

DOI: 10.7667/PSPC170113

基于人工智能算法的无功优化分析软件设计

包涛, 程乐峰, 陈柏熹, 余涛

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对实际电网对无功优化的需求, 利用 Java 编程语言, 设计并开发基于人工智能(Artificial Intelligence, AI) 算法的无功优化分析软件。该软件集成了五种不同性能的 AI 算法, 可用于不同场合下的无功优化求解, 用户则可依据实际情况快速选择相应的算法进行无功优化计算, 计算结果可指导电网对无功投切量和变压器变比等参数进行优化调整。软件主要包括项目管理模块、数据编辑模块、无功优化计算模块和控制变量编辑模块, 并设有 BPA-Matpower 数据接口, 可兼容 BPA 数据格式, 能完成 BPA 数据到 Matpower 数据的精准转换。软件可直接对不同网架结构的 BPA 数据进行编辑, 无需重新编程, 具有计算精度高、通用性强等特点。最后, 针对南方电网下某市电网的 BPA 数据进行工程实例分析, 验证了该软件的有效性和实用性。

关键词: 无功优化; 人工智能算法; BPA-Matpower; 数据接口; 通用性

Software design of reactive power optimization analysis based on artificial intelligence algorithms

BAO Tao, CHENG Lefeng, CHEN Baixi, YU Tao

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Aiming at the demand of Reactive Power Optimization (RPO) in this real power network, this paper uses the Java programming language to design and develop a RPO analysis software based on the Artificial Intelligence (AI) algorithms. The software integrates five AI algorithms with different properties, which can be used for RPO solution under different occasions. The user can quickly select the appropriate algorithm for RPO calculation based on actual situation, and the calculation results can guide the power grid company to optimize the parameters such as reactive power compensation capacity, transformer ratio, etc. The software mainly includes the project management module, data editing module, RPO calculation module and control variable editing module, and has BPA-Matpower data interface, which is compatible with BPA data format and can complete accurate conversion from BPA data to Matpower data. The software can directly edit the BPA data with different grid architectures without reprogramming, and has the characteristics of high precision and versatility. The effectiveness and practicability of the software is finally validated by an engineering case study, according to the BPA data of certain city grid under the China Southern Power Grid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477055 and No. 51777078).

Key words: reactive power optimization; artificial intelligence algorithm; BPA-Matpower; data interface; universality

0 引言

随着电网规模日益扩大、结构日益复杂, 电力市场化的程度不断提高, 电力系统的安全、稳定和经济运行越来越受到关注^[1]。电力系统的无功优化可改善系统潮流分布, 进而影响电网安全稳定、电压质量及运行费用等方面, 对保证电网安全、经济

和可靠运行具有重要意义^[2-3]。

长期以来, 各学者对无功优化问题进行了大量研究, 提出了多种算法^[4-9]。传统的数学解决方法主要有: 内点法、线性规划法和非线性规划方法等, 这类方法对离散变量处理方面有一定限制, 求解时间较长, 容易出现收敛性差等情况。另一种是人工智能(Artificial Intelligence, AI)算法。该类算法拥有全域寻优本领, 收敛性和速度都比传统算法好, 在无功优化中得到了广泛应用。如文献[4]将多目标进

化算法用于求解无功优化问题的比较与评估；文献[5]将群搜索算法(Group Search Optimizer, GSO)用于电力系统无功优化中；文献[6]提出基于量子差分进化算法(Quantum Differential Evolution, QDE)的电力系统无功优化；文献[7]对电力系统无功优化的多目标问题的处理进行了算法改进，提出一种多策略融合粒子群优化(Particle Swarm Optimization with Multi-Strategy Integration, MSI-PSO)算法；文献[8-9]则分别针对无功优化中的无功补偿和无功调度问题进行了深入研究。

常用的 AI 算法有群搜索算法(GSO)、量子遗传算法(Quantum-inspired Genetic Algorithm, QGA)、粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、人工蜂群算法(Artificial Bee Colony, ABC)^[10]以及遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、生物启发式鸟群算法(Bio-Inspired Bird Swarm Algorithm, BI-BSA)^[11]等。上述 AI 算法各有优缺点，适应的场合不一样，至今还没有一个公认最好的 AI 算法来解决无功优化问题；而对于各种算法的编程一般都是针对某个特定的电力系统，不具有通用性。因此，有必要开发一个集成多种 AI 算法的软件对无功优化进行分析。

AI 算法编程一般在 Matlab 平台上进行，并可利用平台内的 Matpower 进行潮流计算。BPA 程序作为我国电力系统分析计算的重要工具^[12]，当使用 AI 算法进行电力系统无功优化分析时，将会产生上述两种软件的数据不兼容问题。因此，开发的软件中还需要一个能兼容 BPA 数据的接口。

基于此，本文以南方电网某市电网的 BPA 数据为基础，设计并开发了基于 AI 算法的无功优化分析软件。该软件集成了前述 5 种常用 AI 算法(GSO、QGA、PSO、ABC 和 GA)，并内置 BPA 数据兼容接口，能应用于不同网架结构的电力系统，具有很强的通用性。同时，用户可方便地根据无功优化需求选择相应的算法进行无功优化分析。最后，本文利用该市电网的 BPA 数据对所开发软件的性能进行了仿真测试验证。

1 无功优化模型与 AI 算法综述

1.1 无功优化模型

电力系统无功优化是指系统在满足各种约束条件下，通过改变有载调压变压器分接头的档位和无功补偿设备投入的容量，以实现电压质量的提高和有功网损的降低^[4-7]。

1.1.1 目标函数

考虑实际电网情况，本文选取网损、电压稳定分量和电压越限个数作为无功优化的目标。

从经济性角度出发，以系统的有功损耗最小为目标函数。该目标函数可表示为

$$\min(\sum_{i,j \in N_L} (\Delta P_{ij})) = \sum_{i,j \in N_L} (g_{ij}[V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}]) \quad (1)$$

式中： ΔP_{ij} 为支路 L_{ij} 的有功损耗； V_i 和 V_j 分别表示节点 i 和节点 j 的电压幅值； θ_{ij} 表示节点 i 和节点 j 的电压相角差； g_{ij} 表示支路 L_{ij} 的电导； N_L 为支路集合。

在以往的计算中，往往只是把电压限制看成约束条件，这样做通常会使优化后的电压幅值接近其极限值，不利于电力系统运行。本文从安全性和提高电压质量的角度出发，以节点电压幅值偏离期望值之和最小为目标函数，即

$$\min(\sum_{i=1}^n |\Delta V_i|) = \sum_{i=1}^n \left| \frac{2V_i - V_{i\max} - V_{i\min}}{V_{i\max} - V_{i\min}} \right| \quad (2)$$

式中： ΔV_i 为节点 i 的电压稳定分量； V_i 为节点 i 的实际电压幅值； $V_{i\max}$ 和 $V_{i\min}$ 分别为节点 i 电压的最大限值和最小限值； n 为节点个数。

综上，无功优化的目标函数表达式如式(3)。

$$F = \min(\lambda_1 \sum_{i,j \in N_L} (\Delta P_{ij}) + \lambda_2 \sum_{i=1}^n |\Delta V_i| + \lambda_3 e) \quad (3)$$

式中： e 为电压越限个数； λ_1 为网损的权重因子； λ_2 为电压稳定分量的权重因子； λ_3 为电压越限个数的权重因子。

1.1.2 约束条件

无功优化的约束条件一般有三种：控制变量约束、状态变量约束和潮流约束^[13-15]。

控制变量选取无功投入容量 Q_c 、变压器变比 K_T ，控制变量约束应该满足

$$\begin{cases} Q_{Ci}^{\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{\max}, & i \in N_C \\ K_{Tj}^{\min} \leq K_{Tj} \leq K_{Tj}^{\max}, & j \in N_T \end{cases} \quad (4)$$

式中： N_C 为含可调无功投入容量的节点集合； N_T 为可调节变比支路集合； Q_{Ci}^{\min} 与 Q_{Ci}^{\max} 分别为节点 i 上无功投入量的下限和上限； K_{Tj}^{\min} 与 K_{Tj}^{\max} 分别为节点 j 上变压器变比的下限和上限。

状态变量有发电机的有功出力 P_G 、无功出力 Q_G 和网络节点电压 V ，状态变量应该满足

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, & i \in N_G \\ Q_{Gj}^{\min} \leq Q_{Gj} \leq Q_{Gj}^{\max}, & j \in N_G \\ V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max}, & k \in N_B \end{cases} \quad (5)$$

式中: N_G 为所有的发电机节点; N_B 为所有的网络节点; P_{Gi}^{\min} 与 P_{Gi}^{\max} 分别为发电机有功出力的下限和上限; Q_{Gi}^{\min} 与 Q_{Gi}^{\max} 分别为发电机无功出力的下限和上限; V_k^{\min} 与 V_k^{\max} 分别为网络节点电压的下限和上限。

潮流约束方程有有功功率平衡约束和无功功率平衡约束, 应满足式(6)关系。

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} + b_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_G 、 Q_G 分别为发电机节点发出的有功功率与无功功率; P_D 、 Q_D 分别为负荷节点的有功功率与无功功率需求; g_{ij} 、 b_{ij} 分别表示支路 L_{ij} 的电导与电纳; θ_{ij} 表示节点 i 和节点 j 的电压相角差。

1.2 AI 算法

人们通过观察大自然的一些群体物种后, 从中获得启发归纳总结出 AI 算法。其研究方法一般是开始有一个初始解群, 按照某些人为设定的概率, 采用类似动物种群的搜索方法来寻求最优解。

群搜索优化算法是受到动物搜索行为的激发, 算法的框架主要基于“生产者-搜集者”模型, 它假设群体成员里, 生产者找寻资源, 其他成员参与分享成果。在这个框架下, 来自动物搜索行为的概念例如搜索机制, 被用于设计最佳搜索策略来解决连续函数优化问题。

量子遗传算法(QGA)^[3,6]是基于量子计算的概念、理论(诸如量子位和量子叠加态)和进化算法的一种概率搜索算法。该算法进行染色体编码时, 是采用特有的量子位染色体编码方式, 再利用量子门的作用来更新个体。量子位在量子遗传算法中, 是最小的信息存储单元。

粒子群算法(PSO)^[3,5]是受到人工生命研究结果的启发, 其基本概念源于对鸟群捕食行为的研究。它的主要思路是先在多维空间初始化一个随机粒子群体, 再根据群中这些粒子的搜索速度和当前位置与群中粒子的极值状态来决定下一步寻找路径和方向, 经过不断迭代革新寻找的快慢和位置来革新群体的相应因素, 直至最后得到最好的位置, 然后结束寻优。

人工蜂群算法(ABC)^[3,10]是基于蜜蜂行为的一种智能优化算法。食物源所在的地点可以表示成可能解, 其蜜源量可以表示解的质量。蜜源量越丰富, 则说明求得解的质量越好, 一些蜜蜂则会自发去寻求蜜源, 从而就能够找到相对较好的解, 最后找到最优解。

遗传算法(GA)^[3]是根据物种进化的原则来进行寻优的, 运用在无功优化问题时, 首先会计算潮流, 然后进行染色体二进制编码, 通过选择、杂交和变异等遗传操作, 使其重新组合, 以产生更为优秀的个体, 如此重复迭代, 直到满足终止进化准则为止, 最后得到趋于最优的一组原问题的解。

2 无功优化分析软件开发

本文设计开发的无功优化分析软件是一款根据电网实际情况定制的软件, 该软件以 Java 语言编写而成, 集成了群搜索算法(GSO)、量子遗传算法(QGA)、粒子群优化算法(PSO)、人工蜂群算法(ABC)和遗传算法(GA)共五种 AI 算法, 内置了 BPA 数据接口, 解决了 BPA 数据与 Matpower 之间数据不兼容的问题, 具有 AI 算法集成化、内置 BPA 数据接口和强通用性等优点。

2.1 软件架构设计

软件架构主要包括如下几个模块: 项目管理器模块, 数据编辑模块, 无功优化计算模块和控制变量编辑模块, 如图 1 所示。其中, 针对各功能模块所需的数据, 提供智能友好的数据录入界面, 减少数据输入的盲目性。

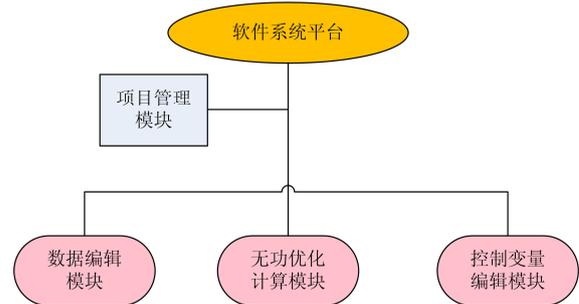


图 1 软件功能设计架构

Fig. 1 Architecture design of software function

软件的系统文件主要由用户导入 BPA 数据, 再经软件转换成 Matlab 格式的数据。用户能够在软件上进行网架结构的数据编辑与控制变量编辑等, 最后能够方便地以用户自定义命名在后台建立一个 .dat 文件和一个 .xlsx 文件, 系统会自动保存方便用户以后读取。在无功优化计算模块里面可导入该 .dat 文件或 .xlsx 文件即可开始计算。系统数据处理流程如图 2 所示。

基于图 2, 用户首先把某电网的 BPA 网架数据导入软件, 如需编辑则使用数据编辑模块, 不需要则通过 BPA 数据接口把 .dat 格式的数据转换成适用于 Matlab 的 Excel 格式数据。接下来, 用户需要自行输入需要节点的无功电源投入容量和特定节点的

变压器档位,更新到后台的 Excel 文件后,即可在无功优化计算模块中导入并进行计算。



图 2 数据处理流程

Fig. 2 Data processing flow chart

2.2 软件数据来源

软件通过与 Matlab 的接口进行数据输入/输出。五种无功优化 AI 算法均由 Matlab 生成,并采用 Matlab-Java 混合编程方法嵌入到软件中,可以独立于 Matlab 运行。运行时,软件将 BPA 网架数据传输给 Matlab 算法程序,由算法程序进行计算后返回给软件。

软件的数据来源于 BPA 网架数据。软件的设计兼容了 BPA 数据格式,导入 BPA 的网架数据后,软件能将这些数据转换为 Matlab 算法所需的数据格式并导入 Excel 表格,再调用 Matlab 算法程序读取表格的数据进行计算。数据流程图如图 3 所示。

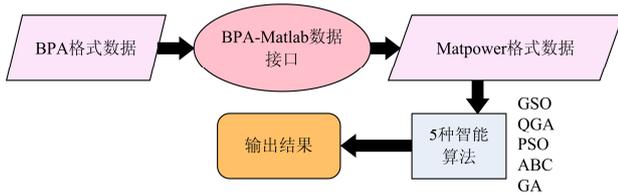


图 3 数据流程图

Fig. 3 Data flow chart

2.3 BPA 数据编辑

当用户把 BPA 数据导入软件后,但仍然有更改电网网架结构的需求时,该软件能够对 BPA 的网架数据进行编辑。BPA 数据编辑器界面如图 4 所示。



图 4 BPA 数据编辑器界面

Fig. 4 BPA data editor interface

图 4 中“数据编辑器”模块把 BPA 的.dat 文件以.txt 的格式呈现在界面中的,用户新建项目之后,即可把 BPA 数据在面板中显示出来,利用软件提供的增加数据卡片小工具,用户可以方便地增加节点卡、线路卡和变压器卡等数据,避免了数据格式出错。编辑结束后,再利用软件的 BPA-Matpower 数据转换接口,更新后台原文件中相对应的.dat 文件和.xlsx 文件。

2.4 BPA 数据接口

软件内置了 BPA 数据接口,该接口的开发依据笔者在文献[12]中提出的 BPA-Matpower 数据转换接口设计方法,可将.dat 格式的 BPA 网架数据转换为 Matlab 所需格式的数据,并导出到 Excel 表格中。

因为 BPA 和 Matpower 之间的数据结构存在很大差异,因此该接口的核心是把 BPA 中的网架信息提取出来,再按 Matpower 的数据规则存放。具体来说,软件首先读取 BPA 的.dat 数据文件,再识别有效数据卡,判断其类型,并截取其中的数据,转换到相应的矩阵中。截取数据的时候,采用 substring 函数,即 public String substring (int beginIndex, int endIndex)接口会对 BPA 数据进行循环读取,总共分 4 次,其 BPA-Matpower 数据接口工作流程如图 5 所示,数据导出结果如图 6 所示。

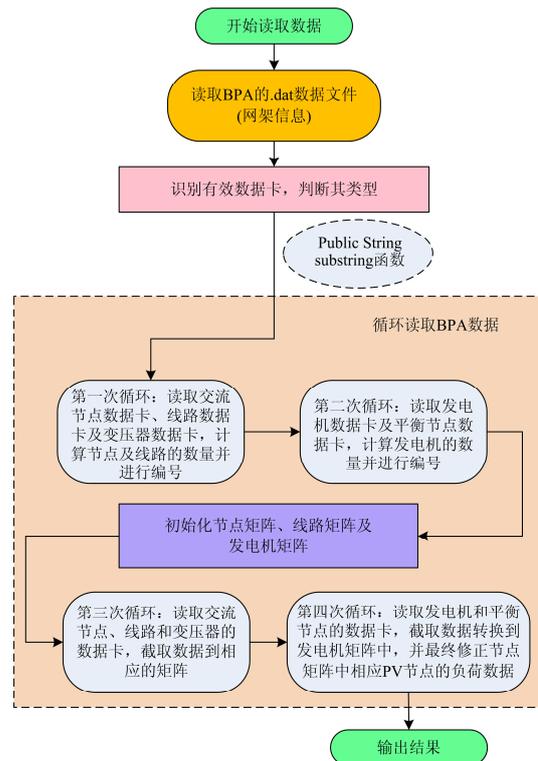


图 5 BPA-Matpower 数据接口工作流程图

Fig. 5 BPA-Matpower data interface work flow chart

节点类型: PQ bus = 1, PV bus = 2, reference bus = 3, isolated bus = 4													
bus name	bus i	type	Pd (MW)	Qd (MVar)	Gs (MW)	Bs (MVar)	area	Vm(p.u.)	Va(degrees)	base (KV)	zone	Vmax(p.u.)	Vmin(p.u.)
节点名称	节点编号	节点类型	有功负荷	无功负荷	电导	电纳	区域编号	电压幅值标幺值	电压相角	基准电压	损耗区域	电压上限标幺值	电压下限标幺值
4XYDC21	1	1	0	0	0	0	1	1	0	230	1	1.1	0.9
4XYDC51	2	1	0	0	0	0	1	1	0	525	1	1.1	0.9
4XYDCg1	3	3	30	3	0	0	1	1.05	0	20	1	1.1	0.9
4XYDCg2	4	2	15	8	0	0	1	1.05	0	20	1	1.1	0.9
4JINZ5	5	1	0	0	0	0	1	1	0	525	1	1.1	0.9
4WEISH21	6	1	0	0	0	0	1	1	0	230	1	1.1	0.9
TSQ50	7	1	58.5	-123	0	0	1	1	0	525	1	1.1	0.9
4JINZ21	8	1	0	0	0	0	1	1	0	230	1	1.1	0.9
4JINZ22	9	1	0	0	0	0	1	1	0	230	1	1.1	0.9
4JINZz1	10	1	0	0	0	0	1	1	0	230	1	1.1	0.9
4JINZz2	11	1	0	0	0	0	1	1	0	230	1	1.1	0.9
4JINZ3	12	1	0	0	0	0	1	1	0	38.5	1	1.1	0.9
4LIG21	13	1	0	0	0	0	1	1	0	230	1	1.1	0.9
4LIG11	14	1	0	0	0	0	1	1	0	115	1	1.1	0.9
4LIGz1	15	1	0	0	0	0	1	1	0	115	1	1.1	0.9
4LIG41	16	1	0	0	0	30	1	1	0	10.5	1	1.1	0.9

图 6 数据导出结果

Fig. 6 Exported results by data

2.5 控制变量编辑

软件能够对 BPA 网架数据的控制变量——无功档位配置和变压器变比——进行编辑。

无功优化中, 通常主要的控制变量只有无功档位配置和变压器变比。为使用户能够方便地输入可变(可修改)的无功档位配置和变压器变比配置, 并在节点增加或减少后, 还能进行通用计算, 该软件特意增加了“控制变量编辑”选项卡, 用户可把已经转换成 Excel 数据格式的 BPA 数据导入控制变量编辑中, 然后在表格中输入可变的无功档位和变比档位, 不可变的节点数据则不更改, 之后点击“更新表格”按钮, 即可把所需网架结构的控制变量更新后台的原文件, 可待无功优化计算时使用。

在网架结构不变且控制变量的档位固定的情况下, 用户在控制变量编辑模块中输入了无功档位配置和变压器变比档位配置后, 更新到 Excel 表格中, 即可一劳永逸, 以后均可根据该更新后的表格导入软件进行无功优化计算。若网架结构更新了, 比如增加了一些变压器或者无功补偿装置, 用户亦可方便地在本模块输入控制变量档位, 保证了该软件的通用性。无功档位编辑模块和变比档位编辑模块界面分别如图 7(a)、7(b)所示。



(a) 无功档位编辑模块



(b) 变比档位编辑模块

图 7 导入 Excel 表格后的档位编辑界面

Fig. 7 Gear editing interface after importing the Excel data

2.6 计算模块

软件可对完成控制变量编辑后的 Excel 表格数据进行基于 AI 算法的无功优化计算。其中，五种无功优化 AI 算法均由 Matlab 生成，且其程序已经打包编译放到了软件中，可以独立于 Matlab 运行。运行时，软件将网架数据传输给 Matlab 算法程序，由算法程序进行计算后输出。

在“采用算法”区域中，系统默认是算法全选，用户可以勾选所要采用的算法；目标函数中，系统默认电压越限个数系数为 1，网损系数为 0.5，电压稳定分量系数为 0.5，用户可以自行设定参数，选择经控制变量编辑后保存的 Excel 文件路径，并写入目标函数中网损和电压稳定分量的权重，最后点击“计算”按钮，软件即可开始所选 AI 算法的无功优化计算。软件进行计算后，会将无功补偿量、支路变比、节点电压、电压越限个数、有功损耗、无功损耗和电压稳定分量等计算结果显示出来，并将不同算法的结果之间形成对比。

3 实例分析

为了验证所开发软件的性能，本文以南方电网某市电网的 BPA 数据为数据源，对该市电网进行无功优化计算，并进行无功优化分析。所做的无功优化是在 Matlab7.10 仿真平台上借助 Matpower4.1 软件包中的潮流计算程序，并在 CPU 为 3.1GHz 内存为 4 GB 的计算机上对电网丰大、丰小、枯大、枯小四种方式下对应模型进行仿真。为确定电网无功优化方案，本文以开发的 GSO、QGA、PSO、ABC 和 GA 等五种 AI 算法进行对比分析。

3.1 无功优化计算

在无功优化模块，选定五种 AI 算法，并选择上文所导出的 Excel 文件路径，配置好目标函数的权重，本文选定网损和电压稳定分量各占 50%，电压越限个数乘以倍数 1 来计算综合目标值。经过计算，五种 AI 算法的无功补偿量计算结果、支路变比结果、电压幅值结果和其他指标结果分别如图 8(a)、8(b)、8(c)和 8(d)所示。优化结果的数据导出到 Excel 表格中显示如图 9 所示。

3.2 无功优化目标对比分析

从网损、电压越限个数、电压质量以及三者的综合目标值四个角度来衡量无功优化的效果。考虑丰大和枯小两种运行方式，基于 PSD-BPA 及基于五种 AI 算法下的各最优目标值对比分析如表 1 所示。



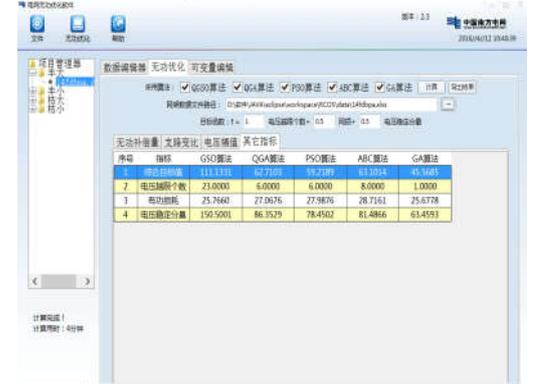
(a) 无功补偿量计算结果



(b) 支路变比结果



(c) 电压幅值计算结果



(d) 其他指标计算结果

图 8 五种 AI 算法运算结果界面显示

Fig. 8 Operation results displayed by 5 kinds of AI algorithms

1	序号	节点名称	GSO算法	QGA算法	PSO算法	ABC算法	GA算法
2	1	4XYDCg1	0	0	0	0	0
3	2	4XYDCg2	0	0	0	0	0
4	3	4XYDC21	0	0	0	0	0
5	4	4XYDC51	0	0	0	0	0
6	5	TSQ50	0	0	0	0	0
7	6	4JINZ5	0	0	0	0	0
8	7	4JINZ21	0	0	0	0	0
9	8	4JINZ22	0	0	0	0	0
10	9	4JINZz1	0	0	0	0	0
11	10	4JINZz2	0	0	0	0	0
12	11	4JINZ3	-180	0	-60	0	0
13	12	4LIG21	0	0	0	0	0
14	13	4LIG11	0	0	0	0	0
15	14	4LIGz1	0	0	0	0	0
16	15	4LIG41	52.5	60	7.5	15	52.5
17	16	4LIG22	0	0	0	0	0
18	17	4LIG12	0	0	0	0	0
19	18	4LIGz2	0	0	0	0	0
20	19	4LIG42	0	0	0	0	0
21	20	BKB	0	0	0	0	0
22	21	BKB	0	0	0	0	0
23	22	BKB	0	0	0	0	0

图9 优化结果 Excel 表格显示

Fig. 9 Excel display of optimization results

表1 两种运行方式下的优化结果对比

Table 1 Comparison of optimization results under two operating modes

项目		目标函数	有功损耗	电压稳定分量
丰大方式	PSD-BPA	81.68	24.70	122.66
	AI算法			
	GA	52.15	24.89	66.86
	QGA	49.47	24.84	61.37
	GSO	54.59	25.12	70.02
桔小方式	PSO	52.63	24.88	65.30
	ABC	52.87	24.53	68.55
	PSD-BPA	79.95	16.00	129.90
	AI算法			
	GA	45.18	15.38	66.22
桔小方式	QGA	42.60	16.01	60.55
	GSO	53.25	15.90	73.84
	PSO	51.50	15.68	120.67
	ABC	42.98	16.17	57.21

从表1可看出,在没有进行无功优化前(即采用PSD-BPA进行潮流计算后对各无功评价目标的统计值),电压稳定分量和电压越限个数值都较高,即由于无功潮流分布不合理导致电压偏差较大。

对于本文应用的AI算法的优化结果可以看出:QGA算法的综合寻优性能最好,但是在收敛时间上有一定的牺牲;GA算法收敛时间较快,在搜寻最优解以及平均搜寻能力上虽然都不及QGA算法,但也能取得较好的收敛效果;GSO算法相对其他算法来说,收敛速度相对比较快;而对于PSO算法来说,它的收敛快慢和找到最优解的本领相对于其他算法处于综合的中等水平;ABC算法最大的缺点就是收敛时间太长,但具有较好的寻找最优解的能力。

该算例通过与PSD-BPA的对比分析验证了本文应用的AI算法在无功优化中的可靠性与优越性,用户可以根据自己的需求选取相应的算法。当时间较紧张时可采用QGA算法进行寻优,而在时间较宽裕时,可采用多种算法同时寻优,选取最优的结果。

4 结论

1) 本文设计并开发了基于五种AI算法的无功优化分析软件。该软件根据电网实际情况进行设计,具有便捷性和通用性等特点,可指导电网对无功投切量以及变压器变比等参数进行调整,并快速地获得最优潮流分布。同时,用户可根据该软件实现对不同电网的BPA网架数据进行无功优化。

2) 软件集成了几种主要的AI算法,并内置BPA数据接口,完成BPA数据到Matpower数据的准确转换,解决了两者数据不兼容的问题,具有较强的用户指向性和实用性,可节省大量的人力物力,实现了灵活的无功优化分析。

参考文献

- [1] 陈芳. 电网运行状态的在线稳定性评估及研究[D]. 福州: 福州大学, 2006.
CHEN Fang. Research on on-line stability assessment of electric network operating security[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.
- [2] 刘前进, 许慧铭, 施超, 等. 改进教与学方法在电力系统无功优化中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 82-88.
LIU Qianjin, XU Huiming, SHI Chao, et al. Research on modified teaching-learning algorithm for reactive power optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 82-88.
- [3] 王克文, 张东岳. 电力系统无功优化算法综述[J]. 电测与仪表, 2016, 53(10): 73-79, 98.
WANG Kewen, ZHANG Dongyue. A summary of reactive power optimization algorithm in power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(10): 73-79, 98.
- [4] 李鸿鑫, 李银红, 李智欢. 多目标进化算法求解无功优化问题的比较与评估[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1651-1658.
LI Hongxin, LI Yinhong, LI Zhihuan. Comparison and evaluation on multi-objective evolutionary algorithm for optimal reactive power flow[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1651-1658.

- [5] 刘华臣, 王锡淮, 肖健梅, 等. 基于群搜索算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 93-99.
LIU Huachen, WANG Xihuai, XIAO Jianmei, et al. Reactive power optimization based on group search optimizer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 93-99.
- [6] 马玲, 于青, 刘刚, 等. 基于量子差分进化算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 39-43.
MA Ling, YU Qing, LIU Gang, et al. Power system reactive power optimization based on quantum DE algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 39-43.
- [7] 陈前宇, 陈维荣, 戴朝华. 电力系统无功优化多目标处理与算法改进[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 129-135.
CHEN Qianyu, CHEN Weirong, DAI Chaohua. Multi-objective reactive power optimization and improvement of particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 129-135.
- [8] LIU L. Reactive power compensation and optimization strategy for grid-interactive cascaded photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 188-202.
- [9] GHASEMI M, TAGHIZADEH M, GHAVIDEL S, et al. Solving optimal reactive power dispatch problem using a novel teaching-learning-based optimization algorithm[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2015, 39: 100-108.
- [10] 刘前进, 许慧铭, 施超. 基于人工蜂群算法的多目标最优潮流问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 1-7.
LIU Qianjin, XU Huiming, SHI Chao. Research on power flow optimization based on multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 1-7.
- [11] 曾嵘, 彭春华, 王奎, 等. 基于鸟群算法的微电网多目标运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 117-122.
ZENG Ceng, PENG Chunhua, WANG Kui, et al. Multi-objective operation optimization of micro grid based on bird swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 117-122.
- [12] 陈柏熹, 李清, 程乐峰, 等. BPA-Matpower 数据转换接口设计[J]. 电测与仪表, 2016, 53(23): 111-116.
CHEN Baixi, LI Qing, CHENG Lefeng, et al. Design of BPA-Matpower data transformation interface[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(23): 111-116.
- [13] 曾嘉俊, 刘志刚, 何士玉, 等. 一种基于子区域粒子群的无功优化算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 37-42.
ZENG Jiajun, LIU Zhigang, HE Shiyu, et al. Study of the reactive power optimization based on sub-region particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 37-42.
- [14] 范亚洲, 黄海涛, 魏明磊, 等. PSO-CSO 算法在地区电网无功优化的应用[J]. 广东电力, 2016, 29(12): 92-97.
FAN Yazhou, HUANG Haitao, WEI Minglei, et al. Application of PSO-CSO algorithm in reactive power optimization for regional power grids[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(12): 92-97.
- [15] 顾然, 董向明, 张海龙, 等. 基于模型预测控制的配电网无功优化控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 37-42, 50.
GU Ran, DONG Xiangming, ZHANG Hailong, et al. A novel reactive power optimization control strategy of distribution network based on model predictive control[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 37-42, 50.

收稿日期: 2017-01-19; 修回日期: 2017-04-06

作者简介:

包涛(1995—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统优化运行与控制的研究工作; E-mail: baotaowork@foxmail.com

程乐峰(1990—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为配网自动化、电力系统运行与控制、博弈论等方面研究; E-mail: chenglf_scut@163.com

陈柏熹(1992—), 男, 硕士研究生, 从事配网自动化及节能理论研究。

(编辑 张爱琴)