratic program method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2232-2241.
 [5] Wu Z, Ding J, Wu Q, *et al.* Reserve constrained dynamic economic dispatch with valve-point effect: a two-stage mixed integer linear programming approach[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(2): 203-211.
 [6] Tang Y, Zhong J, Liu J. A generation adjustment methodology considering fluctuations of loads and renewable energy sources [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 125-132.
 [7] Garcia M, Baldick R. Approximating economic dispatch by linearizing transmission losses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1009-1022.
 [8] 王子琪,陈金富,张国芳,等.基于飞蛾扑火优化算法的电力系统最优潮流计算[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3641-3647. Wang Ziqi, Chen Jinfu, Zhang Guofang, *et al.* Optimal power flow calculation with moth-flame optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3641-3647.
 [9] 李亚辉,李扬,李国庆.基于协同多目标粒子群优化的交直流系统最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 94-100. Li Yahui, Li Yang, Li Guoqing. Optimal power flow for AC/DC system based on cooperative multi-objective particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 94-100.
 [10] Jethmalani C, Simon S, Sundareswaran K, *et al.* Auxiliary hybrid PSO-BPNN-based transmission system loss estimation in generation scheduling[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(4): 1692-1703.
 [11] 张志荣,邱晓燕,孙旭,等.协调柔性负荷与储能的交直流配电网经济优化调度[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 116-123. Zhang Zhirong, Qiu Xiaoyan, Sun Xu, *et al.* Economic optimal scheduling of AC/DC distribution network coordinating flexible load and energy storage systems[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 116-123.
 [12] 于浩,秦文萍,魏斌,等.考虑预测误差的交直流混合微电网经济调度策略[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3987-3996.

(下转第72页)

Song Gao, Li Wei, Song Zhusheng, *et al.* Operation condition analysis for GIS in state grid corporation of China[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 78-82.

[5] 董修峰. SF₆气体密度继电器的校验[J]. 东北电力技术, 2010(7): 43-45.

Dong Xiufeng. SF₆ calibration of gas density relay[J]. North-east Electric Power Technology, 2010(7): 43-45.

[6] 冯印富. SF₆密度表和密度继电器的结构及工作原理[J]. 农村电工, 2011, 19(3): 31-32.

Feng Yinfu. Structure and working principle of SF₆ density meter and density relay[J]. Rural Electrician, 2011, 19(3): 31-32.

[7] 孙银山, 尹军华, 寇新民, 等. SF₆密度继电器RS-485通信终端电阻匹配方法研究[J]. 电气自动化, 2015, 37(1): 46-48.

Sun Yinshan, Yin Junhua, Kou Xinmin, *et al.* Research on the resistance matching method of RS-485 communication terminal of SF₆ density relay[J]. Electrical Automation, 2015, 37(1): 46-48.

[8] 路永玲, 刘洋, 胡成博, 等. 基于LoRa的架空线路物联网感知技术研究[J]. 电气应用, 2019, 38(7): 68-72.

Lu Yongling, Liu Yang, Hu Chengbo, *et al.* LoRa-based communication technology for overhead line internet of things[J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(7): 68-72.

[9] Haubro M, Orfanidis C, Oikonomou G. TSCH-over-LoRa: long range and reliable IPv6 multi-hop networks for the Internet of things[J]. Internet Technology Letters, 2020, 3(4): e165.

[10] 陈金健. LoRa 移动物联网基站无线覆盖的研究[J]. 科技与创新, 2018(14): 87-88.

Chen Jinjian. Research on wireless coverage of LoRa mobile Internet of things base station[J]. Science and Technology and Innovation, 2018(14): 87-88.

[11] 王淑凤, 卢铁兵, 崔翔, 等. 电力系统电磁兼容分析方法及数学模型综述[J]. 电力情报, 1998, 9(4): 1-5.

Wang Shufeng, Lu Tiebing, Cui Xiang, *et al.* Review of electromagnetic compatibility analysis method and mathematical model for power system[J]. Information on Electric Power, 1998, 9(4): 1-5.

[12] Ashtiani C, Wright R, Hunt G. Ultracapacitors for automotive applications[J]. Journal of Power Sources, 2006, 154(2): 561-566.

[13] Kötz R, Carlen M. Principles and applications of electrochemical capacitors[J]. Electrochimica Acta, 2000, 45(4): 2483-2498.

[14] 王炎, 崔建涛, 刘忠. 基于分数阶巴特沃斯滤波器的新型超级电容器[J]. 电子元件与材料, 2017, 36(5): 30-36.

Wang Yan, Cui Jiantao, Liu Zhong. New supercapacitor model of fractional order Butterworth filter[J]. Electronic Components and Materials, 2017, 36(5): 30-36.

收稿日期:2020-08-03

修改稿日期:2020-09-23

~~~~~  
(上接第 52 页)

Yu Hao, Qin Wenping, Wei Bin, *et al.* Economic dispatch of hybrid AC/DC microgrid considering prediction error[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3987-3996.

[13] 邱海峰, 赵波, 林达, 等. 计及储能损耗和换流成本的交直流混合微网区域协调调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 29-37.

Qiu Haifeng, Zhao Bo, Lin Da, *et al.* Regional coordinated dispatch in AC/DC hybrid microgrids considering energy storage loss and converter cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 29-37.

[14] 王守相, 陈思佳, 谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 85-91.

Wang Shouxiang, Chen Sijia, Xie Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91.

[15] 杨旭红, 尹聪聪. 基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略[J]. 电气传动, 2020, 50(5): 75-80.

Yang Xuhong, Yin Congcong. Coordinated control strategy of light storage and DC microgrid based on islanding mode[J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 75-80.

[16] 金星, 邵珠超, 王盛慧. 一种基于差分进化和灰狼算法的混合优化算法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(16): 266-269.

Jin Xing, Shao Zhuchao, Wang Shenghui. A hybrid optimization algorithm based on differential evolution and grey wolf optimizer[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(16): 266-269.

[17] 于德鳌, 李慧, 刘思嘉, 等. 基于改进萤火虫算法的含风电系统环境经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 84-92.

Yu Deao, Li Hui, Liu Sijia, *et al.* Environmental economic dispatch of power system integrated with wind power based on an improved glowworm swarm optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 84-92.

[18] 姚方, 王佳伟, 文福拴, 等. 计及碳税的含风电和储能的电力系统经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 37-46.

Yao Fang, Wang Jiawei, Wen Fushuan, *et al.* Economic dispatch for a power system containing wind power and energy storage with Carbon tax considered[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 37-46.

收稿日期:2020-09-11

修改稿日期:2020-10-23