

9-14-2020

Application of an artificial fish swarm algorithm in the aggregation of coherent generators

Lin ZHU

School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640 , China

Bei WANG

Nantong Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co , Ltd , Nantong 226000 , China

Dong FU

School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640 , China

Da CHEN

School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640 , China

Xinge HU

School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640 , China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

ZHU, Lin; WANG, Bei; FU, Dong; CHEN, Da; HU, Xinge; and LI, Qing (2020) "Application of an artificial fish swarm algorithm in the aggregation of coherent generators," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 3, Article 8.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.03.008

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/8>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

Application of an artificial fish swarm algorithm in the aggregation of coherent generators

Authors

Lin ZHU, Bei WANG, Dong FU, Da CHEN, Xinge HU, and Qing LI

人工鱼群算法在同调发电机组聚合中的应用

朱 林¹, 王 贝², 付 东¹, 陈 达¹, 胡心格¹, 李 清³

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 国网江苏省电力有限公司南通供电公司, 江苏 南通 226000;

3. 南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510700)

摘 要:针对同调发电机聚合, 提出一种基于人工鱼群算法的参数寻优方法, 以同调发电机群集合函数与等值发电机相应函数在频域特性上保持一致为原则, 通过模仿鱼群行为从而得到等值发电机的优化参数。所提方法能够有效解决传统聚合方法在初值设置、寻优方向约束、局部极值等方面的限制。在新英格兰 39 节点系统中进行的发电机聚合验证结果表明, 所提算法给出的最优参数能较好地保证发电机聚合前后的频率响应、系统暂态特性基本一致, 提高了发电机聚合精度。

关 键 词:人工鱼群算法; 动态等值; 发电机聚合; 频率拟合

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.03.008

中图分类号: TM31

文章编号: 1673-9140(2020)03-0061-07

Application of an artificial fish swarm algorithm in the aggregation of coherent generators

ZHU Lin¹, WANG Bei², FU Dong¹, CHEN Da¹, HU Xinge¹, LI Qing³

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Nantong Power Supply

Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nantong 226000, China; 3. Maintenance & Test Center,

EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid, Guangzhou 510700, China)

Abstract: Aiming at the aggregation of coherent generator groups, based on an artificial fish swarm algorithm, a method is proposed to optimize parameters of the equivalent generator through the simulation of fish group behavior under the principle that the aggregate functions of generator group should be consistent with the transfer functions of equivalent generators in frequency domain. The proposed method can effectively solve the limitations of traditional aggregation methods in initial value setting, optimization direction constraint, local extremum, etc. The validation results of generator aggregation in New England 39-bus system show the optimal parameters derived by the new method can better ensure that the frequency response and system transient characteristics of the generator before and after aggregation are basically the same and improve the accuracy of generator aggregation.

Key words: artificial fish algorithm; dynamic equivalence; generator aggregation; frequency-domain fitting

对大型电网进行动态等值处理是提升仿真速度, 凸显待研究区域和所关心问题的一种有效途径^[1-2]。发电机聚合是电力系统动态等值中的关键

一环, 受到了重点的关注, 研究成果丰富。

发电机同调聚合, 是指在外扰动下动态特性表现一致的发电机所构成的机群合并成为一台等值

收稿日期: 2017-12-17; 修回日期: 2018-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(51407079)

通信作者: 王 贝(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源并网系统的稳定分析与控制研究; E-mail: 18744238905@163.com

机的过程。即采用优化算法确定等值机的参数,使等值机的传递函数与待聚合发电机传递函数的集合函数之间有最为接近的频率特性,发电机聚合前后系统的暂态特性尽量保持一致。

针对发电机同调聚合,主流方法包括 Powell 寻优法、粒子群寻优法、改进免疫算法等^[3-9]。这些优化算法有一定的效果,但也存在对于初值敏感、寻优速度较慢、依赖寻优方向等不足,其简化条件与实际情况偏差较大,限制了其在大规模电力系统中的应用。也有学者提出了基于等价条件的发电机聚合解析方法,如文献[10]提出了一种改进的发电机聚合参数解析求解方法,该方法可以快速获得解析解,但依赖逆矩阵结构,参数计算过程相对复杂。

对上述的研究成果进一步分析,可以发现发电机聚合算法或依赖于初始值的设置,或容易陷入局部极值,在寻优速度和寻优精度上受到较大的约束。基于这一认识,该文尝试将具有快速搜索和全局寻优能力、易于扩展实现的人工鱼群优化算法引入到发电机同调聚合问题中。

人工鱼群算法在电力系统中已有良好的应用^[11-16]。这种算法通过模仿鱼群聚集行为从而实现全局最优,与发电机聚合有较好契合度。人工鱼群算法从构造个体的底层行为开始,将等值机的一组参数看作一条人工鱼,以模拟觅食行为来表征参数的变化,通过设置视野范围进行随机性搜索,通过鱼群拥挤度凸显全局最优值;利用聚群及追尾等 2 种行为向全局最优值收敛。相对于传统智能算法的单一收敛方式,人工鱼群算法全局性更好,适用于发电机聚合中多参数的获取。

该文所提出的基于人工鱼群的同调发电机聚合新方法,收敛速度快,求解精度高,可快速获得全局最优的等值机聚合参数。在新英格兰 39 节点系统中进行了测试,仿真结果表明该文所提算法的有效性。

1 同调发电机的聚合

同步发电机有多种实用模型,建模细节各有差异。这里以考虑转子动态、励磁绕组 f 和阻尼绕组

D 、 Q 的五阶发电机为例,阐述等值机确定、待等值各发电机的集合传递函数选取,以及聚合等值机的参数获取。

1.1 等值发电机模型

对于具有 n 台发电机的同调机组,其第 k 台五阶发电机可采用导纳形式描述 d 轴与 q 轴的电磁回路方程,即

$$\begin{bmatrix} i_{dk} \\ i_{qk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Y_{dqk} \\ Y_{qdk} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{dk} \\ u_{qk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & Y_{dqk} \\ Y_{qdk} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E''_{dk} \\ E''_{qk} \end{bmatrix} \quad (k=1,2,3,\dots,n) \quad (1)$$

式中 u_{dk} 与 u_{qk} 、 i_{dk} 与 i_{qk} 为第 k 台五阶发电机机端电压、电流的 d 轴与 q 轴分量; E''_{dk} 与 E''_{qk} 为发电机 d 轴与 q 轴的次暂态电势。其中,运算导纳:

$$Y_{dqk} = - \frac{(1+j\omega T'_{d0k})(1+j\omega T''_{d0k})}{(1+(j\omega)^2)(X_{dk}+j\omega T'_{d0k}X'_{dk})(1+j\omega \frac{X''_{dk}}{X'_{dk}}T''_{d0k})} \quad (2)$$

$$Y_{qdk} = - \frac{1+j\omega T''_{q0k}}{(1+(j\omega)^2)(X_{qk}+j\omega T''_{q0k}X''_{qk})}$$

同理,对于聚合后的等值机也应满足式(1)、(2)结构形式,且:

$$Y_{DQ}^* = \begin{cases} Y_{DQ}^* = - \frac{(1+j\omega T'_{D0}^*)(1+j\omega T''_{D0}^*)}{(1+(j\omega)^2)(X_D^*+j\omega T'_{D0}^*X_D'^*)(1+j\omega \frac{X''_{D0}^*}{X_D'^*}T''_{D0}^*)} \\ Y_{QD}^* = - \frac{1+j\omega T''_{Q0}^*}{(1+(j\omega)^2)(X_Q^*+j\omega T''_{Q0}^*X_Q''^*)} \end{cases} \quad (3)$$

式中 Y_{DQ}^* 、 Y_{QD}^* 代表等值发电机在自身 D^* 轴、 Q^* 轴上的运算导纳。 X_D^* 、 $X_D'^*$ 、 $X_D''^*$ 、 T'_{D0}^* 、 T''_{D0}^* 分别为等值发电机 D 轴同步电抗、暂态电抗、次暂态电抗、暂态时间常数及次暂态时间常数; X_Q^* 、 $X_Q''^*$ 、 T''_{Q0}^* 分别为等值发电机 Q 轴同步电抗、次暂态电抗及次暂态时间常数。这 8 个实用参数均为聚合后的待求解量。

要求待聚合的同调发电机组与对应的等值机具有相同的动态特性,从电磁回路方程上考虑,这意味着两者的交轴、直轴重合,且在相应轴上的投影分量完全相等。

以同步坐标 XY 平面为参考,考虑进行坐标转换,如图 1 所示。经过坐标转换后,同调机群的集合函数与等值机的相应函数完全对应,理论上在交、直轴上对应满足:

$$\begin{cases} Y_{DQ} = \sum_k (Y_{dqk} \cos^2 \varphi_k - Y_{qdk} \sin^2 \varphi_k) = Y_{DQ}^* \\ Y_{QD} = \sum_k (-Y_{dqk} \sin^2 \varphi_k + Y_{qdk} \cos^2 \varphi_k) = Y_{QD}^* \end{cases} \quad (4)$$

式中 Y_{DQ} 、 Y_{QD} 为同调机群集合后的运算导纳, φ_k 为第 k 号机 q 轴领先 Q^* 轴角度,其中 $\varphi_k = \delta_k - \theta$, δ_k 为第 k 台发电机的初始功角, θ 为等值机 Q^* 轴领先参考母线电压的角度。

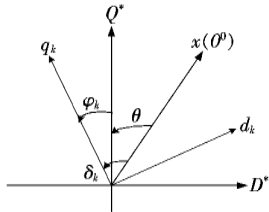


图 1 坐标系的转化关系

Figure 1 Transformation relations of coordinate system

1.2 等值机参数的求解

对于等值发电机,采用五阶模型,需要求取 8 个参数分别为 X_D^* 、 $X_D'^*$ 、 $X_D''^*$ 、 $T_{D0}'^*$ 、 $T_{D0}''^*$ 、 X_Q^* 、 $X_Q''^*$ 和 $T_{Q0}''^*$ 。可进一步利用 $\omega \rightarrow 0$ 、 $\omega \rightarrow \infty$ 等极限条件,减少寻优参数的数量。

第 1 步:式(3)与式(4)联立,令 $\omega = 0$ 、 $\omega = \infty$,可计算出 X_D^* 和 X_Q^* ;

第 2 步:应用寻优算法,利用式(3)、(4)在直轴上拟合 0~10 Hz 的频域段,寻优获得 $X_D'^*$ 、 $X_D''^*$ 、 $T_{D0}'^*$ 、 $T_{D0}''^*$;

第 3 步:应用寻优算法,利用式(3)、(4)在交轴上拟合 0~10 Hz 的频域段,寻优获得 $X_Q''^*$ 和 $T_{Q0}''^*$ 。

对于上述参数的寻优,根本原则为使同调机群的集合函数与等值发电机相应函数之间有最相近的频率特性^[1],即在直轴、交轴上可有目标函数:

$$J_{DQ} = \min \frac{|Y_{DQ} - Y_{DQ}^*|^2}{|Y_{DQ}|^2} \quad (5)$$

$$J_{QD} = \min \frac{|Y_{QD} - Y_{QD}^*|^2}{|Y_{QD}|^2} \quad (6)$$

上述过程是以五阶发电机的同调聚合为例。已可以看出,目标函数的结构形式较为复杂,待寻优参数的数量众多,且一旦发电机模型改变,等值机对应的函数及待寻优参数均发生变化。这不仅要求寻优算法对发电机模型有良好的适应性,同时也要求聚合方法具有收敛速度快、求解精度高。而人工鱼群算法具有对初值设置不敏感的特点,其觅食行为的随机性保证了能较强跳出局部最优,还可以设置待寻优参数实现对不同目标函数的寻优。因而,该文尝试将其应用在同调发电机的聚合问题中,用于获取等值机的全局优化参数。

2 基于人工鱼群算法的发电机聚合原理

人工鱼群算法作为一种基于动物行为的群体智能优化算法,已成功解决大量的实际工程优化问题^[12-16]。该算法具有以下优点。

①并行性。可采用多个人工鱼并行进行寻优,有利于提高寻优速度。

②简单性。算法对初值的设置不敏感,在寻优过程中仅使用了目标函数值。

③全局性。算法的觅食行为具有较大的随机性,具有较强的跳出局部最优的能力。

④多目标性。通过设置不同的人工鱼待寻优参数,对不同目标函数进行寻优。

2.1 人工鱼群算法基本原理

对于一条虚拟人工鱼,设当前位置为 X_{int} ,视野为半径 R 的圆,位置 X_v 为该条鱼某时刻的视点位置,若该点位置食物浓度高于当前位置,则人工鱼向该点前进一步,到达位置 x_{next} ;否则,人工鱼继续巡视视野内的其他位置。设虚拟人工鱼数量为 n ,则初始位置 $X_{int} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,视点位置 $X_v = (x_1^v, x_2^v, \dots, x_n^v)$,则有:

$$x_i^v = x_i + R \cdot \text{rand}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$X_{next} = \frac{X_v - X_{int}}{\|X_v - X_{int}\|} \cdot \Delta S \cdot \text{rand} \quad (8)$$

式中 rand 为 $[-1, 1]$ 间的随机数; ΔS 为人工鱼移动步长。人工鱼群具有觅食、聚群、追尾、随机算 4 种基本行为, 这些行为在不同时刻不同场合进行相互转换, 从而达到参数寻优的目的。

2.2 基于人工鱼群算法的发电机聚合过程

2.2.1 初始参数设定

对于五阶模型, 经极限条件简化后, 待寻优量为 X_D^* 、 $X_D''^*$ 、 T_{D0}^* 、 $T_{D0}''^*$ 、 X_Q^* 和 T_{Q0}^* , 目标函数为式 (3)。人工鱼群数量影响所提算法的搜索精度和搜索速度, 但对于低维度参数寻优, 无需设置数值较大的鱼群数量就能够保证精度和搜索速度要求, 因而, 该文设置人工鱼数量 $n = 100$ 。同时, 为了加速收敛, 又要避免陷入局部最优, 采用了变步长设置。算法中, 视野半径 R 表示人工鱼搜索参数值的最大范围, 移动步长 ΔS 表示人工鱼向确定方向移动的最大距离。该文在算法启动阶段时, 采用 $R = 0.005$ 和 $\Delta S = 0.0005$; 在最优判别时, 采用 $R = 0.001$ 和 $\Delta S = 0.0001$ 。

2.2.2 算法流程

搜索空间内包含若干数量同种类型的人工鱼, 通过觅食行为对等值机五阶模型的参数进行寻优。

算法初期, 每个人工鱼个体随机分布于搜索空间, 各人工鱼进行觅食行为, 并进行聚群行为和追尾行为目标函数计算, 选取最优的行为; 若某条人工鱼进行设定次数的觅食行为后, 尚未找到优于当前目标函数值的位置时, 则进行随机行为。经过一系列的鱼群行为后, 最终会形成一个人工鱼群, 从而得到相应的等值机参数的寻优值。

相比于其他种类的优化算法, 人工鱼群算法对初值参数并不敏感, 具有随机行为可保证具备跳出局部极值的能力, 采用的变步长设置在保证全局搜索的同时也加快了收敛速度。具体流程如图 2 所示。

该文所提算法的鱼群由同类型的人工鱼组成, 即每条人工鱼搜索值均为同一阶次等值机的参数。实际系统中待聚合的发电机可能采用的是不同阶次模型。此情况下, 可令鱼群由不同类型的人工鱼构成, 再采用相同流程实现对不同阶次发电机机聚合参数的寻优(对这一问题将另文展开相关研究)。

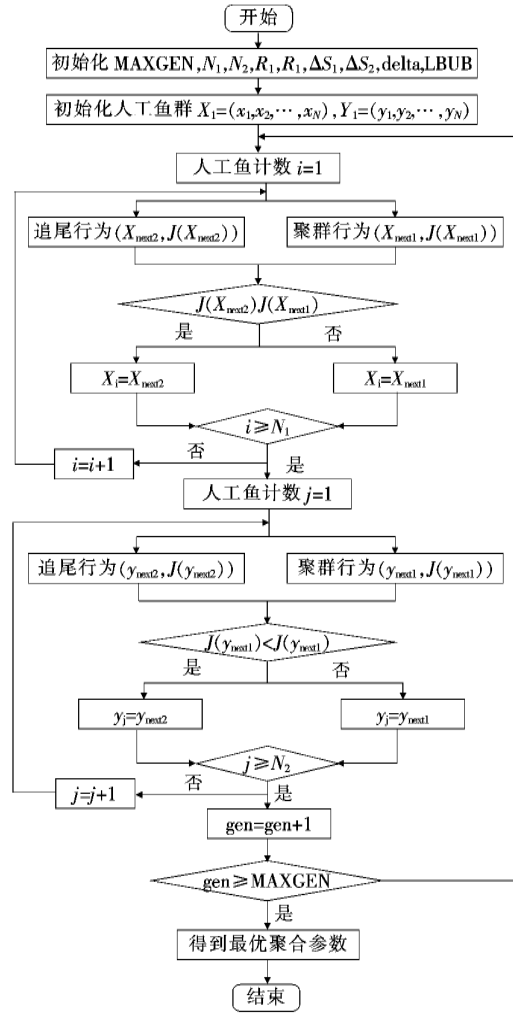


图 2 人工鱼群算法流程

Figure 2 Flowchart of artificial fish swarm algorithm

3 案例分析

为了验证所提算法的有效性, 该文以新英格兰 39 节点电力系统为例。对同调机组发电机 G33 和 G34 进行聚合, 相应的等值机记为 EQU1。为了验证所提算法的有效性, 选用 Powell 优化算法进行聚合效果的对比。聚合前后的发电机参数如表 1 所示, 新英格兰 39 节点系统如图 3 所示。

3.1 聚合前后发电机频域特性对比

考察聚合后等值机与聚合前发电机组集合函数在 $0 \sim 10$ Hz 频域段的特性曲线, 如图 4~7 所示。

表 1 发电机 G33-G34 与等值机参数

发电机	X_D	X'_D	X''_D	T'_{D0}	T''_{D0}	X_Q	X''_Q	T'_{Q0}	T''_{Q0}
G33	0.262 0	0.043 6	0.031 0	5.69	0.057 0	0.258 0	0.031 0	1.50	0.057 0
G34	0.670 0	0.132 0	0.056 8	5.40	0.054 0	0.620 0	0.056 8	0.44	0.054 0
EQU1(人工鱼群)	0.376 7	0.065 6	0.040 1	5.59	0.055 8	0.364 4	0.040 1	0.44	0.052 9
EQU1(Powell)	0.376 4	0.065 2	0.040 4	5.55	0.055 5	0.364 6	0.040 4	0.97	0.055 5

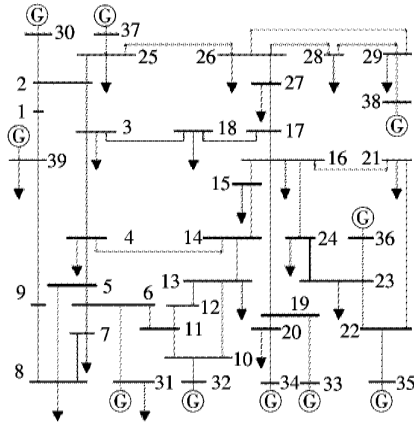
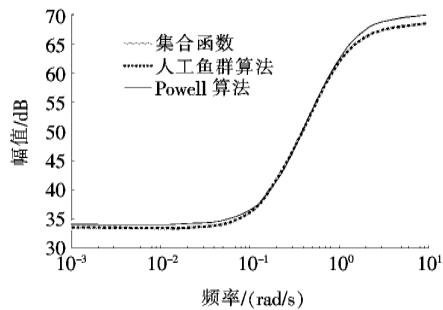
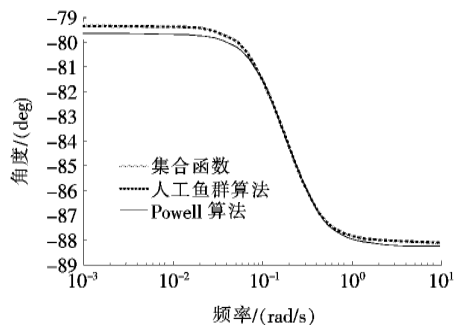
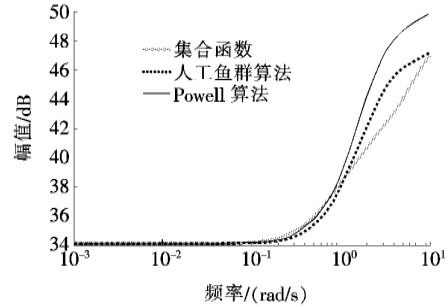
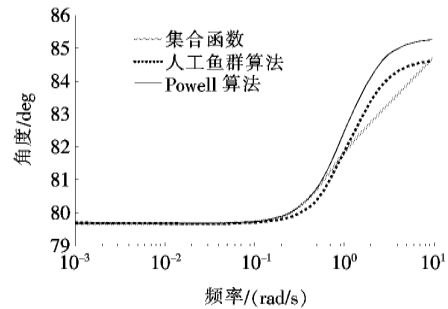


图 3 新英格兰 39 节点系统

Figure 3 New England 39-bus system

图 4 d 轴幅频响应特性曲线Figure 4 d -axis amplitude-response curve图 5 d 轴相频响应特性曲线Figure 5 d -axis frequency-response curve图 6 q 轴幅频响应特性曲线Figure 6 q -axis amplitude-response curve图 7 q 轴相频响应特性曲线Figure 7 q -axis frequency-response curve

由以上曲线可以看出,该文所提人工鱼群算法和 Powell 算法的寻优结果都可以使等值机传递函数与同调发电机组聚合函数具有接近的频域特性,但采用人工鱼群获得的等值机参数能更好地模拟原系统同调发电机群的频率聚合特性,特别是在 d 轴上二者的频域特性曲线几乎重合。

3.2 系统暂态特性对比

在近等值发电机 EQU1 的母线 15 和母线 16 间的线路上发生三相短路瞬时性故障,故障发生时刻为第 10 周波,持续 5 周波后消除。分别观察附近的发电机 G32 转子角,母线 6 电压及节点 16~17 间线路有功功率的暂态特性,如图 8~10 所示。

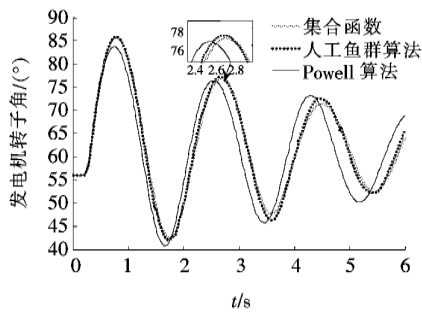


图 8 发电机 G 32 转子角曲线

Figure 8 Rotor curves of G 32 rotor

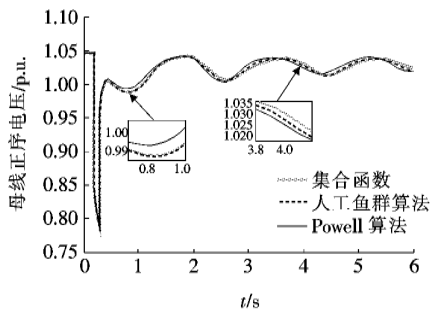


图 9 母线 6 电压曲线

Figure 9 Voltage curves at Bus 6

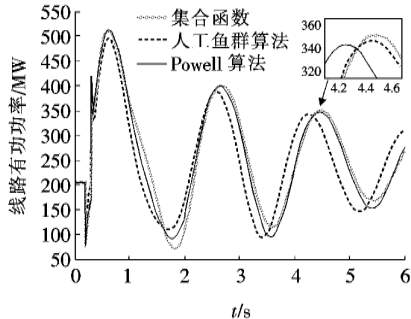


图 10 线路 16-17 有功功率曲线

Figure 10 Active power curve at line 16-17

从以上整体图及局部放大图可以看出,人工鱼群算法获得的等值机能更好地反应原机群的动态特性,相比于 Powell 算法在聚合效果上有进一步的改善,所得到等值系统能更好地反应原始系统受扰后的振荡趋势,因而具有更高的等值精度。

4 结语

该文提出一种基于人工鱼群算法的同调发电机聚合方法。充分利用人工鱼群算法对初值设置不敏感的特点,通过觅食行为的随机性跳出搜索的局部

极值,遵照等值发电机传递函数与发电机群集合函数在频域特性上保持一致为原则,快速得到聚合后等值机的参数。与传统的聚合优化算法相比,该文所提方法具有更高的精确度,在新英格兰系统下的频域、时域仿真结果表明了其有效性。

参考文献:

- [1] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [2] 杨靖萍. 大规模互联电力系统动态等值方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [3] 方云烟,曾喆昭,刘晴,等. 永磁直驱风力发电系统最大功率跟踪非线性抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(5):145-151.
FANG Yunyi, ZENG Zhezhaoh, LIU Qing, et al. Maximum power point tracking with nonlinear disturbance rejection control for DPMSG wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5):145-151.
- [4] 何桂雄,晁勤,田易之,等. 风电场恒速发电动态等值参数聚合的研究[J]. 可再生能源, 2009, 27(1):14-18, 22.
HE Guixiong, CHAO Qin, TIAN Yizhi, et al. Research on the dynamic equivalent parameter aggregation of fixed-speed wind turbines in wind farm[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(1):14-18, 22.
- [5] 胡杰,余贻鑫. 电力系统动态等值参数聚合的实用方法[J]. 电网技术, 2006, 30(24):26-30.
HU Jie, YU Yixin. A practical method of parameter aggregation for power system dynamic equivalence[J]. Power System Technology, 2006, 30(24):26-30.
- [6] 赵娟,余一平,王耀,等. 同步发电机实用参数分时段辨识研究[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(1):41-47.
ZHAO Juan, YU Yiping, WANG Yao, et al. Identification of synchronous generator practical parameters based on time interval[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(1):41-47.
- [7] Aghdam M H, Ghasemaghaee N, Basiri M E, et al. Text feature selection using ant colony optimization[J]. Expert Systems With Applications, 2009, 36(3): 6843-6853.
- [8] 张宝珍,张尧,林凌雪,等. 基于 PSO-FCM 算法的同调发电机识别[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2013,

- 41(4):8-13.
- ZHANG Baozhen, ZHANG Yao, LIN Lingxue, et al. Identification of coherent generators based on PSO-FCM algorithm[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(4): 8-13.
- [9] 刘丽霞, 罗敏, 李晓辉, 等. 电力系统常用动态等值方法的比较与改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(1): 149-154.
- LIU Lixia, LUO Min, LI Xiaohui, et al. Comparison and improvement of common methods of dynamic equivalence in power system[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and its Automation, 2011, 23(1): 149-154.
- [10] 朱林, 李莎, 刘平, 等. 改进的基于结构约束的发电机聚合参数解析方法[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2015, 43(8): 41-48.
- ZHU Lin, LI Sha, LIU Ping, et al. An improved analytical method of generator aggregation parameters based on structural constraint[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2015, 43(8): 41-48.
- [11] 王昕, 黄柯, 郑益慧, 等. 改进的人工鱼群算法在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(9): 205-208.
- WANG Xin, HUANG Ke, ZHENG YiHui, et al. Application of an improved artificial fish swarm algorithm in economic load dispatch of power system[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(9): 205-208.
- [12] 陈小青, 刘觉民, 黄英伟, 等. 采用改进人工鱼群优化粗糙集算法的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1403-1409.
- CHEN Xiaoqing, LIU Juemin, HUANG Yingwei, et al. Transformer fault diagnosis using improved artificial fish swarm with rough set algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1403-1409.
- [13] 聂宏展, 王毕元, 孙金红, 等. 基于混沌人工鱼群算法的输电网规划方法[J]. 电网技术, 2010(12): 109-113.
- NIE Hongzhan, WANG Biyuan, SUN Jinhong, et al. Transmission network planning based on chaotic artificial fish swarm algorithm[J]. Power System Technology, 2010(12): 109-113.
- [14] 郎伟明, 麻向津, 周博文, 等. 基于 LSTM 和非参数核密度估计的风电功率概率率区间预测[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 31-37+103.
- LANG Weiming, MA Xiangjin, ZHOU Bowen, et al. Wind power probabilistic intervals prediction based on LSTM and nonparametric kernel density estimation[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 31-37+103.
- [15] 耿超, 王丰华, 苏磊, 等. 基于人工鱼群与蛙跳混合算法的变压器 Jiles-Atherton 模型参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4799-4807.
- GENG Chao, WANG Fenghua, SU Lei, et al. Parameter identification of Jiles-Atherton model for transformer based on hybrid artificial fish swarm and shuffled frog leaping algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4799-4807.
- [16] 徐鹏, 刘义颖, 赵子兰, 等. 基于改进人工鱼群算法的含大规模风电电网无功优化[J]. 中国电力, 2013, 46(11): 8-11.
- XU Peng, LIU Wenying, ZHAO Zilan, et al. Reactive voltage optimization of a complex power grid integrated with large-scale wind power by improved artificial fish swarm algorithm (AFSA)[J]. Electric Power, 2013, 46(11): 8-11.