

Review on Optimal Allocation of Power Quality Monitoring Points

Pingping Ma¹, Wenqing Huang¹, Xuwen Shen²

¹College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha

²Henan Zhonghui Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou

Email: 313991640@qq.com, 985711197@qq.com

Received: Apr. 14th, 2014; revised: May 10th, 2014; accepted: May 22nd, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

With the rapid development of national economy, electric power industry pays more and more attention to the power quality problems day by day. In order to minimize the harm of the power quality problems, building a real-time power quality monitoring network for real-time monitoring of the power quality problems in the entire network has important practical significance. At the same time, in order to meet the economic benefits, domestic and foreign researchers have proposed a series of methods to solve the optimum measuring positions for power quality monitoring, and made a great contribution to the development of power quality monitoring system. In this paper, these methods were summarized, and the future development of power quality monitoring system was discussed.

Keywords

Electric Energy Quality, Optimize Configuration, Monitoring System, Review

电能质量监测点优化配置综述

马苹苹¹, 黄文清¹, 申学文²

¹湖南大学电气与信息工程学院, 长沙

²河南省众慧电力工程咨询有限责任公司, 郑州

Email: 313991640@qq.com, 985711197@qq.com

收稿日期: 2014年4月14日; 修回日期: 2014年5月10日; 录用日期: 2014年5月22日

摘要

随着国民经济的飞速发展，我国的电网模式正在向智能化发展，然而要实现电网的智能化，其中一项很重要的技术就是电网监测和控制技术，加上近年来各电力行业对电能质量问题的关注度日益提高，所以构建电能质量实时监测网络对全网电能质量问题进行实时监测具有重要的现实意义。为了同时满足经济效益并且具有足够的监控能力，国内外学者相继提出了一系列解决电能质量监测点优化配置问题的方法，并为电能质量监测系统的发展做出了巨大贡献。本文对这些方法进行了综述，并对未来电能质量监测系统的发展进行了展望。

关键词

电能质量，优化配置，监测系统，综述

1. 引言

电能质量问题可以定义为：导致用电设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率的偏差，其内容主要包括频率偏差、电压偏差、电压波动与闪变、三相不平衡、暂态或瞬态过电压、波形畸变(谐波)、电压暂降与短时间中断以及供电连续性等[1]。电能质量问题给用户带来了巨大的经济损失，因此对电网的电能质量进行有效的监测成为一项紧迫而重要的工作。目前，主要采用的电能质量监测方式是在线监测，即在电网中安装电能质量监测装置，以达到在线进行实时监测的目的，然而如果对每个节点均配置电压暂降监测装置，则存在经济性差且完全没有必要的不足。因此，研究如何实现电能质量监测装置的最优布点，即用最少的监测装置实现对全网电能质量的监测分析，这对于减少设备投资、提高电力系统经济效益而言具有重要意义。

2. 对电能质量监测点优化配置问题研究的必要性

随着电力行业的不断发展，我国电力系统的规模随之扩大，电力电子设备特别是各种高度自动化智能化现代设备的应用也越来越广泛，然而大量的非线性设备接入电网，使得系统的电流和电压偏离理想状态而发生畸变。同时，电网中的变压器和电机容量逐渐增大，致使系统中的谐波污染问题日益明显，这已经成为当前电网中普遍存在的问题[2]。电力系统是一个庞大的系统，节点数目成千上万，所以在每个节点均安装电压暂降监测装置将导致监测网络成本巨大，财力无法承担，同时为数众多的监测点将产生海量的高冗余度监测数据，增加信息的处理和传输的难度，因此，我们需要对全网的电压暂降监测点进行合理优化配置，以达到安装最少数目的监测装置来实现全网电压暂降的可观测性。这样既节约了成本，也避免了大量冗余数据带来的信息传输与处理的不便。

智能电网是现代电网的发展方向和目标，在当前智能电网建设背景下，互联电力系统的规模巨大，电网的任何发展都必须以保证电能质量为前提，现在我国提出建设坚强智能电网，需要提高供电可靠性、用电效率，改变电源结构，提高电网灵活性和用户用电选择性，实现用户与电网互动，系统对电能质量的实时监测性要求极高。所以随着智能电网的快速发展，对电能质量的监测系统的研究也刻不容缓。

3. 电能质量监测点优化配置的研究现状

目前国外对此问题的研究已经比较广泛，但在国内，研究出的具体的电能质量监测点的优化配置方法很少，我国对电能质量监测点优化配置的主要指导性原则如下[3]：1) 监测点的设置应满足覆盖系统主

网及全部供电电压等级的要求；2) 要能满足电能质量指标调整与控制的要求；3) 要满足电能质量要求、严格用户和电压敏感用户的特殊需求，以及协议用户的要求。

目前存在的优化配置方法主要有以下几种：

1) 线性规划法

线性规划问题(Linear Programming, 简记为 LP)是运筹学的一个重要分支,是目前应用最广泛的数学规划方法,其模型是由一组含有等式、不等式的代数方程以及具有求极值关系的目标函数(优化函数)表达式所构成的复合式抽象数学模型,它是优化理论中用来求解决策变量最有效的方法之一,把监测装置的优化配置问题转换成线性规划问题进行求解是目前最常采用的一种方法。对于线性规划的优化问题,有枚举法、分支定界法、拟退火法、遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)等解法。

文献[4]提出了一种经济型的网络化监测与分析系统结构,提出监视器应安装在具有较高的权重的组件上面,并在满足系统各节点电压、电流数据可观测的情况下,根据系统的拓扑结构,利用系统关联矩阵设置各节点的约束限制,以系统的总权重最小来设置目标函数,通过整数线性规划问题最优解求取的方法进行监测点数量和布置点的优化设计,实现系统构建的经济优化。

在文献[5]中提出了用规划法 FLP(finance logic programming)来确定电能质量监测的最优配置方案,以降低把数据冗余考虑进内的分布式监控系统的成本,该优化问题是首先利用电路基本定律推导的三个基本法则设置系统各节点间电压、电流的约束关系,定义约束条件,然后以构建电能质量监测系统的费用最低为目标函数来设置监测点,最后通过分支定界法进行优化计算,求取满足相应可观性的最优电能质量监测点。

文献[6]提出了一种基于凹陷域分析的电压暂降监测点优化配置的方法,以监测点数目最小为目标函数。以全网敏感性负荷节点电压暂降可观测性为约束条件。利用 0-1 整数线性规划方法,通过分支界定法求取符合要求的最少数目监测点。

文献[7]提出了一种基于系统监测器监测数据来精确定位故障点位置的优化配置方法,该方法通过对全网进行故障点可观测性分析(FLOA),将系统分为故障点可观测部分和故障点不可观测部分。该方法在满足电压暂降可定位的约束条件下,考虑以监测点数目最小为目标函数进行电压暂降监测点的优化配置计算,把监测装置的优化配置问题转化为一个整数线性规划问题,使用 IPLOG' s CPLEX 优化技术进行求解。

文献[8]根据系统的拓扑特征,提出用遗传算法(GA)来解决电能质量监测装置的优化配置问题,以监测装置数目最少为目标,以在任何类型的电压暂降或骤升故障时都能至少被一个监测装置监测到为约束条件构造整数线性规划模型,利用 GA 进行求解。

文献[9]通过 PSCAD / EMTDC 建立了一个能反映每条母线暂降域的 0-1 敏感度矩阵,形成整数规划的约束条件,以监测仪安装数量最小化为目标函数,采用粒子群算法进行优化计算。

文献[10]提出利用线性规划原理对全网电能质量监测装置进行优化配置的方法。其基本思想:以构建监测网络测量误差之和最小为目标和以全网各节点电压满足可观测为约束条件建立系统的线性规划模型。该方法在利用电网的原始拓扑结构的同时还利用了电网中各节点在典型周期内的电能质量水平,使拓扑结构和各点电能质量水平有机结合,避免了只考虑网络拓扑或者只考虑电能质量水平的情况。

文献[11]提出了一种计及 N-1 情况的电能质量监测装置阶段式优化配置方法,构建了两阶段的优化模型:首先为确保全局最优,建立了以安装设备最少为目标的优化配置模型,然后为实现过程最优,定义了节点观测冗余指标。建立了观测节点最多、节点观测冗余指标最大及系统关键点优先被监测的多目标模型,以线性约束形式考虑了零向量量测问题。该方法较好地兼顾了经济性和鲁棒性,使监测装置部分安装及安装完全时均能实现监测效果的最大化,且能确保在 N-1 情况下关键点的可观测性。

2) 图论分析法

文献[12]提出了一种基于分布式 PQ 监测系统结构的事件源定位和监测装置的优化配置算法:首先构建覆盖矩阵表征电力系统拓扑结构及 PQM 布置状况,构建方向矩阵表征电力系统中各点发生 PQ 事件时各 PQM 的事件方向判定结果,然后利用矩阵乘运算结果中所包含的信息简单地实现 PQ 事件源的判定。并通过图论理论把电力系统节点分解成若干树状结构,然后在各颗树的树根处安装电能质量监测装置,实现该电能质量监测装置对该颗树所属所有节点进行电能质量实时监测,从而实现对整个电网电能质量的实时管理和控制。

3) 回归相关系数法

文献[13]提出一种回归相关系数法以各节点间某项稳态电能质量的相似程度(在其论文中给定相关系数阈值,只要两节点某项电能质量的相关系数满足此条件,就说该项电能质量在这两个节点具有相似的变化规律)为依据把节点分成若干节点群,然后在每个节点群中心安装电能质量监测仪,从而实现对该节点群的电能质量实时监测。

4) 灵敏度分析法

文献[14]提出一种节点电能质量灵敏度分析法,即采用节点处某项电能质量的灵敏性来设置电能质量监测点,用谐波负载潮流算法建立模型,从对负载潮流的计算中可得到反映电力系统的工作点的雅可比矩阵,然后对其进行奇异值分解(SVD)得到对谐波敏感的节点的信息,灵敏度大的地方说明此处电能质量容易受到扰动或者此处该项电能质量恶劣,因此必须在该点安装电能质量监测装置。

5) 同步相量量测(PMU)优化配置法

文献[15]中提出了一种同步相量量测(PMU)优化配制方法,同步相量量测技术涉及到 GPS 同步时钟、同步相量量测、网络通信、数据分析以及技术应用等多个方面,利用 GPS 系统的精确授时信号,实施高精度、低偏差的同步数据采集,对广域分布的电力系统各节点运行参数进行全面的实时动态测量,借助电力通信网络将分散的节点量测数据集中传输到同一数据平台,为后续系统的监测分析和稳定控制提供重要依据。文献[15]对其优化配置问题分为两部分进行了研究,即:①在不考虑 PMU 安装数量的情况下,阐述了量测点的配置原则以及有关的数学理论基础,基于此,建立了相应的优化配置数学模型,其目标函数分别为 PMU 数量最少和满足全局可观测性即具有不可观测性的元素权重之和最小,通过将 FP—DC 策略和改进自适应遗传 MAGA 算法结合(FPDC-MAGA),提出了数学模型的求解算法;②研究了给定 PMU 安装数量情况下的量测点优化问题,此时,关于优化配置数学模型的约束条件是要界定量测装置的配置数量,以全局临界配置为参考,分别提出了欠配置和过配置两种情况下目标函数,欠配置情况下,目标函数要考虑量测系统的全局可观测性水平最高,而过配置情况下,目标函数要着眼于在给定 PMU 配置数量的情况下量测系统的数据冗余性水平最高,根据各自的优化模型通过 FPDC-MAGA 算法进行求解,并分别给出了相应的算法流程图。

6) 演化算法

文献[16]提出了一种演化算法(evolutionary algorithms):文中首先使用最小均方误差方法,通过比较测量数据和模拟的结果来确定事件的特点,如:故障位置、故障类型等,以误差最小代替监测仪安放位置作为目标函数,利用演化算法最大限度地减少检测和电压估计的误差以减少监测仪的数量。

7) 神经网络法

文献[17]针对电压暂降,提出了在被监测的位置安装一种在线的回声状态网络(ESN)作为电压暂降波形的估计仪(VSWE)来估计非监测区域内敏感性负载的瞬时电压暂降波形。从而减少电压暂降监测装置的数目。文献[18]提出应用神经网络来解决电压暂降状态估计的问题。这个问题是基于估计非监测总线上的电压暂降发生频率,此频率是从有限数量的监测总线上记录的。这个故障定位方法也可以用来优化电能

质量监测装置的配置问题。

4. 电能质量监测点优化配置问题的提出和研究的科学意义

国内外学者针对电能质量监测装置的优化布点问题研究已经取得了丰富的成果，提出了一系列有益的方法，为本课题的后续展开奠定了良好的理论基础。但这些方法仍存在一定的不足，例如有如下所述的不足之处：

文献[5]提出的方法是只针对稳态电能质量问题的电能质量监测仪的配置[8]。文献[6]虽然通过仿真计算求得了各种故障下 IEEE-39 节点系统在仅考虑敏感性负荷节点和考虑全网所有节点两种可观测性要求下都求得了满足要求的最优数目的监测点。但由于模型设置的简单，仅考虑了母线故障而没有考虑线路故障，因此精确性不足，同时在进行仿真计算的过程中忽略了负荷电流对模型的影响因而算法还不是很完善，有待进一步的改进。且对电压暂降频次的估计仅仅提出了可能的估计算法，还没有经过算例验证，有待于进一步的研究。文献[7]所提出的算法仅适用于传输系统，而对于配电系统的适用性需要进一步研究，并且如果网络拓扑结构变化，该方法需要网络拓扑的数据并且得到的监测装置的配置方案不再是最优的。文献[9]没有考虑如何用母线处短路故障引起的电压暂降情况来简单反映包含传输线上的故障点短路故障时的电压暂降情况。文献[12]利用图论分析法设置的电能质量监测点能够很好的实现对全网的覆盖，但是某些特殊负荷常常处于树状结构的末端，它们所处位置的电能质量指标越限的可能性远远大于该树状结构的其它节点，而监测点又没有安装在电能质量水平较低的节点，这将给监测带来一定的不准确性，而且也不利于该点电能质量的就地控制，图论分析法主要是对电力网络接线拓扑用数学方法进行分析，没有考虑网络中各节点电能质量水平的实际状况[10]。文献[13]中提到的方法由于在实际情况下，各项电能质量指标并不具有相似的变化特性，各个电能质量指标间的相互影响关系本身还有待进一步研究，谐波、负序电能质量在电网中各节点之间的传播渗透机理也是一个很复杂的过程，因此，要在各节点之间弄清各项电能质量的变化规律还需大量的理论和实践作支撑[10]。文献[14]提出的节点电能质量灵敏度分析法能够很好对某项电能质量的监测点进行设置，但是很难实现各项指标依据灵敏度设置的监测点重合。如果对各指标分别设置监测点，均安装监测装置，则很难满足经济性的要求。同时，采用灵敏度分析法设置监测点时灵敏度阈值要精确确定也很困难。因此用灵敏度分析法来设置电能质量监测点有它固有的局限性[10]。文献[15]所提出的方法只是针对量测点配置优化问题展开了初步的理论研究，起到抛砖引玉的效果，并未考虑电力系统拓扑结构变化、零注入节点等诸多因素的影响，此外，此优化算法采用启发式方法求解数学模型，只能求得近似优化解，无法得到精确最优解，且算法程序每次运行所得结果稍有差异。文献[16]所提方法得到的优化结果不能保证对所有故障引起的电压暂降事件的监测[8]。

为弥补上述算法的不足，我们很有必要研究出一种新算法来解决电能质量监测装置的优化布点问题，以达到安装最少数目的监测装置实现全网的电能质量监测。

5. 电能质量监测点优化配置的发展空间和应用前景

1) 目前国外对监测点优化配置的关注与研究逐渐增多，但国内对这个问题的重视度还较低，有关的理论研究深度、实践应用程度等方面存在很大的差距，并且关于量测点优化配置，大多数学者的研究重点在于稳态领域的优化配置，而考虑系统动态行为的优化配置尚需大量的理论研究和科学实践，为全面建设完善的电力系统动态监测系统提供有力依据，对于未来的电力系统来说，拥有很大的发展空间和应用前景。

2) 电能质量监测网络的评价指标体系中会有一些尚未讨论的情况，有的标准可操作性差、普适性不强，有待于进一步的学习和研究，以便完善构建电能质量监测网络的一般性标准[10]。

3) 随着智能电网建设的大力发展,以及现代化高科技产业发展对供电质量要求的提高,电能质量监测系统将迎来一个发展迅速的时期,各监测节点之间的电能质量协调治理必将成为现实,电能质量监测装置的优化布点问题值得进一步研究,如何跟随信息化、智能化的脚步使其发挥更大的作用,是摆在我们面前的一项重要课题。

网络化、信息化、标准化和智能化已经成为电能质量监测系统的必然发展趋势,它为电网的优化和事故分析提供实时可靠的数据,可以进一步保障各级用户的正常用电秩序,为其提供优质的电能[19]。为电能质量综合评估提供切实依据,也是电力企业面向市场,适应竞争的强有力手段,所以对电能质量监测点的优化配置的研究必将为社会带来巨大的经济效益。

6. 总结

本文首先介绍了在电网中电能质量监测点优化配置的必要性,接着分析了国内外对此课题的研究现状及存在的一系列问题,最后对其未来的发展趋势进行了展望,为以后进行此方面的研究提供了一系列参考依据。由于我们国内对此问题的重视度还较低,所以我们国内应加紧对此课题的研究,找到一种最优解法,把电能质量问题带来的危害程度降到最小。

参考文献 (References)

- [1] 李轩 (2009) 浅谈提高电能质量的措施. *华章*, **18**, 148-152.
- [2] 湘宁, 徐永海 (2001) 电能质量问题剖析. *电网技术*, **3**, 66-69.
- [3] 刘兵, 李群湛 (2009) 电能质量监测装置的优化配置. *电力系统及其自动化学报*, **6**, 69-73.
- [4] Won, D.J. and Moon, S.I. (2008) Optimal number and locations of power quality monitors considering system topology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **23**, 288-295.
- [5] El-Saadany, E.F., Salama, M.A. and Vannelli, A. (2006) A novel power quality monitoring allocation algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **2**, 768-777.
- [6] 吕伟, 田立军 (2012) 基于凹陷域分析的电压暂降监测点优化配置. *电力自动化设备*, **6**, 45-50.
- [7] Liao, Y. (2009) Fault location observability analysis and optimal meter placement based on voltage measurements. *Electric Power Systems Research*, **7**, 1062-1068.
- [8] Almeida, C.M. and Kagan, N. (2011) Using genetic algorithms and fuzzy programming to monitor voltage sags and swells. *IEEE Intelligent Systems*, **26**, 46-53.
- [9] 代晓倩, 杨洪耕, 蔡维 (2011) 一种考虑电压暂降分布域的电能质量监测仪的优化配置方法. *电力科学与工程*, **2**, 6-12.
- [10] 刘兵 (2009) 电能质量监测网络优化设计方法研究. 西南交通大学, 成都.
- [11] 杨春雨 (2011) 计及 N-1 情况的电能质量监测装置阶段式优化配置. *水电能源科学*, **8**, 196-198.
- [12] Won D.-J., Kim J.-M., Seo J.-C., et al. (2006) A new algorithm to locate power-quality event source with improved realization of distributed monitoring scheme. *IEEE Transaction on Power Delivery*, **21**, 1641-1647.
- [13] Ammer, C. and Renner, H. (2004) Determination of the optimum measuring positions for power quality monitoring. *2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 684-688.
- [14] Dzienis, C., Komamicki, P. and Styczynski, Z.A. (2007) A method for optimally localizing power quality monitoring devices in power systems. *IEEE Power Tech International Conference*, Lausanne, 1522-1527.
- [15] 申华 (2010) 配电网电能质量监测点优化选址的研究. 中国石油大学(华东), 山东.
- [16] Nelson, K.M., Matsua, E.L. and Ferrari, J.C. (2007) Allocation of power quality meters for voltage sag estimation using evolutionary algorithms. *19th International Conference on Electricity Distribution*, Vienna, 21-24.
- [17] Deihimi, A. and Momeni, A. (2012) Neural estimation of voltage-sag waveforms of non-monitored sensitive loads at monitored locations in distribution networks considering DGs. *Electric Power Systems Research*, **92**, 123-137.
- [18] Espinosa-Juarez, E., Espinoza-Tinoco, J.R. and Hernandez, A. (2009) Neural networks applied to solve the voltage sag state estimation problem: An approach based on the fault positions concept. *Electronics, Robotics and Automotive*

Mechanics Conference, 88-93.

- [19] Targosz, R. and Manson, J. (2007) Pan European LPQI power quality survey. 19th International Conference on Electricity Distribution Vienna.