

基于改进飞蛾扑火优化算法的并网复合装置滑模变控制器参数优化

刘家军 林皓琨 苗 森 刘立鹏

(西安理工大学电气工程学院 西安 710054)

摘要：针对背靠背 MMC-HVDC 并网复合装置滑模变控制参数整定困难的问题，提出一种基于改进飞蛾扑火优化算法的控制器优化方法。引入佳点集初始化，在初始化种群时增加变量取值的多样性，加快算法收敛速度，减少计算量；结合 Lévy 飞行更新机制，避免算法陷入局部最优。通过 8 个标准测试函数测试所提改进飞蛾扑火算法的性能，并与多个常见群智能优化算法进行对比，验证所提算法的优越性。研究实现 Python-PSCAD 联合仿真方法，以综合 ITAE 指标为目标函数，对滑模变控制器进行参数优化。仿真结果表明，经改进飞蛾扑火算法优化的控制器参数可以使并网复合装置具有更好的动态性能。

关键词：背靠背 MMC-HVDC；并网复合装置；飞蛾扑火优化算法；Python-PSCAD 联合仿真

中图分类号：TM712

Parameter Optimization of Sliding Mode Variable Controller for Grid Connected Compound Device Based on Improved Moth-flame Optimization Algorithm

LIU Jiajun LIN Haokun MIAO Miao LIU Lipeng

(School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054)

Abstract: Aiming at the problem of difficult parameter tuning of sliding mode variable control for back-to-back mmc-hvdc grid connected composite device, a controller optimization method based on improved moth extinguishing optimization algorithm is proposed. Good point set initialization is introduced to increase the diversity of variable values when initializing the population, speed up the convergence speed of the algorithm and reduce the amount of calculation; Combined with Lévy flight update mechanism, the algorithm can avoid falling into local optimization. The performance of the proposed improved moth fire fighting algorithm is tested by 8 standard test functions, and compared with several common swarm intelligence optimization algorithms to verify the superiority of the proposed algorithm. The python PSCAD joint simulation method is studied and realized. Taking the comprehensive ITAE index as the objective function, the parameters of the sliding mode variable controller are optimized. The simulation results show that the controller parameters optimized by the improved moth extinguishing algorithm can make the grid connected composite device have better dynamic performance.

Key words: Back-to-back MMC-HVDC; grid connected composite device; moth-flame optimization algorithm; Python-PSCAD joint simulation

1 引言

随着互联电网向智能化、自动化发展，可靠、

有效的新型并网方式的研究至关重要^[1]。有学者提出基于背靠背 VSC-HVDC 的并网复合装置，通过在待并列两侧系统间传递有功和无功功率，调节待并列两侧的频率和电压，实现电网间的同期并列，该方法改变了传统同期并列方法完全依靠人工操作、操作涉及面广且难度较大、并网速度慢、成功

率低的现状^[2-4]。文献[5]研究了并网复合系统的解列和并网功能的综合控制策略,提高了电网自动化程度。文献[6]提出了一种并网系统转换为 UPFC 的方法,并分析了转化过程中对并网系统的影响。针对并网装置转换为 UPFC 的过程中出现功率和电压长时间波动问题,文献[7]提出了一种基于功率传递方式实现电网并网与 UPFC 功能相结合的控制策略。文献[8]通过建立并网装置转换为静止同步串联补偿器后复合系统的等效模型,验证了不同故障情况下静止同步串联补偿器的限流能力。文献[9]研究了低惯量电力系统中并网复合装置控制稳定性的问题,为低惯量电力系统平滑并网提供了新的思路。文献[10]为抑制背靠背 MMC-HVDC 并网复合系统功率传递过程中的联络线波动,将阻抗分析法与现有控制策略结合,以提高并网稳定性。上述文献提出了基于背靠背 MMC-HVDC 并网复合装置的概念,对并网复合装置的控制策略做了一定的研究,但未考虑控制器参数手动调节参数的复杂性和不确定性问题。

基于背靠背 MMC-HVDC 的并网复合装置具有复杂的拓扑结构和多环节的控制策略,因此一个性能良好的控制系统必不可少^[11-12]。滑模变控制以其响应速度快、鲁棒性强、结构简单等优点^[13]被应用于并网复合装置的控制系统中,但滑模变控制参数整定时常采用经验试凑法,这不仅无法充分发挥控制器的控制性能,而且十分耗费研究者的精力和时间。因此,有必要利用智能优化算法对控制器参数进行优化。

为了保证优化效果,本文利用全局搜索与局部搜索兼顾的飞蛾扑火优化算法(Moth-flame optimization, MFO)进行基于背靠背 MMC-HVDC 并网复合装置的滑模变控制器参数优化。文献[14]提出飞蛾扑火优化算法,并在 29 个基准和 7 个实际工程问题上与其他著名的自然启发算法进行了比较,验证其优越性。文献[15]针对风力发电机组 PI 控制参数整定难的问题,利用飞蛾扑火优化算法对控制器参数进行优化,试验证明参数优化后的 PI 控制器控制效果得到明显改善。文献[16]提出基于飞蛾扑火优化算法的多运行方式 PSS 参数协调优化方法,仿真算例结果表明,应用该方法后有效提高了系统的动态稳定性。文献[17]针对电力系统最优潮流问题,提出采用 MFO 算法的最优化求解方案,算例结果表明,采用 MFO 算法求解最优潮流问题具有收敛速度更快、搜索精度更高、鲁棒性强等优点。根据上述研究成果,传统 MFO 算法存在着两

大问题:一是算法后期收敛速度慢。考虑到传统 MFO 算法的螺旋式飞行搜索和位置更新机制虽对全局搜索能力和局部搜索能力有一定的平衡作用,在优化前期,该算法可快速接近相对最优解,但是在经过一定迭代次数之后,螺旋式飞行搜索会将飞蛾局限在某较小的区域中,该搜索方式仅会对当前位置做一些较小的更新,就会导致算法后期的收敛速度变慢。二是早熟收敛。MFO 不具备跳出局部最优的机制,一旦陷入局部最优,就难以跳出,导致发生早熟收敛现象。同时 MFO 算法的火焰自适应熄灭机制虽增强了局部寻优能力,但在一定程度上减少了种群多样性,也会导致早熟收敛现象。

针对 MFO 算法的不足,本文将佳点集初始化和 Lévy 飞行机制与飞蛾扑火优化算法结合,在加快收敛速度的同时提高算法的全局寻优能力,即使算法暂时陷入局部最优,也可通过 Lévy 飞行跳出局部最优,并以 Automation Library 为纽带,实现 Python-PSCAD 联合仿真,验证所提方法能够有效改善并网复合装置滑模变控制器的控制性能。

2 并网复合装置滑模变控制器设计

2.1 电流内环滑模变结构控制器设计

滑模变结构控制最突出的优势是系统的运行只受滑模面参数影响,不受系统原参数影响,从而使系统在一定条件下具有比鲁棒性更加优越的完全自适应性^[18-19]。并网复合装置拓扑如图 1 所示,将背靠背 MMC-HVDC 并网复合装置投入待并列的两系统之间,将高频侧系统的有功功率通过控制策略向低频侧系统快速传递,从而减少两侧频率差;同时,装置向电压较低并列点注入容性无功,即减少无功负荷;向电压较高并列点吸收无功,即增大无功负荷,以调整并列点的电压幅值与相角,通过功率传递满足并网条件,实现快速并网。

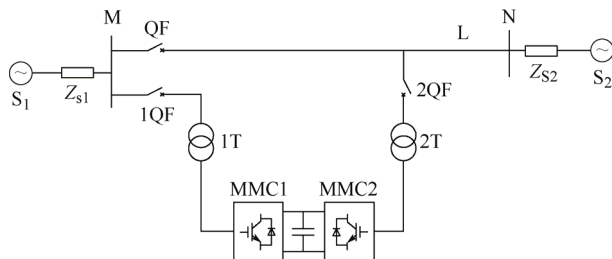


图 1 背靠背 MMC-HVDC 并网复合装置拓扑图

MMC 在 dq 坐标轴下的动态方程为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = u_d - v_d + \omega Li_q \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = u_q - v_q + \omega Li_d \end{cases} \quad (1)$$

式中, i_d 、 i_q 是 MMC 交流侧电流分别在 d 、 q 轴上的分量; u_d 、 u_q 为 MMC 交流侧接入端电压分别在 d 、 q 轴上的分量; v_d 、 v_q 表示 MMC 桥臂中点的基波电压在 d 、 q 轴上的分量。式(1)可转换为

$$\begin{cases} \dot{i}_d = -\frac{R}{L}i_d + \omega i_q + \frac{1}{L}u_d - \frac{1}{L}v_d \\ \dot{i}_q = -\frac{R}{L}i_q - \omega i_d + \frac{1}{L}u_q - \frac{1}{L}v_q \end{cases} \quad (2)$$

滑模面和趋近律的选择作为滑模变控制器设计的中中之重, 其选取直接影响到滑模变控制器的控制性能。考虑到积分可消除系统的静态误差, 因此本文选取积分滑模面, 如式(3)所示。

$$\begin{cases} s_1 = e_1 + k_{s1} \int_0^t e_1 dt \\ s_2 = e_2 + k_{s2} \int_0^t e_2 dt \end{cases} \quad (3)$$

式中, e_1 和 e_2 为控制误差, $e_1 = i_d - i_{dref}$, $e_2 = i_q - i_{qref}$, i_d 和 i_q 分别为电流在 d 、 q 轴上的分量, i_{dref} 和 i_{qref} 分别为电流在 d 轴和 q 轴上的参考值; s_1 和 s_2 表示滑模面; k_{s1} 和 k_{s2} 为滑模面控制参数, 通过调节该参数可以获得更好的稳态性能。

当系统处于稳态时, 系统状态是运行在滑模面上的。但系统在进入稳态前, 必须施加一控制作用使系统向滑模面趋近。

选取指数趋近律, 如式(4)所示

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad \varepsilon > 0 \quad k > 0 \quad (4)$$

式中, s 为切换函数; $\dot{s} = -ks$ 是指数趋近项, 其解为 $s = s(0)\exp(-kt)$, k 为趋近速度。 $\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$ 是等速趋近项, ε 为到达速度, $\operatorname{sgn}(s)$ 为符号函数, 如式(5)所示

$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ -1 & s < 0 \end{cases} \quad (5)$$

指数趋近律中同时包含指数趋近项和等速趋近项, 这样使得系统能很快地趋近切换面。

将 $|x|^2$ 引入式(4)的等速趋近项, 并与式(3)联立可得

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = \dot{i}_d - \dot{i}_{dref} + k_{s1}(i_d - i_{dref}) = \\ \quad -\varepsilon_1 |x_1|^2 \operatorname{sgn}(s_1) - k_{s1}s_1 \\ \dot{s}_2 = \dot{i}_q - \dot{i}_{qref} + k_{s2}(i_q - i_{qref}) = \\ \quad -\varepsilon_2 |x_2|^2 \operatorname{sgn}(s_2) - k_{s2}s_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, x 为系统的状态变量, 本文选用控制误差。

控制之初 $-\varepsilon |x|^2 \operatorname{sgn}(s)$ 与 $-ks$ 共同作用, 趋近速度较快。随着状态变量 x 与滑模面距离的逐渐缩小, $-\varepsilon |x|^2 \operatorname{sgn}(s)$ 与 $-ks$ 均趋于零, 最终稳定在滑模面上。该趋近律可根据状态变量与滑模面之间的距离调整趋近速度, 在削弱抖振的同时达到稳定运行状态。

由式(1)可知, MMC 变换器交流侧电流 i_d 、 i_q 受控制量 u_d 、 u_q , 电网电动势 v_d 、 v_q 以及交叉耦合项 ωLi_q 、 ωLi_d 影响, 因此需要采用前馈解耦控制。将式(6)代入式(2), 可得并网复合装置电流内环滑模变结构控制律, 如式(7)所示。并网复合装置电流内环滑模变结构控制框图如图 2 所示。

$$\begin{cases} u_d = Ri_d - \omega Li_q + v_d - \\ \quad L[k_1 s_1 + \varepsilon_1 |x_1|^2 \operatorname{sgn}(s_1) + k_{s1} e_1] \\ u_q = Ri_q + \omega Li_d + v_q - \\ \quad L[k_2 s_2 + \varepsilon_2 |x_2|^2 \operatorname{sgn}(s_2) + k_{s2} e_2] \end{cases} \quad (7)$$

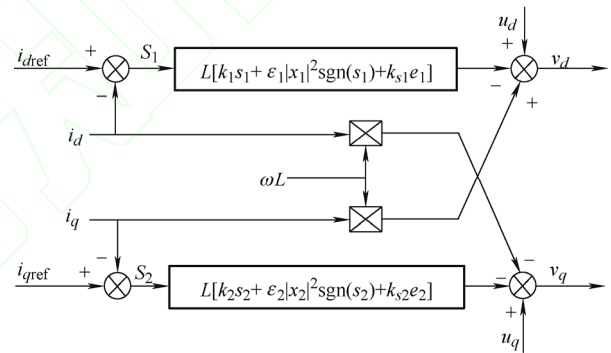


图 2 电流内环滑模变控制策略结构框图

2.2 电压外环滑模变结构控制器设计

MMC 每个桥臂是由多个子模块级联组成, 其直流侧电容电压是由子模块电容电压支撑, 由能量守恒定律可得

$$\frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) = u_{dc} i_{dc} = C_{eq} u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} \quad (8)$$

式中, i_{dc} 为逆变器直流侧电流; C_{eq} 为直流侧等效电容值。对于三相平衡电网, 有 $u_q = 0$, 故 MMC 直流侧动态方程为

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3u_d i_d}{2C_{eq} u_{dc}} \quad (9)$$

直流侧直流电压指令值 u_{dcref} 与实际的直流电压 u_{dc} 的误差为 e_3 , $e_3 = u_{dcref} - u_{dc}$ 。

考虑到电压外环控制器的控制目标是维持直流侧电压的稳定, 因此该控制器的设计目标是保证直

流侧电压的控制具有较强的抗干扰能力, 微分作用能够消除扰动对系统的影响, 能够较好地消除抖振。因此选取一阶滑模为

$$s_3 = e_3 + \beta \frac{de_3}{dt} \quad (10)$$

式中, β 为微分项系数。将式(9)代入式(10)可得

$$\begin{aligned} s_3 &= (u_{dref} - u_{dc}) + \beta(\dot{u}_{dref} - \frac{du_{dc}}{dt}) = \\ &= (u_{dref} - u_{dc}) + \beta(\dot{u}_{dref} - \frac{3u_d i_d}{2C_{eq} u_{dc}}) = \\ &= (u_{dref} - u_{dc}) - \frac{3\beta u_d i_d}{2C_{eq} u_{dc}} \end{aligned} \quad (11)$$

令 $s_3 = 0$, 可得

$$i_{dref} = \frac{2C_{eq} u_{dc}}{3\beta u_d} (u_{dref} - u_{dc}) \quad (12)$$

由式(12)便可得到内环控制器的参考有功电流 i_{dref} 。电压外环滑模变结构控制框图如图3所示。

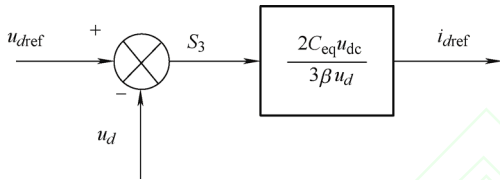


图3 电压外环滑模变控制策略结构框图

当系统的状态轨迹到达滑模面后, 因为实际切换装置会存在延时现象, 很难完全沿着预设的滑模面向平衡点滑动, 而是遵循着在切换面的两侧反复切换的原则运动, 这便是系统的抖振现象。抖振在影响系统控制精度的同时还会影响器件的使用寿命, 但抖振是滑模变控制中固有的, 无法将其彻底消除, 只能尽可能削弱^[20]。抖振的大小受滑模变控制器参数直接影响, 因此找寻滑模变控制器的最优参数, 可有效提高系统控制性能。

3 改进的飞蛾扑火优化算法

3.1 算法原理

该算法衍生于飞蛾以螺旋趋近的方式趋近光源的飞蛾扑火现象, 飞蛾是不断搜索找寻最优值的个体, 而火焰则是飞蛾寻优过程中获得的最优位置。每个飞蛾在相对应的火焰周围寻优, 并在找到更好的解的情况下更新火焰位置, 从而保证寻优过程中最优解的保留^[21]。

MFO 算法可表示为三元组寻优问题

$$\begin{cases} MFO = (I, P, T) \\ I: f \rightarrow \{M, OM\} \\ P: M \rightarrow M' \\ T: M \rightarrow \{true, false\} \end{cases} \quad (13)$$

式中, M 为飞蛾位置, 即待优化变量; OM 为 M 中飞蛾对应的适应度值; f 为适应度函数; P 为飞蛾围绕火焰进行螺旋式位置更新机制; M' 为更新后的飞蛾位置; T 为迭代判断函数, 其为真则停止迭代, 否则继续迭代寻优。

P 函数可以表示为

$$M_i = S(M_i, F_j) \quad (14)$$

式中, S 是螺旋函数; M_i 表示第 i 只飞蛾; F_j 表示第 j 个火焰。

$$S(M_i, F_j) = D_i e^{bt} \cos(2\pi t) + F_j \quad (15)$$

式中, t 为位移变量, 在 $[-1, 1]$ 区间内随机生成; b 为螺旋函数的形状常数; D_i 表示第 i 只飞蛾与第 j 个火焰之间的距离, 其中 D 可以表示为

$$D_i = |F_j - M_i| \quad (16)$$

式中, M_i 表示第 i 只飞蛾; F_j 表示第 j 个火焰; D_i 表示第 i 只飞蛾与第 j 个火焰之间的距离。

飞蛾围绕火焰利用对数螺旋函数更新位置的模型如图4所示, 为便于分析, 图4中只显示了一个飞蛾在一个维度时的模型, 可以此类比至多个飞蛾和多个维度的情况。图4中 M_i 为飞蛾初始位置, 在其飞行时, 可能飞行至 M^1 、 M^2 、 M^3 、 M^4 、 M^5 等位置。

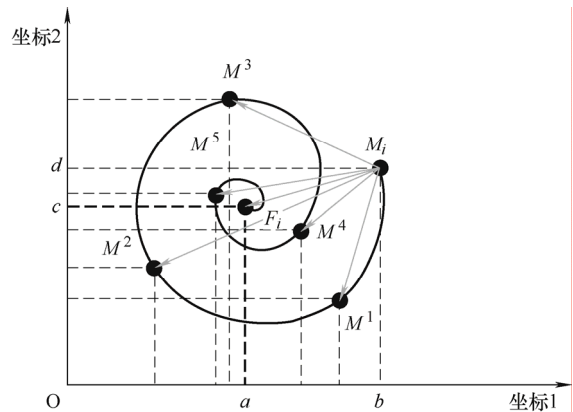


图4 飞蛾位置更新机制

若每次迭代都有 n 只飞蛾, 则飞蛾会侧重于全局寻优而影响局部寻优的精度, 并且排序在最后的火焰寻优价值也较低。研究者提出火焰自熄灭机制, 随着算法迭代次数的增加, 逐渐抛弃适应度差的火焰, 火焰熄灭式可以表示为

$$F_{\min} = \text{round}\left(N - k \times \frac{N-1}{T}\right) \quad (17)$$

式中, N 为种群个数; k 为当前迭代次数; T 为总迭代次数。

传统 MFO 算法用随机取值的方式设置飞蛾初始位置, 但该方法无法使飞蛾初始位置均匀分布在允许范围内。利用佳点集初始化^[22-23]来代替随机滑模变参数飞蛾初始位置的产生方式, 可以使飞蛾种群初始位置分布得更加均匀。

佳点的构造不受空间维数的影响, 能够较好地解决高维空间求解问题。因此, 应用佳点集初始化方法对飞蛾初始位置进行设置, 能得到一个相对较好的初始飞蛾种群。佳点集初始化的具体表达式为

$$P_n(k) = \left\{ \left\{ r^1 k \right\}, \dots, \left\{ r^i k \right\}, \dots, \left\{ r^t k \right\} \right\} \quad k=1, 2, \dots, n \quad (18)$$

式中, $r^i = \{2 \cos(2\pi i / p)\}, 1 \leq i \leq t$; P 是满足 $p \geq 2t+3$ 的最小素数。

基于 Lévy 飞行的滑模变参数飞蛾路径优化^[24-25]是将 Lévy 飞行机制与经典 MFO 算法结合, 其能够增加种群多样性和扩大搜索范围, 即使算法暂时陷入局部最优, 也可通过 Lévy 飞行跳出。Lévy 飞行位置更新式为

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \oplus \text{Levy}(\lambda) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (19)$$

式中, x_i^t 表示 x_i 第 t 代位置; \oplus 为点对点乘法; α 表示步长控制量; $\text{Levy}(\lambda)$ 为随机搜索路径, 并且满足

$$\text{Levy} \sim u = t^{-\lambda} \quad 1 < \lambda \leq 3 \quad (20)$$

因此, Lévy 飞行跳跃路径更新机制为

$$\begin{cases} s = \frac{\mu}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \\ \mu \sim N(0, \sigma_\mu^2) \\ v \sim N(0, \sigma_v^2) \\ \sigma_\mu = \left[\frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\frac{\beta\pi}{2})}{\Gamma(\frac{1+\beta}{2}) 2^{\frac{\beta\pi}{2}} \beta} \right]^{\frac{1}{\beta}} \\ \sigma_v = 1 \end{cases} \quad (21)$$

式中, s 为随机步长; $\beta = \lambda - 1$; μ, v 服从正态分布。

为了提高滑模变结构控制器的性能, 将电流内环滑模变结构控制参数和电压外环滑模变结构控制参数作为改进后的 MFO 算法寻优对象, 并通过以下步骤实现控制器参数优化。

(1) 对参数进行初始化定义, 并根据佳点集初

始化方法, 即式(18)生成滑模变结构控制器参数飞蛾初始位置;

(2) 使用式(17)更新滑模变结构控制器参数火焰数量;

(3) 判断是否为第一次迭代, 若是则根据目标函数计算每个滑模变结构控制器参数飞蛾个体的适应度值, 按照适应度值对滑模变结构控制器参数飞蛾排序, 把滑模变结构控制器参数飞蛾的适应度值赋给对应的滑模变结构控制器参数火焰, 得到第一代滑模变结构控制器参数火焰的位置; 若不是第一次迭代, 将滑模变结构控制器参数飞蛾位置与滑模变结构控制器参数火焰位置按照适应度值排序, 将适应度值最优的位置赋给滑模变结构控制器参数火焰, 成为下一代滑模变结构控制器参数火焰的位置。

(4) 将 Lévy 飞行与自适应惯性权重加入滑模变结构控制器参数飞蛾更新位置机制;

(5) 判断是否满足迭代停止条件, 若未满足则返回步骤(2), 若满足则执行步骤(6);

(6) 输出寻优后的数值即为控制器的最佳参数。

上述步骤即可实现基于改进飞蛾扑火优化算法的并网复合装置滑模变控制器参数优化, 其流程如图 5 所示。

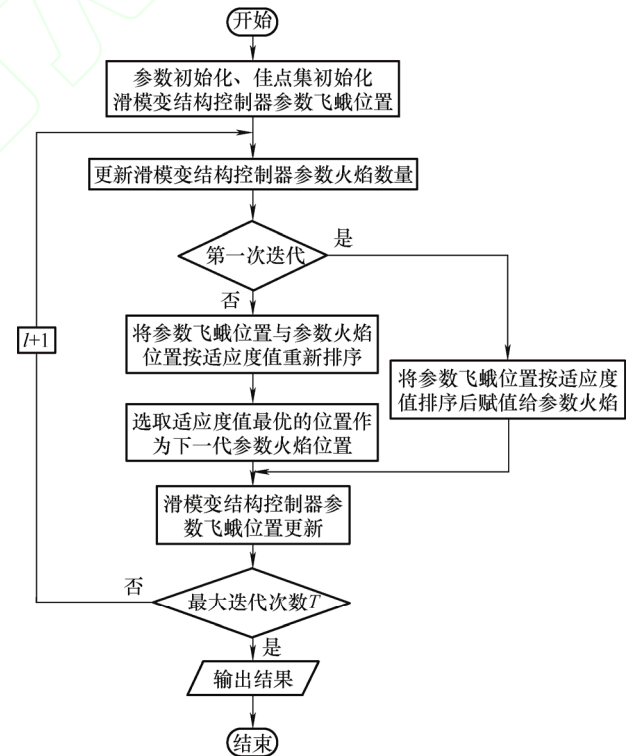


图 5 改进 MFO 算法优化滑模变控制参数流程图

3.2 算法测试

为了更加全面和客观, 对改进的飞蛾扑火优化算法进行性能测试, 选取 8 个不同的测试函数进行

测试, 其中表 1 为 8 个不同的测试函数, 表 2 为函数测试的结果。

表 1 测试函数

测试函数	$f_{\min}(x)$
$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	0
$f_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	0
$f_3(x) = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i x_j)^2$	0
$f_4(x) = \max_i \{ x_i , 1 \leq i \leq D\}$	0
$f_5(x) = \sum_{i=1}^n x_i \sin(x_i) + 0.1x_i$	0
$f_6(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	0
$f_7(x) = -20 \exp \left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} - e^{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos 2\pi x_i}} \right) + 20 + e$	0
$f_8(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n (x_i^2) - \prod_{i=1}^n \cos(\frac{x_i}{\sqrt{i}}) + 1$	0

表 1 中, $f_1 \sim f_4$ 为单峰测试函数; $f_5 \sim f_6$ 为多峰测试函数, 将粒子群算法 (Particle swarm optimization, PSO)、MFO 以及改进 MFO 三种群优化算法进行测试函数仿真对比, 验证所提改进 MFO 的性能。设置所有算法种群为 30, 最大迭代次数为 1 000, 维度为 10。由表 2 可明显看出, 改进 MFO 的寻优能力明显优于 MFO 和 PSO。

表 2 测试结果

测试函数	算法	平均值	方差
f_1	PSO	2.642 245	0.144 362
	MFO	7.92×10^{-30}	1.49×10^{-59}
	改进 MFO	1.10×10^{-189}	0
f_2	PSO	1.098 57	0.028 251
	MFO	1.333 333	3.80×10^{-38}
	改进 MFO	4.50×10^{-103}	1.00×10^{-208}
f_3	PSO	19.212 38	88.857 96
	MFO	1.34×10^{-6}	2.13×10^{-14}
	改进 MFO	2.80×10^{-151}	0
f_4	PSO	0.907 91	0.150 335
	MFO	2.852 998	5.537 056
	改进 MFO	2.87×10^{-88}	2.80×10^{-178}
f_5	PSO	70.704 18	0.876 751
	MFO	12.259 06	4.81×10^{-24}
	改进 MFO	3.60×10^{-101}	9.50×10^{-212}
f_6	PSO	26.165 55	110.614 7
	MFO	21.626 07	24.748 14
	改进 MFO	0	0
f_7	PSO	1.565 486	0.038 066
	MFO	4.91×10^{-15}	0
	改进 MFO	8.88×10^{-16}	0
f_8	PSO	0.829 78	0.009 495
	MFO	0.159 074	0.000 667
	改进 MFO	0	0

4 仿真验证

4.1 Python-PSCAD 联合仿真

目前在 PSCAD 平台上搭建的控制器进行参数优化主要通过 PSCAD 与 Matlab 接口实现, 但 PSCAD 与 Matlab 互联时无法后台运行, 利用 Python-PSCAD 联合仿真即可解决该问题。Automation Library 是 Python 与 PSCAD 联合仿真的纽带, Automation Library 由 Python 开发, 支持 PSCAD 4.6.1 及以上版本, 用于与 PSCAD 接口。此库接口允许用户从自定义脚本调用 PSCAD 函数, 可通过 Python 语言对 PSCAD 进行启动 PSCAD、加载工作区、项目和库、运行模拟、更改工作区和项目设置、更改组件参数等功能。

利用 Python 进行飞蛾扑火算法寻优, 在数据处理部分, 利用 Python 调用 Matlab 引擎进行适应度计算, 而计算所需的状态信息则由 Python 利用 Automation Library 与 PSCAD 联合仿真获得, 联合仿真结构图如图 6 所示。

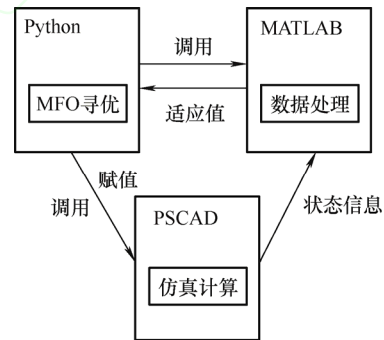


图 6 联合仿真结构图

4.2 评估指标

采用综合 ITAE 指标作为衡量滑模变控制器控制性能好坏的标准, 综合 ITAE 指标相比于 ITAE 指标增加了对调节时间和超调量的指标, 避免优化算法过度重视 ITAE 指标而忽略调节时间和超调量等重要指标的问题, 修改后的综合 ITAE 指标描述为

$$J_{\text{综合ITAE}} = \int_0^T t |e(t)| dt + \omega_1 t_c + \omega_2 \delta(\sigma) \quad (22)$$

式中, t_c 为控制器调节时间; $\delta(\sigma)$ 为超调量; ω_1 、 ω_2 分别为调节时间以及超调量的权重系数。

考虑并网复合装置在功率传递过程中的动态特性, 故设置目标函数为

$$\begin{aligned}
Q_f(X) = & \omega_{DC} \int_t^T t \cdot |e_{DC}(t)| dt + \omega_{11} t_{c1} + \omega_{21} \delta(\sigma)_1 + \\
& \omega_P \int_t^T t \cdot |e_P(t)| dt + \omega_{12} t_{c2} + \omega_{22} \delta(\sigma)_2 + \\
& \omega_{Q1} \int_t^T t \cdot |e_{Q1}(t)| dt + \omega_{13} t_{c3} + \omega_{23} \delta(\sigma)_3 + \\
& \omega_{Q2} \int_t^T t \cdot |e_{Q2}(t)| dt + \omega_{14} \delta(\sigma) + \omega_{24} \delta(\sigma)_4
\end{aligned} \quad (23)$$

式中, ω_{DC} 、 ω_P 、 ω_{Q1} 、 ω_{Q2} 分别为直流电压 DC 、有功功率 P 、MM1 的无功功率和 MM2 的无功功率的综合 ITAE 评估指标的权重系数。

4.3 仿真验证模型

在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建 41 电平的背靠背 MMC-HVDC 并网复合装置的仿真模型, 用以验证和分析飞蛾扑火算法在滑模变控制参数优化过程中的有效性。两侧待并列系统设为水轮机模型, 机组额定容量为 120 MVA, 发电机出口电压 13.8 kV, 变压器变比 13.8/230 kV; 两侧系统的负荷分别为 $S_1=70+j62$ MVA, $S_2=10+j20$ MVA。试验的详细仿真参数如表 3 所示。

表 3 仿真参数

参数	数值
系统电压/kV	220
直流侧电压额定值/kV	40
MMC 容量/MVA	40
桥臂模块数	40
子模块电容值/mF	10
桥臂电抗器电感值/mH	10

本文以有功功率、无功功率和直流侧电压的综合 ITAE 值组成目标函数作为评价指标, 着重对 MMC1 与 MMC2 的电流内环滑模变控制参数、MMC2 的电压外环滑模变控制参数进行优化, 其余参数设为定值。

将本文所述的改进飞蛾扑火算法应用于并网复合装置控制参数优化。在 1 台 8 G 内存, 2.4 GHz 主频的计算机上实现 Python 与 PSCAD 之间的联合运行。算法种群数量设置为 30, 最大迭代次数设置为 100。

用传统 MFO 和所提改进 MFO 算法对并网复合装置的滑模变控制器参数进行优化, 并与优化前的控制性能进行对比, 表 4 展示了优化前后的评价指标。

表 4 优化前后评价指标对比

算法	综合 ITAE 值
优化前	0.442 789
MFO	0.366 769
改进 MFO	0.358 213

通过表 4 的综合 ITAE 指标可看出, MFO 算法及改进 MFO 算法均可对控制参数进行优化, 使控制性能提高, 而且本文提出的基于改进飞蛾扑火优化算法的并网复合装置滑模变控制参数优化方法的优化程度明显高于传统 MFO 算法。

图 7 为控制器参数优化迭代过程中的收敛曲线, 可看出在寻优初期, MFO 的寻优速度暂时领先于 IMFO。迭代 10 次之后, 在达到相同的寻优精度时, IMFO 的收敛速度明显快于 MFO, 且 IMFO 的寻优精度也高于 MFO。综上所述, 在背靠背 MMC-HVDC 并网复合系统的滑模变结构控制器参数优化过程中, IMFO 较 MFO 的优化效果更突出。

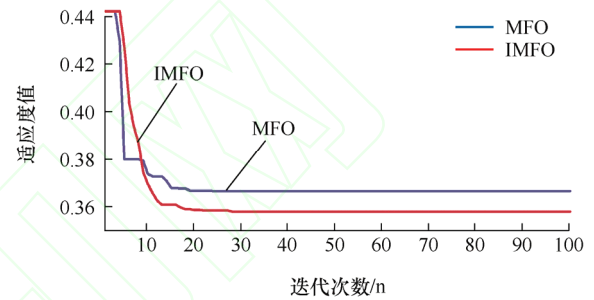


图 7 参数优化收敛曲线

仅用综合 ITAE 指标验证控制效果较为片面, 本节以直流侧电压和 MMC1 侧的有功功率、无功功率以及 MMC2 侧的无功功率的波形图来对比优化前后的参数控制效果。

图 8~9 为直流侧电压波形及其局部放大图。由图 8 可明显看出未经参数优化、经 MFO 参数优化后以及经改进 MFO 参数优化后的功率传递过程中的直流侧电压波动。未经参数优化时, 功率传递过程中滑模变控制下的直流侧电压波动约 0.2 kV, 而经过 MFO 和改进 MFO 优化的直流侧电压波动约 0.04 kV, 说明经控制器参数优化后的直流侧电压波动幅值明显减小, 提高了系统稳定性。

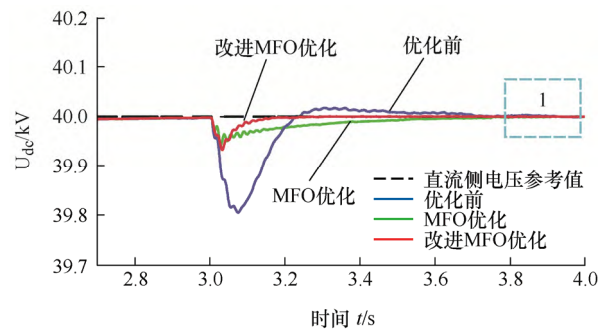


图 8 直流侧电压波形

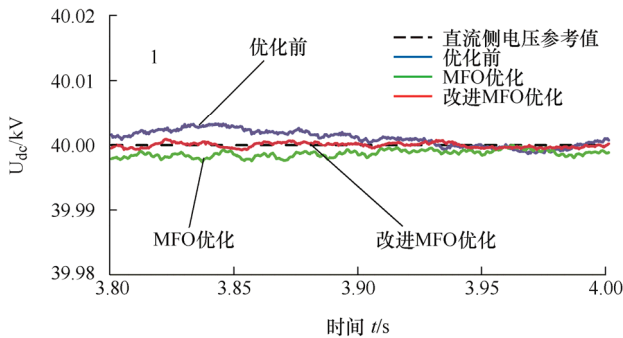


图9 直流侧电压局部放大波形1

此外, 优化前后直流侧电压波动及响应速度情况如表5所示。

表5 优化前后直流侧电压波动及响应速度

算法	直流侧电压波动/kV	响应速度/s
优化前	0.20	0.7
MFO	0.04	0.6
改进 MFO	0.04	0.2

由表5可以看出, 未经参数优化的直流侧电压需要0.7 s才能回归稳态, 经MFO算法寻优后的直流侧电压需要0.6 s回归稳态, 经改进MFO算法寻优后的直流侧电压的响应速度最低, 仅需要0.2 s即可回归稳态。上述数据可有效说明控制器参数优化后的直流侧电压响应速度明显加快。

为进一步分析参数优化对系统稳态性能的影响, 选取3.8~4 s之间的直流侧电压波形如图9所示, 可见未经参数优化的直流侧电压和经MFO优化后的直流侧电压波形在稳态有一定的稳态误差, 而经改进MFO优化后的电压波形具有良好的稳态性能, 无明显稳态误差。综上所述, 经MFO及改进MFO参数优化的系统直流侧电压较未经参数优化的系统直流侧电压具有更小的波动、更快的响应速度以及更小的稳态误差, 且经改进MFO参数优化后的动、静态性能较MFO更佳。

功率传递过程中的有功功率波形如图10所示,

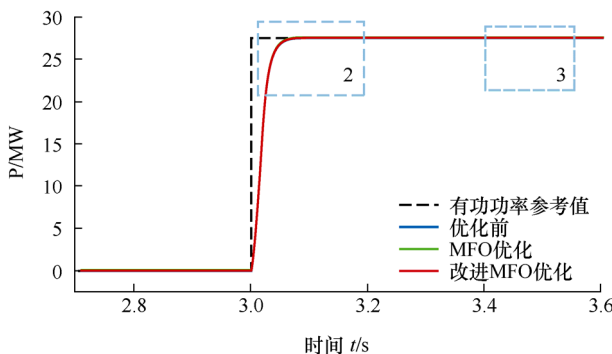
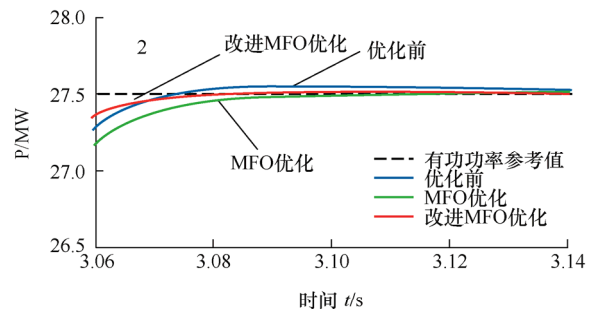
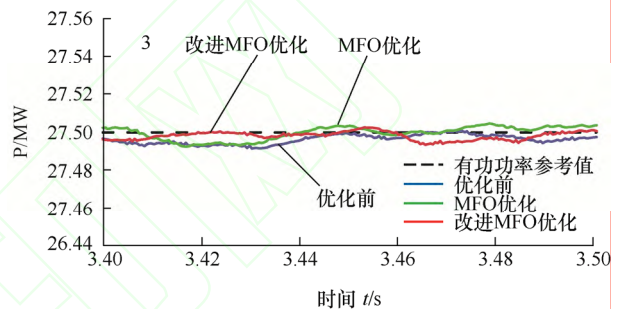


图10 有功功率波形

为观察波形, 将图10进行局部放大如图11所示, 由图11a可明显看出未经参数优化、经MFO优化后以及改进MFO优化后的功率传递过程中有功功率的响应速度及超调情况, 具体数据如表6所示。



(a) 局部放大波形2



(b) 局部放大波形3

图11 有功功率局部放大波形

表6 优化前后有功功率的响应速度及超调情况

算法	响应速度/s	超调情况/MW
优化前	0.14	0.094
MFO	0.09	0.037
改进 MFO	0.08	0.021

由表6可知, 未经参数优化时, 有功功率传递时约有0.094 MW的超调量, 且有功功率需要0.14 s才能回归稳态。而经参数优化的有功功率超调量为0.037 MW, 有功功率响应速度为0.09 s; 经改进MFO参数优化的有功功率响应速度为0.08 s。图11b可反应有功功率的静态特性, 可见三种情况下有功功率的静态性能无明显区别。综上所述, 经MFO及改进MFO参数优化的有功功率较未经参数优化的有功功率具有更小的超调、更快的响应速度, 且经改进MFO参数优化后的动态性能较MFO更佳。

图12为功率传递过程中的MMC1的无功功率波形, 为观察波形, 将图12进行局部放大如图13所示, 由图13a可明显看出未经参数优化、经MFO优化后以及改进MFO优化后的功率传递过程中MMC1的无功功率的响应速度及超调情况。具体情况如表7所示, 几种情况下均无明显超调情况。

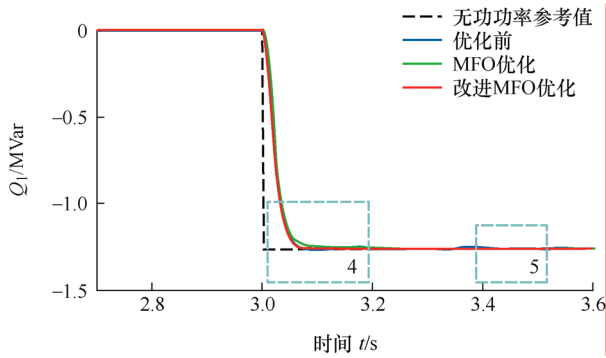
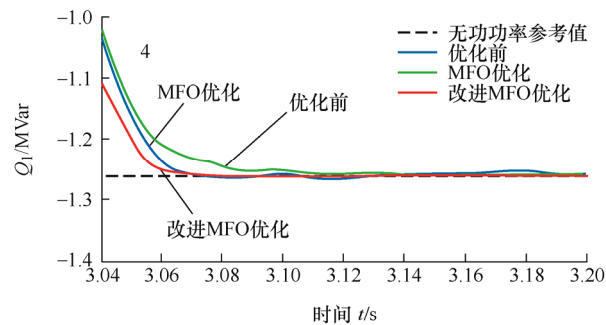
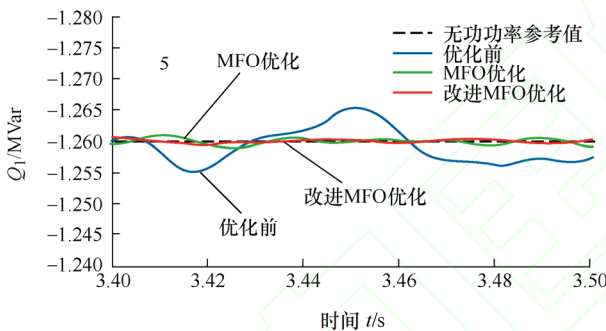


图 12 MMC1 无功功率波形



(a) 局部放大波形 4



(b) 局部放大波形 5

图 13 MMC1 无功功率局部放大波形

表 7 优化前后 MMC1 无功功率的响应速度及超调情况

算法	响应速度/s	超调情况/MVar
优化前	0.08	0.120
MFO	0.13	0.075
改进 MFO	0.07	0.024

然而，从图 13b 来看，未经参数优化的无功功率静态性能较差，在无功功率已回归稳态后，仍存在幅值约为 0.01 MVar 的波动，而经 MFO 参数优化后的无功功率静态性能良好。经改进 MFO 参数优化后的响应速度为 0.07 s。此外，经改进 MFO 参数优化后的无功功率静态性能较经 MFO 参数优化后的无功功率静态性能更优。

综上所述，经改进 MFO 参数优化后的系统无

功功率较未经参数优化的系统无功功率具有更快的响应速度及更好的静态稳定性。

图 14 为功率传递过程中的 MMC2 的无功功率波形，局部放大如图 15 所示。具体数据如表 8 所示。可以明显看出经改进 MFO 算法优化的控制器可以得到最佳的动态性能。

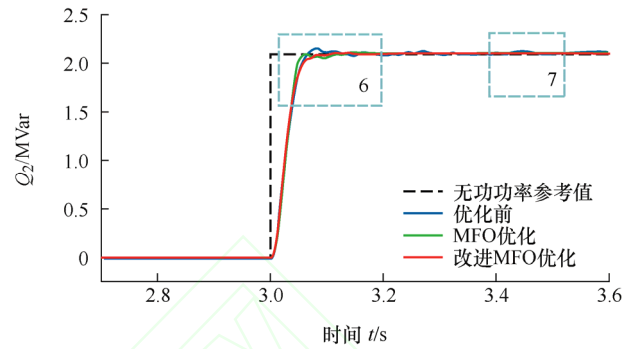
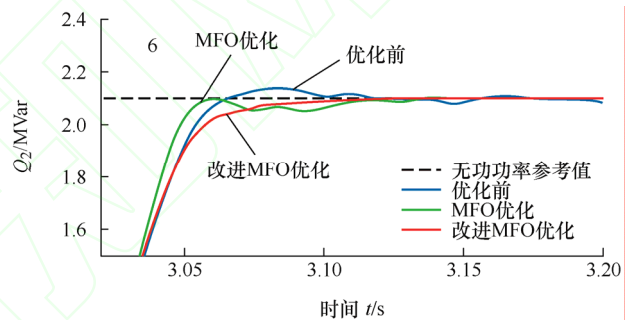
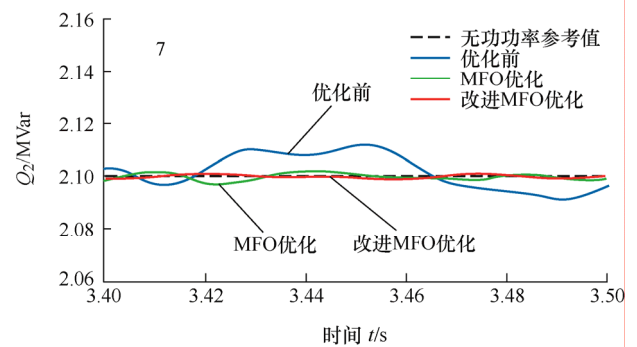


图 14 MMC2 无功功率波形



(a) 局部放大波形 6



(b) 局部放大波形 7

图 15 MMC2 无功功率局部放大波形

表 8 优化前后 MMC2 无功功率的响应速度及超调情况

算法	响应速度/s	超调情况/MVar
优化前	0.14	0.47
MFO	0.13	0.49
改进 MFO	0.11	0.11

图 14b 可反应无功功率的静态特性，未经参数优化的无功功率静态性能较差，在无功功率已回归

稳态后,仍存在幅值约为 0.02 MVar 的波动,而经参数优化后的无功功率静态性能良好,且根据波形看出经改进 MFO 参数优化后的无功功率静态性能较经 MFO 参数优化后的无功功率静态性能更优。综上所述,经 MFO 及改进 MFO 参数优化的无功功率较未经参数优化的无功功率具有更小的超调、更快的响应速度,且经改进 MFO 参数优化后的动、静态性能较 MFO 更佳。

综合上述分析,对背靠背 MMC-HVDC 并网复合装置滑模变控制器进行参数优化可进一步抑制功率传递过程中直流侧电压的波动,同时提高系统的动、静态性能。根据对比可知,相对于传统 MFO 算法对并网复合装置直流侧电压波动的抑制以及系统动、静态性能的提高,改进 MFO 算法优化后的参数对并网复合装置直流侧电压波动的抑制以及系统动、静态性能的提高更具有优越性。

5 结论

为解决背靠背 MMC-HVDC 并网复合装置滑模变控制参数整定困难的问题,本文提出了一种改进飞蛾扑火优化算法,通过优化控制器参数以充分发挥控制器的性能。主要得出以下结论。

(1) 针对飞蛾扑火优化算法全局搜索能力差和容易早熟收敛的问题,本文将佳点集初始化种群和 Lévy 飞行更新机制与飞蛾扑火优化算法结合,其与原始飞蛾扑火算法相比,收敛速度得到了提升,并改善了算法陷入局部最优的问题。

(2) 针对 Matlab-PSCAD 联合仿真参数优化方法无法后台运行的问题,提出了基于 Automation Library 的 Python-PSCAD 联合仿真方法,以综合 ITAE 指标为目标函数,实现了原始 MFO 算法和改进 MFO 算法应用于背靠背 MMC-HVDC 并网复合装置滑模变控制器参数的优化。仿真结果表明,控制器参数整定问题得到了解决,同时控制器的性能也得到了有效提升,从而提高了系统的动态和静态性能。

(3) 本文通过仿真分析验证了所提出的控制器参数优化算法的有效性,其可为实际工程控制器参数的调制提供一定的理论依据。

参 考 文 献

[1] 张兴,李明,郭梓暄,等. 新能源并网逆变器控制策略研究综述与展望[J]. 全球能源互联网. 2021, 4(5): 506-515.

ZHANG Xing, LI Ming, GUO Zixuan, et al. Review and perspectives on control strategies for renewable energy grid-connected inverters[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 506-515.

[2] 刘家军. 基于功率传递的电网间同期并列原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 10-15.

LIU Jiajun. Principle and technology of synchronization and paralleling between power grids based on power transfer[M]. Beijing: Science Press, 2018: 10-15.

[3] 刘家军, 汤涌, 姚李孝, 等. 电压型换流器实现电网间同期并列的原理及仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(S1): 12-17.

LIU Jiajun, TANG Yong, YAO Lixiao, et al. Research on the principle and simulation of synchronization parallel between grids by VSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(S1): 12-17.

[4] LIU Jiajun, TANG Yong, SUN Huadong, et al. Research on implementation of compound function based on back-to-back VSC in power grid parallel[C]// 2010 International Conference on Power System Technology, 2010: 1-6.

[5] 支建刚. 基于 VSC-HVDC 的电网解列与并列的综合控制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.

ZHI Jiangang. Research on integrated control of grid splitting and paralleling operation based on VSC-HVDC[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.

[6] 刘家军, 任娟, 王锬, 等. 基于背靠背 VSC-HVDC 同期并列装置转换为 UPFC 的策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(7): 7-12, 18.

LIU Jiajun, REN Juan, WANG Kun, et al. Research on control strategy of synchronization paralleling device converted into unified power flow controller based on back-to-back VSC-HVDC[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(7): 7-12, 18.

[7] 刘家军, 王锬, 杨松. 基于背靠背 VSC-HVDC 电网间同期并列装置实现 UPFC 的仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 151-157.

LIU Jiajun, WANG Kun, YANG Song, et al. Simulation study on achieving UPFC of simultaneous paralleling device based on back to back VSC-HVDC[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 151-157.

[8] 刘家军, 杨松, 谭雅岚. 基于功率传递的同期并列装置实现 SSSC 功能的仿真[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 103-109.

- LIU Jiajun, YANG Song, TAN Yalan, et al. Simulation of implementing SSSC function converting from grid paralleling device based on power through transmission[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 103-109.
- [9] 孙骥. 基于虚拟同步发电机的并网复合装置在低惯量系统中的应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- SUN Ji. Application of grid connected composite device based on virtual synchronous generator in low inertia system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [10] LIU Jiajun, YANG Jie. Research on power oscillation suppression strategy of grid-connected composite system based on impedance optimization[C]// 2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering(CEEPE), 2021: 535-541.
- [11] 王福忠, 陶新坤, 田广强, 等. 基于改进果蝇算法优化的微电网逆变器恒功率控制算法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 71-79.
- WANG Fuzhong, TAO Xinkun, TIAN Guangqiang, et al. Constant power control algorithm for a microgrid inverter based on an improved fruit fly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 71-79.
- [12] 林雪华, 洪国巍, 郭琦, 等. 基于改进 MOPSO 的 MMC 控制参数多机联合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 48-55.
- LIN Xuehua, HONG Guowei, GUO Qi, et al. Multi-machine joint parameters optimization of MMC controller based on improved MOPSO[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 48-55.
- [13] GUO Jinghua, LI Keqiang, FAN Jingjing, et al. Neural-fuzzy-based adaptive sliding mode automatic steering control of vision-based unmanned electric vehicles[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1): 1-13.
- [14] MIRJALILI S. Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm[J]. Knowledge-based Systems, 2015, 89: 228-249.
- [15] 黄琳妮. 基于群飞蛾扑火算法的风力发电系统 PI 控制参数优化整定[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- HUANG Linni. Optimization of PI control parameters of wind energy system based on swarm moths flame algorithm[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [16] 潘晓杰, 张立伟, 张文朝, 等. 基于飞蛾扑火优化算法的多运行方式电力系统稳定器参数协调优化方法[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3038-3046.
- PAN Xiaojie, ZHANG Liwei, ZHANG Wenchao, et al. Multi-operation mode PSS parameter coordination optimization method based on moth-flame optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3038-3046.
- [17] 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, 44(11): 3642-3647.
- WANG Ziqi, CHEN Jinfu, ZHANG Guofang, et al. Optimal power flow calculation with moth-flame optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2017, 44(11): 3642-3647.
- [18] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 23-30.
- LIU Jinkun. MATLAB simulation of sliding mode variable structure control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 23-30.
- [19] 曹亚丽, 曹竣奥, 宋昕, 等. 一种改进滑模观测器的 PMSM 矢量控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 104-111.
- CAO Yali, CAO Junao, SONG Xin, et al. Research on vector control of PMSM based on an improved sliding mode observer[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 104-111.
- [20] 赵盈盈. 基于滑模变结构的 PMSM 直接转矩控制[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- ZHAO Yingying. Permanent magnet synchronous motor direct torque control based on sliding mode[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [21] 王雨薇. 基于混沌理论和改进人工神经网络的短期风速预测研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- WANG Yuwei. Research on short-term wind speed forecasting based on chaotic theory and improved artificial neural network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [22] 何思名, 袁智勇, 雷金勇, 等. 基于改进灰狼算法的 DG 接入配电网反时限过电流保护定值优化[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 173-181.
- HE Siming, YUAN Zhiyong, LEI Jinyong, et al. Optimal setting method of inverse time over-current protection for a distribution network based on the improved grey wolf optimization[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 173-181.
- [23] 唐伦, 田立峰, 张曦, 等. 计及 N-1 安全约束的输电网阻塞管控数据驱动模型[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 11-17.

- TANG Lun, TIAN Lifeng, ZHANG Xi, et al. A data-driven model for transmission congestion management considering N-1 static security constraints[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(23): 11-17.
- [24] 袁性忠, 张鹭, 罗迪, 等. 基于边缘计算的能源自治区域调度策略[J]. 智慧电力, 2021, 49(8): 46-54.
- YUAN Xingzhong, ZHANG Lu, LUO Di, et al. Energy autonomous region scheduling strategy based on edge computing[J]. Smart Power, 2021, 49(8): 46-54.
- [25] 张莹, 苏建徽, 汪海宁, 等. 基于改进磷虾群算法优化 Elman 神经网络的 PEMFC 电堆建模[J]. 电测与仪表, 2021, 58(3): 23-27.
- ZHANG Ying, SU Jianhui, WANG Haining, et al. PEMFC stack modeling based on Elman neural network optimized by improved krill herd algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 23-27.
-
- 作者简介:** 刘家军, 1967 年生, 博士, 教授。主要研究方向为电器及其控制、人工智能在电力系统中的应用等。
E-mail: liujiajun-88@163.com
- 林皓琨(通信作者), 女, 1995 年生, 博士研究生。主要研究方向为人工智能在电力系统中的应用。
E-mail: 705271400@qq.com
- 苗淼, 女, 1998 年生, 硕士研究生。主要研究方向为电力系统运行与控制。
E-mail: 1552202598@qq.com
- 刘立鹏, 男, 1998 年生, 硕士研究生。主要研究方向为电力系统运行与控制。
E-mail: 24027934405@qq.com