

# 基于独立分量分析的工频通信中的谐波干扰消除

甘武, 孙云莲

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 双向工频通信系统是一种基于配电网的通信系统。通信信号在配电网中传输时,其背景信号中必然含有大量的谐波成分,这会给通信信号的检测带来极大的困难。该文根据双向工频通信的信号特征,提出了基于独立分量分析的谐波消除方法。该方法在消除谐波干扰的同时,有用信号成分几乎不被破坏。通过 Matlab 对此方法进行了验证,取得了良好的效果。

**关键词:** 谐波; 盲源分离; 双向工频通信; 独立分量分析

**中图分类号:** TM73      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2005)10-0017-04

## 0 引言

双向工频自动通信系统<sup>[1]</sup> (Two Way Automatic Communication System TWACS)是近年来在北美出现的一种基于配电网的通信系统,其原理是利用工频电压基波波形过零信息实现信号的调制和解调。TWACS特殊的调制原理和传输方式决定了其具有成本低廉、实现简单、抗干扰能力强等优点,这是传统的电力线载波通信所无法比拟的。但由于其传输速率较低(双向各传输 64 bit共需要 7~8 s),目前主要应用于通信速率要求不高的民用自动抄表、工业远程计量等领域。

在电网中实现通信信号的传输,其背景信号中必然含有大量的谐波成分,会给信号的检测带来极大的困难。通常,谐波干扰有工频干扰和其整数倍频率的谐波成分。在信号检测过程中,谐波干扰的存在往往对有用信号造成较大破坏,从而影响检测和效果。通常的陷波滤波器可以去除周期性干扰,但是陷波滤波器在低频段的系数敏感度高,量化后的陷波频点极易发生偏移,滤波效果不理想,且会对有用信号成分造成一定的破坏。在众多的消噪方法中,最有效的方法应该是直接从观测信号中减除干扰成分,其前提是能够直接获得噪声参考信号。

基于独立分量分析 (Independent Component Analysis (ICA))的盲源分离 (Blind Source Separation, BSS)理论为谐波消除提供了新的思路。从统计信号处理的角度来看,谐波和待检测的目标常来自于两个相互独立的信号源,故可以将谐波干扰消除问题转化为盲源分离问题。由于对谐波频率和时域波形的基本形式有一定的了解,因而比一般 BSS问题的处理要简单。本文将 ICA 应用于谐波干扰消除

中,通过 Matlab 仿真来验证 ICA 可以有效地分离出混杂在通信信号中的电网基波及其谐波成分,较好地解决了谐波干扰问题。

## 1 独立分量分析

独立分量分析<sup>[2]</sup>是近期发展起来的一种非常有效的盲源分离技术。ICA 处理的对象是一组相互统计独立的信源经线性组合而产生的混合信号,最终从混合信号中提取出各独立的信号分量。ICA 在统计独立意义下对混合信号进行分离,以达到消除噪声的目的,这显然比基于不相关性度量的传统自适应滤波方法效果要好。ICA 在生物医学信号处理、混合语音信号分离、图象消噪等方面已取得了较好的应用效果。

图 1 是 ICA 线性组合模型,  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$  是两非高斯分布的独立源,  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  是两观察信号,  $a_{ij}$  是未知的模型系数,模型可描述为:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

或用矩阵形式描述为:

$$X = A \cdot S \quad (2)$$

在独立源  $s$  和混合矩阵  $A$  都是未知的情况下,希望能寻找一分离矩阵  $W = A^{-1}$ ,从观测信号中进行源信号的分离,即:

$$S = A^{-1} \cdot X = W \cdot X = S \quad (3)$$

式中:  $X$ ,  $S$  分别为观测信号和源信号向量;  $A$  为混合矩阵。

ICA 方法能够较好地解决这一问题,其中的关键问题是建立一个能够度量分离结果独立性的目标函数及其相应的分离算法。人们从不同的角度提出多种目标函数及算法。在本文中讨论的是一种基于

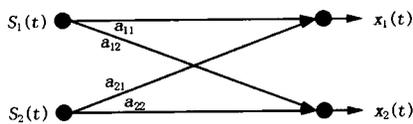


图 1 ICA 线性组合模型

Fig 1 Linear combined model of ICA

负熵 (negentropy) 的判据和一种非常高效的 ICA 算法:快速 ICA (FastICA) 算法<sup>[3]</sup>。

## 2 双向工频通信系统及其信号特征

图 2 是基于配电网的双向工频通信系统的结构示意图。TWACS 是以中低压 (10 kV / 220 V) 配电线路为通信信号的载体,在电压过零点附近把信号叠加在基波电压或电流上。具体的工作过程是在 10 kV 母线电压接近过零点时,由调制变压器 220 V 侧的硅整流器件调制出一个瞬时电流脉冲,从而产生了一个微弱的电压畸变信号叠加在 10 kV 电压上,该畸变电压信号可自动跨过用户配电变压器,为用户端接收,该电压信号被称为出站信号。类似的,配电变压器 220 V 侧用户端的硅整流器件在电压过零点附近调制出电流信号,该电流信号可以在 10 kV 支线电流 CT 中检测到,该电流信号被称为入站信号。实现通信的电压或电流脉冲信号的频带在 200 ~ 500 Hz 之间。

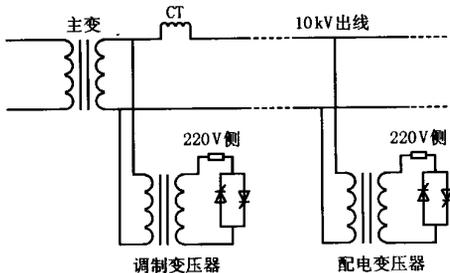


图 2 配电网双向工频通信结构示意图

Fig 2 Structure of TWACS in power distribution network

TWACS 的通信信号如图 3 所示。由图可知,通过调制电压传递的信号由两个相邻周期电压波形组成,根据调制位置的不同来表示“1”或“0”,用于子站到用户之间的信息传输,称为输出通道调制信号;电流调制的信号由 4 个相邻周期电流波形携带,电流调制位置与电压调制位置相同,在时间轴上对应于电网电压基波过零点,用于从用户到子站之间的信息传输,称为输入通道调制信号。

由于在过零点处调制信号所需的能量要求小,以及电压的过零点的特殊性为信号的定位提供了便

于调制和检测的条件,因而 TWACS 通信系统可以利用电压波形基波过零点作为调制位置。

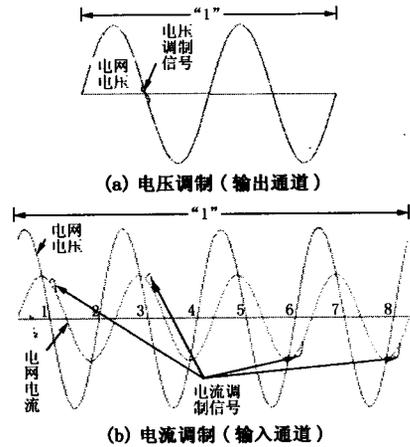


图 3 双向工频通信系统通信信号

Fig 3 Communication signals of TWACS

TWACS 输入信号的编码方式不止图 3 (b) 所示这一种。规定的 8 个调制位置只调制其中 4 个,而且两正两负,这样得到的编码方式共有 36 组 18 对。在这些编码中,可以排出 5 个正交编码集,每个正交编码集含有 6 个编码且互相正交。根据这样的编码特性,可以实现 4 个相邻电流周期同时携带 6 个通道,以提高通信传输信息的吞吐量。

一个典型的入站信号如图 4 所示。假设在用户 220 V 侧调制出一峰值为 25 A 的电流脉冲信号,则叠加到 10 kV 出线上的信号峰值为 0.55 A,而出线负载电流一般为 100 ~ 200 A,甚至更大,这就给信号的检测带来了极大的困难。

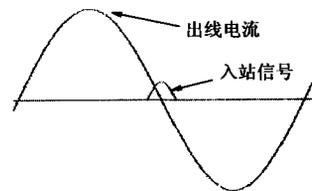


图 4 入站信号检测

Fig 4 Detection of entrance signal

设检测输入信号  $x(n)$  表示为:

$$x(n) = s(n) + \sum_{k=1}^M A_k \sin(n\omega_k + \phi_k) = s(n) + d(n)$$

式中:  $s(n)$  为通信电流脉冲信号;  $d(n)$  为电网基波及谐波成分; 频率为  $\omega_k$ ;  $K$  为谐波次数 ( $K = 1, \dots, M$ )。

通信信号的频带分布在 200 ~ 500 Hz 之间,为保证采样时获得通信信号的足够信息,采集频率应在 4 kHz 左右。因背景噪声中最大的几个成分如基

波(50 Hz)和其3、5次谐波都处于相对采集频率的低频段中,能否准确地滤除这些低频成分的干扰,将直接影响通信的质量。由于通信电流脉冲信号和电网谐波是统计独立的,故可以应用ICA将工频及其谐波成分 $d(n)$ 滤掉,使通信信号 $s(n)$ 不失真地分离开来。

### 3 FastICA 及其在消除工频通信中谐波干扰的应用

固定点算法(又称FastICA)是一种快速的寻优迭代算法。固定点算法以负熵最大作为一个搜寻方向,可以实现顺序地提取独立源。互信息与负熵之间存在关系: $I(y_1, \dots, y_N) = J(y) - \sum_{i=1}^N J(y_i)$ (假设 $y_i$ 彼此不相关),其中 $y = Wx_0$ 对ICA问题而言, $J(y)$ 是常数。为使互信息 $I(y_1, \dots, y_N)$ 最小,只需要找到一个合适的 $w$ 去最大化各自的边缘负熵,即满足 $\sum_{i=1}^N J(y_i)$ 最大,此时的 $w$ 就是分离矩阵。这也是负熵的主要思想。

在仿真实验中,先模拟四路原始信号,使方差为1,均值为0。接着产生随机的混合矩阵,得到混合信号。然后产生协方差阵,求出协方差的特征向量和特征值,对信号进行白化,对白化后的信号采用FastICA迭代计算(最大迭代次数为5000)。最后恢复信号为0均值,单位方差。

以入站信号的检测为例,假设通信电流脉冲信号频率为250 Hz,配电变压器对于通信电流脉冲信号的频率响应为线性;通信信号的波形不失真地通过变压器,幅值严格按照变压器的变比传递。若为用户侧调制出的电流脉冲信号峰值为25 A,则叠加到10 kV出线上的信号峰值为0.55 A。

模拟的4路原始信号(signal1 ~ signal4)为(采样频率为4000 Hz):

1) 通信信号 signal4:幅值为 $0.55 \times \sqrt{2}$ ,频率为250 Hz。

2) 电网(电流)基波及谐波成分基波:

$$\text{signal1} = 150\sqrt{2} \sin(100t - \pi/6)$$

三次谐波:

$$\text{signal2} = 18 \sin(300t + \pi/3)$$

五次谐波:

$$\text{signal3} = 3 \sin(500t + \pi/4)$$

采用FastICA算法,在Matlab仿真中可得到式(3)中的分离矩阵 $w$ ,

$$W = \begin{bmatrix} -0.6991 & -0.2154 & -0.6723 & -0.1137 \\ -0.4949 & -0.3707 & 0.6952 & -0.3666 \\ 0.1049 & -0.7488 & 0.0204 & 0.6542 \\ -0.5053 & 0.5055 & 0.2535 & 0.6518 \end{bmatrix}$$

从而实现分离出通信信号的目的。

分离效果如图5~9所示。

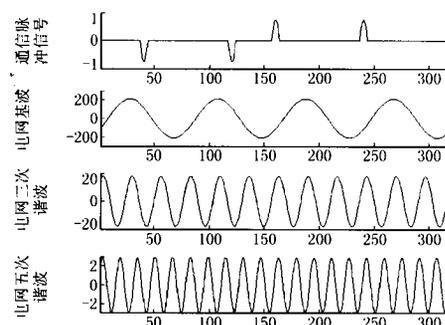


图5 原始信号

Fig 5 Primary signals

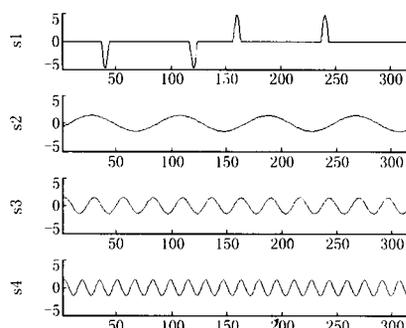


图6 原始信号(零均值,单位方差)

Fig 6 Primary signals(zero mean value, unit variance)

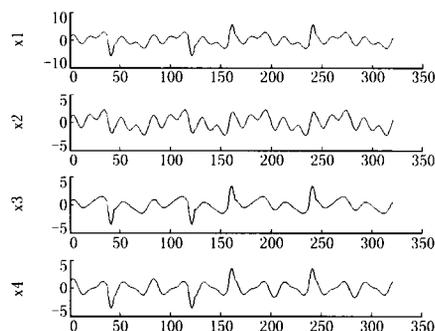


图7 混和信号

Fig 7 Combined signals

比较图6和图9,可以看出工频通信信号 $s(n)$ 可从原混和信号中分离开来,可以实现通信信号的检测。

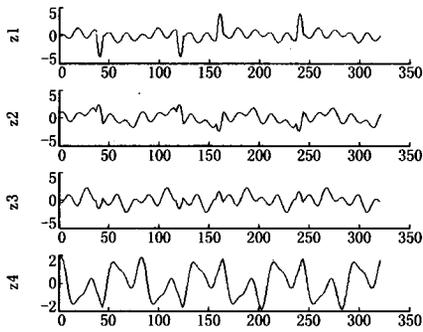


图 8 白化后的信号

Fig 8 Whitelized signal

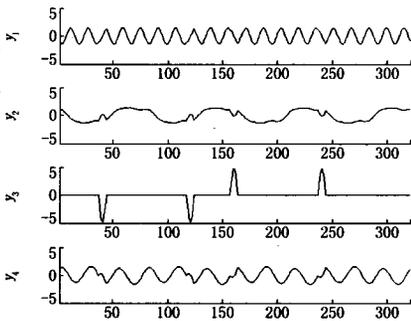


图 9 恢复信号(零均值,单位方差)

Fig 9 Restored signals(zero mean value, unit variance)

#### 4 结论

本文将ICA用于双向工频通信中的谐波干扰消除,提出了一种有效的谐波消除方法。该方法的

特点是消除谐波干扰的同时几乎不对信号中的有用成分造成破坏。这是因为ICA方法能有效地估计出目标信号中的谐波成分,然后直接从目标信号中“减去”谐波干扰信号,故能取得理想的消噪效果。

#### 参考文献:

- [1] 周世炜,张绍卿. 配电网双向工频通信的原理与实现[J]. 电网技术, 1999, 23(10): 37-38  
ZHOU Shi-wei, ZHANG Shao-qing Realization of Two Way Fundamental Frequency Communication for Power Distribution Network [J]. Power System Technology, 1999, 23(10): 37-38
- [2] 杨福生. 独立分量分析及其在生物医学工程中的应用[A]. 99 中国生物医学电子学学术年会论文集. 1999. 34-37.  
YANG Fu-sheng Independent Component Analysis and Its BME Application [A]. 99 China Biomedicine Electronics Academic Annual Meeting Papers 1999. 34-37.
- [3] Hyvrinen A. The Fixed-point Algorithm and Maximum Likelihood Estimation for Independent Component Analysis[J]. Neural Processing Letters, 1999, 10(1): 1-5.

收稿日期: 2004-09-08; 修回日期: 2004-09-25

#### 作者简介:

甘武(1978-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统通信; E-mail: sammer1978@sina.com

孙云莲(1962-),女,教授,博士生导师,从事数字信号处理及电机控制研究。

### Harmonic elimination of two-way frequency automatic communication system based on independent component analysis

GAN Wu, SUN Yun-lian

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Two-way Frequency Automatic Communication System (TWACS) is a communication system based on power distribution networks. A lot of harmonic elements exist in background signal when TWACS transmits communication signals, which will bring great difficulty to check and measure communication signal. A new method using Independent Component Analysis (ICA) to eliminate harmonic interference is proposed according to signal characteristics in TWACS. The method can eliminate harmonic interference nearly without destroying useful signals. The method is testified effectively through Matlab.

**Key words:** harmonic; blind source separation (BSS); two-way frequency automatic communication system (TWACS); independent component analysis (ICA)

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告