

# 基于改进型蚁群算法实现配电网 无功功率最佳补偿点分析

王光增<sup>1</sup>, 华献宏<sup>1</sup>, 柴志华<sup>1</sup>, 张照锋<sup>2</sup>, 金东红<sup>2</sup>, 李灿灿<sup>2</sup>, 徐成浩<sup>2</sup>

(1. 国网浙江浦江县供电有限公司, 浙江 浦江 322200;

2. 浦江光远电力建设有限公司, 浙江 浦江 322200)

**摘要:** 针对配电网中由于谐波等因素影响, 导致无功功率增加的问题, 提出了新型的无功功率最佳补偿点查找方案; 该方案构造出包括设备层、节点层、通信网络层、计算机管理层和远程管理中心的补偿点分析系统, 能够以系统化的架构在本地或者远程对电力节点进行分析, 并设计出一套谐波控制系统, 能够通过在线、实时检测谐波发生点来选择功率补偿点; 并在传统的蚁群算法中融合粒子群算法, 解决了常规技术中难以实现全局最优解的技术弊端; 通过 200 次的迭代计算, 试验表明, 该方法在达到预定周期时, 能够通过最佳化地更新全局位置搜索到局部的最优解, 收敛速度快, 收敛时间约为 60s, 通过对比试验, 本研究的方案具有一定的技术进步性。

**关键词:** 配电网; 无功功率; 补偿点; 蚁群算法; 粒子群算法

## Analysis of Optimal Compensation Point for Reactive Power in Distribution Network Based on Improved Ant Colony Algorithm

Wang Guangzeng<sup>1</sup>, Hua Xianhong<sup>1</sup>, Chai Zhihua<sup>1</sup>, Zhang Zhaofeng<sup>2</sup>,

Jin Donghong<sup>2</sup>, Li Cancan<sup>2</sup>, Xu Chenghao<sup>2</sup>

(1. State Grid Zhejiang Pujiang County Power Supply Co., Ltd., Pujiang 322200, China;

2. Pujiang Guangyuan Electric Power Construction Co., Ltd., Pujiang 322200, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the increase of reactive power due to the influence of harmonics and other factors in the distribution network, a new type of reactive power optimal compensation point search scheme is proposed. The scheme constructs a compensation point analysis system including equipment layer, node layer, communication network layer, computer management layer and remote management center. It can analyze power nodes locally or remotely with a systematic architecture and design a set of harmonic control system. The harmonic control system can select the power compensation point through online and real-time detection of the harmonic generation point. And the particle swarm optimization algorithm is integrated in the traditional ant colony algorithm, which solves the technical shortcomings that it is difficult to achieve the global optimal solution in the conventional technology. Through 200 iteration calculations, the experiment shows that the method of this study can find the local optimal solution by optimally updating the global position when the predetermined period is reached. The project of this research has certain technological advancement.

**Keywords:** distribution network; reactive power; compensation point; ant colony algorithm; particle swarm algorithm

## 0 引言

在配电网应用中, 由于电网运行的不稳定性以及各种因素的影响, 容易出现多种无功因素影响电网的正常运行, 这就需要对配电线路中的无功功率点进行补偿<sup>[1]</sup>。无功补偿能够平衡电力系统中的无功功率, 提高配电应用效率, 提高供电质量。无功补偿在保持配电网系统正常运行方面具有重要的意义。由于配电系统中各种电力设备分布比较

松散, 如果对每个电力设备分布点进行补偿, 则会造成资源浪费, 这就需要合理地选择无功补偿点和补偿容量, 以最大限度地减少电网中的无功流动, 节省配电成本<sup>[2]</sup>。

在配电网供电过程中, 配电线路中的无功功率输出信息中含有大量的非线性问题, 传统的计算方法通常利用微分学进行无功功率计算优化。该方法采用高等数学计算原理, 对变量的一阶或二阶梯度进行目标函数求解。该方法虽然在一定程度上具有进步意义, 但对于配电网中出现的

收稿日期:2020-04-14; 修回日期:2020-05-13。

作者简介:王光增(1982-),男,山东济南人,博士,高工,主要从事电气工程及其自动化方向的研究。

引用格式:王光增,华献宏,柴志华,等.基于改进型蚁群算法实现配电网无功功率最佳补偿点分析[J].计算机测量与控制,2021,29(2):207-211.

离散变量则很难处理，很难求出全局最优解<sup>[3]</sup>。针对该问题，本研究提出了改善型的蚁群算法，不仅能够快速查找配电网无功功率的最佳补偿点，还能够实现补偿点优化的控制，有效地避免了配电网中的谐波干扰。

### 1 总体方案设计

为了使本领域的技术人员能够清楚了解本文技术方案，本研究设计出一整套的补偿点分析系统，不仅能够在本地的研究，还能够实现数据的远程管理和调控。该系统包括设备层、节点层、通信网络层、计算机管理层和远程管理中心<sup>[4]</sup>。系统架构如图 1 所示。

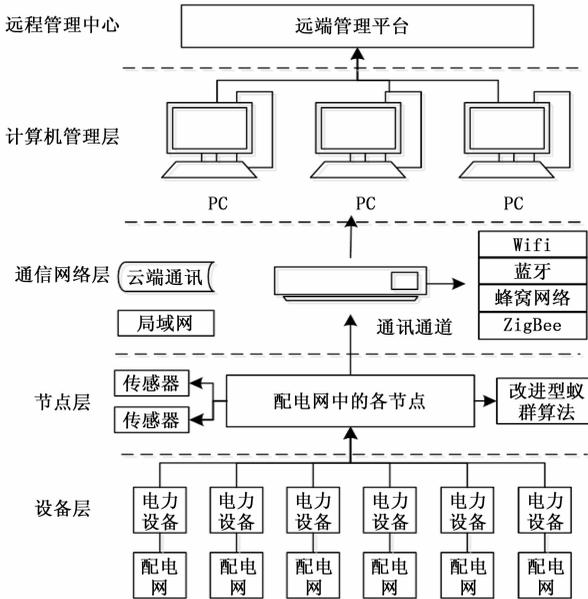


图 1 系统架构示意图

设备层主要包括配电网设备，用于输出配电，在配电网系统中，通过网络节点设置有大量的电力设备。为了信息获取的便利，通常在不同的节点接入了不同类型的传感器。传感器将接收的节点数据信息通过通信网络层传递到计算机管理层。由于配电网结构的复杂性，传递方式为多样化，能够支持多种类型的通信，比如支持 TCP/IP 通信协议、RS485 通信协议、Modbus 通信协议、HTTP、XMPP、WIA-PA、PLC、串行通信等通信协议<sup>[5]</sup>。

在计算机接收端，还设置有谐波控制系统，能够在线、实时检测谐波。谐波控制系统内的总控中心用于控制谐波检测相关信息，A/D 转换单元用于将接收到的模拟信号转换成数字信息，其中的 DSP 计算单元用于对接收到的数字信号进行信息转换，谐波检测装置用于实时检测电路中的谐波信息。由于输出的功率受多种环境杂波信息的影响，谐波影响量最大。因此，本研究以谐波发生点最多的节点为重点研究的对象<sup>[6]</sup>。

在图 2 中，为了提高配电网中谐波的检测效率，采用的 DSP 计算单元为 TI 公司的 DSP2812，该核心处理单元还

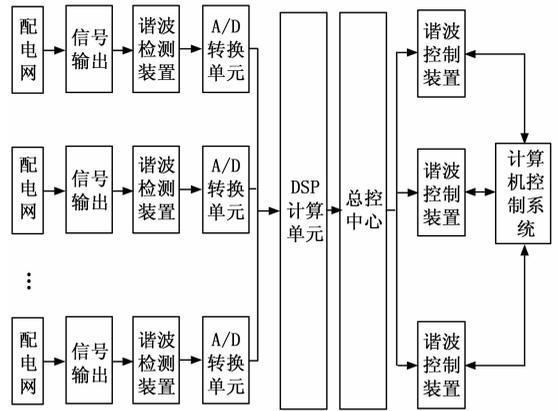


图 2 配电网网络节点中谐波控制方案

采用了 Xilinx CPLD XC9572XL 作为数字锁相和保护电路，其中 XC9572XL 的内核电压为 3.3 V，其组成模块包含 4 个 54V18 功能模块，能够提供 1600 个 5ns 延迟可用门。

在该方案中，谐波检测装置接收到配电网的输出信号后，谐波信号通过 A/D 转换单元由模拟信号量转换为数据信号量，DSP 计算单元的输入端与 A/D 转换单元的输出端连接，获取数字信息<sup>[7]</sup>。DSP 控制单元对采集到的谐波数据进行计算、分析，然后总控中心根据计算得出的结果进行控制，并将控制指令通过计算机控制系统进行信息交互。上述谐波发生点，通过改进型的蚁群算法来查找，以发现谐波发生比较严重的节点<sup>[8]</sup>。下文将详细描述。

### 2 基于改进型蚁群算法的补偿点寻找方法

本研究所提改进型的蚁群算法能够有效地克服蚂蚁在搜索过程中出现的各种技术弊端，比如，难以求出局部最优和全局最优解<sup>[9-11]</sup>等。

#### 2.1 蚁群算法

蚁群算法的应用需要构建目标函数，能够快速检索无功功率最佳补偿点，为了客观、量化该补偿点，下面用输出函数对电网中应用的电力设备量化表示， $y = f(x)$ ，其中的可将自变量的定义域用  $(0, U_p)$  表示，假设在配电网中设置的任意一个电力设备网络节点  $(x_i, y_i)$  的输出补偿点用极大值点来表示，则极大值点可以用  $x_i + 1$  来表示，然后随机分布这些点，假设区域为  $N$  等，在空间上分布不同的区域点<sup>[12]</sup>。比如  $N = x_i + 1$ ，该公式中的  $N$  表示为不同的空间区域，任意空间区域用  $0_i$  来表示，其中  $i = 1, 2, 3, \dots, M$ ，上述不同区域在应用过程中，需要通过长度表示，其长度公式可以通过以下公式表示： $D_i = U_p / M$ 。为了表达任意电力设备的估计，本研究形象地引入路径问题，如图 3 所示。

图 3 中的  $E(i, j)$  表示为不同设备节点之距，区间的任意点范围区间可以为  $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$ ，TSP 路径表示寻求不同电力设备不同节点之间的距离，为了实现最佳搜索，使得 TSP 路径输出最短<sup>[13]</sup>。引入了以下公式：

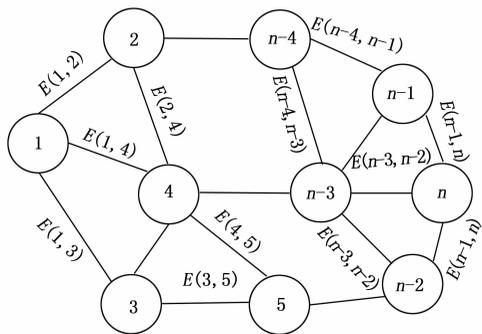


图 3 电力设备不同补偿点路径之间的关系示意图

其中最佳信息检索的修正表示式可以用以下公式表示:

$$r_{ij}(t+n) = \rho r_{ij}(t) + \Delta r_{ij} \quad (1)$$

其中:

$$\Delta r_{ij} = \sum_{a=1}^{Num} \Delta r_{ij}^a \quad (2)$$

$$\Delta r_{ij}^a = \begin{cases} \frac{Q}{L_a} L_{ij}, & \text{蚂蚁所走路径} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

在上述公式中, 其中的字母  $\rho$  电力设备中无功功率最佳补偿点搜索蚂蚁元素输出的信息残留系数,  $1-\rho$  为在  $(t, t+n)$  内搜索蚂蚁元素被稀释的程度。Q 为介于 1~100 之间的常数,  $L_{ij}$  为在计算过程中, 为了提高精度, 第  $k$  只搜索蚂蚁信息元素遍历的路径。L<sub>a</sub> 为搜索蚂蚁信息历经路程总长,  $r_{ij}$  搜索蚂蚁信息搜索到的补偿点在  $(i, j)$  位置处的信息素<sup>[14]</sup>。

### 2.2 粒子群优化算法

如图 4 所示, 在应用粒子群优化算法时, 采用的电力设备节点数据集为  $D$ , 其定义区间介于 0 和 2 之间<sup>[16]</sup>。在计算过程中, 一旦利用粒子群优化算法, 则会有以下表达式:

$$P_{i,n} = 4P_{i-1,n}(1 - P_{i-1,n}) \quad (4)$$

其中:  $i = 2, 3, \dots, G$ ; 该表达式通过 Logistic 混沌映射公式进行的应用, 为了提高数据计算的精度, 将每个离子的适应度按照设定的步骤进行逐步计算出, 这根据用户的个人喜好程度而定, 比如计算出初始粒子等<sup>[17]</sup>。结合定义域, 将该定义阈映射到混沌区间  $[a_n, b_n]$  所包含的变量区间。不同粒子之间的关系式还可以表示为:

$$p_m = a_n + (b_n - a_n) \times P_{i,n} \quad (5)$$

这样, 可以快速计算出任意位置处的适应度值和平均适应度值<sup>[18-20]</sup>, 其中用  $p_{best}$  表示为粒子群的当前位置, 用字母  $g_{best}$  表示为粒子群的当前适应度。

在计算过程中, 如果发现收敛条件难以满足, 需要进行粒子群更新计算, 更新公式为:

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^N [(f_i - \bar{f}) / f]^2 \quad (6)$$

在式 (6) 中,  $f_i$  表示第  $i$  个粒子的适应度, 当出现多种粒子时, 多种粒子的平均适应度用  $\bar{f}$  来表示,  $f$  来表示归

一化因子<sup>[21]</sup>, 该因子用式 (7) 来表示:

$$f = \begin{cases} \max\{|f_i - \bar{f}|\}, & \max |f_i - \bar{f}| \geq 1 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中: 当  $\epsilon$  ( $\epsilon > 0$ ) 时, 则进行反复映射计算, 利用式 (8) 对粒子的位置信息不断地进行更新和计算, 迭代公式为:

$$x_m^{k+1} = x_m^k + v_m^{k+1} \quad (8)$$

经过式 (8) 的计算, 在不断的反复计算过程中, 将计算出的粒子通过向量表达式表示为:

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})^T \quad (9)$$

在向量表示中, 令不同的粒子  $i = 1, 2, \dots, m$ , 所更新出的所有的粒子中, 通过式 (8) 更新出的粒子中, 新更新出的粒子的适应度一旦比设定的  $p_{best}$  的适应度还要大, 重新计算  $p_{best}$ , 这样能够提高粒子群计算输出的精度, 通过这种迭代计算和反复计算, 能够在配电网中快速搜索到的配电网中发生无功功率的点, 该出位置也是较为恰当的合适无功功率补偿点<sup>[22-24]</sup>。

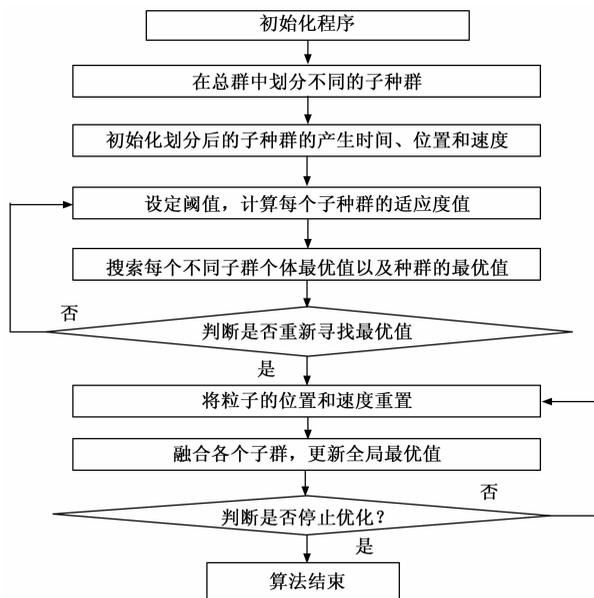


图 4 混沌粒子群优化算法流程图示意图

### 3 算例分析及试验结果

在国网浙江浦江县供电有限公司按照图 1 中的方式进行组网, 对上述技术方案进行验证分析。在硬件架构设计中, 假设为 110 kV 变电站配电, 选择 A 区、B 区、C 区、D 区、E 区、F 区、G 区、H 区变电站作为通信汇聚节点。该节点为区域配电通信网的核心层<sup>[25]</sup>。然后, 再选配网调主站, 其作为整个配网系统的监控中心, 在配网调主站内安装 2 台以太网交换机, 如图 5 所示。

为了验证本研究新型算法的可行性和准确性, 下文采用 TSPeil51 算法, 并设置以下算法参数:  $\alpha = 1, \beta = 5, \rho = 0.5$ , 采用的迭代次数是 200; 在改进的混沌粒子群优化

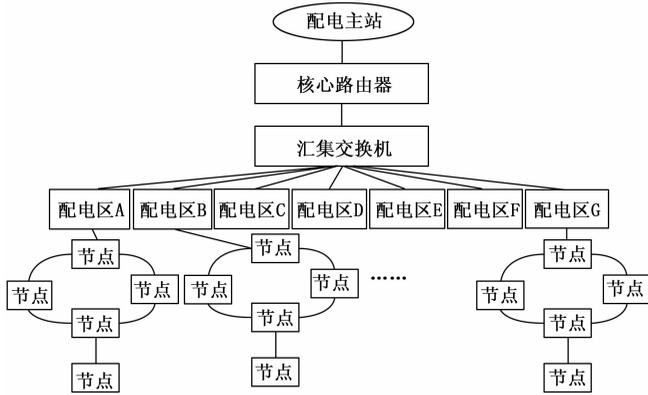


图 5 试验架构示意图

CPSO算法中，蚁群部分与其他相同，粒子群中  $C_1 = C_2 = 2, \omega = 5$ ，在利用 TSPLib 时，其输出的最短路径为 426。在进行仿真试验时，硬件环境为 Pentium (R) CPU 为 256 内存，硬盘容量为 80 G，软件环境为 Windows XP 操作系统，JDK1.5，在 Matlab2014b 软件环境下进行模拟仿真，在 Matlab 中，能够实现模拟环境的可视化操作。试验通过传统的蚁群算法和本研究的改进型算法进行对比<sup>[26-28]</sup>。图 6 为蚂蚁的初始分布位置示意图。

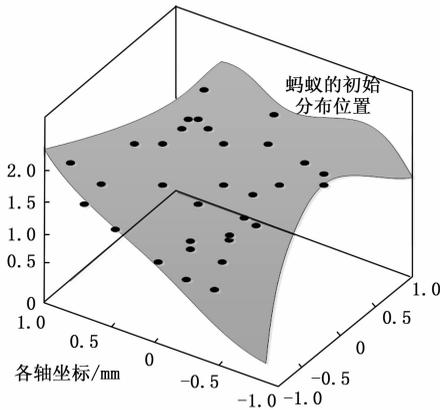


图 6 蚂蚁的初始分布位置示意图

图 7 为采用常规蚁群算法的最优演变示意图。

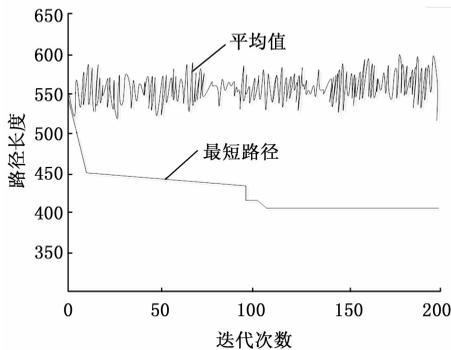


图 7 标准蚁群算法在 ei51 上演化过程

这种标准算法收敛速度比较慢，在 190 次迭代计算时

仍未见其收敛，可见速度之慢。最优解在 430 左右的位置可以发现，说明在寻优方面的效果明显不好。

本研究方案的最优演变如图 8 所示。

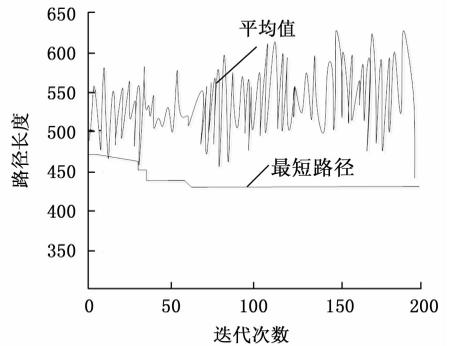


图 8 改进型粒子群算法在 ei51 上演化过程

图 8 中的 ei51 上表现出改进型粒子群算法具有较快的收敛速度，通过图 8 可以看出，在迭代次数在 55 次附近时，就表现出了收敛，最优解在 430 附近。在具体应用中，还可以通过调整  $\alpha, \beta, \rho$  的值达到最优收敛。融入粒子群算法之后可以看到，不同迭代次数时的平均路径长度具有明显的波动，这表明融入的粒子群算法后，粒子的惯性运动改变了常规技术中蚂蚁的路径，进而避免了常规蚁群算法中出现的局部最优解停滞现象。图 9 为采用常规蚁群算法的蚂蚁分布示意图。

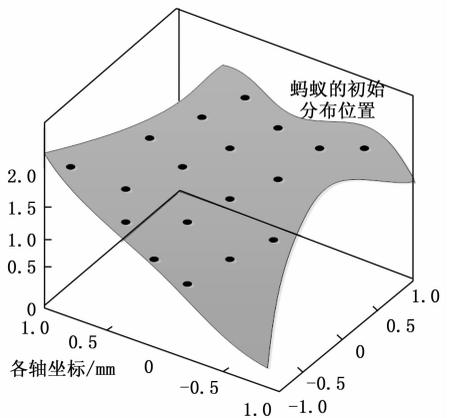


图 9 采用常规蚁群算法的蚂蚁分布示意图

然后再采用本文算法进行试验，观察蚂蚁分布情况，如图 10 所示。

通过上述仿真结果，可以看出本研究的算法改变了常规蚁群算法中的蚂蚁行为，具有较好的收敛性，因此，本研究的算法取得了很好的效果。

#### 4 结束语

本研究提出了如何查找配电网无功功率最佳补偿点的问题，引出了融入粒子群算法的改进型蚁群算法，通过该算法，能够搜索到配电网中的谐波发生率比较高的

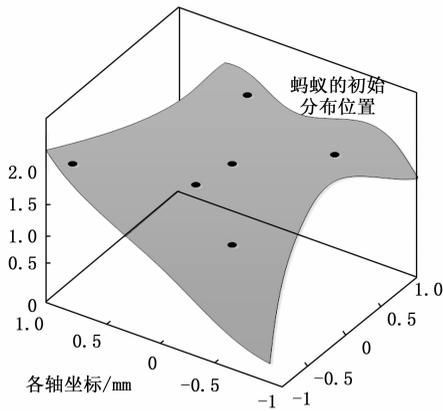


图 10 采用改进蚁群算法的蚂蚁分布示意图

电力设备节点, 克服了常规经典蚁群算法中仅仅能够查询局部最优解的技术弊端, 该算法兼顾了全局最优解的查询<sup>[29]</sup>。本研究虽然在一定程度上具有技术进步性, 但是在应用过程中依然会存在一些问题。比如优化大规模组合问题、解决连续域问题、计算量和时间问题等, 这仍旧是亟待解决的难题。因此, 这需要本领域的研究人员进一步地研究和探索, 本研究的技术方案为下一步的研究奠定了理论基础。

#### 参考文献:

[1] 黄冬冬, 吴在军, 窦晓波, 等. 光伏规模化并网的电能质量复合控制策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015 (3): 116-121.

[2] 季斌炜, 陈潇一. 基于粒子群算法的配电网无功补偿方法研究 [J]. 电网与清洁能源, 2016, 32 (3): 115-118.

[3] 郭一飞, 高厚磊, 田佳, 等. 引入聚类分析的光伏出力建模及其在可靠性评估中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (23): 93-100.

[4] 邢晓溪, 吴雁南. 基于 EPON 技术的电力通信系统设计与实现 [J]. 信息技术, 2017 (3): 110-112, 116.

[5] 武玉晶, 刘宁, 吕恒琪. 基于蚁群优化的 MPPT 算法研究 [J]. 数学的实践与认识, 2017, 47 (5): 120-124.

[6] 高迪, 路瑶, 赵娟娟, 等. 基于 Tabu 算法的配电网无功补偿 [J]. 电气自动化, 2015 (1): 91-93.

[7] 陈朋, 刘金忠, 孙业荣, 等. 有载调容变压器附加损耗的计算方法 [J]. 变压器, 2017, 54 (2): 17-22.

[8] 余凤. 基于 EPON 技术的配网光通信网络 [J]. 激光杂志, 2017, 38 (5): 137-139.

[9] 刘科研, 盛万兴, 贾东梨, 等. 基于协同进化蚁群算法的含光伏发电的配电网重构 [J]. 可再生能源, 2017, 35 (5): 702-708.

[10] 唐海国, 冷华, 朱吉然, 等. 基于智能配变终端的变压器低压保护改进策略 [J]. 中国电力, 2016 (s1): 16-20.

[11] 吴小雅. 基于瞬时电流跟踪的三相光伏逆变器并网控制策略研究 [J]. 广东电力, 2016, 29 (1): 115-119.

[12] 薛飞, 石季英, 袁大玲, 等. 考虑配电网拓扑变化的广义电源规划 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31 (10): 117-124.

[13] 单宝峰, 陈军港, 撒奥洋, 等. 基于 QPSO 算法的含分布式电源配电网故障诊断 [J]. 青岛大学学报 (工程技术版), 2018, 33 (1): 28-32, 39.

[14] 王秋杰, 金涛, 谭洪, 等. 基于分层模型和智能校验算法的配电网故障定位技术 [J]. 电工技术学报, 2018, 33 (22): 5327-5337.

[15] 刘洪, 陈星屹, 李吉峰, 等. 基于改进 CPSO 算法的区域电热综合能源系统经济调度 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37 (6): 199-206.

[16] 陈冰斌, 赵健. 配电网无功补偿节能计算方法优化研究 [J]. 电网与清洁能源, 2017, 33 (10): 27-32, 40.

[17] 曾梅, 郭均鹏. 基于 CPSO 的基础设施模糊投资组合优化模型 [J]. 河北工业科技, 2016, 33 (1): 1-5.

[18] 杜清福. 合作式粒子群优化算法 [J/O]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14 (2): 276-281.

[19] 王钾, 王慧琴, 冯路佳. 基于量子蚁群算法的建筑消防疏散路径规划 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 167-172.

[20] 杨海清, 芦斌. 基于改进蚁群算法的水下无人机路径规划研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 216-220.

[21] 董朕, 殷豪, 孟安波, 等. 基于混合算法优化神经网络的风电预测模型 [J]. 广东电力, 2017, 30 (2): 29-33.

[22] 殷豪, 李德强, 葛佳菲, 等. 基于混合算法的含分布式电源配电网重构研究 [J]. 电力建设, 2016, 37 (4): 104-109.

[23] 张文柱, 孔维鹏, 高鹏, 等. 基于改进蚁群算法的无线传感网络路由算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 274-279.

[24] 陈蓓, 郑恩让, 郭娜. PCI 控制的九开关逆变器及谐波补偿控制研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (9): 116-121.

[25] Dolfing A G, Leuven J R F W, Dermody B J. The effects of network topology, climate variability and shocks on the evolution and resilience of a food trade network [J]. PloS one, 2019, 14 (3): e0213378.

[26] 黄振华, 薛家祥. 基于粒子群算法的无线充 PID 控制器优化设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (11): 84-88.

[27] Wauters M M, Angelo R, Roberta C, et al. Localization, topology, and quantized transport in disordered floquet systems [J]. Physical Review Letters, 2019, 123 (26): 266601.

[28] 杨增瑞, 孙凤伟, 戴兆乐, 等. 基于分组粒子群的光伏最大功率点跟踪方法 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 244-252.

[29] Chen B, Yao N, Liu W J, et al. Distributed topology control algorithm based on load balancing evaluation model in wireless sensor networks [J]. Wireless Personal Communications, 2019, 109 (4): 2607-2625.