

基于多目标优化的柔性交流输电装置 控制技术研究

李江成,陈晓华,李海涛,朱志旭

(国网江苏省电力有限公司淮安供电分公司,江苏 淮安 223002)

摘要:由于当前方法并未进行柔性交流输电装置控制参数寻优,导致控制结果不理想,控制延误和损耗上升,因此提出一种基于多目标优化的柔性交流输电装置控制方法。分析柔性交流输电装置的基本工作原理,通过换流器输出电压和电网关系获取柔性交流输电装置的无功功率传输特征和运行方式,以此搭建双环矢量控制器。采用多目标改进教与学算法(MOMTLA)对控制器参数 Pareto 解集进行寻优搜索,最终实现柔性交流输电装置控制。仿真实验结果表明,所提方法能够获取比较满意的控制结果,能够降低控制过程中产生的损耗延误。

关键词:多目标优化;柔性交流输电装置;控制技术;多目标改进教与学算法

中图分类号:TM712 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23925

Research on Control Technology of Flexible AC Transmission Device Based on Multi-objective Optimization

LI Jiangcheng, CHEN Xiaohua, LI Haitao, ZHU Zhixu

(Huai'an Power Supply Branch of the State Grid Jiangsu Province Electricity Co., Ltd.,
Huai'an 223002, Jiangsu, China)

Abstract: Because the current method does not optimize the control parameters of flexible AC transmission device, resulting in unsatisfactory control results, control delay and loss rise, a flexible AC transmission device control method based on multi-objective optimization was proposed. The basic working principle of flexible AC transmission device was analyzed. The reactive power transmission characteristics and operation mode of flexible AC transmission device were obtained through the relationship between converter output voltage and power grid, so as to build a double loop vector controller. The multi-objective modified teaching-learning algorithm(MOMTLA) was used to optimize the Pareto solution set of controller parameters, and finally realize the control of flexible AC transmission device. Simulation results show that the proposed method can obtain satisfactory control results and reduce the loss and delay in the control process.

Key words: multi-objective optimization; flexible AC transmission device; control technology; multi-objective modified teaching-learning algorithm(MOMTLA)

随着我国经济的迅猛发展,人们对电力的需求不断增加,因此现阶段需要根据我国能源的分布特征和相关负荷需求进行资源配置优化^[1-2]。到目前为止,在西部地区已经设置了多个水电和煤电等不同类型的能源基地,各种外送电力需求也开始增加,因此为了保证输电的稳定性,需要引入柔性交流输电装置。该装置可以克服输电电网的孤岛和弱电网供电、清洁能源并网难、电

能的大容量和远距离运输难、孤立电荷供电难等多种弱点,提升大规模并网情况下电力系统的电力传输能力,保证电力系统的安全稳定运行。

为了更好地实现柔性交流输电装置控制^[3],国内外相关专家给出了一些较好的研究成果。俞智鹏等人^[4]优先考虑不同场景下分布式静态串联补偿器(distributed static series compensator, DSSC)的优化配置,设定目标函数为最小阻塞程度,明

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1503000)

作者简介:李江成(1980—),男,硕士,高级工程师,Email:lidream12@163.com

确DSSC的配置地点和容量;根据DSSC的潮流控制能力对调度系统中的发电机进行优化控制。许云飞等人^[5]通过分析柔性交流输电装置工作在潮流控制时的有功/无功功率平衡,以此根据在统一潮流控制器内变流器的有功功率变化情况,实时改进前馈电流,最终完成控制器功率协调控制。徐飞等人^[6]通过分析动态输出反馈控制下的电力系统状态变化,利用阻尼比对该系统的稳定性进行调整,使电力系统可以一直保持着稳定状态,在此基础上,采用量子粒子群算法对柔性交流输电装置控制器参数进行优化,并将优化后的控制器接入柔性交流输电装置,以此达到供电稳定的最终目标。

在上述研究基础上,本文结合多目标优化算法,提出一种基于多目标优化的柔性交流输电装置控制方法。经实验测试证明,所提方法能够有效减少控制延误和损耗,使控制结果更加理想。

1 柔性交流输电装置控制

1.1 柔性交流输电装置控制器设计

作为串联型的柔性交流输电装置,静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)在线路上串入一电压,通过控制调整该电压的大小和相位实现对线路潮流的控制,从而保证系统的安全稳定运行。SSSC结构如图1所示。

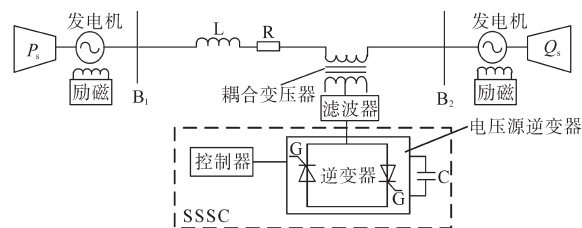


图1 SSSC结构

Fig.1 SSSC structure

SSSC结构主要包括控制器、电压源换流器、耦合变压器、直流电容器、滤波器、驱动电路等。图1中, P_s 、 Q_s 分别为系统的有功功率和无功功率, L 为电感, R 为线路的等效电阻, C 为直流侧电容, G 为逆变器, B_1 和 B_2 为不同的母线。

柔性交流输电装置的频率取值范围取决于可控电压对应的幅值,则该装置所对应的输出电流计算公式为

$$i = \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_c}{R + X} \quad (1)$$

式中: \dot{U}_s 、 \dot{U}_c 分别为电力系统的输入电压与输出

电压; X 为电阻器的等效电阻。

分析电路的相关知识,能够获取柔性交流输电装置的视在功率值,具体的计算式如下:

$$S_s = P_s + Q_s = \dot{U}_s i = \dot{U}_s \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_c}{R - X} \quad (2)$$

通常情况下,柔性交流输电装置在运行过程中只需要吸收一小部分有功功率,确保系统内的损耗可以实现下降;而换流器容量需要通过进行无功功率补偿。所以,说明 \dot{U}_c 和 \dot{U}_s 两者的相位是一致的。在实际运行的过程中,其他等效电阻明显低于联结变压器和电抗器的等效电阻,同时计算过程中不加入电阻,则柔性交流输电装置吸收的无功功率能够表示为

$$Q_s = \text{Im}(S_s) = \text{Im}\left(\dot{U}_s \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_c}{R - X}\right) = \dot{U}_s \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_c}{X} \quad (3)$$

结合上述分析,将控制目标进行划分,具体能够划分为电流控制策略和电压控制策略。

柔性交流输电装置控制并不能实现实时有功和无功类变量之间的解耦控制。所以,当输电装置的无功功率发生变化时,对应的相角也会发生变化,进而促使整个装置的电压也会受到影响从而产生变化。其中,输电装置的间接控制策略需要借助电力系统的电压幅值和相位实现^[7],同时还需要实现输电装置中电压和功率的间接控制。在上述分析的基础上,构建柔性交流输电装置控制器,控制器由上层控制、中层控制和下层控制组成,具体描述如下:

1)上层控制。上层控制负责对系统内的全部运行人员进行控制,同时还负责接收电力系统调度中心的调控指令,更好完成输电装置的启停控制以及指令值计算等。

2)中层控制。中层控制的指令来自上层,中层控制是为了更好完成输电装置的直流电压和操作方式转换等相关操作。

3)下层控制。通过硬件电路设计完成底层控制,整个过程十分简单,主要是利用中层控制的调制比 M 和相角 δ 形成触发脉冲,最终完成开关器件的触发,同时还能够实时监测开关器件状态。

1.2 基于多目标优化的柔性交流输电装置控制

智能优化算法是解决电力系统最优化问题的重要途径之一,主要采用多目标改进教与学算法进行柔性交流输电装置控制器参数寻优^[8-9]。整个搜索过程划分为三个阶段。

1) 导师教学搜索。针对教与学优化算法 (teaching-learning based optimization, TLBO) 的导师教学搜索设定为多目标扩展, 其中搜索过程可以采用下式:

$$\begin{cases} X_{ij}^{\text{new}} = X_{ij}^{\text{old}} + r(X^{\text{teacher}} - T_f M_j) \\ M_j = \frac{\{X_{1j}^{\text{old}}, X_{2j}^{\text{old}}, \dots, X_{ij}^{\text{old}}\}}{N_L} \end{cases} \quad (4)$$

式中: X_{ij}^{new} 为全新的搜索策略; X_{ij}^{old} 为传统的搜索策略; X^{teacher} 为教师搜索策略; i 为班级中 Learner 的数量; j 为 Learner 的综合学习能力数量; M_j 为第 j 门学科的平均成绩; N_L 为教师数量; r 为任意常数; T_f 取值为 0 或 1, 需要结合实际情况进行设定。

2) 小组互学搜索。MOMTLA 的小组互学搜索采用 TLBO 的搜索逻辑框架, 同时将两两互学改进为小组互学, 信息交流主要通过小组讨论的形式进行。其中, TLBO 的互学搜索在实际操作的过程中会发生早熟现象, 同时还非常容易陷入局部最优。所以, 需要在 MOMTLA 中加入一个随机判优过程, 同时根据随机数判定是否接受小组互学搜索的更新方案。经过多次目标拓展之后, MOMTLA 的小组互学搜索过程能够表示为

$$X_{ij}^{\text{new}} = X_{ij}^{\text{old}} + r_1 \left(\frac{X_{i_1j}^{\text{old}} + X_{i_2j}^{\text{old}}}{2} - X_{i_3j}^{\text{old}} \right) \quad (5)$$

$$\begin{cases} X_{ij}^{\text{new}} = X_{ij}^{\text{new}} \\ X_{ij}^{\text{new}} = X_{ij}^{\text{new}} + r_2 (X_{i_2j}^{\text{old}} - X_{i_1j}^{\text{old}}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 内的任意数; i_1, i_2, i_3 为在针对实际运行情况选取的三个 Learner。

3) 单机停止搜索。在多机协调控制中, 随机锁定一台装置的参数保持不变, 对剩余装置的参数继续进行优化设计。详细的搜索过程如下式:

$$\begin{cases} X_{i,m}^{\text{new}} = X_{i,m}^{\text{old}} \\ X_{i,n}^{\text{new}} = X_{i,n}^{\text{new}} + r_1 \cdot \text{sign}(r_2) \cdot (X_{i_2j}^{\text{old}} - X_{i_1j}^{\text{old}}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: m 为已经锁定的学习能力数量; n 为需要优化的学习能力数量。

在教与学算法中, Teacher 种群规模需要优先设定一个定值, 更好避免 Teacher 种群中的数据无限扩大^[10-11]。在处理多目标优化问题的过程中, 需要通过 Pareto 解尽可能均匀分布在 Pareto 最优解集内。所以, 通过基于模糊隶属度的自适应“圆空间”方法组建 Teacher 群体, 对最新形成的 Pareto 解进行筛选。基本思路就是确保 Teacher 群体中全部个体的非占有性前提下, 促使 Teacher 群体更加接近极值解, 详细的操作流程如图 2 所示。

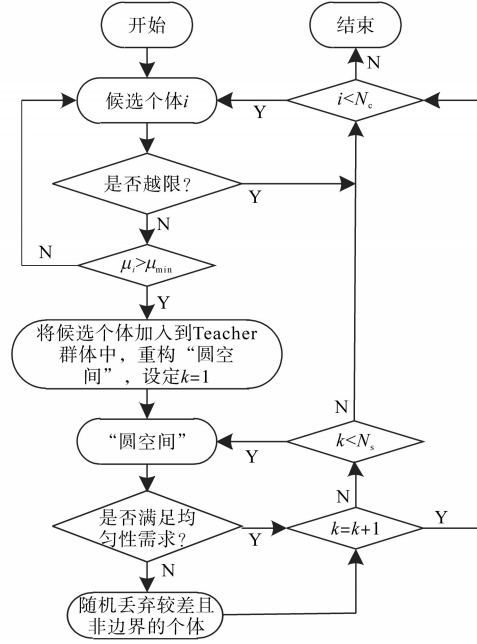


图2 Teacher群体的构建流程

Fig.2 Construction process of Teacher group

“圆空间”将通过圆内的数据变化进行圆半径自适应调整。圆半径的变化会导致函数空间中的“圆空间”需要重新分配^[12-13], 具体的目标函数为

$$u_{ij} = \begin{cases} 1 & f_j(X_i) \leq F_j^{\min} \\ \frac{F_j^{\max} - f_j(X_i)}{F_j^{\max} - F_j^{\min}} & F_j^{\min} \leq f_j(X_i) \leq F_j^{\max} \\ 0 & f_j(X_i) \geq F_j^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: F_j^{\min}, F_j^{\max} 分别为种群规模的最小值和最大值; $f_j(X_i)$ 为种群规模。

在教与学算法的教学搜索阶段, Teacher 主要引导 Learner 搜索 Pareto 解。以下将小生境技术的基础, 通过轮盘赌方法限定 Teacher 群体中的类似 Teacher 进入教学搜索阶段的概率。共享函数表示为

$$S_h(d_{lk}) = \begin{cases} 1 - \frac{d_{lk}}{\sigma_{\text{share}}} & d_{lk} < \sigma_{\text{share}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: S_h 为共享函数; σ_{share} 为小生境的半径; d_{lk} 为两个学习者 l, k 之间的海明距离。

Teacher 进入教学搜索阶段被选中概率和小生境数两者成反比, 具体的计算式如下:

$$p(i) = \frac{1 / \sum_{j=1}^{N_T} S_h(d_{lk})}{\sum_{i=1}^{N_T} [1 / \sum_{j=1}^{N_T} S_h(d_{lk})]} \quad (10)$$

式中: N_T 为 Teacher 群体中的单一个体总数; p 为

当选教学搜索阶段Teacher的概率。

结合上述分析,以下详细给出通过MOMTLA进行控制器参数Pareto解集寻优搜索的详细步骤:

- 1)通过控制器参数的解集空间和约束条件,对Learner群体进行初始化处理;
- 2)通过MOMTLA求解不同Learner群体中的目标函数,同时对Learner进行评估;
- 3)组建Teacher群体;
- 4)通过小生境技术的轮盘技术选取Teacher个体进入导师教学搜索;
- 5)进行MOMTLA搜索;
- 6)假设满足设定的终止条件,则停止计算,获取控制器参数的最优Pareto解集,得到最优控制参数,实现柔性交流输电装置控制^[14-15];反之,则跳转至步骤2)重复上述操作。

2 仿真实验

为了验证所提基于多目标优化的柔性交流输电装置控制技术的有效性,选择柔性交流输电系统中10个柔性交流输电装置进行实验测试,对这10种装置进行编号处理:晶闸管控制串联电容器(H₁)、晶闸管控制串联电抗器(H₂)、静止同步串联补偿器(H₃)、可控串联电容补偿器(H₄)、将静止无功补偿器(H₅)、晶闸管控制制动电阻器(H₆)、静止同步补偿器(H₇)、将静止调相器(H₈)、超导蓄能器(H₉)、固态断路器(H₁₀)。采用这10种柔性交流输电装置进行实验测试^[16],以验证本文方法的实际应用效果。

2.1 控制性能分析

优先分析采用所提多目标优化算法前后的H₃控制效果,将H₃这一装置电压参考值和实际值之间的差值(V_{svc})和控制线路传输功率和有功参考值的差值(P_{tesc})作为测试指标,两个测试指标的取值越小,则说明控制结果越好。详细的测试结果如图3所示。

分析图3中的实验数据可知,优化后,柔性交流输电装置控制效果得到明显改善。由此可见,对柔性交流输电装置控制参数进行优化是正确且可行的。

2.2 损耗分析

不同方法在控制H₃的过程中,会产生不同类型的损耗。对比本文方法和文献[4]方法、文献[5]方法开关损耗以及二极管损耗变化情况,实验结果如图4所示。

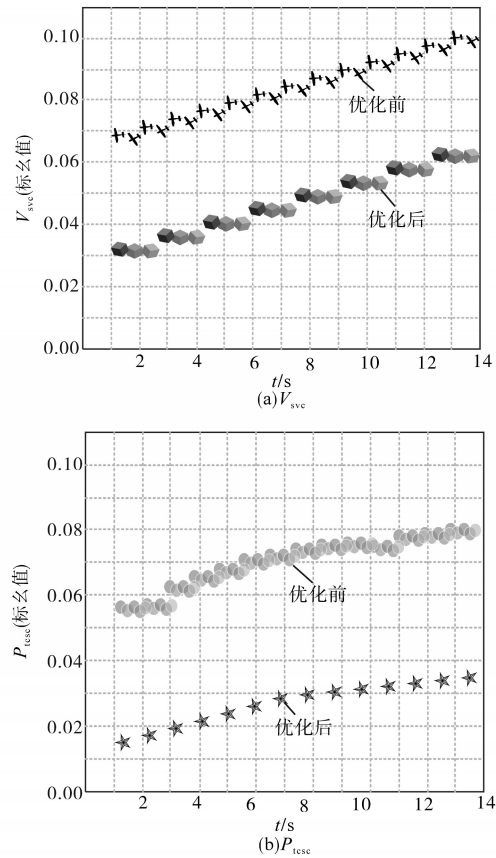


图3 所提方法的控制性能测试分析

Fig.3 Control performance test analysis of the proposed method

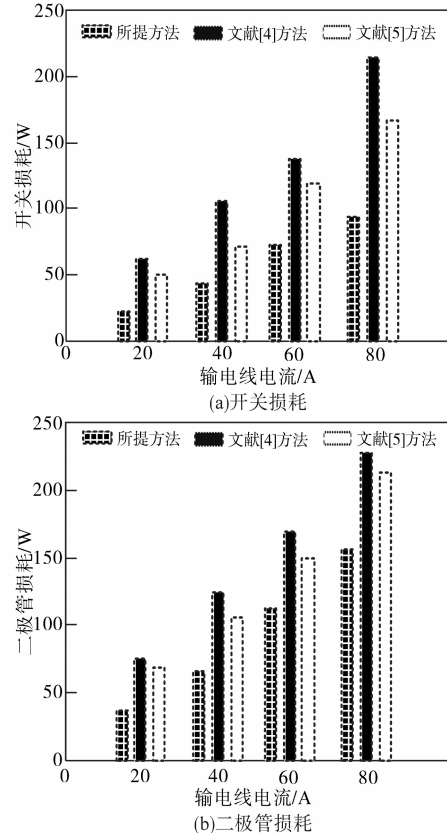


图4 不同方法的损耗分析仿真结果

Fig.4 Simulation results of loss analysis with different methods

图4中,随着输电线电流的增加,各个方法的损耗也相应增加。但是相比另外两种方法,所提方法的开关损耗和二极管损耗明显更低一些,充分证明了所提方法的优越性。

2.3 参数寻优耗时

分析不同方法的柔性交流输电装置控制参数寻优耗时,表1给出三种方法的参数寻优耗时对比结果。

表1 不同方法的参数寻优耗时测试
Tab.1 Time-consuming test of parameter optimization of different methods

测试对象	参数寻优耗时/s									
	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆	H ₇	H ₈	H ₉	H ₁₀
所提方法	1.2	1.1	0.9	0.8	1.1	0.9	1.2	0.8	1.3	1.2
文献[4]方法	1.8	1.5	2.7	2.6	3.8	3.9	2.1	1.9	4.7	4.2
文献[5]方法	2.7	3.1	4.2	4.4	5.6	3.6	3.2	2.7	6.3	5.9

由表1中的实验数据可知,相比文献[4]方法和文献[5]方法,所提方法的柔性交流输电装置控制参数寻优耗时明显更低一些,说明该方法的柔性交流输电装置控制参数寻优耗时更短,效率更高,可以为降低控制延误奠定坚实的基础。

2.4 控制延误分析

分析不同方法在实际运行的过程中是否存在延迟,将控制延误设定为测试指标,表2给出三种方法的控制延误对比结果。

表2 不同方法的控制延误仿真测试
Tab.2 Control delay simulation test of different methods

测试对象	控制延误/s									
	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆	H ₇	H ₈	H ₉	H ₁₀
所提方法	2.5	3.2	4.7	6.0	5.8	4.3	2.1	1.8	4.7	1.6
文献[4]方法	2.9	3.6	5.6	6.7	6.6	5.8	3.0	2.4	6.8	2.9
文献[5]方法	4.2	4.8	6.8	7.9	8.1	7.7	4.5	3.8	8.4	3.6

由表2中的实验数据可知,相比文献[4]方法和文献[5]方法,所提方法的控制延误明显更低一些,说明该方法的控制时间更短,效率更高,更进一步证实了所提方法的优越性。

3 结论

目前的电力系统都是以高压电网为骨干网架,因此要求该系统需要具有强大的灵活性以及可控性。柔性交流输电装置的出现为现代电网智能化和柔性化带来了全新的契机,但是也带来了各种安全问题。为此,提出一种基于多目标优化的柔性交流输电装置控制技术。实验测试结

果表明,所提方法能够获取比较满意的控制结果,降低控制过程中产生的损耗、参数寻优耗时和延误,可以在实际中进一步推广。

参考文献

- [1] 朱军,陈敬良,张安淇. 户外广告资源配置优化模型及算法研究[J]. 上海理工大学学报,2019,41(2):190-195.
ZHU Jun, CHEN Jingliang, ZHANG Anqi. Modeling and algorithm for outdoor advertising resources optimization [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2019, 41(2):190-195.
- [2] 黄启航,马雪,白左霞,等. 面向灵活资源配置的电力系统超短期优化调度[J]. 中国电力,2019,52(6):110-116,126.
HUANG Qihang, MA Xue, BAI Zuoxia, et al. Ultra-short-term optimal scheduling of power system orienting to flexible resources configuration[J]. Electric Power, 2019, 52(6):110-116, 126.
- [3] 索之闻,李晖,蒋维勇,等. 考虑离散调压设备动作频次的高压直流输电系统控制优化[J]. 电力系统自动化,2020,44(3):211-219.
SUO Zhiwen, LI Hui, JIANG Weiyong, et al. Control optimization of HVDC system considering action frequency of discrete voltage regulation equipment[J]. Automation of Electric Power Systems 2020, 44(3):211-219.
- [4] 俞智鹏,叶荣,唐雨晨,等. 含高渗透率海上风电电网的DSSC优化配置与运行控制策略[J]. 可再生能源,2020,38(6):837-845.
YU Zhipeng, YE Rong, TANG Yuchen, et al. Optimal allocation and operation control strategy of DSSC with aigh penetration of offshore wind power[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(6):837-845.
- [5] 许云飞,张海宁,钟诚,等. 基于改进前馈统一潮流控制器功率协调控制[J]. 电子技术应用,2019,45(2):40-44.
XU Yunfei, ZHANG Haining, ZHONG Cheng, et al. Improved feed forward power coordinate control strategy for unified power flow controller[J]. Application of Electronic Technique, 2019, 45(2):40-44.
- [6] 徐飞,王利平. 量子粒子群算法的柔性交流输电装置协调控制[J]. 制造业自动化,2020,42(8):106-109,147.
XU Fei, WANG Liping. Coordinated control of FACTS device based on quantum behaved particle swarm optimization algorithm[J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(8):106-109, 147.
- [7] 高宁波,张鸿,杨建民,等. 一种模拟特定畸形波列的相位调制方法(英文)[J]. 船舶力学,2019,23(9):1021-1033.
GAO Ningbo, ZHANG Hong, YANG Jianmin, et al. A phase modification methodology in modelling deterministic freak wave train[J]. Journal of Ship Mechanics, 2019, 23(9):1021-1033.
- [8] 李红伟,蒋嘉焱,刘青卓,等. 基于改进教与学算法的配网多目标无功优化[J]. 控制工程,2020,27(5):878-883.
LI Hongwei, JIANG Jiayan, LIU Qingzhuo, et al. Multi-objective reactive power optimization of distribution network based on im-

- proved teaching-learning based optimization[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(5): 878-883.
- [9] 李丽荣, 李木子, 李崔灿, 等. 具有动态自适应学习机制的教与学优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(19): 62-67.
LI Lirong, LI Muzi, LI Cuican, et al. Teaching and learning based optimization with dynamic self-adaptive learning[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(19): 62-67.
- [10] 何杰光, 彭志平, 崔得龙, 等. 一种多反向学习的教与学优化算法[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(6): 159-167.
HE Jieguang, PENG Zhiping, CUI Delong, et al. Multi-opposition teaching-learning-based optimization[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(6): 159-167.
- [11] 黎延海, 拓守恒, 雍龙泉. 动态选择策略的和声教与学混合算法[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(12): 3679-3684.
LI Yanhai, TUO Shousheng, YONG Longquan. Hybrid algorithm based on harmony search and teaching-learning-based optimization using dynamic selection strategies[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(12): 3679-3684.
- [12] 黄秀丽, 黄进, 于鹏飞, 等. 电力无线专网中面向安全风险的分分布式资源分配方法[J]. 计算机应用, 2020, 40(12): 3586-3593.
HUANG Xiuli, HUANG Jin, YU Pengfei, et al. Security-risk-oriented distributed resource allocation method in power wireless private network[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(12): 3586-3593.
- [13] 赵艳军, 梁坤杰, 龙霏, 等. 考虑灾害事件攻防顺序的电网防灾资源分配策略[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 49-55.
ZHAO Yanjun, LIANG Kunjie, LONG Fei, et al. A resource allocation strategy for power grid disaster prevention considering the attack and defense sequence of disaster events[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 49-55.
- [14] 马永翔, 陈昊睿, 闫群民, 等. 基于灰狼优化算法的SSSC阻尼功率振荡控制器设计[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(3): 1-6.
MA Yongxiang, CHEN Haorui, YAN Qunmin, et al. Design of SSSC damping power oscillation controller based on grey wolf optimization algorithm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3): 1-6.
- [15] 周贵勇, 郝俊芳, 王胜, 等. 一种直流输电无功控制功能优化策略及应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 181-187.
ZHOU Guiyong, HAO Junfang, WANG Sheng, et al. Optimization strategy and application analysis of reactive power control function for HVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 181-187.
- [16] 袁小威, 王金梅, 苗海东, 等. 基于LCC的高压直流输电换流站无功功率控制策略研究[J]. 电气传动, 2021, 51(13): 14-19.
YUAN Xiaowei, WANG Jinmei, MIAO Haidong, et al. Research on the reactive power control strategy of HVDC converter station based on LCC[J]. Electric Drive, 2021, 51(13): 14-19.

收稿日期:2021-08-04

修改稿日期:2021-08-26