

数字化变电站全频带故障信息利用可行性分析初探

王 宾¹, 董新洲¹, 薄志谦²

(1. 清华大学电机系电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;

2. 阿海珐输配电有限公司, 英国 斯塔福德郡, ST17 4LX)

摘要: 目前实施建设的数字化变电站二次测控、保护系统都是基于工频和谐波分量信号, 行波信号能否在数字化变电站中应用尚未见文献报道。针对该问题, 探讨了数字化变电站中全频带故障信息利用的可行性方案, 从三个方面分析了面临的主要问题, 可能的解决方案以及相关技术难点: 1) 数据通信实时性约束下的行波暂态故障特征采集、提取、表达研究; 2) 传输行波暂态信息时, 数字化变电站过程层通信网络性能评估; 3) 基于空域相关性滤波算法探讨不同故障频带间的特征延续性, 提高数字化变电站中行波信号利用的可靠性。所做工作对于未来数字化变电站的通信网络设计及智能保护控制系统的建设, 都将产生积极的影响。

关键词: 数字化变电站; 全频带故障信号; 行波; 通讯性能; 智能保护控制系统

Feasibility analysis of full band fault signals with applications in digital substations

WANG Bin¹, DONG Xin-zhou¹, BO Zhi-qian²

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. AREVA T&D Automation Co, Stafford Shire, ST17 4LX, UK)

Abstract: Meters, control devices, and protections used in current digital protections are all designed based on power frequency and harmonics fault signals, while the feasibility of travelling wave signals with applications in digital substation is not reported as now. In response to this question, the feasibility analysis of full band fault signals with applications in digital substations is discussed in this paper from three points to issue the questions: 1) the sampling, analyzing and expressing of travelling wave signals with the constraints of communication real-time in digital substation; 2) the evaluations of network performance to communications at process level in digital substation; 3) spatial correlation filtering algorithm based full band fault analysis to enhance the reliability of travelling wave using. The content discussed in this paper will help the communication system design and the development of smart protection and control system in the rapidly developed digital substations.

Key words: digital substation; full band fault signals; travelling wave; communications performance; smart protection and control system

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)13-0017-05

0 引言

变电站全数字化、智能化是其发展的必然趋势。虽然目前数字化变电站日益铺开, 各个地区电网都建设了试点、示范站, 但是受设备技术水平的限制, 目前的工作重点主要放在对传统变电站的数字化改造, 及不同厂家设备的互操作等方面; 实现了数字

化变电站建设的第一步: 即结构的数字化^[1]。

目前, 系统中运行的保护控制装置主要反映故障后的稳态故障特征, 如电流增大、电压降低、功率倒向、测量阻抗减小等。实践证明这类保护性能稳定、动作可靠, 能快速切除系统故障、保证电网安全稳定运行, 是目前电力系统继电保护的主要方式。但获取工频故障信息需要较长的时间窗, 限制了保护的動作速度; 故障过渡电阻的存在降低了保护的灵敏度; 电流互感器饱和造成二次传变电流失真, 可能导致保护的误动; 此外距离保护中的系统振荡、变压器差动保护中的励磁涌流等问题, 迄今为止仍然没有根本解决。其症结在于: 这种保护仅

基金项目: 高等学校博士学科点新教师专项科研基金(200800031034); 北京市自然科学基金(3102017); 电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室基金(SKLD09M32, SKLD09M04)资助项目

仅使用工频故障信息。

电力系统故障暂态过程实际上是故障行波信号多次折反射叠加、衰减至稳态工频的过程。行波信号为故障最初突变信号，动作快速，不受过渡电阻、电流互感器饱和、系统振荡和长线分布电容等影响，当然也存在可靠性差的弊端。无论行波还是工频，描述的都是同一个物理现象；综合利用行波、工频以及暂态、谐波等全频带信息，必将极大地提升保护控制系统的性能。目前已实用化的行波选线技术、基于行波和工频信号的高压单端故障测距组合法等，已经证实了多频带故障特征融合的价值性。

目前数字化变电站中电子式互感器合并单元(MU)只能采集低频带信息，对暂态、行波等高频带信号的采集，是MU发展的必然趋势。但如果不加选择地将行波暂态采样数据全部放到通信网上，不仅不能提高保护控制系统的性能，反而会引起通信阻塞，影响数字化变电站的安全运行。

因此，本文将初步探讨数字化变电站中全频带故障信息利用的可行性方案。

1 全频带故障信息利用现状和主要问题

1.1 行波暂态故障特征采集、提取、表达研究

传统电力系统故障信号分析方法主要采用傅里叶变换、短时傅里叶变换、最小二乘法等，但其不具有频域局部化特性，无法处理非平稳故障信号。

小波变换由于同时具有时域、频域局部化的特点，近年来在电力系统故障信号分析领域得到了广泛应用；主要包括：1) 利用小波分析观测信号频率结构随时间的变化情况，提取故障特征频率，检测系统的故障。2) 利用小波变换模极大值检测故障信号奇异点，确定故障特征^[2-5]。小波变换的主要缺点是计算量较大，针对该问题，数学形态学方法得到了较多关注。由于其计算均为加减运算，与傅里叶变换和小波变换相比具有更快的计算速度，而且其信号处理幅值不偏移，相位不衰减，且数据窗较短^[6-7]。近年来在变压器差动保护、行波故障测距、小电流接地选线、故障信号滤波等方向得到了广泛的研究。此外，基于Hilbert-Huang变换等分析方法，也在暂态信号分析中得到了广泛关注和应用。

小波变换、数学形态学、Hilbert-Huang变换等方法的快速发展应用，已经为行波暂态故障特征采集、提取和表达提供了丰富的经验。与传统变电站不同，数字化变电站中二次保护控制设备的输入信号从模拟量变为数字量，通信网络的特性将严重制约保护控制系统的整体性能。特别是对于行波暂态信号，根据奈奎斯特采样定理，为了保证信号的真

实性，其采样速率将是目前MU中采样速率的几百倍，甚至上千倍。直接采用目前的采样值传输方式，并不现实，必须进行故障特征采集、提取和表达研究。但到目前为止，尚未见有相关文献报道在数字化变电站中，通信实时性约束下，如何合理地划分行波、暂态信号的最低特征频带；如何实现故障特征充分表达下的行波暂态信号特征抽取等问题，来满足新一代智能保护控制系统的技术要求。

1.2 数字化变电站过程层通信网络性能评估

数字化变电站的运行基础是稳定可靠的数据通信网。如何构建这个网络，不同厂家有自己的解决方案，如总线网、自愈环网等。在IEC61850标准正式颁布之前，大量典型应用测试已经证明了：基于100M的交换式以太网，完全能够满足变电站自动化的功能要求^[8]。文献[9-11]借助OPNET仿真平台对基于IEC61850标准的通信和网络进行了建模并仿真研究，得出了一些有意义的结论。

但到目前为止，所有的通信测试均基于稳态工频情况考虑，而真正考验数字化变电站通信的实时性、畅通性，均出现在伴随大量的暂态故障数据流，特别是行波、暂态数据的恶劣故障情况下；暂态故障数据流既表现出一定的周期性特征，同时也有显著的突发性特点，必须特殊考虑。因此必须针对不同数字化变电站硬件配置、不同网络结构，分析和仿真测试传输行波暂态信号条件下数字化变电站过程层通信网络性能，回答数字化变电站中能否传递行波暂态采样值信息？行波、暂态的采样速率选多少适宜？采样值传输时间窗取多长？并相应地指导行波暂态故障特征的数据挖掘。

1.3 行波信号利用的可靠性分析

无论傅里叶变换，还是小波变换、数学形态学等方法，关注的都是某个、或某几个频带的故障特征，无法得到不同频带、不同尺度之间的关联特性。传统继电保护设计思想面向于被保护元件^[12]，决定了其只需找到相关的故障频带，确定故障特征，即可保证较好的继电保护“四性”；即使使用到了不同频带的信息，也只是在出口时采取了组合逻辑设计，各个频带依旧独立^[13]。而对于真正意义上的数字化变电站，保护设计思想面向于变电站，功能优化组合的前提是故障信息的优化组合，而其基本信息变化是故障行波信号的多次折反射叠加、衰减至稳态工频的电力系统暂态过程，因此自然需要探讨全频带故障特征的数据采集、融合、挖掘技术，特别是全频带故障信息挖掘可以保证故障特征的延续性，在行波数据丢失、误码等情况下，故障特征不丧失，提高了使用行波暂态信号的可靠性，必将极大地提

升智能保护控制系统的性能优化和运行稳定。

2 全频带故障信息利用的主要研究内容

图 1 所示为目前数字化变电站单间隔实施的的网络架构。随着技术的发展, 数字化变电站必将向着 MU 数据采集全频带化、过程层通信网络化、保护控制集成化的方向发展, 因此全频带故障信息利用需要研究如下主要内容。

2.1 关于信号全频带化采集研究

为了保证全频带信号的物理统一性和故障特征延续性, 必须在同一信号采集硬件平台上研究全频带、高采样率下的实时数据软抽取技术, 实现密集采样下线性、实时地抽取低频频信息。如图 1 所示, 数据软抽取可以在合并单元 MU 中实现; 也可能在保护装置中实现, 关键取决于过程层通信网络的实时性能。完成此滤波器组的设计, 既有效地采集了行波暂态信号, 保证全频带信息的健全性, 又实现了工频信息的独立性; 为传统上基于工频信息的保护算法, 比如电流保护、距离保护、差动保护等提供了数据基础。

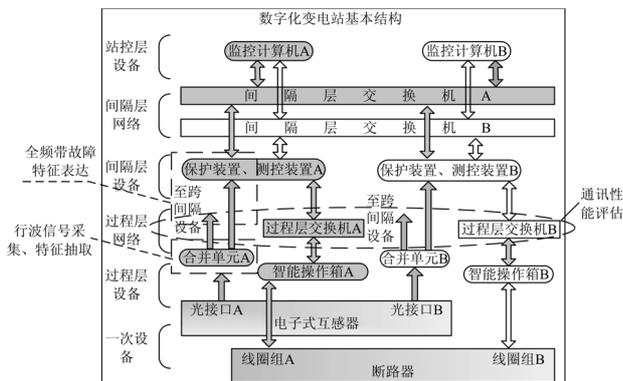


图 1 目前数字化变电站单间隔实施的的网络架构

Fig.1 Current major configurations of digital substation with the unit of bay

为了满足数字化变电站数据通讯的实时性、畅通性, 降低通信量, 必须针对剥离工频信号后剩余的高频频带信息进行有效的划分, 在保证不丧失故障特征的前提下提取行波、暂态的最低特征频带; 并根据数据通讯网的最大传输容量, 限定行波暂态信号的软件采样速率及数据采集值的存储容量和有效时间窗。在此基础上, 从划分智能保护控制系统功能的角度入手, 定义行波故障特征表达的“充分性”进一步补充、探讨行波暂态信号故障特征的有效提取。

2.2 关于过程层通信网络性能评估

如图 1 所示, 过程层通信根据网络拓扑结构的

不同, 也可分为两类: 单间隔点对点通信和过程层网络通信。变电站过程层通信网络中的传输数据可概括为三种不同类型: 周期性数据, 随机性数据和突发性数据。

行波、暂态故障数据流既表现出一定的周期性数据流特征, 同时也有显著的突发性数据特点, 必须特殊考虑。首先应建立能够反映暂态、行波信号的网络负载模拟器模型。随后, 精确建模底层以太网通信模型、量化变电站过程层数字通信在间隔内、间隔间的通信延迟指标; 同时针对不同硬件配置、不同网络结构, 分析和仿真测试变电站过程层通信网络的性能特性; 也指导行波暂态故障特征的挖掘。

2.3 关于行波信号利用的可靠性研究

行波暂态故障特性的有效提取、传输, 虽然能够保证故障特征的充分表达, 但由于其故障特征不可重复, 而且采样率很高, 容易受干扰, 因此行波信号利用的可靠性会受影响。如果发生行波特征信号丢失、误码的情况, 如何弥补?

针对该问题, 在获取各频带特征表达的基础上, 应该关注全频带信号不同频带间的纵向关联性, 因为这种纵向关联恰恰体现了行波、暂态、谐波、工频的故障特征延续性。如果行波暂态故障特征在通信过程中出错, 依靠故障特征的延续性也可以有效地保障智能保护控制系统的动作特性。分析不同频带、尺度间的故障特征相关, 是智能保护控制算法研究的基础, 也才能实现故障特征可靠、充分表达下的通信量最少传输。

3 关键技术

3.1 多速率信号处理滤波器组

全频带信息的采集实际上是多速率信号处理问题, 通过内插和抽取改变数字信号的速率, 来适应数字化变电站中智能保护控制系统不同功能模型对信号速率的不同要求。直接在时域上进行抽取和内插会导致频域的扩展和压缩使频谱变坏。因此一般先通过时域上的抽取和内插, 加以几种典型滤波器的配合工作, 以达到信号速率转换的目的。一个典型的多速率信号处理结构如图 2 所示。



图 2 一种典型的多速率信号处理结构

Fig.2 Typical structure of multi-rate signal processing filter

积分梳状(CIC)滤波器结构简单、工作频率高, 经过其整数倍抽取, 高速信号的速率得到大幅降低。半波(HB)抽取滤波器的计算量比一般的 FIR 滤波器

小一半，处理速率也较高，一般用 N 个级联的 HB 抽取滤波器组对信号进行 $2N$ 倍抽取。CIC 滤波器和 HB 滤波器是混叠滤波器，信号需经过 FIR 滤波器滤除无用的频率分量后，再进行下一步处理。多相滤波器组可以进行分数倍采样速率的转换，使速率的转换更加灵活，也使整个系统的输出速率能够满足特殊应用场合的需求。在多相滤波器组后，还可用级联的 HB 内插滤波器来提高输出信号的时间分辨率。因此，全频带信息的采集实际上就是多速率信号处理滤波器组的设计，即为对滤波器增益处理、非线性相位、阻带衰减、提高无混叠带宽等参数细节研究、设计。比如：CIC 滤波器的频率响应为：

$$H(e^{j\omega}) = D \times Sa\left(\frac{\omega D}{2}\right) \times Sa^{-1}\left(\frac{\omega}{2}\right) \times e^{j(1-D)\omega/2} \quad (1)$$

其中： D 为抽取因子，抽样函数 $Sa(t) = \text{sint}/t$ 。

通信网络中传输最大的数据量为实时采样数据。考虑到平台的通用性，设定智能保护控制系统含 24 个通道，单个通道采样数据为 AD 采集的数据瞬时值，则每次传送数据量为 $24 \times 1 = 24 \text{ Word} = 24 \times 16 = 384 \text{ Bits}$ 。对于工频，以单周期 24 点采样为例，数据量所占的带宽为 $384 \times 24 / 0.02 = 0.4 \text{ M}$ 。如果以太网传输速率为 10 M ，则每次传送所需时间为 $384 / (10) \mu\text{s} = 38.4 \mu\text{s}$ ；以太网通信速率为 100 Mbps ，则每次采集数据的传送时间为 $3.84 \mu\text{s}$ 。针对不同采样率，传输数据量所占带宽、所占网络负荷百分数以及传输时间的具体参数如表 1 所示。

表 1 不同采样率采样数据所占带宽、网络负荷

Tab.1 Bandwidths and network loads of various sampling frequency data

不同频带	周期采样点数	数据量所占带宽/M	10 Mbps 网络负荷/%	100 Mbps 网络负荷/%	10 Mbps 网络传送时间/ μs	100 Mbps 网络传送时间/ μs
工频	24	0.4	4	0.4	38.4	3.84
谐波	64	1.2	12	1.2	38.4	3.84
	128	2.4	24	2.4	38.4	3.84
暂态	1 280	24	240	24	×	3.84
行波	20 000	375	3 750	375	×	×

由表 1 所示，传输暂态、行波瞬时值必须降低信号频带，但是也必须保证故障特征的健全性。因此需结合暂态故障分析理论，探讨故障信号频带的合理划分问题。

3.2 过程层以太网时延分析

针对周期性、随机性、突发性三种数据的特点，根据 IEC61850 协议栈的层次结构，对底层以太网的通信实时性进行研究，利用动态建模仿真软件 OPNET 对基于 Ethernet 的各设备之间的通信情况进行建模仿真，具体对网络传输中最重要的性能指标

——以太网时延进行研究，仿真分析影响以太网时延的主要因素，总结影响时延的主要因素，为后续在保护测控中应用奠定基础。

3.3 基于信号尺度间相关性的空域相关滤波算法

不同频带故障特征的抽取，在电力系统中已经得到了广泛的应用。特别是小波变换、多分辨率分析等技术的发展，已经使各个尺度（频带）的信息充分得到了表达，但是其相互间的关联信息并没有得到足够的关注和利用。可以采用基于信号尺度间相关性的空域相关滤波算法来解决该问题。

空域相关滤波算法：信号的突变点在不同尺度的同一位置都有较大的峰值出现，噪声能量却随着尺度的增大而减小。因此，可以取相邻尺度的小波系数直接相乘进行相关计算，这种计算将在锐化信号边缘及其他重要特征的同时抑制噪声，而且能够提高信号主要边缘的定位精度，更好地刻画真实信号。

依次计算不同尺度间的空域相关性，恰恰体现了行波、暂态、谐波、工频的故障特征延续性，研究空域相关性的物理表达是此部分的关键。

4 结论

本文主要针对行波信号在数字化变电站中的利用，分别从行波信号获取，行波数字采样信号传输，以及行波信号的可靠、充分利用三个角度入手，分析了在应用中遇到的主要问题以及可行的解决方案。论文只提出了初步方案，后续的理论 and 实践研究正在进行中。

参考文献

- [1] 高翔. 数字化变电站[M]. 北京：中国电力出版社，2008.
GAO Xiang. Digital substation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [2] 董新洲. 小波理论应用于输电线路行波故障测距研究(博士学位论文)[D]. 西安：西安交通大学, 1996.
DONG Xinzhou. Research on wavelet transform theory with applications in transmission line fault location based on travelling waves, doctoral dissertation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1996.
- [3] 曹豫宁, 李永丽, 张兴华, 等. 基于小波变换的电流互感器饱和实时检测新判据[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(10): 27-30.
CAO Yu-ning, LI Yong-li, ZHANG Xing-hua, et al. A new on-line criterion for current transformer saturation

- based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 27-30.
- [4] 哈恒旭, 张保会, 吕志来. 利用暂态电流的输电线路单端量保护新原理探讨[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 56-61.
HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui, Lü Zhi-lai. A novel principle of non-unit protection based on transient components for EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 56-61.
- [5] 束洪春, 李义, 宣映霞, 等. 对不受波速影响的输电线路单端行波法故障测距的探讨[J]. 继电器, 2006, 34(8): 1-5.
SHU Hong-chun, LI Yi, XUAN Ying-xia, et al. Discussions on the single ended approach based on travelling wave to fault location that can avoid the effect of wave speed[J]. Relay, 2006, 34(8): 1-5.
- [6] 邹力, 赵青春, 林湘宁, 等. 基于数学形态学的电力系统振荡中故障识别和改进的选相方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 37-42.
ZOU Li, ZHAO Qing-chun, LIN Xiang-ning, et al. Mathematical morphology based fault detector and improved phase selector in power swing[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 37-42.
- [7] 吴青华, 张东红. 形态滤波技术及其在继电保护中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 45-49.
WU Qing-hua, ZHANG Dong-hong. Morphological filtering techniques and applications in protection relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(7): 45-49.
- [8] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 基于 IEC 61850 标准的过程总线通信研究与实现[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 84-89.
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. Research and implementation of the communication of process bus based on IEC61850[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 84-89.
- [9] 董楠, 朱林, 段献忠. 基于 OPNET 的变电站过程层网络的仿真研究[J]. 继电器, 2006, 34(21): 40-44.
DONG Nan, ZHU Lin, DUAN Xian-zhong. Study on process-level network in substation using OPNET simulation[J]. Relay, 2006, 34(21): 40-44.
- [10] 韩小涛, 聂一雄, 尹项根. 基于 OPNET 的变电站二次回路通信系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 67-71.
HAN Xiao-tao, NIE Yi-xiong, YIN Xiang-gen. Research on substation secondary circuit communication system using OPNET simulator[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 67-71.
- [11] 吴俊兴, 胡敏强, 吴在军, 等. 基于 IEC 61850 标准的智能电子设备及变电站自动化系统的测试[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 70-74.
WU Jun-xing, HU Min-qiang, WU Zai-jun, et al. Testing of IEC 61850 based intelligent electronic device and substation automation system[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 70-74.
- [12] 贺家李. 电力系统继电保护[M]. 三版. 北京: 中国电力出版社, 2007.
HE Jia-li. Power system protective relaying[M]. 3rd Edition. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [13] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
GE Yao-zhong. The Novel protective relaying and fault location principle and technology[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2008.

收稿日期: 2010-01-27; 修回日期: 2010-02-22

作者简介:

王 宾 (1978-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为电力系统继电保护、电能质量监测分析等; E-mail: binw_ee@mail.tsinghua.edu.cn

董新洲 (1963-), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向为行波保护、行波测距、小波变换在电力系统中的应用、无通道保护等。

薄志谦 (1955-), 男, 博士, 主要研究方向是电力系统保护和控制。