

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.03.016

# 基于状态估计的电能质量监测点优化配置研究<sup>\*</sup>

吴丽丽, 黄飞腾, 翁国庆<sup>\*</sup>

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:**针对智能配电网的电能质量监测系统构建成本较高的问题,对通过已知监测数据获得未安装电能质量监测装置(PQM)的系统节点信息的状态估计进行了研究,构建了一种基于状态估计和PQM的电能质量监测系统,提出了一种基于状态估计和多种群改进遗传算法的电能质量监测点优化配置方法,以较少的监测装置实现了对配电网的全面监测,达成了系统性能和经济成本的优化,优化后的电能质量监测系统能对各监测点的全局信息进行再加工,从而帮助电力管理部门尽快查明事件原因、明确责任、排除故障。在两种不同拓扑结构的IEEE配电网络中进行了仿真应用。研究结果表明,该算法能有效地实现配电网的电能质量监测点的优化配置,降低监测系统的构建成本。

**关键词:**电能质量;监测点;优化配置;状态估计;遗传算法

中图分类号:TM727.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)03-0331-05

## Optimized allocation of power quality monitoring based on state estimation

WU Li-li, HUANG Fei-teng, WENG Guo-qing

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Aiming at the high cost problem of power quality monitoring system in distribution network, a state estimation method was researched which is used to estimate the monitoring data of uninstalled nodes by known information of power quality monitoring (PQM). The power quality monitoring system was constructed based on state estimation and PQM. An optimal allocation method based on the state estimation and the improved genetic algorithm of multiple populations was proposed, with fewer monitoring device for the comprehensive monitoring of the distribution network. The optimization of system performance and finance was achieved. Global information of the monitoring stations was processed by the optimal monitoring system, to help the administrative departments to find out the reason as soon as possible, clear the responsibility and solve faults. The proposed algorithm was applied in two different topologies of IEEE distribution network. The results indicate that the proposed algorithm can effectively achieve the optimal allocation of power quality monitoring in the distribution network, and it can reduce the costs of the power quality monitoring system.

**Key words:** power quality; monitoring station; optimal allocation; state estimation; genetic algorithm

## 0 引言

随着社会经济和新能源技术发展,电网受到了大量冲击负荷或非线性负荷影响,电能质量问题日益突

出,包括电压波形畸变、电压闪变和三相不平衡等问题<sup>[1-2]</sup>。另一方面,随着精密电子装置设备的广泛使用,人们对电能质量(PQ)的要求也不断提高。准确、有效地监测和分析电网中的电能质量已经成为国内外研究的热点<sup>[3-4]</sup>。对配电网进行电能质量监测对于解

收稿日期:2015-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207139);浙江省教育厅科研项目(Y201431752);浙江工业大学校级自然科学基金资助项目(1401103025408)

作者简介:吴丽丽(1982-),女,福建莆田人,硕士,讲师,主要从事智能电网、电子技术、电力自动化的研究。E-mail:jdsaaa@163.com

通信联系人:翁国庆,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:wqg@zjut.edu.cn

决电能质量问题和提高供电可靠性而言,具有重要意义<sup>[5]</sup>。

但是,现有的电能质量监测装置(PQM)成本普遍较高,构建全覆盖的监测系统其成本与效益的性价比并不理想<sup>[6]</sup>。所以,对于减少 PQM 安装数量并智能地选择恰当的安装位置,即用最少 PQM 实现对系统最好的监测效果,具有较大的现实意义和应用价值。

国内外对监测点配置优化问题已提出了一些初步的研究成果,但是这些现有的研究各自针对不同的目标,其监测点的优化配置方法各有特色,但仍存在一定的局限性和缺陷。文献[7]对不同类型的短路情况进行了仿真,针对该类型的电能质量事件,进行 PQM 的配置,不足之处在于其应用范围受到故障类型限制。文献[8]通过定义每条线路的各个权重因子,提出了系统平均不明确指数,以实现其网络总权值最小为目标,得到 PQM 的优化配置,但是其权重衡量上存在不确定性。

本研究提出一种基于状态估计的电能质量监测点优化配置方法,该方法能通过已知监测数据获得未安装 PQM 的系统节点信息,并基于该状态估计方法,构建一种电能质量监测系统,以较少的监测装置实现对配电网的全面监测。然后,本研究通过多种群改进遗传算法实现监测点的优化配置,达成系统性能和经济成本的优化。在监测点的优化配置基础上,各个 PQM 对电能信号进行采集和数据处理,然后上传到电能质量监测系统,监测系统对全局信息进行再加工,实现电能质量事件的智能诊断,从而帮助电力管理部门尽快查明事件原因、明确责任、排除故障、采取合理改善措施,从而保证电能质量满足用户需求。最后,在两种不同拓扑结构的配电网络中进行应用。

## 1 状态估计

状态估计方法使得未安装 PQM 的系统节点能通过已知监测数据获得其估计信息。所以,系统中需要在恰当的位置安装一定数量的 PQM,才能满足状态估计的条件,从而获得全网监测目标的电能质量。因此,该状态估计方法是依托于电能质量监测系统的一种方法。

### 1.1 电能质量监测系统

电能质量监测系统的结构包含若干台分布式的 PQM 和类似于大脑地位的 PQ 总站<sup>[9]</sup>。单台 PQM 的结构如图 1 所示。

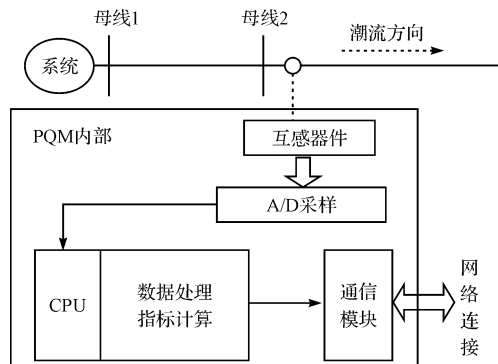


图1 电能质量监测装置的内部结构

单台 PQM 主要包含信号变换、模/数(A/D)采样、处理器(CPU)和通信模块。

其中:信号变换是将工频信号通过互感器件变换为二次信号;A/D 采样则是将连续的模拟信号转换为离散的数字信号;嵌入式的 CPU 对这些数据进行加工处理,转换为 PQ 指标,从而减少数据量。通信模块通过网络连接上传 PQ 指标数据到 PQ 总站,由工作站进行数据汇总、存储和智能计算。

构建电能质量监测系统如图 2 所示。

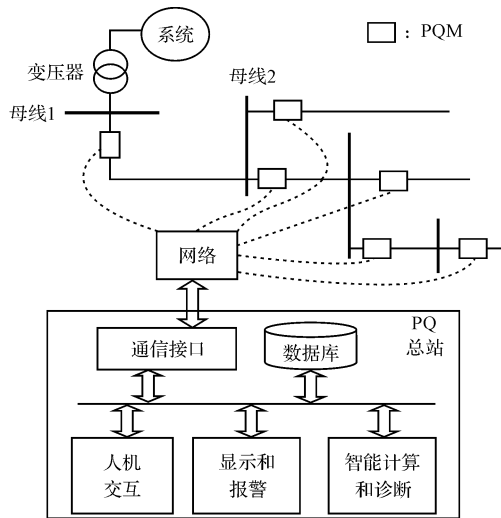


图2 电能质量监测系统的构架

其中:PQ 总站对各 PQM 上传的数据进行汇总、处理、存储和智能计算等功能,并具有友好的人机交互界面和操作平台,能够对电能质量数据进行进一步的全局分析和运算,并进行事件诊断和故障排查,还能够对各种数据进行分析、显示和报警等辅助管理功能。

### 1.2 电能质量的状态估计

从基尔霍夫电流和电压定律可知,电路中的电流和电压具有可推算的关系,例如从 KCL 定律可得一条支路的电流可通过另外 $(N-1)$ 条支路计算得出。此外,根据线路电压降落的计算方法,在已确定线路类型

和长度的情况下,已知线路一段的电能工频数据,可以推导出线路另一段的电能数据。这些传统的潮流计算方法中,蕴含了电能数据能通过拓扑结构进行传递计算的思想,这种思想是所提状态估计方法的理论基础。

对一个监测系统而言,在满足具有一定数量的 PQM 布置的情况下,可以从这些 PQM 监测数据提取特征值。将这些特征数据构造成状态估计矩阵模型,对未安装 PQM 的节点进行电能质量估计,就是所提状态估计方法的核心思想。本研究定义了特征函数  $g_n(u, v)$  来表征在第  $n$  个 PQM 处,电能质量数据从节点  $u$  映射到节点  $v$  的精确度;而  $p_n(u)$  则表征节点  $u$  电能质量数据的精确度。那么对于有  $m$  个节点的配电网,可构建其对应数量的状态估计矩阵模型。

模型如图3所示。

$$\begin{array}{c} p_n(u) \rightarrow \\ \text{(input)} \end{array} \begin{bmatrix} g_n(1,1) & g_n(2,1) & \cdots & g_n(m,1) \\ g_n(1,2) & g_n(2,2) & \cdots & g_n(m,2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_n(1,m) & g_n(2,m) & \cdots & g_n(m,m) \end{bmatrix} \begin{array}{c} \rightarrow p_n(v) \\ \text{(output)} \end{array}$$

图3 状态估计输入输出矩阵模型

图3所示矩阵中的各个  $g_n(u, v)$  是根据线路参数和拓扑结构,按电气参数映射过程(电气等效计算)得到;当两节点距离越远、线路参数越大、分流支路越多的情况下,该值越小。该状态估计矩阵模型表示,若存在第  $n$  个 PQM,则从节点  $u$  的电能质量数据推算出节点  $v$  的电能质量数据仍具有的准确度。

基于该模型,那么从监测系统中存在若干数量的 PQM,可以推算出全网所有需要监测节点的电能质量数据,以及其最佳的准确度。

通过上述状态估计模型,从而将成本与性能的复杂定性问题转换为准确度与成本的定量优化。笔者构建如下优化模型:

$$\begin{cases} \min F(x) = f(x) + h(x) \\ f(x) \geq 0 \\ \text{s. t. } h(x) \leq 0 \\ m \geq x \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $f(x)$ —经济成本函数,  $h(x)$ —系统性能(或准确度函数),如下:

$$\begin{cases} f(x) = \alpha \cdot \sum_{i=1}^N x_i \\ h(x) = -\beta \cdot \sum_{i=1}^N p_n(x_i) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\alpha$ —成本系数;  $\beta$ —性能系数;  $p_n(x_i)$ —状态估计

矩阵模型的输出;  $x_i$ — $x$  中第  $i$  个位置;  $x$ —优化过程中的可行解( $m$  维向量),表示  $m$  个节点的每个位置是否需要安装 PQM(不安装取 0,安装取 1)。

## 2 多种群改进遗传算法

遗传算法是比较成熟的智能进化算法,能较好地适用于多种优化问题<sup>[10]</sup>。遗传算法从个体组成的群体中搜索迭代,其初始的个体是随机产生的,然后对每个个体进行评价,适应度高的更符合要求的,每一代中适应度值较高的一部分个体将被保留到下一代,其他个体则通过选择、交叉和变异等操作产生新的个体迭代其余部分。当达到设定的迭代次数时,停止进化,输出最优个体作为优化结果。但是普通遗传算法存在随机性较强,如果迭代次数和种群规模较小时,容易陷入局部收敛。

多种群遗传算法是对普通遗传算法的一种改进算法<sup>[11]</sup>,其基本思想是划分若干个独立的子集合,分别进行遗传进化,最后进行结合后得到优化结果。

### 2.1 遗传编码和适应值评价

针对电能质量监测点的优化问题,对其进行遗传编码方式如下:

$$x^j = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_m] \quad (3)$$

式中:向量  $x^j$ —第  $j$  个个体,其元素值分别表示对应  $m$  个节点的每个位置是否需要安装 PQM,不安装取 0,安装取 1。因此,该方法属于二进制编码。

适应值的评价函数由目标函数转换得到

$$fit(x) = -[F(x) + C_h] \quad (4)$$

式中:  $C_h$ — $h(x)$  最低取值范围的绝对值,作用是将适应值转换为大于零的实数。因此,在该模型中,个体的适应值越高越优良。

### 2.2 多种群和选择操作

首先,本研究通过对初始种群进行多个独立子群的随机划分,但独立子群的规模统一为  $\mu$ 。然后笔者对多种群分别进行选择、交叉和变异等遗传操作,在进化迭代过程中,为保留最优个体的流失,以及使得不同子群具有不同的收敛速度,本研究对  $q$  个独立子群按照下式概率进行保留:

$$B = [b_1 \quad b_2 \quad \cdots \quad b_q] = \left[ \frac{1}{\mu} \quad \frac{2}{\mu} \quad \cdots \quad \frac{q-1}{\mu} \quad \frac{q}{\mu} \right] \quad (5)$$

式(5)表示每个子群在进化时,每一代保留最优个体的数量分别从 1 至  $q$ ,从而拉开了每个独立子群的收敛速度,防止所有群体都过早收敛。

选择操作分两大类,被保留的个体强制进行一次遗传选择;而对于不被保留的个体采样经典的轮盘赌操作,其被选择概率  $X_z(x)$  计算如下:

$$X_z(x) = \frac{fit(x)}{\sum_{i=1}^{\mu} fit(x_i) - \sum_{j=1}^b fit(x_j)} \quad (6)$$

式(6)表示当前个体被选择的概率为其自身的适应值在其所在独立子群的所有个体适应值的总和的比例,但是其中要除去被保留的个体。其中  $b$  表示其所在子群对应式(5)的保留数。为维持种群的数量,其轮盘赌选择总数  $X_{num}$  为:

$$X_{num} = \mu - b \quad (7)$$

### 2.3 交叉与变异操作

对强制保留的个体,在交叉操作前,本研究进行一次赋值替换,将未被选择个体替换掉(用于保存到下一代)。然后对所有被选择或被强制保留的个体,进行一次交叉操作,采样双点交叉,即随机选中遗传编码上的两个点,对两条编码互换其中的代码,交叉操作示意图如图4所示,即编码的2号与4号位置被选中进行交叉。

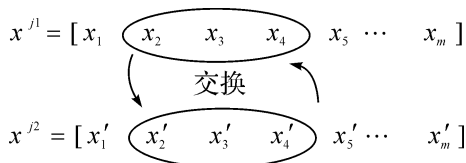


图4 交叉操作示意图

变异操作则采样较低的概率进行随机选取某个个体上的一位遗传代码位置,进行0或1的变换。对于多种群算法而言,其变异概率设置如下:

$$B_V = \left[ \frac{1}{2\mu} \quad \frac{2}{2\mu} \quad \dots \quad \frac{q-1}{2\mu} \quad \frac{q}{2\mu} \right] \quad (8)$$

变异概率的设置原则原理类似于较优个体的保留,用于调控不同独立子群的差异,但是数值上降低了一半。

### 2.4 算法流程

基于多种群遗传算法的优化配置方法的具体步骤如下:

步骤1:根据电力系统的结构,获取状态估计矩阵及其参数。

步骤2:进行初始的必要参数设置,编码,对初始种群进行随机初始化。

步骤3:对初始种群进行分类,得到  $q$  个独立子群。

步骤4:对  $q$  个独立子群分别按照进化算法进行遗传,包括:选择、交叉、变异和适应度计算。

步骤5:收敛判定,如果达到最大进化次数,则跳出循环。否则返回步骤4。

步骤6:对  $q$  个独立子群的输出结果进行合并,选取最优值作为全局极值。

步骤7:将全局极值解码转换为优化配置结果。

基于多种群遗传算法的优化配置流程如图5所示:

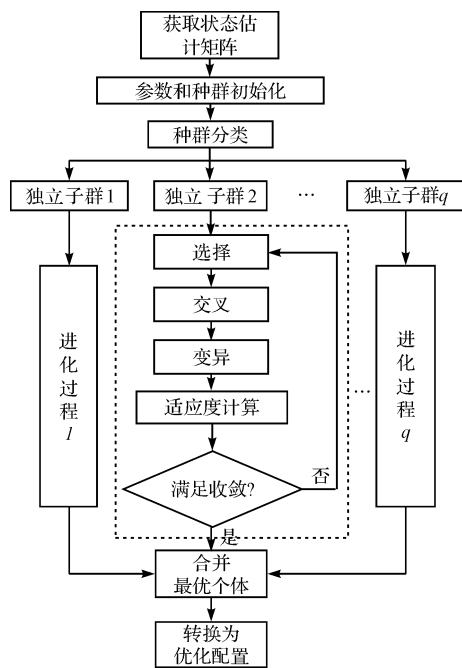


图5 算法流程

## 3 实 验

本研究进行了多种群遗传算法的编程,并对应于两种不同节点数的 IEEE 配电网拓扑结构<sup>[12]</sup>,在用 Matlab/Simulink 电力系统仿真中构建了模型,展示其中 PQM 监测到的扰动事件实时电压  $U$  和电流  $I$  的波形如图6所示。

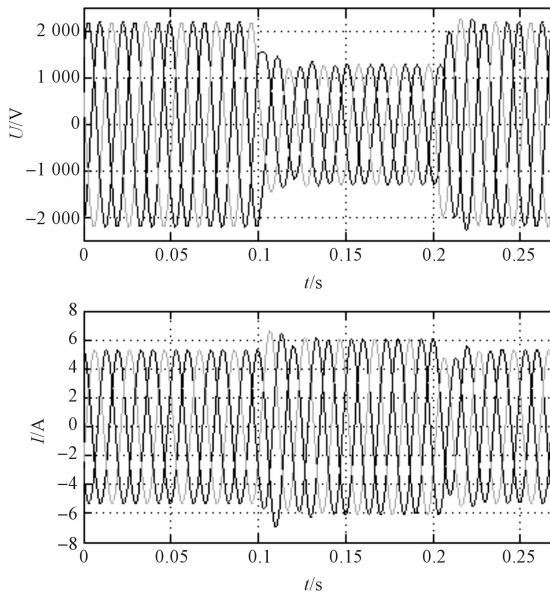


图6 PQM 监测到的扰动事件电压和电流波形

本研究用多种群遗传算法进行电能质量监测点优化配置的应用,得到优化结果。笔者将得到的两种不同配电网结构的优化配置方案标注在配电网拓扑中,优化配置结果如图7所示。

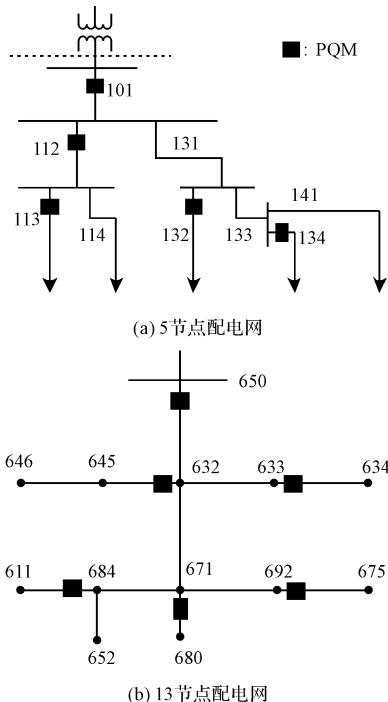


图7 3种不同节点配电网的优化配置结果

从图7中可以观察到优化配置后的PQM位置分布,实际安装数量约为可安装的监测点的一半。结果还表明,改进算法能有效地对PQM进行优化配置,在满足全网电能质量监测的前提下,明显地降低了实际配置的PQM数量,从而降低了PQ监测系统的构造成本。

## 4 结束语

本研究提出了一种基于状态估计的电能质量监测点优化配置方法。在满足状态估计条件的情况下,研究者能通过该状态估计方法获得其他未安装PQM的系统节点的电气信息,并构建了一种电能质量监测系统结构,可以用较少的监测装置实现对配电网的全面监测。笔者通过多种群改进遗传算法实现了监测点的优化配置,达成系统性能和经济成本的优化。在优化配置基础上,电能质量监测系统能对各监测点的电能信号进行采集和数据处理,并对全局信息进行再加工,

从而帮助电力管理部门尽快查明事件原因、明确责任、排除故障。最后,笔者在两种不同拓扑结构的配电网网络中所提算法进行了应用,实验结果表明,该算法能有效地实现配电网的电能质量监测点的优化配置,降低了监测系统的构建成本。

## 参考文献(References):

- [1] 曲广龙,杨洪耕.基于梯形云模型的电能质量数据关联性挖掘方法[J].电力系统自动化,2015,14(7):145-150.
- [2] 费平平,江全元,严玉婷.统一电能质量调节器能量优化控制策略研究[J].机电工程,2014,31(5):629-633.
- [3] 付学谦,陈皓勇.基于加权秩和比法的电能质量综合评估[J].电力自动化设备,2015,35(1):128-132.
- [4] B JOHANNA, M RITWIK. Integration of distributed generation in the Volt/VAR management system for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015,6(2):576-586.
- [5] 黄飞腾,翁国庆,王强.带分布式电源的配电网电能质量扰动源定位[J].电力系统自动化,2015,39(9):150-155.
- [6] 马立新,张海兵,周磊.有源电力滤波器的故障诊断与监测系统[J].机电工程,2015,32(4):553-556.
- [7] Almeida C F M, Kagan N. Allocation of Power Quality Monitors by Genetic Algorithms and Fuzzy Sets Theory[C]//15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems. Curitiba, Brazil:IEEE,2009.
- [8] Haiyan Dong, Qian Guo, Qingquan Jia, etc. An algorithm to locate power-quality disturbance source based on disturbance measures and information fusion theory. DRPT 2011. Weihai, China:[s. n.],2011:589-595.
- [9] 柳英杰,胥芳,潘国兵.三通道分布式电能质量检测系统研究[J].机电工程,2014,31(2):244-248.
- [10] 陈碧云,韦杏秋,陈绍南,等.基于多种群遗传算法的电力系统多目标优化[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(7):24-29.
- [11] 孙晓燕,陈姗姗,巩敦卫,张勇.基于区间适应值交互式遗传算法的加权多输出高斯过程代理模型[J].自动化学报,2014,40(2):172-184.
- [12] IEEE PES distribution system analysis subcommittee's distribution test feeder working group[EB/OL]//[2013-08-01]. Online Available: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>.

[编辑:张豪]

## 本文引用格式:

吴丽丽,黄飞腾,翁国庆.基于状态估计的电能质量监测点优化配置[J].机电工程,2016,33(3):331-335.

WU Li-li, HUANG Fei-teng, WENG Guo-qing. Optimized allocation of power quality monitoring based on state estimation[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(3):331-335.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>