

DOI: 10.7667/PSPC160656

基于改进 MOPSO 的 MMC 控制参数多机联合优化

林雪华¹, 洪国巍², 郭琦¹, 李岩¹, 谢国超², 刘崇茹²

(1. 南方电网科学研究院(南方电网仿真重点实验室), 广东 广州 510080;

2. 华北电力大学(新能源电力系统国家重点实验室), 北京 102206)

摘要: 在模块化多电平换流器中, 控制系统性能对控制器参数依赖性很强。选择合适的控制参数需要大量的调试, 严重影响了系统控制器的设计效率。首先分析了模块化多电平换流器控制策略, 对控制系统进行了模块化划分。为了适应模块化多电平换流器控制参数优化, 加入状态评估来动态适应运动参数, 以改进多目标粒子群算法。将优化算法与电磁暂态仿真程序结合, 利用电磁暂态仿真软件计算适应值。实现了 Matlab 优化程序调用 PSCAD, 仿真结果验证了该方法在模块化多电平换流器控制参数优化中的有效性。

关键词: 模块化多电平; 控制参数优化; 多目标优化; 粒子群算法; 进化状态; 均匀实验设计

Multi-machine joint parameters optimization of MMC controller based on improved MOPSO

LIN Xuehua¹, HONG Guowei², GUO Qi¹, LI Yan¹, XIE Guochao², LIU Chongru²

(1. EPRI of China Southern Power Grid (CSG Key Laboratory for Power System Simulation), Guangzhou 510080, China;

2. North China Electric Power University (State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources), Beijing 102206, China)

Abstract: In modular multilevel converters, the performance of control system strongly depends on the control parameters. It requires a significant amount of testing and debugging to get proper control parameters, which seriously affects the efficiency of controllers. The control strategy of MMC is analyzed and the control system is divided based on the functions. In order to adjust the parameters optimization of MMC controller, the evolutionary state assessment to adjust the PSO parameters is involved, which is to improve the MOPSO algorithm. The electromagnetic transient simulation program is linked to the proposed improved MOPSO to give the results of the optimization objective. This paper realizes the joint invocation between PSCAD and Matlab program, simulation results proof the effectiveness of the proposed method in the parameters optimization of MMC controller.

This work is supported by China Southern Power Grid Science and Technology Program: Key Technologies and Engineering Application Research of High-capacity VSC-HVDC (No. CSGTRC-K142031).

Key words: modular multilevel converter (MMC); optimizing parameters of controllers; multi-objective optimization; particle swarm optimization (PSO); evolutionary status; uniform design

0 引言

模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 是一种新型的电压源型换流器 (Voltage Source Converter, VSC), 模块化的结构使其不仅保留了传统 VSC 的优点, 比如独立的有功无功功率快速控制、向弱交流系统或无源系统供电等,

而且具备输出谐波含量少、模块化冗余性等优势, 特别适用于高电压大容量输电。然而子模块级联的拓扑使其控制系统的协调控制变得复杂。比如, 对数目众多的子模块电容电压进行均衡控制, 对每个子模块进行测量、驱动和保护, 对相单元间环流进行抑制控制等。控制系统对 MMC-HVDC 系统的动态性能至关重要, 其控制系统通常由多个比例积分 (PI) 控制器或谐振控制器等构成, 各控制器之间相互影响。在对 MMC 系统控制器进行设计优化时, 为选择合适的控制参数, 需要对较多的参数进行调

基金项目: 南方电网科技项目: 大容量高电压柔性直流输电关键技术及工程应用研究 (CSGTRC-K142031)

试, 如何快速选取合适的控制参数是一个亟待解决的问题。

控制参数优化常用的整定技术主要有两类: 试验优化和算法优化。试验优化属于直接优化, 是一种全局优化方法, 它是在最优化思想的指导下, 通过广义试验进行最优设计^[1]; 算法优化是通过优化算法对优化对象的数学模型进行优化, 优化算法包括确定型算法和概率型算法^[2], 确定型算法主要包括单纯形法、梯度信息法和爬山法等。文献[3]利用单纯形法的优化模块在 PSCAD 中对 VSC-HVDC 系统的控制参数进行了优化, 但如果优化对象为非连续的、高阶的系统, 确定型算法很容易陷入局部极值。MMC 的数学模型具有非线性、离散性和高阶性的特点, 其中含有的大量电力电子开关和电容等非线性元件, 使得确定型算法无法适用。概率型算法主要有粒子群算法、禁忌搜索、遗传算法等, 其核心优势是引入了跳出局部极值的机制, 利用了搜索中的随机性。文献[4-5]提出的优化 HVDC 控制系统的算法, 分别利用了遗传算法和粒子群算法。文献[6]提出的基于正交优选的粒子群算法, 集中了算法优化和试验优化的优点。

MMC 控制系统具有多目标特征, 既需要对有功和无功类物理量进行独立控制, 又要完成大量电容电压均衡控制及相间环流抑制控制。因此, 在对其进行参数优化时, 单纯的线性加权并不能准确表达其系统特性, 有必要引进多目标优化算法。另一方面, 传统优化算法在解决非线性、高阶问题时容易陷入局部极值, 而 MMC 控制系统功能模块多, 各控制器参数相互作用, 需要对粒子运动参数进行修正。本文基于种群的进化状态评估, 使算法在收敛状态更趋于“开采”, 在停滞状态更趋于“开发”, 有利于优化 MMC 参数。最后验证了本文算法的有效性。

1 MMC 控制系统

本文根据控制系统的控制对象和功能, 并针对多目标优化算法的特点, 将 MMC 换流站控制系统进行划分, 分为如图 1 所示的 4 个模块, 包括: 电压功率控制模块、环流抑制模块、电容电压均衡模块和调制模块。

1.1 电压功率控制模块

与传统 VSC 站级控制相似, MMC 的电压功率控制模块在实际工程中多采用矢量控制, 形成 dq 解耦的内环电流控制和外环输出控制。系统控制模块的输出指令给定外环输出控制的控制目标, 包括 d 轴的直流电压或有功功率 q 轴的交流电压或无功

功率。图 2 为单端 MMC 系统定有功功率和定无功功率控制系统框图。

对于外环控制器, d 轴和 q 轴的传递函数分别为 $K_{PP}+K_{IP}/s$ 和 $K_{PQ}+K_{IQ}/s$ 。为简化分析, 认为换流器交流侧电压的 dq 轴分量近似等于内环控制器输出的 dq 轴电压参考值, 即 $v_d \approx v_{dref}$, $v_q \approx v_{qref}$, 则内环控制器的 d 轴和 q 轴的传递函数相同^[7], 因此, 对于内环控制器, d 轴和 q 轴可以选择使用同样的参数, 其传递函数为 K_P+K_I/s 。从而, 对于电压功率控制模块, 比例积分控制器参数为 6 个, 包括外环控制器控制参数 K_{PP} 、 K_{IP} 、 K_{PQ} 、 K_{IQ} 和内环控制器控制参数 K_P 、 K_I 。

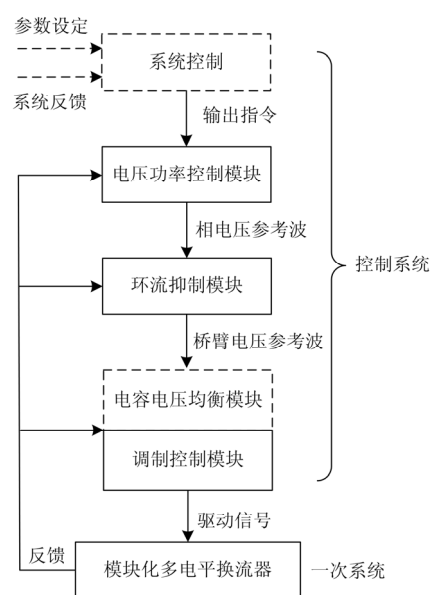


图 1 控制系统模块结构

Fig. 1 Structure of MMC control

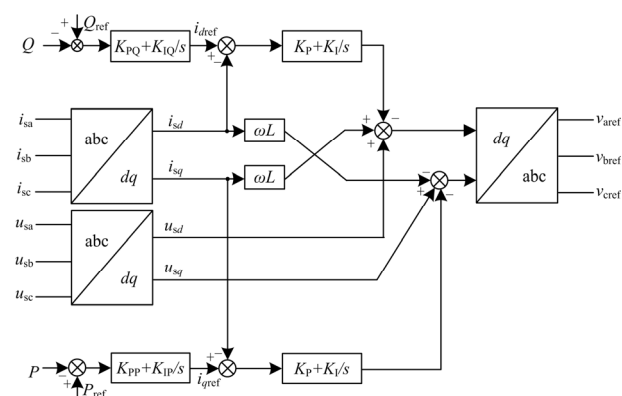


图 2 电压功率控制模块控制系统图

Fig. 2 Control system of voltage power control module

1.2 环流抑制模块

MMC 换流器内部相间环流是由各个相单元之

间电压不完全相同所造成的，包含可控分量和不可控分量^[8]。可控分量会增大桥臂电流的有效值，增大器件损耗，环流抑制的作用就是通过控制手段对可控分量进行抑制，其控制系统框图如图 3 所示。本文选择采用文献[9]所述的环流抑制控制方式，其控制系统通过谐振控制器抑制环流的二次和四次谐波，其传递函数为 $\frac{sK_{R_2}}{s^2 + (2 \times \omega_0)}$ 和 $\frac{sK_{R_4}}{s^2 + (4 \times \omega_0)}$ 。

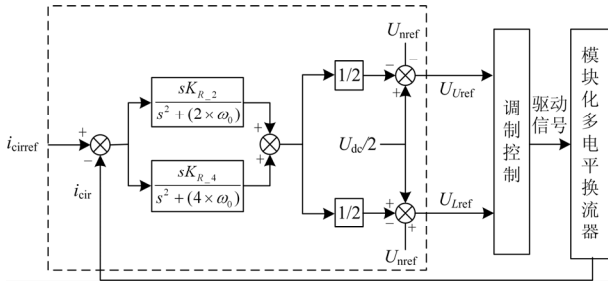


图 3 环流抑制模块控制系统图

Fig. 3 Control system of loop current suppression module

在三相系统对称运行时，三相的环流抑制模块的谐振控制器参数也相同。因此，环流抑制模块中二次和四次谐振控制器参数，对于一端的换流站来说各自只有 1 个，分别为 K_{R_2} 和 K_{R_4} 。

1.3 电容电压均衡模块和调制模块

最近电平逼近(Near Level Control, NLM)调制计算简便，对硬件要求低，因此在高电平 MMC-HVDC 系统实际工程应用中广泛采用该方案。NLM 调制策略根据调制波获得需要的电平数，使换流器的桥臂电压逼近参考值，而子模块具体的投切状态由选择性投切策略决定。基于 NLM 调制的电压均衡策略，是根据子模块电容电压和桥臂电流方向投入相应个数的子模块，从而保证了电容电压的均衡。在调制模块和电容电压均衡模块中不存在控制参数，无需对控制目标建立适应度函数。

2 基于进化状态的多目标粒子群算法

2.1 多目标优化问题

假设存在优化问题，其决策目标变量个数为 k ，决策变量个数为 n ，则其可表示为

$$\min y = F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)) \quad (1)$$

式中： x 为 n 维决策变量； y 为 k 维的目标变量。其中 y 为决策目标变量，维数为 k ； x 为决策变量，维数为 n 。

假设 1 (支配性)。 $v = (v_1, v_2, \dots, v_k)$ 由目标向量 $u = (u_1, u_2, \dots, u_k)$ 支配，其具体含义为：当且仅当 $u_i \leq v_i, \forall i=1, 2, \dots, k$ 且 $\exists j=1, 2, \dots, k$ ，使 $u_j < v_j$ 。

在多目标优化中得到的 Pareto 最优解集，通常是在多目标问题中进行取舍，得到的 Pareto 最优解集。

2.2 自适应网格多目标粒子群算法

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)的原理是：由相当数量的粒子组成种群，在种群进化中，粒子之间的信息相互交流。种群的第 t 次进化迭代公式中，粒子的速度与位置公式为

$$\begin{cases} v_{id}^t = \omega \times v_{id}^{t-1} + c_1 \times r \times (p_{best}^{t-1} - p_{id}^{t-1}) + \\ c_2 \times r \times (g_{best}^{t-1} - g_{id}^{t-1}) \\ p_{id}^t = p_{id}^{t-1} + v_{id}^t \end{cases} \quad (2)$$

式中： i 为粒子序号； d 为粒子维数； c_1 和 c_2 为加速因数； ω 为惯性系数； v_{id} 是粒子速度； r 是均匀分布的随机数，且 r 属于 $[0,1]$ 。

粒子群算法因其计算逻辑简单，收敛性良好，且参数设置较少而得到广泛应用^[10-13]。在众多的多目标粒子群算法中较为经典的为 Coello 的 MOPSO 算法^[14]，其采用自适应网格机制的外部存储器作为精英保留策略^[15]。

MOPSO 算法所采用的自适应网格法可以使外部存储器中的解集保持多样性。但是，若将其直接应用于 MMC 的控制器参数优化中存在以下问题。

1) 在 MMC 中含有较多的控制参数，这就造成了搜索空间维度增大，降低了搜索效率。而且初始分布范围越广，分布越均匀^[16]，则全局优化效果越好。但是，在传统的算法中，其初始化过程是随机的，无法满足初始种群的均匀性与广阔性，从而会使后续搜索效果变差。

2) 在 MMC 中，控制目标与控制参数之间存在相互影响，所以粒子群算法的快速收敛性容易使 MMC 的参数优化陷入局部极值。

3) MMC 系统较复杂，其适应值无法直接通过函数表示，需要从 PSCAD/EMTDC 的计算结果中取得。所以，需要将优化过程与 PSCAD/EMTDC 的计算过程相结合，以达到优化目标。

2.3 多目标粒子群算法的改进

针对 MOPSO 算法在 MMC 参数优化中的局限性，本文提出了一种改进的多目标粒子群算法。其主要包括以下两部分。

1) 将试验设计优化方法-均匀试验设计应用于初始分布设计中。均匀试验设计是一种部分因子设计，其能够保证选出的点具有整齐、均匀的特点。在种群粒子位置初始化中，使用该方法能够保证初始分布的均匀性^[16]。

2) 将进化状态评估应用到自适应网格法中, 能够调节运动方程的参数以控制“开发”与“开采”的过程。

依据加入外部存储器中的粒子特征的不同, 对种群迭代过程分类。

1) 收敛状态: 在进行第 t 次迭代时, 若外部存储器中的部分旧解被新解支配, 或者外部存储器中的 Pareto 解集个数增加, 则解集在向真实的 Pareto 解逼近, 此时种群迭代过程处于收敛状态。

2) 多样化状态: 在进行第 t 次迭代时, 存储器中的粒子数量已饱和, 此时得到的新解与旧解无支配关系。此时通过自适应网格法选出适应多样性更好的解代替旧解, 增加了算法的多样性。此时种群迭代过程处于多样化状态。

3) 停滞状态: 在进行第 t 次迭代时, 得到的新解无法支配旧解, 或者新解的适应多样性比旧解更差时, 新解不加入外部存储器。此时种群迭代过程处于停滞状态。

种群的进化状态的流程图如图 4 所示。种群迭代算法得到新非支配解称为新解, 求取新解与存储器中旧解的支配属性, 记其中非支配解的个数为 N 。若存储器中的旧解有被新解支配的情况, 意味着新解的粒子支配旧解的粒子, 此时种群处于进化状态。当新解与旧解之间无支配情况时, 判断 N 是否与存储器中的粒子个数 $NumRep$ 相等。若 $N=NumRep$, 则表示存储器中无新解加入, 此时种群处于停滞状

态。当 $N \neq NumRep$ 时, 判断外部存储器是否饱和。若未饱和, 则新解中的粒子加入外部存储器, 此时处于收敛状态; 若饱和, 则通过自适应网格法删除多余粒子, 再检验是否仍然有新解存在, 若存在, 则将新解加入存储器, 否则种群处于停滞状态。

收敛状态的运动参数计算如式(5)所示, 多样化状态的运动参数计算如式(4)所示, 停滞状态运动参数计算如式(3)所示, 使种群在多样性状态和停滞状态更趋于“开发”, 而收敛状态更趋于“开采”。

$$\begin{cases} \omega(t) = \omega(t-1) \\ c_1(t) = c_1(t-1) \\ c_2(t) = c_2(t-1) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \omega(t) = \omega(t-1) - 2\Delta_\omega \\ c_1(t) = c_1(t-1) - 2\Delta_{c_1} \\ c_2(t) = c_2(t-1) + 2\Delta_{c_2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \omega(t) = \omega(t-1) + \Delta_\omega \\ c_1(t) = c_1(t-1) + \Delta_{c_1} \\ c_2(t) = c_2(t-1) - \Delta_{c_2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Delta_\omega = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / MaxLoop \\ \Delta_{c_1} = (c_{1\max} - c_{1\min}) / MaxLoop \\ \Delta_{c_2} = (c_{2\max} - c_{2\min}) / MaxLoop \end{cases} \quad (6)$$

3 基于粒子群算法的控制参数优化

3.1 控制参数优化的评价指标

控制参数优化的目的是在参数的变化范围内找到一组 PI 值使控制系统稳定并使相应的目标函数值最小。除去单一性能指标, 动态误差泛函积分评价指标中 ITAE(Integrated Time and Absolute Error) 是评价控制系统性能优良程度的综合指标, 具有较好的选择性和实用性, 其控制目标的函数表达式为

$$F = \int_0^T (t \times |y_{\text{ref}} - y|) dt \quad (7)$$

模块化多电平换流器中, 电压功率控制模块的外环输出为 d 轴的直流电压 U_{dc} 或有功功率 P 和 q 轴的交流电压 U_{ac} 或无功功率 Q , 所以对应的评价指标是 U_{dcITAE} 或 P_{ITAE} 和 U_{acITAE} 或 Q_{ITAE} 。环流抑制模块的控制目标是环流 I_{cir} 的大小, 其评价指标为 $I_{cirITAE}$, 所以粒子的适应值为三维目标向量。

3.2 适应值计算

本文的改进多目标粒子群算法在 Matlab 软件中实现, 适应值的计算通过 PSCAD 运行电磁暂态程序得到。将 Matlab 得到的每一组控制参数通过联

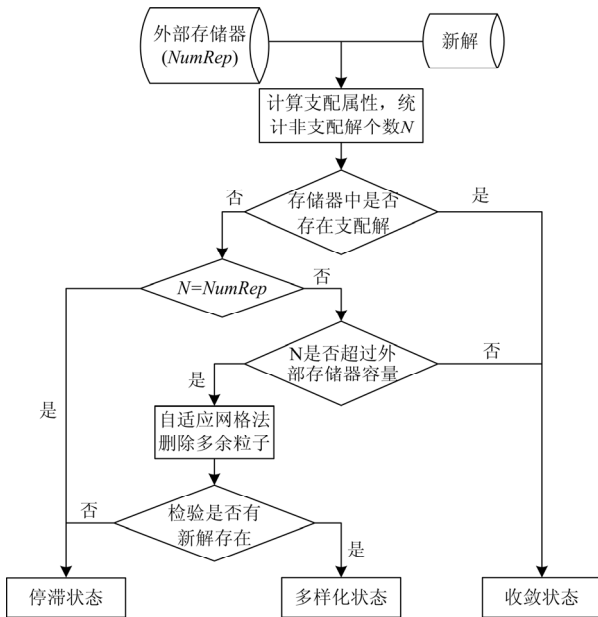


图 4 粒子结构体和进化状态评估

Fig. 4 Particle structure and evolution state assessment

合调用函数传递给 PSCAD 进行仿真，从而计算出适应值。因此，适应值的计算过程适应了 MMC 系统的非线性、离散性和高阶性等特点。然而 PSCAD 运行仿真程序时间较长，使算法的寻优效率下降。

为了缩短寻优时间从而提高寻优效率，本文在 PSCAD 中编写了自定义模块用于与 Matlab 联合调用，在 Matlab 中编写函数实现与多台计算机的通信，利用局域网构建了 PSCAD 分布式计算机群，用以同时计算种群中多个粒子的适应值，从而大大减少粒子适应值的计算时间。

3.3 算法流程

图 5 为本文改进多目标粒子群算法的控制参数优化过程。整体算法的过程如下。

步骤 1：设置惯性权重和加速因子等参数数值；

步骤 2：在参数优化范围内，使用均匀试验设计表初始化粒子种群的位置；

步骤 3：利用联合调用函数调用 PSCAD 来计算适应值，确定粒子初始的个体最优值，计算粒子的支配属性，将其非支配解存储到外部存储器中；

步骤 4：在外部存储器中选取全局最优值，根据更新公式调整粒子的速度和位置；

步骤 5：计算调整后种群粒子的适应值，更新粒子个体最优值，更新粒子的支配属性；

步骤 6：利用自适应网格法，将新种群中的非支配解加入到外部存储器中，进行进化状态评估，并按照式(3)—式(6)调整粒子的运动参数；

步骤 7：检测算法终止条件，若条件满足则终止迭代输出结果；否则跳至步骤 4。

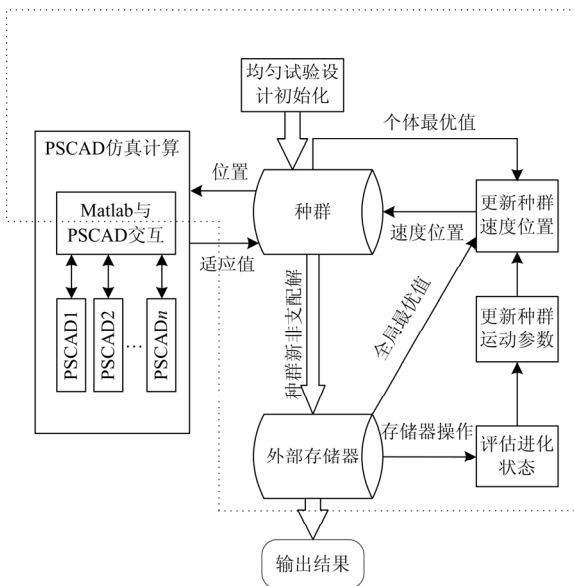


图 5 参数优化过程

Fig. 5 Process of parameter optimization

4 仿真实验分析

4.1 仿真模型

本文在 PSCAD/EMTDC 环境下，搭建了 101 电平的单端 MMC 系统，用以验证和分析改进多目标粒子群算法在 MMC 控制参数优化过程中的有效性。系统参数如图 6 所示。

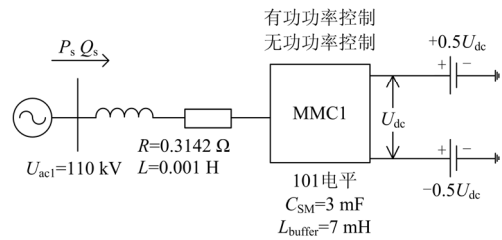


图 6 仿真模型参数

Fig. 6 Parameter of simulation model

MMC 电压功率控制模块选择定有功功率和定无功功率控制，设置有功功率参考值为 100 MW，无功功率参考值为 28 Mvar，桥臂电抗为 0.007 H。由于外环参数较多，在仿真研究和工程实际中调节困难，所以本文着重对外环参数进行优化，将内环参数和环流抑制参数设为定值， K_P 、 K_I 、 K_{R_2} 和 K_{R_4} 的取值分别为 2、0.01、400 和 200。所以，本文利用改进多目标粒子群算法，以有功功率、无功功率和环流的 ITAE 值组成的三维目标向量作为评价指标，对外环参数组成的四维参数向量同时进行参数优化。

由 3 台 8 G 内存，3 GHz 主频的计算机组成分布式计算机群，每台计算机上运行 PSCAD 电磁暂态仿真程序，设置其中一台计算机上运行 Matlab 优化主算法，实现 PSCAD 与 Matlab 之间的联合调用。将本文所述的改进 MOPSO 和 Coello 的经典 MOPSO 应用于 MMC 系统控制参数优化。其算法的运动参数设置为：种群数量设置为 100，外部存储器容量为 100，最大迭代次数设置为 200，运动参数为 $c_1=c_2=1.5$ ， $\omega=0.9$ 。

4.2 优化算法性能分析

两种算法优化过程中，使用 PSCAD 仿真计算 ITAE 指标消耗了绝大部分时间，优化耗时都在 20 小时左右。

用经典 MOPSO 和改进 MOPSO 算法对上述 MMC 控制系统参数进行优化，并与优化前的整定结果进行对比，优化前后 PI 参数如表 1 所示。整定结果基于文献[17]所述方法，首先根据 bode 图得出满足系统稳定裕度的 PI 参数范围并按照一定步长

进行划分,得到有限组 PI 参数,将此参数应用于电磁暂态仿真程序中,选取 ITAE 值最小的参数作为最优结果。

表 1 优化前后控制参数对比

Table 1 Comparison of control parameters between before and after optimization

参数	整定结果	经典 MOPSO	改进 MOPSO
K_{PP}	1	7.05	13.41
K_{IP}	0.05	0.004	0.032
K_{PQ}	2	5	5
K_{IQ}	0.05	0.02	0.054

表 2 对比了两种优化算法的效果,解集范围由解集中粒子适应值的最大值和最小值确定。通过 ITAE 评价指标的结果可知,两种算法优化的结果在性能上优于优化前的参数,而且改进 MOPSO 的优化程度更佳。

4.3 优化后参数控制效果对比

在 3 s 时设置系统交流侧发生故障,交流母线电压下降为基准值的 0.85 倍,故障持续时间为 0.1 s。为提高仿真速度,在 PSCAD 下使用 Fortran 语言编写了自定义模块以实现控制系统功能。

表 2 优化前后评价指标对比

Table 2 Comparison of objectives between before and after optimization

	P_{ITAE}	Q_{ITAE}	I_{chITAE}
整定结果	3.132	0.420	0.151
经典 MOPSO	解集范围 [0.681 0.909]	[0.166 0.247]	[0.038 0.094]
MOPSO	优化程度 >70%	>41%	>37%
改进 MOPSO	解集范围 [0.433 0.834]	[0.145 0.171]	[0.024 0.075]
MOPSO	优化程度 >76%	>65%	>50%

分别以 A 相环流、有功功率和无功功率的波形图来对比优化前的参数和经过经典 MOPSO 算法与改进 MOPSO 算法优化后的参数控制效果,如图 7—图 9 所示。由图可知,相对于经典 MOPSO 算法对控制系统动态性能的提高,改进 MOPSO 算法优化后的参数对控制系统动态性能的提高更佳显著。由环流抑制效果对比可知,改进算法使环流不仅在稳态时具有更小的波动范围,而且在暂态过程中也具有更小的波动范围。由有功功率和无功功率效果对比可知,改进算法具有更小的调整时间和更小的超调量,动态性能得到了显著的改善。

为了分析利用本文所述方法所得的 PI 参数在系统主电路参数改变时的控制效果,在 4 s 时设置系统主电路参数改变,使桥臂电抗从 0.007 H 改变为 0.07 H,故障持续时间为 0.1 s。图 10、图 11 分

别对比了桥臂电抗改变时有功功率和无功功率的波形图。

由图可知,桥臂电抗改变时,改进 MOPSO 所得结果可以获得更小的超调量和调整时间,对控制系统性能改善效果更明显,从而验证了本文所述方法的有效性。

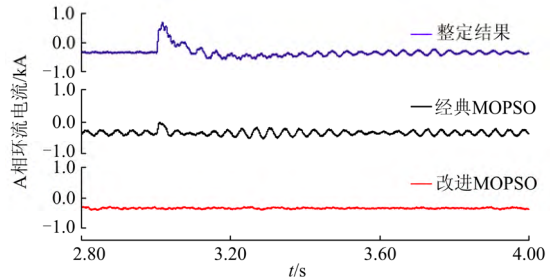


图 7 A 相环流对比

Fig. 7 Circulating current comparison of phase A

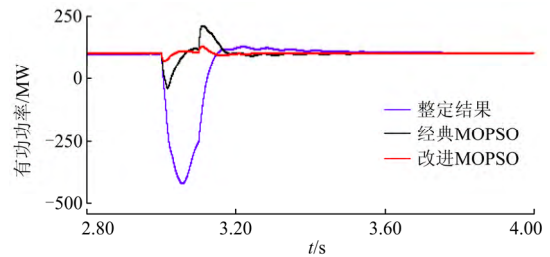


图 8 交流电压阶跃时有功功率对比

Fig. 8 Active power comparison with the step-change of AC voltage

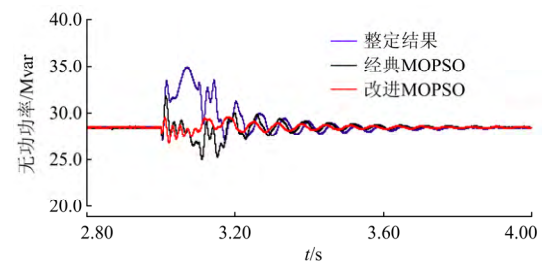


图 9 交流电压阶跃时无功功率对比

Fig. 9 Reactive power comparison with the step-change of AC voltage

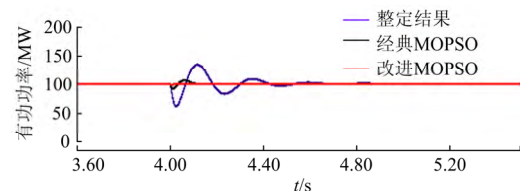


图 10 主电路参数改变时有功功率对比

Fig. 10 Active power comparison with the change of main circuit parameters

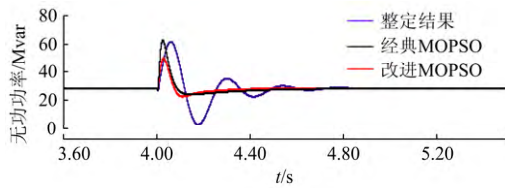


图 11 主电路参数改变时无功功率对比

Fig. 11 Reactive power comparison with the change of main circuit parameters

5 结语

本文将多目标粒子群算法应用于模块化多电平控制参数的优化,通过均匀试验设计初始化种群,并加入状态评估来动态适应运动参数,减少了算法局部收敛的可能性,提高了全局搜索能力,从而提高了多目标粒子群算法的性能。

实现了 Matlab 与 PSCAD 之间的联合调用,充分利用了 Matlab 的速度优势和 PSCAD 的精确仿真优势,同时建立 PSCAD 分布式计算机群以提高仿真速度。

与经典 MOPSO 相比,改进 MOPSO 使动态性能指标 P_{ITAE} 降低了 6%,使 Q_{ITAE} 降低了 24%,使 $I_{cirITAE}$ 降低了 13%,模块化多电平换流器的外特性得到明显的改善。仿真结果验证了本文所提方法的实用性和有效性。

参考文献

- [1] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 1-9.
- [2] 冯春时. 群智能优化算法及其应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
FENG Chunshi. Swarm intelligence optimization algorithms and their applications[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.
- [3] 郭春义, 赵成勇, 李广凯, 等. 基于 Simplex 算法的 VSC-HVDC 控制参数优化[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 13-17.
GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, LI Guangkai, et al. Control parameter optimization based on Simplex algorithm for VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(9): 13-17.
- [4] 喻锋, 王西田, 杨煜, 等. 一种混合遗传算法在 HVDC 定电流控制器参数优化中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 126-131.
YU Feng, WANG Xitian, YANG Yu, et al. An application of hybrid genetic algorithm in the parameters optimization of HVDC constant current controller[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 126-131.
- [5] 胡江, 魏星. 基于自适应粒子群算法的直流输电 PI 控制器参数优化[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 71-74.
HU Jiang, WEI Xing. Parameter optimization of HVDC technology PI controller based on adaptive particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 71-74.
- [6] 吴峰, 汪海洋, 金宇清, 等. 基于正交优选粒子群算法的双馈风电系统控制器参数优化整定[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 19-24.
WU Feng, WANG Haiyang, JIN Yuqing, et al. Parameter tuning of doubly fed induction generator systems for wind turbines based on orthogonal design and particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 19-24.
- [7] 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.
GUO Jie. Research on several issues in modular multilevel converter for HVDC application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [8] 杨晓峰, 郑琼林. 基于 MMC 环流模型的通用环流抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 59-65, 178.
YANG Xiaofeng, ZHENG T Q. A novel universal circulating current suppressing strategy based on the MMC circulating current model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 59-65, 178.
- [9] 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.
- [10] 文娟, 谭阳红, 雷可君. 基于量子粒子群算法多目标优化的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 73-78.
WEN Juan, TAN Yanghong, LEI Kejun. Multi-objective optimization of distribution network dynamic reconfiguration based on integer coded quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 73-78.
- [11] 吴辰斌, 李海明, 刘栋, 等. 一种改进型粒子群优化算法在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 44-48.
WU Chenbin, LI Haiming, LIU Dong, et al. Application of improved particle swarm optimization algorithm to power system economic load dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 44-48.
- [12] 潘超, 焦薇羽, 孟涛, 等. 基于混合智能粒子群算法的

- 广义电源主动配电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 69-75.
- PAN Chao, JIAO Weiyu, MENG Tao, et al. Optimal allocation of generalized power sources in active distribution network based on hybrid intelligent particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 69-75.
- [13] 李如意, 黄明山, 周东国, 等. 基于粒子群算法搜索的非侵入式电力负荷分解方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 30-36.
- LI Ruyi, HUANG Mingshan, ZHOU Dongguo, et al. Optimized nonintrusive load disaggregation method using particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 30-36.
- [14] COELLO C A C, PULIDO G T, LECHUGA M S, et al. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.
- [15] 徐鹤鸣. 多目标粒子群优化算法的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- XU Heming. Research on multiobjective particle swarm optimization algorithms[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [16] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀实验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 83-87.
- [17] 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: 2016-05-09; 修回日期: 2016-08-03

作者简介:

林雪华(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流仿真建模与控制保护技术研究; E-mail: linxh@csg.cn

洪国巍(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电系统; E-mail: livewukong@live.com

刘崇茹(1977-), 女, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为交直流混合系统分析、仿真、运行与控制。E-mail: chongru.liu@ncepu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)