

基于 D - S 证据理论的电能质量在线监测算法研究

赵 静 温丽丽 郭 亮

(国网四川省电力公司 , 四川 成都 610041)

摘 要: 电能质量水平高低是公司电网安全运行水平和优质服务水平的重要体现。现代电网不断发展 , 提供了可靠性 , 保证了供电质量 , 但同时也带来了潜在的危险 , 局部电网的某些设备或线路故障 , 可能诱发恶性连锁反应 , 并最终酿成大面积停电的重大系统事故 , 严重影响供电可靠性。另一方面 , 近年来随着节能环保和可持续发展观念的建立 , 大量不可控制的电源点并入主网架 , 给电网的安全与供电可靠性带来了巨大的挑战。因此 , 研究和建立起一套高效的电网供电质量监测系统 , 实现电网内电压、频率和可靠性数据的全局的在线监测 , 对于提升安全运行与服务水平 , 具有重要意义。

关键词: 电能质量; 在线监测; 证据理论

Abstract: The level of power quality is an important embodiment of safe operation and quality service of the company. The modern power grid continues to develop to provide the reliability and quality of power supply , but also brings the potential dangers. Some equipments or line failures in local power grid may cause a vicious chain reaction , eventually lead to power outages over a large area , and seriously impact on the reliability of power supply. On the other hand , in recent years , with the concept of energy saving , environmental protection and sustainable development , a large number of non - controllable power points are connected to the main power grid , which brings great challenges for the security and reliability of power grid. Therefore , it is important to study and establish an effective monitoring system for power quality , which can realize on - line monitoring for voltage , frequency and reliability of power grid and is of great significance to improving safe operation and service level.

Key words: power quality; on - line monitoring; D - S evidence theory

中图分类号: TM92 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2015) 06 - 0080 - 05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.019

0 引 言

电能质量水平高低是公司电网安全运行水平和优质服务水平的重要体现。随着现代电力系统已步入高电压、大电网和大机组时代 , 电网规模不断扩大 , 区域电网相互之间的耦合程度越来越紧密 , 联网程度的增强可以提高电网的可靠性与供电质量 , 但同时也带来了潜在的危险 , 局部电网的某些设备或线路故障 , 可能诱发恶性连锁反应 , 并最终酿成大面积停电的重大系统事故 , 严重影响供电可靠性。另一方面 , 近年来随着节能环保和可持续发展观念的建立 , 国家大力发展新能源技术 , 大量不可控制的电源点并入主网架、气候等不可控制因素对电网的安全与供电可靠性带来了巨大的挑战。

因此 , 研究和建立起一套高效的电网供电质量监测系统 , 实现电网内电压、频率和可靠性数据的全局的在线监测 , 对于提升安全运行与服务水平 , 是十

分必要的。基于此 , 国家电网公司于 2012 年年底开展了电能质量在线监测系统建设的试点工作。

电能质量业务涵盖电网频率、电压和可靠性三方面内容 , 其中由省调度部门负责提供的数据主要为电网频率指标、中枢点电压指标以及设备停、带电状态。而这些电压、频率以及设备带电状态的数据主要取自主站调度控制系统中采集的站端基础数据。虽然说近年来国网四川省电力公司调度控制中心(以下简称四川省调) 一直着力抓好站端基础数据整治 , 但仍无法保证数据 100% 的准确 , 导致个别送出数据中显示错误的停电信息。目前此问题只能靠人工修改 , 通过人工每日核对送入电能质量在线监测系统中的停电线路信息 , 返回核查当时是否正常停电还是数据错误导致的误送。

1 基本理论

1.1 电能质量在线监测范围

电能质量可以定义为: 导致用户设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率偏差, 其内容涉及到频率偏差、电压偏差、电磁暂态、供电可靠性、波形失真、三相不平衡以及电压波动和闪变等。这次需要监测电能质量指标主要包括电网频率、电压和可靠性三大类指标。

从这三大类指标来分析, 频率指标将监控电网频率指标, 电压指标将监测中枢点电压指标和供电电压指标, 可靠性指标主要监测输变电系统可靠性指标和供电可靠性指标。

1.1.1 频率指标

电力系统频率是指电力系统统一的一种运行参数, 是电能质量的一个重要指标。中国电力系统的标称频率为50Hz, GB/T 15945-2008《电能质量电力系统频率偏差》中规定“电力系统正常运行条件下频率偏差限值为±0.2 Hz”。电网频率数据主要来自调度控制系统, 通过调度技术支持系统数据的采集, 实现电网频率的最大频率、最小频率情况和责任频率越限情况的统计, 完成电网频率合格率、越限指标等情况的在线监测。

1.1.2 电压指标

电压指标包括电网中枢点电压和供电电压两部分。电压是电能质量的主要指标之一, 也是电网运行的最重要指标之一。中枢点电压数据主要来自调度控制系统, 通过调度控制系统数据的采集, 实现母线运行的最高电压、最低电压情况和母线电压越限情况的统计, 并计算中枢点电压合格率等监测指标, 完成中枢点电压指标的在线监测。供电电压数据主要来自供电电压自动采集系统, 通过供电电压自动采集系统实现电压监测点的最高电压、最低电压和电压监测点越限情况的运行情况统计, 并计算各级单位的电压合格率, 完成供电电压指标的在线监测。

1.1.3 可靠性指标

电力系统可靠性取决于发供电设备和线路的可靠性、电力系统结构和接线、备用容量、运行方式(静态稳定和动态稳定储备)以及防止事故连锁发展的能力。可靠性指标主要监测输变电系统可靠性指标和供电可靠性指标。对应调度部门送出数据为一次设备的带电状态信息。

1.2 D-S 证据理论

D-S 证据理论是一种不确定性推理模型, 由 Dempster 和他的学生 Shafer 共同提出。它可以在已

知证据的情况下, 推断假设的确信程度, 当概率值已知的时候, 证据理论就演变成为概率论。D-S 证据理论的基本概念现介绍如下:

1) 证据的不确定性

设 U 的幂集 2^U 上定义了一个基本概率赋值函数 $m: 2^U \rightarrow [0, 1]$, 使 m 满足

$$m(\emptyset) = 0, \sum_{A \subseteq U} m(A) = 1 \quad (1)$$

基本概率赋值函数 $m(A)$ 表示了证据对 U 的子集 A 成立的一种信任程度。

信任函数定义为

$$Bel: 2^U \rightarrow [0, 1], Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (2)$$

2) 证据的组合

对于相同的证据, 由于来源不同, 可能得到不同的基本概率赋值函数。D-S 证据理论采取正交和来组合这些函数。

设 m_1, m_2, \dots, m_n 是 2^U 上的 n 个基本概率赋值函数, 它们的正交和 $m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n$, 且定义为

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ m(A) = K \sum_{\cap A_i = A} \prod_{i=1}^n m_i(A_i), A \neq \emptyset \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$K^{-1} = 1 - \sum_{\cap A_i = \emptyset} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) = \sum_{\cap A_i \neq \emptyset} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)$$

3) 证据理论的推理

知识表示: 系统的推理规则表示为

$$A: IF E THEN H, CF$$

证据的描述: 对于任何命题 $A \subseteq U$, 其信任函数为

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) = \sum_{a \in A} m(a) \quad (4)$$

$$Bel(U) = \sum_{B \subseteq U} m(B) = \sum_{a \in U} m(\{a\}) + m(U) = 1$$

似然函数为

$$Pl(A) = 1 - Bel(\sim A)$$

$$= 1 - \sum_{a \in \sim A} m(\{a\}) = m(U) + Bel(A) \quad (5)$$

$$Pl(U) = 1 - Bel(\sim U) = 1 - Bel(\emptyset) = 1$$

类概率函数为

$$f(A) = Bel(A) + \frac{|A|}{|U|} [Pl(A) - Bel(A)] \quad (6)$$

4) 不确定性推理

匹配度函数:

$$MD(A, E) = \begin{cases} 1; & \text{如果 } A \text{ 的所有元素都出现在 } E \text{ 中} \\ 0; & \text{其他} \end{cases}$$

$$CER(A) = MD(A, E) \cdot f(A) \quad (7)$$

命题的逻辑组合的情况

合取:

$$\begin{aligned}
 CER(A) &= CER(A_1 \text{ and } A_2 \text{ and } \dots \text{ and } A_n) \\
 &= \min\{ CER(A_1), CER(A_2), \dots, CER(A_n) \} \quad (8)
 \end{aligned}$$

析取:

$$\begin{aligned}
 CER(A) &= CER(A_1 \text{ or } A_2 \text{ or } \dots \text{ or } A_n) \\
 &= \max\{ CER(A_1), CER(A_2), \dots, CER(A_n) \} \quad (9)
 \end{aligned}$$

如果几种规则支持同一命题,总的概率赋值函数定义为各规则假设得到的基本概率赋值函数的正交和,即

$$m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n \quad (10)$$

2 多决策融合电能质量在线监测算法原理

2.1 基本算法原理

图 1 展示了现有电能质量在线监测方案的基本原理,所有指标由四川省调位于安全 I 区的智能电网调度控制系统经由简单的逻辑判断,将电网频率、实时电压以及设备停电状态传输至位于安全 III 区的调度生产管理系统,调度生产管理系统再通过接口文件,将信息传输至国网电能质量在线监测系统。此方案优点在于直接利用现有 SCADA 信息,简单方便,但缺点也较明显,未经处理的 SCADA 生数据的可用度无法达到 100% 的要求,站端上送的瞬时跳零数据,导致误送设备停电状态。

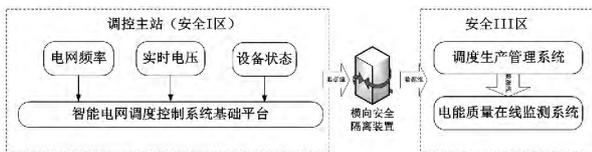


图 1 现有电能质量在线监测方案

图 2 所示为经过改进后的电能质量在线监测方案。它的原理在于采用智能电网调度控制系统现有的功能模块,对采集的电压、频率、设备状态等生数据进行融合判断,由调度生产管理系统进行多决策分析,确定电网各设备当前运行状态。

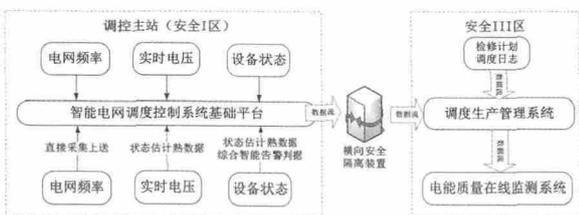


图 2 改进后电能质量在线监测方案

2.2 设备状态变化可信度设置

设备状态变化是基于 SCADA(稳态监控)网络拓扑分析结果的。即某一设备相关联的任一断路器由合闸到分闸,该设备的状态就会发生变化并发出设备状态变化告警。设备状态变化可信度设置如表 1 所示。识别框架: $\Theta = \{\text{设备停运、设备运行}\}$,可信度判断时间间隔为断路器变位时间前后 60 s 内。基于 D-S 证据理论的设备状态判断流程可如图 3 所示。

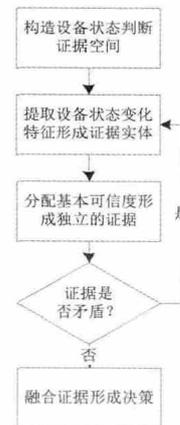


图 3 基于 D-S 证据理论的设备状态判断流程

表 1 设备状态变化证据

证据	开关变化	设备量测变化	本站间接量测变化	对侧潮流变化	状态估计合格率	PMU 量测	辅助系统
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7

各证据可信度应该按照设备所属厂站电压等级、装机容量、投运年限等原因进行设置,如投运年限短、站端监控系统版本较新的厂站上送的信息可信度更高,而处于边缘地区的厂站因为运维力量的差异以及设备工况的原因,上送数据的可信度也应相应较低。

各证据取值范围在 (0, 1), 依据如下:

1) $m_1 \sim m_3$ 证据

由于本站数据有一定的错误概率,故设备停运与运行的证据相差不大,取 $m_1 \sim m_3\{\text{设备停运}\} = 0.6$, $m_1 \sim m_3\{\text{设备运行}\} = 0.4$ 。

2) m_4 证据

$m_4\{\text{设备停运}\} = 1 - \text{abs}(\text{对侧潮流变化率} - \text{本侧潮流变化率})$,其中潮流变化率 = $\text{abs}(\text{当前采样点} - \text{前一刻采样点}) / \text{当前采样点}$,本证据实质上是量度双侧潮流变化的一致性。

如果本侧潮流变化率小于 5%,取 $m_4\{\text{设备停运}\} = 0.5$ (即此证据不可用)。

表 2 A 电厂设备停运状态证据融合判断

项目	开关变化	设备量测变化	本站间接量测变化	对侧潮流变化	状态估计合格率	PMU量测	辅助系统	组合结果	决策结果	是否正确
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m		
设备停运	0.6	0.6	0.6	0.9	0.6	0.6	0.5	0.983	停运	是
设备运行	0.4	0.4	0.4	0.1	0.4	0.4	0.5	0.017		

表 3 B 电厂设备停运状态证据融合判断

项目	开关变化	设备量测变化	本站间接量测变化	对侧潮流变化	状态估计合格率	PMU量测	辅助系统	组合结果	决策结果	是否正确
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m		
设备停运	0.6	0.6	0.6	0.1	0.4	0.5	0.5	0.2	运行	是
设备运行	0.4	0.4	0.4	0.9	0.6	0.5	0.5	0.8		

3) m_5 证据

m_5 {设备停运} = 0.6, 当该站状态估计合格率大于 90%, 反之则取为 0.4, 如当时全网状态结果不收敛, 则取值为 0.5, 当前证据无效。

4) m_6 证据

判断原则与 $m_1 \sim m_3$ 一致, 如该站无 PMU 装置, 则取值为 0.5, 当前证据无效。

5) m_7 证据

如该站相应时间段无检修计划, 则取值 0.5, 当前证据无效, 如有检修计划, 则取值 0.6。

结果, 由于机组无出口断路器, 故开关变化判据改为出口隔离刀闸判据。 m_4 证据因为本侧潮流变化率大于 5%, 则 m_4 {设备停运} = $1 - \text{abs}(\text{对侧潮流变化率} - \text{本侧潮流变化率})$, 根据计算结果此处近似取为 0.9。该站状态估计合格率未低于 90%, 则 m_5 {设备停运} 取 0.6。其余证据按照上一节描述进行设置。则得到决策结果为设备停运的概率高达 98.3%, 与实际相符。

2) B 电厂于 2014 年 8 月 27 日 13:32 上送全站信息为 0 的信号。机组开关变为分位, 有功量测(含机组与出线)变为 0, 对侧厂站量测无明细变化。该站 PMU 信息未采集, 调度生产管理系统中未检索到该站停电检修计划。

表 3 所示为 B 电厂机组停运的证据融合判断结果。 m_4 证据因为本侧潮流变化率大于 5%, 则 m_4 = $1 - \text{abs}(\text{对侧潮流变化率} - \text{本侧潮流变化率})$, 对侧潮流变化率与本侧潮流变化率不一致性较高, 根据计算结果此处近似取为 0.1。其余证据按照上一节描述进行设置。则得到决策结果为设备运行的概率高达 80%, 与实际相符。

3 多决策融合算法实际应用分析

3.1 设备停运判断实例

1) A 电厂于 2014 年 9 月 9 日 00:16 分上送 61 号 F 刀闸状态为分(此机组无出口断路器), 经调阅曲线, 61 号机组量测由 00:16 的 373.60 MW 跳变为 00:17 的 1.14 MW。两回送出线路的量测、全厂有功出力以及对侧潮流量测如图 4 所示。PMU 装置量测信息与稳态监控显示一致。调度生产管理系统中未检索到该站停电检修计划。

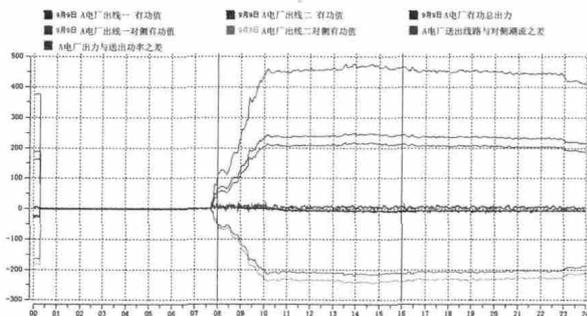


图 4 A 电厂 2014 年 9 月 9 日潮流情况

表 2 所示为 A 电厂机组停运的证据融合判断

3.2 算法适应性分析

该算法在一定程度上避免了站端错误上送遥测、遥信信号造成系统误判设备状态的情况, 但如果当前厂站负荷潮流较轻, 如有功长期停留在 0 MW 附近, 则此时站端设备跳闸或计划停运, 可通过保护动作信号或辅助系统进行判断状态。但如果是错误上送遥信变位信号, 此时作为量测变化的直接或间接判据均不可用, 无可避免地无法通过信号本身进行正确的设备状态判断, 仅能通过站端的视频监控核实站端设备的实际情况。

4 结 论

改进了现有的电能质量在线监测方案,并通过多组实例对改进方案进行了验证,得出以下结论:

1) 所改进的电能质量在线监测方案在一定程度上避免了错误遥测、遥信信号造成的设备状态误判,具有较好的适应性;

2) 所改进的方案在设备负荷变化明显时,具有更好的适应性及可行性。

下一步工作中,将同时从技术与管理两个角度出发,对电能质量在线监测方案进行优化,在技术上研究负荷变化较小的情况下设备状态的判断方法,从管理上研究杜绝错误信息上送的手段,双管齐下,进一步提升电能质量在线监测的水平。

参考文献

[1] Q/GDW 649-2011 电能质量监测系统技术规范[S].

[2] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(一)——电能质量一般概念[J]. 电力自动化设备,2003,23(10):1-4.

[3] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(二)——供电网谐波的测量与分析[J]. 电力自动化设备,2003,23(11):1-4.

[4] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(三)——电力系统的电压凹陷[J]. 电力自动

化设备,2003,23(12):1-4.

[5] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(四)——电压波动与闪变的测量分析[J]. 电力自动化设备,2004,24(1):1-4.

[6] 刘俊勇,杨洪耕,肖先勇. 电能质量问题的研究和技术进展(五)——电能质量监测与数据管理. 电力自动化设备,2004,24(2):1-4.

[7] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(六)——电能质量控制技术进展[J]. 电力自动化设备,2004,24(3):1-4.

[8] 肖先勇,杨洪耕,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(七)——电力市场环境下的电能质量问题[J]. 电力自动化设备,2004,24(4):1-4.

[9] 符玲,何正友,麦瑞坤,等. 小波熵证据的信息融合在电力系统故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报,2008(13):64-69.

[10] 郭创新,彭明伟,刘毅. 多数据源信息融合的电网故障诊断新方法[J]. 中国电机工程学报,2009(31):1-7.

[11] 王勇,刘金宁,曹曼,等. 基于概率论与证据理论的风电场电能质量评估方法研究[J]. 华北电力大学学报,2012,39(3):65-70.

作者简介:

赵 静(1982) 博士,研究方向为调度自动化;
温丽丽(1982) 硕士,研究方向为调度自动化;
郭 亮(1982) 博士,研究方向为调度自动化。

(收稿日期:2015-08-15)

(上接第75页)

参考文献

[1] 林俐,潘险险. 基于分裂层次半监督谱聚类法的风电场机群划分方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):8-14.

[2] 陈迎. 基于运行数据的风电场等效建模研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.

[3] 闫广新,晁勤,刘新刚,等. 含变速双馈风电机组风电场的等值问题[J]. 可再生能源,2008,26(1):21-23.

[4] 张元,郝丽丽,戴嘉祺,等. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(6):138-146.

[5] 米增强,苏勋文,杨奇迹. 风电场动态等值模型的多机表征方法[J]. 电工技术学报,2010,25(5):162-170.

[6] 辛拓,申洪,李扬絮,等. 一种实用的风电场等值方法研究[J]. 广东电力,2012,25(4):59-64.

[7] 贾彦,刘璇,李华,等. 考虑尾流效应对风电场机组布

局的影响分析[J]. 可再生能源,2014,32(4):429-435.

[8] 孙蕾. 变速恒频风力发电机组建模与控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2009,47-52.

[9] 李芸,王德林. 大型风电场的等值模型及其改进研究[J]. 电工电能新技术,2014,33(7):11-17.

[10] 付蓉,谢俊,王保云. 风速波动下双馈机组风电场动态等值[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(15):1-6.

[11] 袁贵川,倪林,陈颖. 大型风电场等值建模与仿真分析[J]. 广东电力,2010,23(11):6-9.

[12] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010.

作者简介:

徐立亮(1990) 硕士,从事电网运行工作。

(收稿日期:2015-08-14)