

电力系统信号与数据的压缩传感技术综述*

于华楠, 杜瑶, 马聪聪

(东北电力大学信息工程学院 吉林 132012)

摘要:随着智能电网建设及电力系统自动化、智能化水平的不断提高,电力系统信号分析与数据处理方法在电力系统中的重要作用进一步凸显。压缩传感(CS)是一种基于信号的稀疏特性,将利用奈奎斯特采样定理的信号采样过程转化为基于优化计算恢复信号的观测过程的新兴信号处理方式,并广泛应用于信号/图像处理、医疗成像与无线通信等领域。基于压缩传感的电力系统信号分析与数据处理方法具有采样速率低、高压缩比,以及便于提取信号特征等优点,因而,在电力系统中具有广泛的应用前景。描述了压缩传感理论框架,并对该理论在电力系统信号分析与数据处理中的应用进行详细综述,其中主要围绕电能质量分析、故障分析、电力系统模态识别、电力系统预测、数据传输,以及智能电网等方面进行评述,并结合压缩传感在电力系统信号分析与数据处理领域的发展状况,对其发展前景进行展望。

关键词: 智能电网;电力系统;电力系统信号分析与数据处理;压缩传感

中图分类号: TH86 TM769 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Survey of compressed sensing technology for signal and data of power system

Yu Huanan, Du Yao, Ma Congcong

(College of Information Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: As the automation and intelligence for power grid and power system improves continuously, the function of power system signal analysis and data processing methods is further highlighted. Compressed sensing is a new signal processing method based on signal sparseness, which transforms the signal sampling process using Nyquist sampling theorem into the observation process based on optimized computation for restoring signal. It is widely used in signal / image processing, medical treatment imaging, wireless communication and etc. Compressed sensing-based power system signal analysis and data processing method has the advantages of low sampling rate, high compression ratio, easy to extract signal characteristics and etc. Therefore, it has a wide application prospect in power system. The main purpose of this paper is to provide a theoretical framework of compressed sensing, and to summarize its applications in power system signal analysis and data processing. The main aspects are as follows: power quality analysis, fault analysis, power system modal identification, power system prediction, data transmission, smart grid and etc, and combined with the development of compressed sensing in power system signal analysis and data processing, its development prospect is expected.

Keywords: smart grid; power system; power system signal analysis and data processing; compressed sensing (CS)

0 引言

为进一步提高电网接纳和优化配置多种能源的能力,全面建设安全、经济、高效的现代能源保障体系,我国正在大力推动智能电网和能源互联网建设。作为智能电网和能源互联网的基本功能模块,高级量测体系

(advanced metering infrastructure, AMI) 常被用于测量、收集、储存、分析、运用和传送电价信息、用户用电数据与系统运行状况^[1-2]。这些功能的实现主要依赖于电力系统信号分析与数据处理方法,其对 AMI 的建设和实施有重要意义,也是发展智能电网和能源互联网的关键基础技术之一。

电力系统信号分析与数据处理是电力系统问题得以

改善和控制的基础。传统的电力系统信号分析与数据处理方法主要有傅里叶变换(Fourier transform, FT)^[3]、小波变换(wavelet transform, WT)^[4,6]和希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)^[7]等。其中,傅里叶变换主要适用于稳态信号的分析,且不具有时域分析能力,使其应用范围受到限制;小波变换具有良好的时频局部化特性,但由于小波基选取困难,使其自适应性较差;而HHT变换解决了小波变换选取基函数困难的问题,具有良好的局部适应性。这些方法虽各具特色,但其共同点是均建立在奈奎斯特采样定理的基础上,这将导致大量的采样数据量,给电力系统数据传输和存储带来巨大压力。

近几年,一种新的信息获取指导理论为数据采集技术带来了革命性的突破,即压缩传感。该理论指出:对可压缩的信号可通过远低于Nyquist标准的方式进行采样,仍能精确地恢复出原始信号^[8,9]。因而,相对于传统电力系统信号分析与数据处理方法,将压缩传感理论应用于电力系统信号压缩与检测领域中,不仅具有较高的压缩比,而且便于直接提取信号特征,是一种更为高效的电力系统信号分析与数据处理方法。

本文针对以上研究背景,从稀疏表示、观测矩阵以及重构算法方面,系统地介绍了压缩传感理论现阶段的发展状况,并对压缩传感理论在电能质量分析、故障分析、电力系统模态识别和电力系统预测、数据传输,以及智能电网等方面进行详细归纳综述。另外,本文的目的在于从多个角度,对压缩传感理论在电力系统方面的研究现状和应用进行梳理和综述,为后续开展更为深入的研究提供借鉴与参考。

1 基础理论

1.1 电力系统信号与数据简介

1.1.1 电力系统信号

电力系统是一个集发电、变电、输电和配电功能于一体的电能生产与消费系统,其庞大、复杂的体系结构形成了如今种类繁多的电力系统信号。电力系统信号,顾名思义是指存在于电力系统中的一系列电压、电流等信号。

在电力系统中,电压、电流等信号通常采用余弦形式来表示,根据IEEE C37.118-2005标准^[10],在实际应用中电力系统信号的通用数学表达式为:

$$x(t) = X_m \cos(2\pi ft + \varphi) \quad (1)$$

式中: X_m 表示信号幅值, f 表示信号的额定频率, φ 表示信号的初相角。在实际应用中,需根据具体情况以及信号种类的不同建立相应的电力系统信号模型。

本文将电力系统信号根据实际应用情况大致分为:电能质量扰动信号、故障信号与振荡信号。

1) 电能质量扰动信号。对于电能质量扰动信号,根据电力系统运行状态可分为稳态扰动信号和暂态扰动信号。前者一般是指稳态的电压扰动信号,以波形畸变为特征,主要包括谐波、间谐波、陷波以及噪声等;而后者以电压幅值变化和暂态持续时间为特征,主要包括电压暂升、电压暂降、脉冲和振荡等。通过准确分析电能质量扰动信号,提取信号特征,并进行识别分类与参数估计,可处理多种电力系统问题。

2) 故障信号。在电力系统中,故障是不可避免的。当故障发生时,故障信号将出现在各条发生故障的线路上。电力系统中的故障信号一般是随机非平稳的,它的特征主要反映在相对于正常信号的突变上,即暂态电流或电压信号。

3) 振荡信号。现代电力系统具有区域互联、大电网、远距离以及超高压的特征,常因系统局部异常引发全系统振荡甚至大面积的瓦解,由此产生的振荡信号是一种非线性、非平稳信号,主要包括次同步振荡信号、同步振荡信号、异步振荡信号及低频振荡信号,以上几种振荡信号产生原因俱不相同,且功角变化与频率范围也不同。

1.1.2 电力系统数据

信号是数据的电气或电磁编码,数据的含义则更加广泛。电力系统数据可以理解为发电、输电、变电和配电过程中,需要处理或者传输的信息。需要注意的是,与信号分析和特征提取的目的不同,数据处理是为了信息的传输和获取。例如,随着随机性、波动性极强的新能源发电规模的不断扩大,为避免电力系统中电源与系统负荷的失衡,必须对电力系统中用电负荷以及风、光等历史数据进行分析,提取数据基本特征并实现未来数据的准确预测。

1.2 压缩传感理论简介

压缩传感理论是由Donoho D. L.^[11]和Baraniuk R.^[12]等人提出的一种新型的信号处理方法。压缩传感理论使得测量信号的数量远远小于传统奈奎斯特采样定理所获得的海量数据,不仅减轻了系统的传输存储压力,还大大提高了采样信号的分辨率^[13]。

压缩传感理论可以概括为以下3个步骤:稀疏表示、构建观测矩阵和设计重构算法。这3个部分构成了该理论的基本框架。

设测量信号为 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$,其中 n 为信号长度,对 \mathbf{x} 进行压缩传感的过程如下。

1) 稀疏表示:信号的稀疏表示是信号必须在某种变换下具有稀疏性,这是应用压缩传感理论的先验条件。设计过完备字典 $\mathbf{D} = \{\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_n\}$,使信号 \mathbf{x} 在过完备字典上具有稀疏性,即:

$$\mathbf{x} = \Psi \mathbf{s} \quad (2)$$

式中: \mathbf{s} 是稀疏变量。

2) 构建观测矩阵:并不是任何矩阵都可以作为观测矩阵,选择观测矩阵的前提是必须使传感矩阵满足约束等距性(restricted isometry property, RIP)条件。设观测矩阵为 $\Phi \in R^{m \times n}$ ($m \ll n$),则测量向量为:

$$y = \Phi x \quad (3)$$

3) 设计重构算法:由测量值及投影矩阵重构原始信号,即从测量向量 y 中恢复出原始信号 x ,利用重构算法求解最优问题 $\min \|x\|_1, \text{ s. t. } y = \Phi x$ 。

1993年, Mallat S 等人^[14]首次提出应用过完备字典对信号进行稀疏表示,同时引入了匹配追踪算法。由于信号的稀疏分解与压缩传感在本质上是一致的,且求得稀疏解也是压缩传感信号重建问题的基本问题。因而,本文将原子稀疏分解算法归纳到压缩传感问题中,对电力系统信号分析与数据处理方法进行统一研究总结。

1.3 基于压缩传感的电力系统信号分析与数据处理

压缩传感在电力系统中的应用主要有两个方面:1) 利用压缩传感对电力系统信号或数据进行分析与特征提取;2) 在信号或数据处理中应用压缩传感自身的优势,减少数据传输过程中的数据量。

对于电力系统信号和数据,传统分析方法通常无法考虑信号自身的基本特征,从而限制表达信号的范围和能力。根据压缩传感理论,可通过设计的过完备字典对信号进行稀疏表示,实现提取信号基本特征的目的。此外,对于电力系统信号和数据,由于传统的处理方法均属于奈奎斯特采样定理的范畴,即采样频率必须大于原始信号最高频率的两倍,因而会带来巨大的数据量^[15-16],而且,在使用传统方法处理信号与数据的过程中,无法将采样与压缩同时进行,这不仅浪费大量时间和资源,还将给系统的传输和存储带来沉重压力^[17]。而基于压缩传感的电力系统信号分析和数据处理方法,可将采样与压缩融合到一起,大大减轻了系统传输与存储负担,提高了压缩效率。

为进一步说明压缩传感技术对于电力系统信号分析与数据处理具有重要的现实意义,接下来,将对压缩传感在电能质量扰动信号、故障信号、与振荡信号等电力系统信号分析中,以及电力系统与智能电网的数据处理中的应用进行全面综述。

2 压缩传感在电力系统信号分析和数据处理中的应用研究

2.1 压缩传感在电能质量分析中的应用研究

电能质量分析作为电力系统亟待解决的热点问题引起了国内外研究学者的广泛关注,其中主要集中在电能质量扰动信号特征提取,以及电能质量数据压缩两方面。

在电能质量扰动信号分析中,由压缩传感理论可知,式(3)中, x 代表原始电能质量扰动信号, y 代表电能质量扰动信号测量值。为完成电能质量扰动信号特征提取与数据压缩的目的,主要需从以下几方面出发,即过完备字典、观测矩阵的设计与重构算法的改进。不同的过完备字典,其稀疏表达能力不同,过完备字典的设计,力求使原子能更全面的反映原始电能质量扰动信号的基本特征,从而获得更好的稀疏性,这也是不同文献改进的出发点之一。另一方面,合理有效的观测矩阵对于测量值的获取和原始电能质量扰动信号的精确重构也起到关键作用^[18]。观测矩阵的设计必须要满足约束等距性 RIP 准则,因此,需设计与大多数的稀疏信号都不相关,且精确重构原始信号所需的测量数也较小的观测矩阵^[19-20]。此外,重构算法作为压缩传感理论的核心内容,更是改进的重要目标。

文献[21]提出了基于原子分解快速算法的电能质量扰动信号分析方法,通过快速傅里叶变换对构建的相关原子库中的最优原子频率进行预求解,并采用匹配追踪算法选出最优原子,快速准确地提取出了电能质量扰动信号的特征量。针对传统电能质量扰动信号分析方法存在的采样率高、传输或存储过程浪费资源等缺陷,文献[22]首次提出了基于压缩传感理论的暂态和短时电能质量扰动信号的压缩采样与重构算法,有利于推进电能质量扰动信号分析与检测技术的进一步发展。文献[23-25]以 Gabor 原子库和匹配追踪算法为基础,对电能质量扰动信号进行准确分析与检测,实现扰动特征的有效提取,同时具有较好的抗噪性能。传统的电能质量检测方法大多是对单相数据进行压缩采样,但在实际应用中,这种方法往往无法达到较高的精确度。因此,文献[26]提出用压缩传感理论来解决三相电能质量数据的压缩,实现了三相电能质量扰动信号同时处理,且精确地检测出多项性能指标。

目前,电能质量监测系统不仅应具备电能质量扰动信号检测功能,还应具备精确地扰动分析能力,而对扰动信号进行分类是对扰动信号准确分析的重要基础和前提。文献[27-28]首先针对电能质量扰动信号的特征构建相关原子库,再改变搜索参数的方式,实现匹配追踪算法的优化,通过该方法分类准确度较高,且抗噪性能较好。文献[29]可同时实现对三相电能质量扰动信号的准确分类,也可实现对信号的有效压缩和重构。安全稳定的电能质量是智能用电网络的基本要求,谐波与间谐波是最常见的电能质量扰动信号,对其进行准确地测量分析对于保障用电设备的安全稳定运行有较大意义。文献[30-33]提出一种基于压缩传感的智能用电网络高分辨率谐波与间谐波测量方法,有效提升了智能用电网络的电能质量。文献[34]提出一种面向用电侧电能质量监

测的时空压缩传感方法,可以达到自检测电能质量数据的效果,解决了电能质量数据量庞大、数据计算处理复杂等问题。

将压缩传感理论应用在电能质量分析中,不仅可以准确提取扰动特征,进行识别分类,还有效解决了电能质量数据量大的难题,节约了系统资源,为电能质量分析提供了新思路 and 途径。

2.2 压缩传感在故障分析中的应用研究

随着电力系统规模的扩大,越来越多的非线性和大功率电力电子器件被投入到电网中,对电网安全稳定运行造成了威胁^[35-36]。为了保障电力系统和用户的安全,快速准确地排除系统故障,许多专家学者提出将压缩传感理论应用于电力系统故障信号分析中,并相继对该方法进行了相关的实验验证。

采用压缩传感理论分析故障信号时,式(3)中, \mathbf{x} 代表原始故障信号, \mathbf{y} 代表故障信号测量值。与电能质量扰动信号分析类似,研究也主要从过完备字典、观测矩阵的设计与重构算法的改进入手。

目前,为了克服传统正交匹配追踪算法处理故障信号花费时间较长的缺陷,文献[37]提出了一种将压缩传感理论和禁忌优化算法相结合的稀疏故障信号特征提取方法,该方法与其他传统方法相比,不仅有较小的余量误差和算法运行时间,而且,在强噪声情况下,具有较高的信噪比。针对电气系统的故障诊断易受噪声干扰这一问题,文献[38]将压缩传感理论应用到故障诊断中,准确恢复出故障信号,根据故障信号判断故障类型。文献[39-40]提出了一种将原子分解和行波自然频率相结合的单端故障测距方法,该方法具有很高的测距精度和自适应性,基本不受故障类型、故障距离以及外界因素的影响。

随着特高压电网的发展建设,输电线路电场和特高压变电站问题已经引起大量学者的广泛关注。针对传统的工频电场分析方法应用场合受限的缺点,文献[41]介绍了一种将压缩传感理论应用于工频电场逆问题计算的新方法,保障了工作人员的安全,为无接触式的设备故障在线监测提供了新的思路。

近几年,小电流接地运行方式被广泛应用在国内中低压配电网中,针对小电流接地系统单相接地故障的选线难度由配电网结构的复杂性所决定这一特点,且传统方法采样频率和对硬件设施要求较高。文献[42-43]将压缩传感理论应用于小电流接地故障的选线中来解决这一难题,并获得了较高的选线准确度。文献[44-45]针对目前采用暂态量的故障选线方法的不足,将原子分解法应用到故障暂态零序电流的分析中,有效地识别出母线故障,表现出了较好的自适应性和较强的鲁棒性。

目前,单相自动重合闸技术作为提高系统安全稳定

运行的有效措施,已被广泛应用于电力系统的超、特高压线路中。然而,传统重合闸盲目性的缺点将给电力系统运行和设备使用带来严重危害,为解决上述问题,文献[46]采用原子稀疏分解法来分析非线性故障信号,准确地判定了故障熄弧时刻,为线路断路器的重合时刻整定提供了依据。

压缩传感理论作为一种新的故障分析途径和方法,其具有较好的自适应性和鲁棒性,而且算法测量精度较高,便于恢复故障信号,从而判断故障类型,较其他方法具有较大优越性和更广阔的应用前景。

2.3 压缩传感在电力系统模态识别中的应用研究

随着我国经济的不断发展,电力系统向区域互联、大容量和超高压电网方向发展。互联电网有利于提高电力系统运行的经济性和可靠性,但多区域的电网互联有可能引起低频振荡^[47]和次同步振荡^[48]等现象的出现,使电网的安全稳定运行受到冲击。因此,为避免电力系统的稳定性遭到破坏,需要实时监测电力系统的振荡模式,对其进行准确分析,避免次同步振荡现象的发生。

在电力系统模态识别领域,式(3)中, \mathbf{x} 为原始振荡信号, \mathbf{y} 为测量振荡信号,虽然分析的信号类型与前文有所不同,但从根本上讲,应用压缩传感技术的出发点是一致的,即均以稀疏分解和特征提取为最终目标。

文献[49-51]提出一种将压缩传感理论与盲源分离技术相结合的低采样频率方法,不仅能够对系统进行高效准确地模式识别,还可节约系统资源。

为克服传统特征分析方法不适合分析大规模高阶系统的特点,文献[52]提出一种将原子稀疏分解法应用到低频振荡模态参数辨识中的新方法,为电力系统稳定分析和安全运行提供一种全新的思路和途径。针对互联电力系统普遍存在的低频振荡现象,文献[53]提出一种检测低频振荡主导模式的新方法,该方法能准确识别主导模式,且自适应地揭示振荡模式时变特性的缺点。此外,为解决传统分析低频振荡模式方法不能自适应反映振荡模式时变特性的缺陷,文献[54]提出一种将粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法应用到原子分解的迭代优化过程中的模态原子法,能有效追踪振荡模式的时变特性,具有较强的鲁棒性和抗噪性,而且有良好的时频分辨率。

由于现有的线性化方法难以有效辨识电力系统次同步振荡模态,文献[55]提出一种处理非线性、非平稳信号的阻尼正弦原子分解方法,该方法在建立相应原子库的基础上,采用匹配追踪和改进粒子群算法对次同步振荡信号进行处理,可快速准确地辨识次同步振荡模态,而且具有较好的时频特性。文献[56]提出了基于改进入侵杂草优化(invasive weed optimization, IWO)算法优化的阻尼正弦原子分解算法,该方法利用改进后的 IWO 算法

对传统的匹配追踪(matching pursuit, MP)算法进行优化,具有较好的辨识精度,为扰动源定位、故障诊断等领域提供了新的方法与途径。文献[57]通过引入混沌序列初始化的多种群策略、预筛选机制、以及随机变异的扩散机制对IWO算法进行改进,利用改进得到的IIWO算法对传统的匹配追踪算法进行优化,不仅降低了搜索的时间复杂度,而且获得了更高的辨识精度和时频特性。

同样,针对传统的线性化方法难以有效辨识次同步振荡模态的问题,文献[58]在建立过完备的阻尼正弦原子库基础上,提出一种基于改进生物地理学优化(improved biogeography-based optimization, IBBO)的阻尼正弦原子分解算法,该方法不仅提高了辨识精度,而且验证了该算法在静止无功补偿器(static var compensator, SVC)次同步振荡阻尼控制器设计中的可行性和所设计控制器的有效性。

此外,由于电力系统数据在向控制中心传输的过程中易受到传感器故障和网络攻击等因素的影响,可能会导致通信链路的阻塞和中断,这将严重影响系统数据的恢复和重建工作。文献[59]介绍了一种基于分布式压缩传感的方法用于恢复系统丢失的数据,并将其应用在电力系统状态估计(power system state estimation, PSSE)中,利用测量数据时间和空间的相关性,来准确执行线性状态估计,进行电力系统模态识别。文献[60]也将压缩传感理论作为分析电力系统模态的手段,准确得到了系统状态估计结果。

在电力系统中,由于许多重要事件都具有稀疏特性,压缩传感理论在该领域中逐渐凸显其优势。利用电力系统事件的稀疏性,通过压缩传感技术来对电力系统进行模态识别已成为新的发展趋势,并已取得了众多的阶段性成果,说明了该方法的正确性和有效性。

2.4 压缩传感在电力系统预测中的应用研究

目前,将压缩传感理论与其他智能算法结合被很好地应用于电力系统预测领域中,并在风电功率预测和电力负荷预测领域中已得到了很好地验证。

在电力系统预测领域中,应用压缩传感技术对预测数据的分析与其他领域中的数据分析有所不同。在分析其他电力系统数据时,通常是对数据进行压缩采集,缩小数据量。而此处,则主要关注对相似历史数据的分析。式(3)中, \mathbf{x} 为新测量数据, \mathbf{y} 为新测量数据的压缩表示,字典 \mathbf{D} 是通过用电负荷、风、光等历史数据构建的过完备字典,将新测量数据在历史数据构成的过完备字典中稀疏分解,寻找相似的历史数据,然后利用相似的历史数据,对未来数据进行预测。相对于传统预测方法,压缩传感技术能够针对数据的不同特征进行分别预测,得到精确地全方面预测。因此,压缩传感在预测中的应用,实际上是对历史数据的分析,但应用的处理方法与信号

分析方法类似,所以为便于理解,也可以看作是对信号的处理。

文献[61]简单介绍了风电功率爬坡事件的物理含义,并提出了一种基于原子稀疏分解和反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)的组合预测方法,在一定程度上提高了预测精度,并能有效降低绝对平均误差和均方根误差计算值的统计区间。文献[62]采用原子稀疏分解(atomic sparse decomposition, ASD)法作为人工神经网络(artificial neural network, ANN)的前置分解方法,对短期风电功率进行滑动预测,能够有效地处理风电功率非平稳性,明显提升算法预测精确度。

对电力系统进行准确地负荷预测具有较大的现实意义。为了能够提高实时负荷预测精度,文献[63]提出一种将原子分解和支持向量机(atomic decomposition SVM, A-SVM)相结合的电力负荷组合预测方法,并采用浙江省某地区电网的实测负荷数据进行实验,由实验结果证明了该方法的良好鲁棒性和统计意义。

将压缩传感理论与其他智能算法相结合的组合预测,目前已达到了较好的预测精度,且具有较好的抗干扰能力。压缩传感理论为该领域提供了新的方法与思路。

2.5 压缩传感在数据传输中的应用研究

在电力系统中,电力监测设备需要为系统的准确分析提供大量的监测数据。传统的压缩采样方法不仅对系统的硬件要求较高,而且在采样过程中会产生大量数据,既浪费系统资源,还给系统的传输和存储带来沉重负担。因此,有专家学者尝试将压缩传感理论应用于电力系统数据传输中,提出了一个既可以保证数据实时性,又能节约系统资源的可靠数据传输方法。

首先以特高压输电塔远程监测系统中的实时监测数据为例,对振动、倾斜、风速等监测数据进行压缩采集,实现高效可靠的数据传输,基于式(3), \mathbf{x} 为原始测量数据, \mathbf{y} 为压缩测量数据。由于特高压输电塔远程监测系统只是庞大的电力系统中的一部分,因而为使更多数据传输问题得以妥善解决,由此将压缩传感技术推广到整个电力系统。为减少测量数据量,可通过改进观测矩阵的设计,以提高测量精度,同时节约系统成本。

实际中,随着电力系统和广域保护的复杂程度日益增加,通过通信技术从不同变电站获得全球数据已经成为新的研究热点。针对海量数据传输导致的网络阻塞和数据丢失问题,文献[64]将压缩传感技术应用于广域电力系统中,能够有效减少广域网(wide area network, WAN)的数据流量。针对海量电力系统数据将给系统传输或存储带来巨大压力这一现实问题,文献[65]提出一种基于传统MP算法的电力系统数据压缩方法,有效地减少了数据存储空间,节约了系统资源。

针对特高压输电塔形成的强电磁场干扰及所处的野

外恶劣自然环境严重影响了数据传输质量,导致出现监测系统数据溢出、误码率增加等问题。文献[66]提出一种基于压缩传感理论的特高压输电塔实时监测系统数据传输方法,明显降低了数据溢出率,有效地增强了输电塔监测系统的实际应用性能。

此外,文献[67]提出一种新型的绝缘子泄漏电流数据压缩方法,利用压缩传感理论使绝缘子泄漏电流数据量大大减少,不仅减轻了系统传输和存储的负担,而且明显提高了数据压缩比。

在电力系统中,大量的采样数据不仅会给系统传输和存储带来沉重负担,而且数据传输过程还易受到噪声、电磁场干扰,以及恶劣的自然环境等因素影响压缩传感作为一种新的信号处理方式,可以有针对性的解决上述问题,并提高系统的整体性能。

2.6 压缩传感在智能电网中的应用研究

近年来,随着通信和自动化等技术的不断完善,极大地提升了电网的智能化水平^[68-69],传统电网已经从单层的物理系统转变为包含信息层的智能电网^[70]。电网智能化的实现是以获取大量实时状态数据为基础。为了准确实时获取电力设备的运行状态信息,需要进行大量数据的分析。

智能电网涵盖了发电、输电、变电、配电、用电、调度各环节,压缩传感技术在面向智能电网时的应用也十分广泛。例如,智能电网中的无线传感器网络等通信载体进行数据传输时,通常以观测矩阵与重构算法的设计为出发点,将压缩传感和网络拓扑、路由相结合。文献[71]采用二维CS技术对无线传感器网络的多个节点数据进行压缩,在式(3)中, \mathbf{x} 为原始节点测量数据, \mathbf{y} 为节点测量数据的压缩表示,通过融合各个随机节点的数据信息,在汇聚节点处得到观测值集合,解决了数据存储、处理和传输等问题。

另一方面,还可从观测矩阵的改进入手,实现智能电网中的大量隐私数据的加密传输。文献[72]设计了一个具有高度可靠性的观测矩阵,并使用该矩阵,将大量的原始隐私数据转换成少量的密钥数据,增强其在获取测量数据时的保密性,实现智能电网数据的安全高效传输,其中对应式(3)中的 \mathbf{x} 为原始隐私数据, \mathbf{y} 为隐私数据的压缩表示。

而在智能电网无线家庭局域网中,由于网络节点数比较稀疏,使压缩感知技术也更适用于节点之间的数据传输。文献[73]提出了一种基于压缩传感的数据收集方案,在原始网络数据具有良好稀疏性的基础上,对观测矩阵进行了改进,实现低功耗数据采集的目的,对应式(3)中 \mathbf{x} 为原始网络数据, \mathbf{y} 为网络数据的压缩表示。可见,压缩传感技术在智能电网中的应用是灵活且广泛的。

此外,压缩传感在智能电网中还有诸多应用。传统数据采集方法往往在数据压缩效率和消耗时间上无法达到平衡,针对这一问题,文献[74]有效解决了智能电网数据采集量大等问题,为智能电网拓扑结构识别的研究和分析提供了新思路。智能电网多层复杂数据结构的特点还给电力系统数据实时同步监测带来了困难,文献[75]介绍了一种基于压缩传感的智能电网多层数据通信方法,有效地改善了系统数据传输性能,实现了可靠、安全和高效的数据传输技术。

随着智能电网建设的不断推进和发展,电网运行过程和监测系统产生的数据量也在不断上升,逐渐形成了如今的大数据的智能电网。现将压缩传感理论应用于智能电网中,减轻系统数据传输和存储压力,而且提高了整体系统的安全性和可靠性。

3 压缩传感面临的关键问题

压缩传感理论近几年得到了迅猛发展,不仅形成了较为完善的基本理论框架,而且在信号/图像处理、医疗成像、模式识别与地质勘探等相关领域均取得了阶段性的研究成果。而对于电力系统信号分析与数据处理领域,压缩传感理论虽然已得到了广泛研究,但针对诸多具体问题和应用问题的研究还处于探索阶段,仍然存在大量的问题亟待研究和解决。其中,主要有以下两方面:

1) 理论层面

针对电力系统特性,压缩传感理论应用于电力系统中依旧存在一些理论问题亟待解决。

应用压缩传感理论的前提条件是测量信号具有稀疏性。字典的设计决定着表示系数是否具有足够的稀疏性或衰减性,从而在减少压缩测量的同时,提高算法运行速度和测量精度。因此,基于目前的理论基础,设计高性能的过完备字典,并对于如何找到最优的冗余字典是目前将压缩传感理论应用于电力系统信号分析与数据处理中面临的难题之一,也是该领域一直的研究热点。

另一方面,由于观测矩阵的设计需要满足RIP准则,因此,如何设计一个与变换基高度不相关的观测矩阵,并在利用观测矩阵进行线性测量时,保证信号中的信息不被破坏,是应用压缩传感理论的另一难点。此外,信号重构算法是压缩传感理论的重要部分。如何设计性能稳定和重构精度较高的重构算法,并以较快的速度恢复原始信号一直是大家普遍关注的问题。

在压缩传感理论中,稀疏表示与观测矩阵和重构算法之间有着紧密联系,因此,为使该理论在电力系统信号分析与数据处理领域中得到广泛研究,应对稀疏字典的设计、观测矩阵的设计,以及重构算法的设计进行统筹考虑,以便推进该理论在电力系统信号分析与数据处理中

的应用与发展。

2) 应用层面

目前,压缩传感理论的硬件实现已经在一些领域取得了若干成果。TI公司和美国Rice大学运用压缩传感理论,研究制造出一种新型单像素数码照相机;麻省理工学院成功研制出了磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)射频(radio Frequency, RF)脉冲设备和编码孔径相机;中科院研制了CS滤波器和混沌器等,这些CS的硬件实现将CS理论向实用化推进了一大步。

从现有的研究现状来看,目前将压缩传感应用于电力系统信号分析与数据处理的工作主要集中在理论层面,即观测矩阵和重构算法的性能分析和优化上。另一方面,电力系统所具有的复杂性使测量信号在分析时易受到噪声、环境等外界因素干扰,往往达不到较好的精度,这些均影响着压缩传感的发展,使其应用层面的研究仍处于起步阶段,导致实际应用和理论研究严重脱节。此外,经济高效的硬件系统不仅是压缩传感过程物理实现的关键步骤,也是将该理论推向实际应用的必要环节。因而,针对电力系统信号分析与数据处理的压缩传感方法构建有效的硬件平台来解决大量的实际问题,这方面的研究还远远不够,需要进一步改进和完善。

4 结论与展望

压缩传感理论是通过信号的稀疏特性,将基于奈奎斯特采样定理的信号采样过程转化为基于优化计算恢复信号的观测过程。随着智能电网与能源互联网自动化和智能化水平的提升,以及用电部门对电能质量要求的不断提高,进一步将压缩传感理论成功地推向了电力系统信号分析与数据处理的各个领域。

本文对压缩传感理论框架的全过程进行了简要地描述,并详细地阐述了压缩传感理论目前在电力系统中的应用,综述了该技术在国内外该领域中的研究成果。压缩传感理论作为一种新兴的信号处理方式,虽然其体系还不完善,但其已在信号处理及其他领域掀起了一股浪潮,为目前许多尚未解决的难题提供了新思路和新方法,在经济和工业蓬勃发展的今天,将会拥有更广阔的应用前景。

参考文献

[1] 赵鸿图,周京阳,于尔铿. 支撑高效需求响应的高级量测体系[J]. 电网技术,2010,34(9):13-20.
ZHAO H T, ZHOU J Y, YU ER K. Support for high-demand response to the high-level measurement system[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 13-20.

[2] 栾文鹏,王冠,徐大青. 支持多种服务和业务融合的高

级量测体系架构[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5088-5095.

LUAN W P, WANG G, XU D Q. Support multiple services and business integration of advanced measurement architecture[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2014, 34(29): 5088-5095.

[3] 苗世洪,孙扬声. 基于电力系统故障信息远程通信的高效数据压缩与解压技术研究[J]. 电力系统自动化,1996,20(5):53-55.

MIAO SH H, SUN Y SH. Research on efficient data compression and decompression technology based on remote communication of fault information in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(5): 53-55.

[4] SANTOSO S, POWERS E J, GRADY W M. Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1250-1257.

[5] 陈平,葛耀中. 离散小波变换用于输电线路故障暂态行波信息压缩[J]. 电力系统自动化,2000,24(4):31-36.

CHEN P, GE Y ZH. Application of discrete wavelet transform to information compression of transient traveling waves in transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 31-36.

[6] MASOUM M A S, JAMALI S, GHAFFARZADEH N. Detection and classification of power quality disturbances using discrete wavelet transform and wavelet networks[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2010, 4(4): 193-205.

[7] ELANGO M K, KUMAR A N, PURUSHOTHAMAN S. Application of neural networks for power quality disturbance classification using hilbert huang transform[J]. European Journal of Scientific Research, 2010, 46(3): 442-454.

[8] DONOHO D L, TSAIG Y. Extensions of compressed sensing[J]. Signal Processing, 2006, 86(3): 533-548.

[9] BAJWA W U, HAUPT J, SAYEED A M, et al. Compressed channel Sensing: A new approach to estimating sparse multipath channels[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(6): 1058-1076.

[10] IEEE Std C37. 118-2005. IEEE standard for synchrophasors for power systems[S]. 2005.

[11] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.

[12] BARANIUK R. Compressive sensing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(4): 118-121.

- [13] CANDES E, WAKIN M B. An introduction to compressive sampling [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2):21-30.
- [14] MALLAT S, ZHANG Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12):3397-3415.
- [15] ZHAO H T, XI D M. Compression and realization of power quality disturbance data based on wavelet analysis [J]. Uncertainty Reasoning and Knowledge Engineering (URKE), 2011, 35(5):217-219.
- [16] VANGA M, GANESH H. Comparison of fourier transform and wavelet packet transform for quantification of power quality [J]. Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET), 2012, 42(11):1-6.
- [17] GEREK B. 2-D analysis and compression of power-quality event data [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 65(2):791-798.
- [18] DONOHO D L, HUO X M. Uncertainty principles and ideal atomic decompositions [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(7):2845-2862.
- [19] CANDES E, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2):489-509.
- [20] CANDES E, ROMBERG J, TAO T. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurement [J]. Communications on pure and Applied Mathematics, 2006, 59(8):1207-1223.
- [21] 曲正伟, 郝婉茹, 王宁. 原子分解快速算法在电能质量扰动分析中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10):145-150.
- QU ZH W, HAO W R, WANG N. Application of fast algorithm of atomic decomposition in power quality disturbance analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10):145-150.
- [22] 王学伟, 王琳, 苗桂君, 等. 暂态和短时电能质量扰动信号压缩与重构方法 [J]. 电网技术, 2012, 36(3):191-196.
- WANG X W, WANG L, MIAO G J, et al. Sampling and reconstruction of transient and short-time power quality disturbance signals [J]. Power System Technology, 2012, 36(3):191-196.
- [23] 于浩明, 黄纯, 江亚群, 等. 采用快速原子分解的电能质量扰动信号参数辨识 [J]. 电网技术, 2014, 38(8):2237-2243.
- YU H M, HUANG CH, JIANG Y Q, et al. By fast atomic decomposition of parameter identification of power quality disturbance signal [J]. Power System Technology, 2014, 38(8):2237-2243.
- [24] HOANG T A, NGUYEN D T. Matching pursuit for the recognition of power quality disturbances [C]. IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, 2002:1791-1796.
- [25] 贾清泉, 于连富, 董海艳. 应用原子分解的电能质量扰动信号特征提取方法 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24):61-64, 93.
- JIA Q Q, YU L F, DONG H Y. Feature extraction of power quality disturbance signals based on atomic decomposition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24):61-64, 93.
- [26] 于华楠, 代芳琳, 邹潇. 三相电能质量扰动信号压缩方法研究 [J]. 电测与仪表, 2014, 51(23):60-63.
- YU H N, DAI F L, ZOU X. Research on compression of three-phase power quality disturbance signals [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(23):60-63.
- [27] 王宁, 李林川, 贾清泉. 应用原子分解的电能质量扰动信号分类方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4):51-58.
- WANG N, LI L CH, JIA Q Q. Classification of power quality disturbance signals using atom decomposition [J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2011, 31(4):51-58.
- [28] MANIKANDAN M S, SAMANTARAY S R, KAMWA I. Detection and classification of power quality disturbances using sparse signal decomposition on hybrid dictionaries [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(1):27-38.
- [29] 于华楠, 代芳琳, 苏天恺. 基于压缩感知的三相电能质量扰动信号压缩及分类新方法 [J]. 吉林大学学报:工学版, 2016, 46(3):964-971.
- YU H N, DAI F L, SU T K. A new method of compressing and classifying three-phase power quality disturbance signals based on compressed sensing [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2016, 46(3):964-971.
- [30] 刘晏池, 王雪, 刘佑达, 等. 基于分布式压缩感知的智能用电网络高分辨率谐波与间谐波测量 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10):2161-2166.
- LIU Y CH, WANG X, LIU Y D, et al. High resolution harmonics and interharmonics measurement of intelligent power network based on distributed compression sensing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10):2161-2166.
- [31] BERTOCCO M, FRIGO G, NARDUZZI C, et al. Resolution enhancement in harmonic analysis by

- compressive sensing [C]. IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems, 2013: 40-45.
- [32] KUSTANOVICH Z, LEVRON Y. Applications of compressed sensing for locating harmonic distortions in power systems [C]. IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, 2015: ;1-4.
- [33] BRITO A E, CABRERA S D, VILLALOBOS C. Optimal sparse representation algorithms for harmonic retrieval [C]. IEEE Conference Record of the Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2001: 1407-1411.
- [34] 孙毅, 许鹏, 武昕. 面向用电侧电能质量监测的时空压缩感知方法 [J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2351-2357.
SUN Y, XU P, WU X. Space-time compressed sensing method for power quality monitoring of power [J]. Power System Technology, 2015, 39(8), 2351-2357.
- [35] LIANG M, BOZCHALOOI I S. An energy operator approach to joint application of amplitude and frequency-demodulations for bearing fault detection [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(5): 1473-1494.
- [36] SELESNICK I W. Resonance-based signal decomposition; A new sparsity-enabled signal analysis method [J]. Signal Processing, 2011, 91 (12): 2793-2809.
- [37] 周晏, 王璐. 基于稀疏编码和禁忌优化的故障信号抽取方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(7): 2164-2166, 2181.
ZHOU Y, WANG L. A fault signal extraction method based on sparse coding and tabu search [J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(7): 2164-2166, 2181.
- [38] 叶北林, 梁凯豪, 熊平原. 基于压缩感知的一类带噪声电气系统的故障诊断 [J]. 电气技术, 2015, 16(8): 29-33.
YE B L, LIANG K H, XIONG P Y. Fault diagnosis of a class of noisy electrical system based on compressed sensing [J]. Electrical Engineering, 2015, 16(8): 29-33.
- [39] 徐高, 龚庆武, 关钦月, 等. 利用行波固有频率和原子能量熵的故障选相方法 [J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1688-1693.
XU G, GONG Q W, GUAN Q Y, et al. Fault phase selection method using traveling wave natural frequency and atomic energy entropy [J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1688-1693.
- [40] 徐高, 龚庆武, 李勋, 等. 基于原子分解和行波自然频率的单端故障测距方法 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 133-138.
XU G, GONG Q W, LI X, et al. Single-ended fault location method based on atomic decomposition and traveling wave natural frequency [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 133-138.
- [41] 何风行, 诸军, 黄薛凌, 等. 基于压缩感知的变电站工频电场逆问题建模与仿真 [J]. 华东电力, 2013, 41(9): 1779-1782.
HE F X, ZHU J, HUANG X L, et al. Modeling and simulation of inverse problem of power frequency electric field in substation based on compression [J]. East China Electric Power, 2013, 41(9): 1779-1782.
- [42] 张杰, 毕贵红, 陈仕龙, 等. 基于压缩感知理论的小电流接地故障选线法 [J]. 中国电力, 2013, 46(12): 6-11.
ZHANG J, BI G H, CHEN SH L, et al. Line selection method of small current earth fault based on compressed sensing theory [J]. China Electric Power, 2013, 46(12): 6-11.
- [43] WANG X W, WEI Y F, ZENG Z H. Fault line selection method of small current to ground system based on atomic sparse decomposition and extreme learning machine [J]. Journal of Sensors, 2015(10): 1-19.
- [44] 吴靓, 张英杰, 徐高, 等. 基于原子分解的谐振接地系统自适应故障选线方法 [J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3554-3562.
WU L, ZHANG Y J, XU G, et al. Adaptive fault location method based on atomic decomposition in resonant grounding system [J]. High Voltage Technology, 2014, 40(11): 3554-3562.
- [45] WANG Y X, XIANG J W, MO Q Y. Compressed sparse time-frequency feature representation via compressive sensing and its applications in fault diagnosis [J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2015, 68(5): 70-81.
- [46] 贾晶晶, 龚庆武, 李勋. 采用原子分解法的带并联补偿线路单相自适应重合闸 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 117-123.
JIA J J, GONG Q W, LI X. Single-phase adaptive reclosing with parallel compensation line using atomic decomposition method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 117-123.
- [47] LIU G P, XU ZH, HUANG Y, et al. Analysis of inter-area oscillations in the South China interconnected power system [J]. Electric Power Systems Research, 2004, 70(1): 38-45.
- [48] ARWINDRA R, GORO F, TOSHIHISA F, et al. Effects of virtual resistor in power electronic converter on subsynchronous oscillation damping [J]. IEEE

- Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2011, 6(6):540-546.
- [49] YANG Y C, NAGARAJIAH S. Output-only modal identification by compressed sensing: Non-uniform low-rate random sampling[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 56(5):15-34.
- [50] ZEBADUA A, AMBLARD P O, MOISAN E, et al. Examples of output-only modal identification using compressive sensing techniques[C]. Structural Health Monitoring, IEEE, 2015:1291-1298.
- [51] SADHU A, HU B, NARASIMHAN S. Blind source separation towards decentralized modal identification using compressive sampling[C]. IEEE International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications, 2012:1147-1152.
- [52] 李勋, 龚庆武, 贾晶晶, 等. 基于原子稀疏分解的低频振荡模态参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9):124-133.
- LI X, GONG Q W, JIA J J, et al. Parameter identification of low frequency oscillation modes based on atom sparse decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9):124-133.
- [53] 李勋, 龚庆武, 贾晶晶. 采用原子分解能量熵的低频振荡主导模式检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1):131-139.
- LI X, GONG Q W, JIA J J. Low frequency oscillation dominant mode detection method based on atom decomposition energy entropy[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(1):131-139.
- [54] 李勋, 龚庆武, 关钦月, 等. 基于 PSO 的模态原子法在低频振荡模式时变特性追踪的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10):79-89.
- LI X, GONG Q W, GUAN Q Y, et al. Application of modal atom method based on PSO to time-varying characteristic tracking in low frequency oscillation mode[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2013, 33(10):79-89.
- [55] 郑志萍, 吴军, 杨武盖, 等. 一种新的阻尼正弦原子分解算法辨识 SSO 模态参数[J]. 中国电力, 2016, 49(1):75-79.
- ZHENG ZH P, WU J, YANG W G, et al. A new sine-atom decomposition algorithm for identifying SSO modal parameters[J]. China Electric Power, 2016, 49(1):75-79.
- [56] 董飞飞, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于阻尼正弦原子分解的次同步振荡模态辨识[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19):119-125.
- DONG F F, LIU D CH, LIAO Q F, et al. Modal identification of subsynchronous oscillation based on damping sinusoidal atom decomposition[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2013, 33(19):119-125.
- [57] 邹红波, 王飞. 经 IWO 优化的原子分解算法辨识次同步振荡模态[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(4):62-67.
- ZOU H B, WANG F. Identification of subsynchronous oscillation modes by atomic decomposition algorithm optimized by IWO[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation, 2016, 28(4):62-67.
- [58] 董飞飞, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于 IBBO 的原子分解算法在次同步振荡抑制中的应用[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6):107-113.
- DONG F F, LIU D CH, LIAO Q F, et al. Application of atomic decomposition algorithm based on IBBO in subsynchronous oscillation suppression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6):107-113.
- [59] HAMIDI R J, KHODABANDEHLOU H, LIVANI H, et al. Application of distributed compressive sensing to power system state estimation[C]. IEEE North American Power Symposium, 2015:1-6.
- [60] ROZENBERG I, LEVRON Y. Applications of compressed sensing and sparse representations for state estimation in power systems[C]. IEEE International Conference Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, 2015:1-4.
- [61] 崔明建, 孙元章, 柯德平. 基于原子稀疏分解和 BP 神经网络的风电功率爬坡事件预测[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12):6-11, 26.
- CUI M J, SUN Y ZH, KE D P. Prediction of power climbing events based on atomic sparse decomposition and BP neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12):6-11, 26.
- [62] 崔明建, 孙元章, 柯德平. 基于原子稀疏分解理论的短期风电功率滑动预测[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1):120-127.
- CUI M J, SUN Y ZH, KE D P. Short-term wind power slide prediction based on atomic sparse decomposition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1):120-127.
- [63] 陈成, 朱敏, 王树朋. 基于原子分解和支持向量机的短期电力负荷预测[J]. 陕西电力, 2014, 42(10):1-5, 9.
- CHEN CH, ZHU M, WANG SH P. Short-term load forecasting based on atomic decomposition and support vector machine[J]. Shanxi Electric Power, 2014,

- 42(10):1-5,9.
- [64] LI B, HE J H, YIP T, et al. Wide area power system fault detection using compressed sensing to reduce the WAN data traffic [C]. Proceedings-International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Programming, 2014:40-45.
- [65] 张楠, 张娟, 屈宪军. 基于 MP 的电力系统数据压缩方法[J]. 电气时代, 2015(11):60-62.
ZHANG N, ZHANG J, QU X J. Power system data compression method based on MP [J]. Electrical Age, 2015(11):60-62.
- [66] 胡顺仁, 王元, 梁快, 等. 基于压缩感知的特高压输电塔实时监测系统数据传输方法研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(7):81-85.
HU SH R, WANG Y, LIANG K, et al. Research on data transmission method of real-time monitoring system for UHV transmission towers based on compressed sensing [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(7):81-85.
- [67] 陈青, 黄建才, 朱永利. 基于压缩传感理论的绝缘子泄漏电流数据压缩[J]. 电力科学与工程, 2010, 26(7):1-4.
CHEN Q, HUANG J C, ZHU Y L. Data compression of insulator leakage current based on compression sensing theory [J]. Electric Power Science and Engineering, 2010, 26(7):1-4.
- [68] XI F, SATYAJAYANT M, GUOLIANG X, et al. Smart grid, the new and improved power grid: A survey [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials (COMST), 2012, 14(4):944-980.
- [69] 张文亮, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 先进电力电子技术在智能电网中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4):1-7.
ZHANG W L, TANG G F, ZHA K P, et al. Application of advanced power electronic technology in smart grid [J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2010, 30(4):1-7.
- [70] DIVYAKANT A, PHILIP B, ELISA B, et al. Challenges and opportunities with big data [J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2012, 5(12):2032-2033.
- [71] TAN L T, LE L B. Compressed sensing based data processing and MAC protocol design for smart grids [C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2015:2138-2143.
- [72] GAO J T, ZHANG X M, LIANG H, et al. Joint encryption and compressed sensing in smart grid data transmission [C]. IEEE Global Communications Conference, 2014:662-667.
- [73] ISLAM T, KOO I. Compressed sensing-based data gathering in wireless home area network for smart grid [C]. International Conference on Informatics, Electronics and Vision, 2012:82-86.
- [74] BABAKMEHR M, SIMOES M G, WAKIN M B, et al. Compressive sensing-based topology identification for smart grids [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 12(2):532-543.
- [75] ISLAM M T, KOO I. Compressed sensing-based multi-layer data communication in smart grid systems [J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2013, 7(9):2213-2231.

作者简介



于华楠, 分别在 2004 年、2007 年和 2012 年于吉林大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为东北电力大学副教授, 主要研究方向为压缩传感在电力系统中的应用、电能质量信号检测与分析工作。

E-mail: yhn810117@163.com

Yu Huanan received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Jilin University in 2004, 2007 and 2012, respectively. Now she is an associate professor in Northeast Dianli University. Her main research interests include compressed sensing and its applications in power systems, power quality signal detection and analysis.