

DOI:10.19725/j.cnki.1007-2322.2018.04.013

基于改进 MOPSO 的 MMC-HVDC 控制器 PI 参数分层优化

谢国超¹, 刘崇茹¹, 凌博文¹, 徐东旭¹, 朱毅²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;

2. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东济南 250021)

Layered Parameter Optimization of MMC-HVDC PI Controller Based on Improved MOPSO

XIE Guochao¹, LIU Chongru¹, LING Bowen¹, XU Dongxu¹, ZHU Yi²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. State Grid Shandong Economics Research Institute, Jinan 250021, China)

摘要: 针对模块化多电平换流器型高压直流输电工程系统控制目标多、多个 PI 控制器之间相互影响、PI 参数优化困难的问题, 提出一种基于改进多目标粒子群算法的 MMC-HVDC 控制器 PI 参数分层优化方法。为了提高种群的多样性同时免于粒子陷入局部最优解, 对外部存储器中的粒子进行变异操作; 为了改善算法收敛性并获得良好的 Pareto 前沿, 提出一种基于隶属度函数的领导粒子选取方法; 为了适应 MMC-HVDC 控制系统结构, 对多个控制器 PI 参数进行分层优化。本文实现了 MATLAB 与 PSCAD/EMTDC 联合调用和数据交互。算法性能分析和电磁暂态程序仿真证明了本文所提出方法可以快速收敛并且获得均匀分布的 Pareto 前沿, 有效改善系统的动态性能。

关键词: 模块化多电平换流器; 控制器参数优化; 多目标粒子群算法; 隶属度函数; 变异; 分层优化

Abstract: For MMC-HVDC(modular multilevel converter-high voltage direct current, MMC-HVDC) controller optimization, such problems as multiple control objectives, the relative influence among multiple PI controllers and the difficulty of PI parameter optimization are obvious. In this paper, layered parameter optimization of MMC-HVDC PI controller is proposed based on improved MOPSO method. In order to increase the diversity of the particles to avoid the population sinking into the local optimal solution, a mutation operation is introduced to the particles in the external memory. In order to improve the convergence of the algorithm and obtain a good Pareto frontier, a leading particle selection method is proposed based on membership function.

基金项目: 国家电网公司科学技术项目(SGSDJY00JHJS1600141)

Meanwhile, a layered parameter optimization method is proposed to fit with the structure of MMC-HVDC controller. The combined invocation and data interaction between MATLAB and PSCAD/EMTDC are implemented in this paper. Algorithm performance analysis and electromagnetic transient simulation results show that the proposed method converges fast and can obtain the uniform Pareto frontier. It can also improve the dynamic performance of the system effectively.

Keywords: modular multilevel converter(MMC); parameter optimization of controllers; multi objective particle swarm optimization(MOPSO); membership function; mutation; layered optimization

0 引言

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)自被提出以来便得到了广泛的关注。MMC 具有独立控制有功功率和无功功率、向无源网络或者弱交流系统供电等传统电压源换流器的特点, 且波形质量高、换流器损耗低, 现已被广泛应用于直流电网的构建并在新能源并网和大电网互联等领域极具发展潜力。迄今为止, 模块化多电平换流器型高压直流输电工程(modular multilevel converter-high voltage direct current, MMC-HVDC)在国内外均取得了成功的应用^[1]。

多模块的拓扑结构和多环节的控制策略使其在仿真研究和工程实践中需要考虑复杂的协调控制, 因而对其控制系统的性能要求非常高。比例-积分

(proportional-integral, PI)控制以其调节快速、结构简单、参数定义易于理解、易于实现等优点而被广泛应用于 MMC 的控制系统中,但工程中常采用试凑法获得参数,这不仅对工程师提出了很高的要求,而且十分耗费精力和时间。近年来,随着智能优化算法的普及和深入,智能优化算法已经越来越多地应用于 PI 控制器参数优化。

多目标粒子群算法 (multi objective particle swarm optimization, MOPSO) 以其良好的收敛性能、简单的计算模式、较强的全局搜索能力和较少的参数设置的特点而被广泛应用于多目标优化问题的求解,也有学者使用 MOPSO 算法优化 PI 控制器参数。文献 [2] 利用多目标粒子群算法优化统一潮流控制器的控制系统。文献 [3] 采用 MOPSO 算法优化了以系统成本和污染排放最小为目标函数的“源-网-荷-储”优化调度模型。文献 [4] 对 MOPSO 算法进行了改进并对含风电场的电力系统进行了优化调度。文献 [5] 利用改进的 MOPSO 算法优化能源管理系统中的设计参数。文献 [6] 采用 MOPSO 算法优化多个目标函数,进而得到在柔性交流系统中安装电力电子装置的最优位置。文献 [7] 利用改进的 MOPSO 算法提出一种含有分布式电源的配电网重构方法。文献 [8] 采用 MOPSO 算法求解考虑环境约束和机组运行效率的电力系统经济平稳调度模型。文献 [9] 建立了基于 MOPSO 算法的连锁跳闸预防控制方法。

MMC 模型中含有众多的电力电子开关和非线性电容等元件,其控制系统模型具有多目标、非线性、高阶性、离散型等特点,本文将 MOPSO 算法应用于 MMC-HVDC 控制器 PI 参数的优化并对算法进行了改进,通过引入遗传算法中的变异机制同时增加一种基于隶属度函数的领导粒子选取方法,降低了算法出现局部收敛的概率,增强了算法全局寻优能力,从而改善了算法性能。

1 MMC-HVDC 控制策略

MMC-HVDC 常规的控制系统采用直接电流控制中的矢量控制策略^[10-12],通过坐标变换将 abc 坐标系下的三相交流量转换为 dq 坐标系下的同步旋转的直流量建立 MMC 的数学模型。矢量控制策略采用双闭环控制方式,通过 dq 轴解耦,形成外环控制器和内环控制器^[13],其控制框图如图 1 所示。

其中,外环控制器根据系统级控制设定的公共连接点处的有功功率和无功功率、直流侧的直流电压或交流侧的交流电压等参考值,计算用于内环控制器的 dq 轴电流参考值,而内环控制器则通过调节换流器输出的初始电压调制波使 dq 轴电流快速跟踪其参考值。

MMC-HVDC 的基本控制方式由外环控制器决定,目前广泛使用的控制方式组合为有功功率和无功功率(PQ)控制和直流电压和无功功率($U_{DC}Q$)控制。设外环控制器 d 轴的传递函数为 $K_{Pd} + K_{Id}/s$, K_{Pd} 和 K_{Id} 分别为外环 d 轴控制器的比例系数和积分系数,外环控制器 q 轴的传递函数为 $K_{Pq} + K_{Iq}/s$, K_{Pq} 和 K_{Iq} 分别为外环 q 轴控制器的比例系数和积分系数。为了使控制环节简洁清晰,可以假设 MMC 交流电压的 dq 轴电压(u_d 和 u_q)近似等于内环控制器输出的 dq 轴电压分量(u_{dref} 和 u_{qref})^[14],即 $u_d \approx u_{dref}$, $u_q \approx u_{qref}$,则内环 dq 轴的控制器可以使用同一套 PI 参数,因此,对于内环控制器,传递函数为 $K_P + K_I/s$, K_P 和 K_I 分别为内环 d 轴和 q 轴控制器的比例系数和积分系数。因此,MMC 控制系统中,有 6 个待优化的 PI 参数,分别为 K_{Pd} 、 K_{Id} 、 K_{Pq} 、 K_{Iq} 和 K_P 、 K_I 。

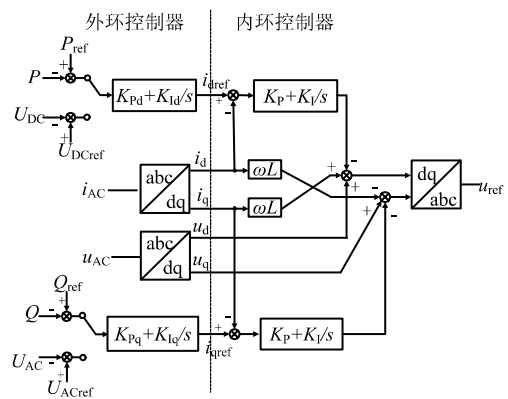


图 1 矢量控制策略框图
Fig. 1 Vector control strategy

2 MOPSO 算法改进

2.1 MOPSO 简介

2004 年,Coello 提出了多目标粒子群智能算法,成功将只能用于单目标优化问题的粒子群算法应用于多目标优化问题^[15],其基本思想是通过迭代更新粒子的速度和位置信息来搜索最优值,算法采用外部存储器和自适应网格机制保存非劣解并保

持解的多样性。算法主要流程如下：

Step1: 设定算法相关参数的值，初始化粒子种群的结构体信息，计算初始适应值；计算支配属性，把非支配解加入到外部存储器并初始化网格；令迭代次数 $j=1$ 。

Step2: 在外部存储器中选择一个领导粒子作为当前全体粒子的最优值，依式(1)对粒子群速度和位置进行迭代更新；判断位置是否有超出上下限，如果超出则取值为上下限，并且相应的将速度改变方向。

$$\begin{cases} v_j = \omega \times v_{j-1} + c_1 \times r \times (p_{\text{best},j-1} - p_{j-1}) + \\ \quad c_2 \times r \times (g_{\text{best}} - p_{j-1}) \\ p_j = p_{j-1} + v_j \end{cases} \quad (1)$$

式中： v_j 和 p_j 是第 j 次迭代中粒子的飞行速度和位置； ω 表示惯性权重系数； $p_{\text{best},j-1}$ 是第 $j-1$ 次迭代中全部粒子的最优位置； g_{best} 是全局最优位置； c_1 为粒子自我认知能力的加速因子； c_2 为粒子社会认知能力的加速因子； r 是随机数，在 $[0, 1]$ 之间服从均匀分布。

Step3: 更新每个粒子所经过位置的最优值，计算支配属性，把非支配解加入到外部存储器，如果非支配解数量超出网格容量，则利用与选取领导粒子相似的方法删除粒子密集区域的某些粒子。

Step4: 令 $j=j+1$ ，重复 step2 和 step3，直至到达最大的迭代次数。

2.2 MOPSO 的改进

2.2.1 变异机制

迭代过程中如果多次迭代选取的领导粒子的结果保持不变，此时可能使种群陷入局部最优值，而达不到真实的 Pareto 前沿。本文引入遗传算法中的变异机制，使其更大限度地能够遍历寻优空间，并使外部存储器中的非支配解尽可能地靠近真实的 Pareto 前沿。

迭代过程中，将获得的非支配解加入到外部存储器后，对外部存储器中的所有粒子的位置进行变异操作，对于第 k 个非支配解的位置信息 x_k ，采用如下变异方法：

首先，根据式(2)计算变异率 p ，

$$p = (1 - (j - 1) / (N_{\text{loop}} - 1))^{(1/m)} \quad (2)$$

式中： N_{loop} 为最大迭代次数； m 为变异系数； j 为当前迭代次数。

然后，计算变异区间，

$$[\min(V_{\text{down}}, x_k - \Delta x), \max(V_{\text{up}}, x_k + \Delta x)] \quad (3)$$

式中： V_{up} 和 V_{down} 为参数寻优空间的最大和最小值， \min 和 \max 为求取最小值和最大值的函数， Δx 由式(4)计算得到：

$$\Delta x = p \times (V_{\text{up}} - V_{\text{down}}) \quad (4)$$

最后，根据式(5)计算变异结果 X_k ，并更新外部存储器。

$$X_k = \text{unifrnd}(\min(V_{\text{down}}, x_k - \Delta x), \max(V_{\text{up}}, x_k + \Delta x)) \quad (5)$$

式中：unifrnd 为创建随机的连续均匀分布数组函数。

使用变异后的结果计算适应值，如果所得适应值支配变异前的适应值，则以此变异结果代替存储器中原有的非支配解，从而完成变异操作。

2.2.2 基于隶属度函数的领导粒子选取方法

基本 MOPSO 算法选取领导粒子时，首先计算每个网格的拥挤程度，用轮盘赌的方法选取一个网格，然后从选出的网格中随机选取一个粒子作为领导粒子。上述方法在迭代初期效果明显，计算得到的适应值随迭代次数的增加而显著降低，但是在迭代后期对适应值的改善效果不明显，而且需要迭代多次才能到达全局最优值。

针对此问题，本文应用模糊集理论提出一种基于隶属度函数的领导粒子选取方法，决策者通过计算外部存储器中每个非支配解的适应值的隶属度，作为领导粒子选取的评价指标。

本文以时间乘绝对误差积分准则(integrated time and absolute error, ITAE)为参考指标^[16]，建立控制目标的适应度评价函数，如式(6)所示。

$$f = \int_0^T t \times |y_{\text{ref}} - y| dt \quad (6)$$

式中： y_{ref} 为相应的控制目标的参考值； y 为相应的控制目标的实际值；积分上限 T 为动态过程时间。

本文选取由 MMC 的控制目标和桥臂环流的 ITAE 值组成的三维向量作为多目标粒子群算法的适应值，当维数 $i=1, 2, 3$ 时， f_i 分别表示有功类控制目标的 ITAE 值、无功类控制目标的 ITAE 值和桥臂环流的 ITAE 值。

为了简化分析同时具有代表性，本文采用一个简单的线性函数作为适应值的隶属度函数。

首先,找出每一维适应值的最大和最小值,记为 $f_{i\max}$ 和 $f_{i\min}$;

然后,利用式(7)对三维 ITAE 指标构成的适应值进行模糊化处理,

$$l_{i,k} = \frac{f_{i\max} - f_{i,k}}{f_{i\max} - f_{i\min}} \quad (7)$$

式中: $f_{i,k}$ 代表第 k 个非支配解第 i 维的适应值; $l_{i,k}$ 为对应的模糊化处理后的适应值。

通过模糊化处理,每一维适应值转化为 0 到 1 之间的数值,数值越大代表该维适应值更优,数值越小则更差。

最后,计算每一个粒子的隶属度函数值 L_k ,为简化分析,认为三维适应值之间同等重要,即可以通过式(8)计算隶属度函数值,并用轮盘赌的方法选取其中一个的粒子作为领导粒子。

$$L_k = \frac{\sum_{i=1}^3 l_{i,k}}{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^3 l_{i,k}} \quad (8)$$

式中: n 为外部存储器中存储的非支配解的数量。

由此,多目标优化问题被转换成了单目标问题,并且避免了可能由于各维度数值差异过大而带来的某一维度指标起主导作用的影响。在算法结束后,可选择式(8)中具有最大隶属度函数值的非支配解作为整个优化过程的最优解。

3 MMC-HVDC 控制器 PI 参数分层优化

3.1 内外环控制参数分层优化

MMC 控制系统中,首先由外环控制器计算出 dq 轴电流参考值,然后将其输入内环控制器得到换流器输出的初始电压调制波。针对控制系统的设计结构,本文对待优化的 6 个参数进行分层交替优化。在采用本文改进的 MOPSO 的每次迭代过程中,首先优化内环的控制参数,然后优化外环控制参数。具体操作是:算法每次迭代过程中,粒子速度和位置更新两次,计算两次适应值,第一次更新后,将领导粒子的外环参数赋给种群中所有粒子,即保持外环参数不变,试图优化出性能更佳的内环参数,第二次更新后,将领导粒子的内环参数赋给所有粒子,即固定内环参数,优化出性能更佳的外环参数。

3.2 控制参数优化流程

本文在 MATLAB 上运行改进 MOPSO 算法,在 PSCAD/EMTDC 上运行 MMC 仿真模型用以计算适应值,综合了 MATLAB 强大的数据处理能力和 PSCAD/EMTDC 仿真精确的优势。为了实现 PSCAD/EMTDC 将适应值传输给 MATLAB 进行寻优,同时 MATLAB 将控制参数传输给 PSCAD/EMTDC 计算适应值,在 PSCAD/EMTDC 中利用 Fortran 语言建立了 MATLAB 与 PSCAD/EMTDC 联合调用的自定义功能模块。同时针对 PSCAD/EMTDC 仿真运行时间长的问题,在实验室使用局域网连接多台计算机,在 MATLAB 中编写任务管理分配函数,结合此自定义功能模块实现多个 PSCAD/EMTDC 仿真程序与 MATLAB 同时交互数据,从而减少适应值的计算时间,提高寻优效率,框图如图 2 所示。

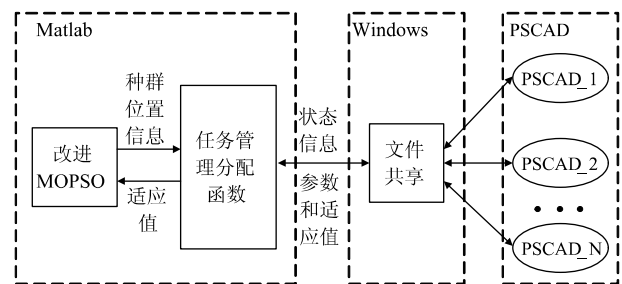


图 2 联合调用与数据交互框图

Fig 2 Combined invocation and data exchange

为了综合基于拥挤度方法选取领导粒子和基于隶属度方法选取领导粒子的优势,本文设置在前半迭代周期内采用基于拥挤度方法选取领导粒子,后半迭代周期采用基于隶属度方法选取领导粒子。

图 3 为本文提出的基于改进多目标粒子群算法的 MMC-HVDC 控制参数优化过程。

4 算法性能分析与仿真实验

4.1 单端 101 电平算例系统

本文在 PSCAD/EMTDC 下搭建单端 101 电平 MMC-HVDC 系统用于参数优化过程的适应值计算和优化结果的仿真实验,其拓扑结构如图 4 所示。

仿真模型运行工况为:采用定有功功率和无功功率控制,其设定值分别为 100MW 和 30Mvar。

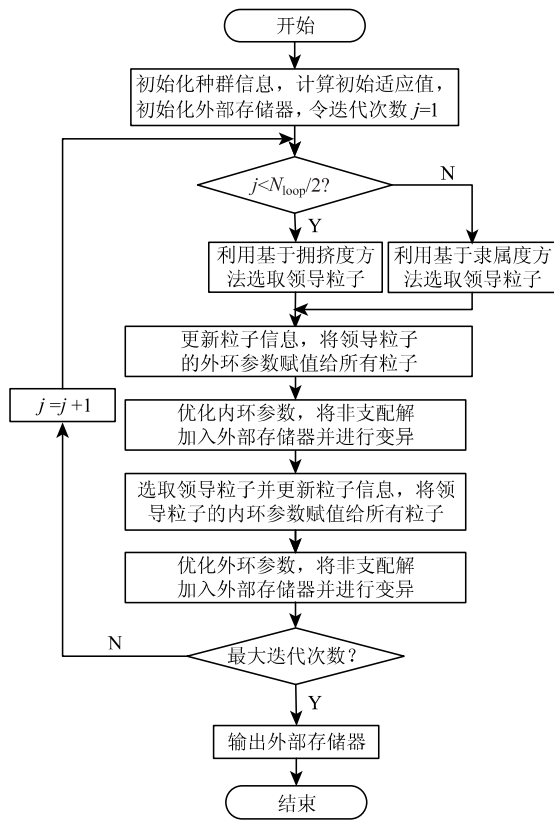


图 3 控制参数优化流程

Fig. 3 Process of control parameter optimization

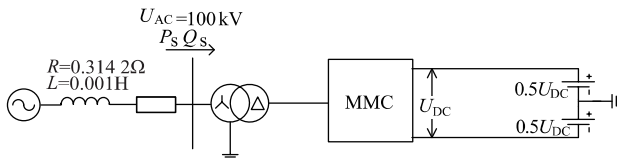


图 4 MMC-HVDC 系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of MMC-HVDC

联结变压器、桥臂电抗、每个桥臂半桥子模块个数、子模块电容等的参数如表 1 所示。

表 1 MMC-HVDC 模型参数设置
Tab 1 Parameters for MMC-HVDC

名称	参数
联结变压器变比/kV	100/110
联结变压器额定容量/MVA	1 380
联结变压器漏抗/pu	0.14
单个桥臂子模块个数	100
子模块电容值/F	0.03
桥臂电抗值/H	0.007

采用最近电平逼近调制策略，并且对子模块电容电压和桥臂环流加以控制。本文桥臂环流抑制策

略使用文献 [17] 提出的谐振控制器，其对二次谐波和四次谐波抑制的传递函数分别为 $sK_2/(s^2 + (2 \times \omega_0))$ 和 $sK_4/(s^2 + (2 \times \omega_0))$ ， K_2 和 K_4 的取值分别为 400 和 200。桥臂模型选用半桥详细等效模型，联结变压器网侧绕组采用星型接法，阀侧绕组采用三角型接法。仿真运行时间和适应值函数的动态过程时间均为 2 s。

试验中设置 6 个 PSCAD/EMTDC 仿真程序分布于 3 台主频为 3GHz、内存为 8G 的计算机上，在其中 1 台计算机上运行 MATLAB 控制参数寻优算法，完成 MATLAB 与多个 PSCAD/EMTDC 之间的数据交互和联合调用。改进 MOPSO 算法的参数设置为种群规模、外部存储器规模和迭代次数均为 100，更新公式中的参数为 $c_1 = c_2 = 1.4$ ， $\omega = 1.0$ 。

4.2 评价指标对比分析

为验证本文提出的改进算法的性能，选用基本 MOPSO 算法和带精英策略的非支配排序多目标遗传算法 (fast and elitist non-dominated sorting in genetic algorithm, NSGA-II) 进行对比，设置 3 种算法均获得 100 个 Pareto 解集，迭代 100 次，同时，设置 NSGA-II 算法的交叉率为 0.8，变异率为 0.2。对比结果如表 2 所示。

表 2 优化前后评价指标对比

Tab 2 Comparison of objectives between before and after optimization

算法	P_{ITAE}	Q_{ITAE}	I_{ITAE}
优化前	435.1	188.6	149.7
基本算法	适应值范围 [18.4, 2.279]	[14.7, 6.0]	[17.2, 2.9.6]
同时优化	优化程度 >36%	>68%	>80%
NSGA-II	适应值范围 [30.1, 2.76]	[14.7, 9.3.5]	[17.1, 2.4.2]
算法	优化程度 >37%	>50%	>84%
改进算法	适应值范围 [17.2, 3.9.1]	[14.5, 8.4.0]	[16.8, 1.9.0]
分层优化	优化程度 >91%	>56%	>87%

适应值范围由外部存储器中粒子每一维适应值的最大值和最小值确定，优化程度由适应值范围的上界计算得到。通过对比结果可以看出，3 种优化方法均可以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多目标粒子群算法的 MMC-HVDC 控制器 PI 参数分层优化方法的优化程度高于基本 MOPSO 算法和 NSGA-II 算法。

表3列出了优化前控制参数的整定值与采用不同优化方法所得的控制参数的参数值,整定值基于文献[18]所述方法计算得到,表中所列的优化结果是在外部存储器中采用如前所述的隶属度函数方法选取的典型值。

本文将3种优化方法的寻优过程进行对比,其适应值的收敛曲线如图5所示。可以看出,3种优化方法均产生了良好的优化效果,改进优化方法的优化性能较佳。

表3 优化前后控制参数对比

Tab 3 Comparison of control parameters between before and after optimization

参数	优化前	基本算法同时优化	NSGA-II算法同时优化	改进算法分层优化
K_{Pd}	1.000 0	1.614 6	6.975 8	8.669 4
K_{Id}	0.050 0	0.036 3	0.007 5	0.017 7
K_{Pq}	2.000 0	2.857 3	0.535 1	8.211 0
K_{Iq}	0.050 0	0.012 7	0.002 8	0.006 3
K_P	0.500 0	5.828 3	5.375 8	2.298 7
K_I	0.040 0	0.002 3	0.002 4	0.000 2

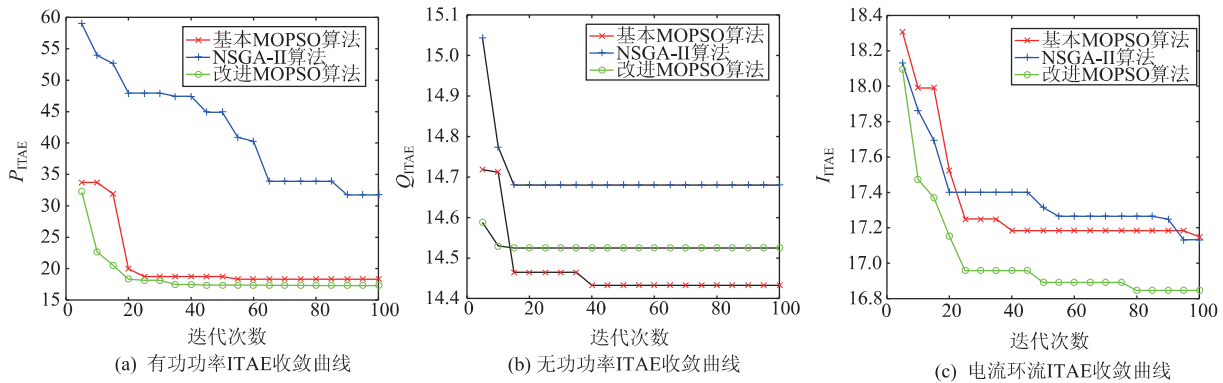


图5 适应值收敛曲线

Fig 5 Fitness convergence curves

4.3 仿真结果对比

将仿真算例中待优化的参数修改为表3中优化出的参数,设置不同故障并观察暂态响应,以此验证本文算法的有效性。

设置仿真模型在2s时交流侧母线电压降低为0.85p.u.,故障持续0.1s,分别对有功功率、无功功率和A相桥臂环流的波形进行对比,如图6~图8所示。通过对比可以看出,本文提出的改进优化方法可以使得有功功率和无功功率的调整时间减少,同时使超调量更低,在稳态和暂态过程中

均能将环流抑制在非常小的范围内。

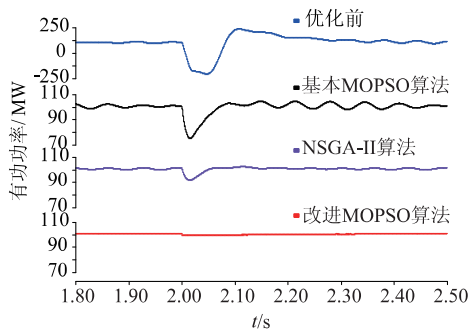


图6 交流电压下降时有功功率对比

Fig 6 Active power comparison with the AC voltage drop

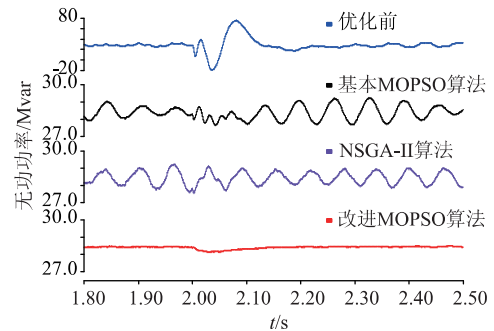


图7 交流电压下降时无功功率对比

Fig 7 Reactive power comparison with the AC voltage drop

设置仿真模型在2s时有功功率整定值降低为80MW,分别对有功功率、无功功率和A相桥臂环流的波形进行对比,如图9~图11所示。通过对比可以看出,在有功功率参考值改变的暂态响应中,本文提出的改进优化方法可以使得有功功率的调整时间减少,同时使超调量更低,在稳态和暂态过程中均能将无功功率的波动和环流抑制在非常小的范围内。

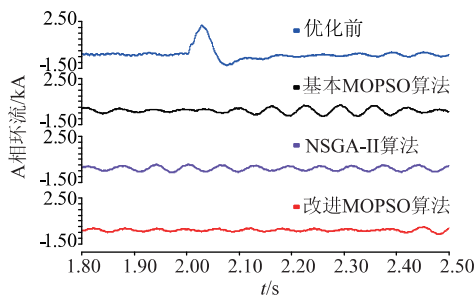


图 8 交流电压下降时 A 相环流对比

Fig 8 Circulating current comparison of phase A with the AC voltage drop

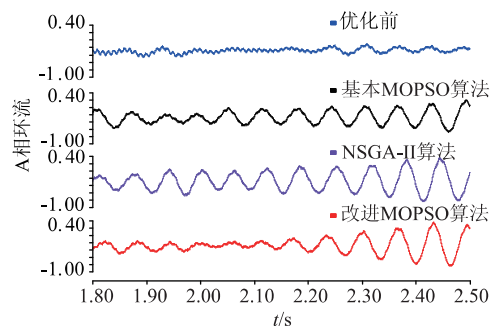


图 11 有功功率下降时 A 相环流对比

Fig 11 Circulating current comparison of phase A with the active power drop

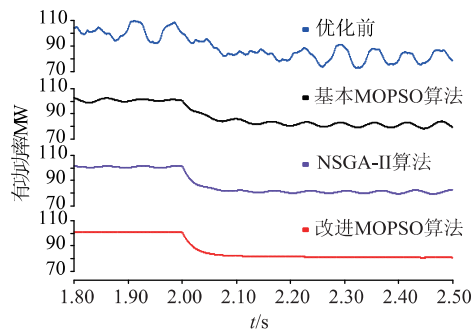


图 9 有功功率下降时有功功率对比

Fig 9 Active power comparison with the active power drop

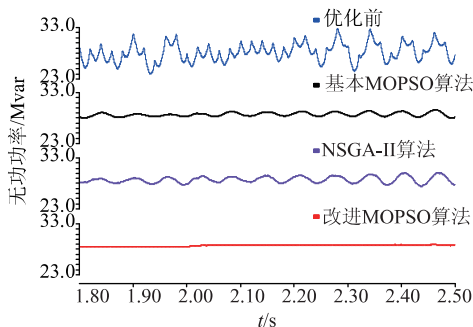


图 10 有功功率下降时无功功率对比

Fig 10 Reactive power comparison with the active power drop

5 结束语

本文提出了一种采用改进 MOPSO 算法对 MMC-HVDC 控制器 PI 参数进行分层优化的方法，实现了 MATLAB 与 PSCAD/EMTDC 之间的联合调用和数据交互。在优化算法方面，该改进方法对外部存储器中的非支配解进行变异操作并更新外部存储器，进而添加一种基于隶属度函数的领导粒子选取方法，与基于拥挤度的领导粒子选取方法分阶段使用，提高了算法全局寻优的能力，

改善了算法的收敛性能；在优化方式方面，对内外环控制参数进行分层优化，从而适应控制系统的设计结构。仿真结果表明本文提出的方法可以同时改善算法性能和 MMC 的动态响应，从而验证了本文方法的有效性和实用性。

参 考 文 献

[1] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37 (15): 3-14.

[2] 颜楠楠, 傅正财. 基于多目标粒子群优化算法的 UPFC 协调控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 43-48.
YAN Nannan, FU Zhengcai. Coordinated design of UPFC based on multi-objective particle swarm optimization [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 43-48.

[3] 曾鸣, 杨雍琦, 向红伟, 等. 兼容需求侧资源的“源-网-荷-储”协调优化调度模型 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 102-111.
ZENG Ming, YANG Yongqi, XIANG Hongwei, et al. Optimal dispatch model based on coordination between “generation-grid-load-energy storage” and demand-side resource [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36 (2): 102-111.

[4] 卢锦玲, 苗雨阳, 张成相, 等. 基于改进多目标粒子群算法的含风电场电力系统优化调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 25-31.
LU Jinling, MIAO Yuyang, ZHANG Chengxiang, et al. Power system optimal dispatch considering

- wind farms based on improved multi-objective particle swarm algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 25-31.
- [5] KITAMURA S, MORI K, SHINDO S, et al. Multi-objective energy management system using modified MOPSO [C] //IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE, 2005, 4: 3497-3503.
- [6] LAIFA A, BOUDOUR M. FACTS allocation for power systems voltage stability enhancement using MOPSO [C] //IEEE SSD 2008. 5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, IEEE, 2008: 1-6.
- [7] 卢扬, 吴俊勇, 郝亮亮. 基于改进 MOBPSO 算法的含分布式电源的多目标配电网重构 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 62-68.
LU Yang, WU Junyong, HAO Liangliang. Multi-objective distribution network reconfiguration with distributed generations based on improved MOBPSO algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44 (7): 62-68.
- [8] 李燕青, 李浩闪. 考虑环境约束的电力系统动态经济平稳调度 [J]. 现代电力, 2014, 31(6): 35-39.
LI Yanqing, LI Haoshan. Dynamic steady economic dispatching model by considering environmental constraints [J]. Modern Electric Power, 2014, 31 (6): 35-39.
- [9] 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.
REN Jianwen, WEI Junjiao, GU Yufeng. Preventive control based on multi-objective particle swarm optimization algorithm for cascading trips [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36 (7): 53-59.
- [10] 管敏渊, 徐政. 模块化多电平换流器型直流输电的建模与控制 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 64-68.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter in HVDC transmission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 64-68.
- [11] 宋平岗, 罗剑, 游小辉, 等. 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统控制策略研究 [J]. 现代电力, 2017, 34(1): 55-61.
SONG Pinggang, LUO Jian, YOU Xiaohui, et al. Research on control strategy of multi-terminal HVDC based on MMC [J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1): 55-61.
- [12] 罗程, 赵成勇, 张宝顺, 等. 基于 MMC 的柔性直流输电站级控制器的设计及其动模实验 [J]. 现代电力, 2015, 32(2): 64-69.
LUO Cheng, ZHAO Chengyong, ZHANG Baoshun, et al. The design of station controller of flexible HVDC based on MMC and its dynamic simulation experiment [J]. Modern Electric Power, 2015, 32(2): 64-69.
- [13] GUAN M, XU Z. Modeling and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(12): 4858-4867.
- [14] 郭捷. 模块化多电平换流器在 HVDC 应用的若干关键问题研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [15] COELLO C A, PULIDO C G T, LECHUGA M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.
- [16] 徐峰, 李东海, 薛亚丽. 基于 ITAE 指标的 PID 参数整定方法比较研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 207-211.
XU Feng, LI Donghai, XUE Yali. Comparing and optimum seeking of PID tuning methods based on ITAE index [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (8): 207-211.
- [17] LI Zixin, WANG Ping, CHU Zunfang, et al. An inner current suppressing method for modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 4873-4879.
- [18] 杨汾艳, 徐政, 张静. 直流输电比例-积分控制器的参数优化 [J]. 电网技术, 2006, 30(11): 15-20.
YANG Fenyan, XU Zheng, ZHANG Jing. Study on parameter optimization of HVDC PI controllers [J]. Power System Technology, 2006, 30 (11): 15-20.

收稿日期: 2017-06-27

作者简介:

谢国超(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电系统控制策略, E-mail: xieguochao@gmail.com;

刘崇茹(1977—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为交直流混合系统分析与仿真、运行与控制, E-mail: chongru.liu@ncepu.edu.cn.

(责任编辑: 林海文)