

双向工频通信信号在配电网中传输特性的仿真分析

陈晓辉, 杨凌霄

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 双向工频通信技术 (TWACS) 是一种基于电力配电网的新型数字通信技术。该文介绍了双向工频通信的基本原理, 建立了工频通信的仿真模型, 说明了调制信号产生的机理、推导了信号在线路中传播以及通过变压器时的传输特性, 并应用小波变换对通信信号进行时频分析以服务于信号提取。

关键词: 双向工频通信; 传输特性; 配电网; 仿真

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)11-0040-04

0 引言

双向工频通信技术 TWACS (Two Way Automatic Communication System) 是一种在国外新兴的电力配电网双向数字通信技术。它利用在电压过零处加入一微弱的畸变来实现信号的调制, 具有通信距离远, 抗干扰性能强, 设备简单投资小的特点, 与传统的电力载波相比最大的优势在于能够直接进行跨变压器台区的通信, 无需中继装置。由 DCSI 公司开发的基于工频通信技术的系列产品, 是美国能源部 2004 年推荐的低压配电网通信设备之一^[1]。利用这一技术实现远程抄表、状态监测、负荷控制等功能, 必将极大地提高我国的配电自动化水平。

本文建立了双向工频通信信号产生和在配电网中传输的数学模型, 并在此基础上进行了理论分析和仿真实验, 利用小波变换对信号进行时频分析以服务于信息提取。

1 双向工频通信的基本原理

图 1 为双向工频通信的结构示意图。当变电站母线电压接近零点处, 调制变压器二次侧晶闸管触发导通, 使电网电压产生一个微弱的畸变, 这一信号可以跨越变压器台区被用户端接收, 称之为出站信号 (outbound signal); 与此相类似在配电变压器的 0.4 kV 侧也可以调制出一个微弱的畸变电流, 被变电站的信号检测装置所接收, 称之为进站信号 (inbound signal)。出站信号与进站信号的调制方法是一样的, 只是接收装置分别检测电压和电流信号。

一种常用的编码方法是以调制信号的相对的位置来表示信息“0”和信息“1”, 以出站信号为例, 每两个周波定义为一个信息单元, 每个信息单元的起

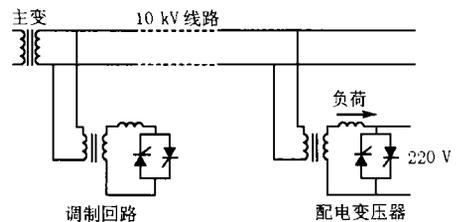


图 1 双向工频通信的结构示意图

Fig 1 Schematic diagram of TWACS

始点作为基准点, 调制信号在基准点后的第一个负过零处表示信息“0”, 在基准点后的第二个负过零处表示信息“1”^[2]。

2 工频通信信号在线路中的传输特性分析

2.1 调制信号的产生

信号等效调制电路如图 2 所示。

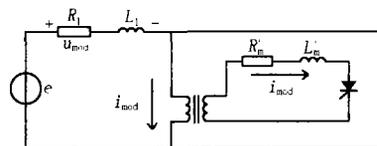


图 2 工频通信信号等效调制电路

Fig 2 Equivalent modulation circuit for TWACS signal

晶闸管在 $\alpha = 155^\circ$ 时触发导通, 调制回路产生电流 i_{mod} , 并在调制变压器一次侧感应出电流 i_{mod} , i_{mod} 在变压器的漏感 L_1 和电阻 R_1 上产生压降 u_{mod} 。对于变电站 u_{mod} 是出站信号, 对于终端 i_{mod} 是进站信号。降低调制变压器变比或减小 R_m 、 L_m 可以增大信号幅值, 调整 R_m 、 L_m 的比值可以改变信号的波形。

2.2 调制信号在单相线路中的传播

调制信号的频率在 200 Hz 到 600 Hz 之间, 等效波长远远大于馈线长度, 波的反射、折射可以忽

略,不存在载波通信所遇到的驻波和盲区问题,可以采用集总参数模型来研究信号在线路中的传输特性如图 3所示^[3]。

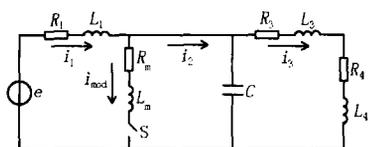


图 3 工频通信信号传输模型

Fig 3 Transmission model of TWACS signal

图中 R_m 、 L_m 是 R_m 、 L_m 折算到调制变压器一次侧的等效值, C 为补偿电容, R_3 、 L_3 为线路阻抗, R_4 、 L_4 为负荷阻抗 (包括配变的等效阻抗), 用开关 S 等效晶闸管。设 $t=0$ 时刻 ($\omega t=155^\circ$), 晶闸管触发导通, S 闭合; $t=t_1$ 时刻 i_{mod} 过零, 晶闸管截止, S 断开。根据 S 的闭合与断开将调制过程分为三个阶段:

(1) $t < 0$ 时, 利用正弦电路的稳态分析法求解, 求出 $u_c(0^-)$, $i_1(0^-)$, $i_3(0^-)$ 作为下一阶段的初始值;

(2) $0 < t < t_1$ 时, 电路的微分方程为

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_1} e - \frac{R_1}{L_1} i_1 - \frac{1}{L_1} u_c$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{1}{L_1} e - \frac{R_1 L_m - R_m L_1}{L_1 L_m} i_1 - \frac{R_m}{L_m} i_2 - \frac{L_1 + L_m}{L_1 L_m} u_c$$

$$\frac{di_3}{dt} = -\frac{R_3}{L_3} i_3 - \frac{1}{L_3} u_c$$

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} i_2 - \frac{1}{C} i_3$$

求出 $u_c(t_1^-)$, $i_1(t_1^-)$, $i_3(t_1^-)$ 作为下一阶段的初始值;

(3) $t > t_1$ 时, 电路的微分方程为

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_1} e - \frac{R_1}{L_1} i_1 - \frac{1}{L_1} u_c$$

$$i_2 = i_1$$

$$\frac{di_3}{dt} = -\frac{R_3}{L_3} i_3 - \frac{1}{L_3} u_c$$

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} i_2 - \frac{1}{C} i_3$$

式中: $L_5 = L_3 + L_4$, $R_5 = R_3 + R_4$ ^[4]。通过求解这组微分方程, 可以得出以下结论:

(1) 0 到 t_1 时刻是信号调制过程, 这一时段的电路暂态响应可以等效于左边在正弦激励下, 由 R_1 、 L_1 、 R_m 、 L_m 组成的一阶 RL 电路的零状态响应与右边二阶 RLC 电路的零输入响应的叠加。当 C 较大时, 可以认为一阶 RL 电路的零状态响应占主要部分, 对应的 $u_{mod}(0 < t < t_1)$ 即为调制信号, 其频率

取决于晶闸管由导通到截止的时间。

(2) t_1 以后是系统恢复过程, 这一时段的电路暂态响应可以等效于二阶 RLC 电路的零输入响应,

振荡频率 $= \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$, 衰减时间常数 $= 2L/R$, 式中 $R = R_1 + (R_3 + R_4)$, $L = L_1 + (L_3 + L_4)$ 。对于实际系统, R_1 、 L_1 等效系统阻抗, $R_3 + R_4$ 、 $L_3 + L_4$ 等效负荷阻抗, 由于 $R_1 \ll R_3 + R_4$, $L_1 \ll L_3 + L_4$, 所以 $u_{mod}(t > t_1)$ 的振荡频率和衰减速度取决于系统阻抗, 图 4(a)和 4(b)分别给出 $L_1/R_1 = 8.8$ 和 $L_1/R_1 = 4.4$ 时 u_{mod} 的暂态波形, 为方便辨认将幅值作了放大, 并画出系统电压作参考。

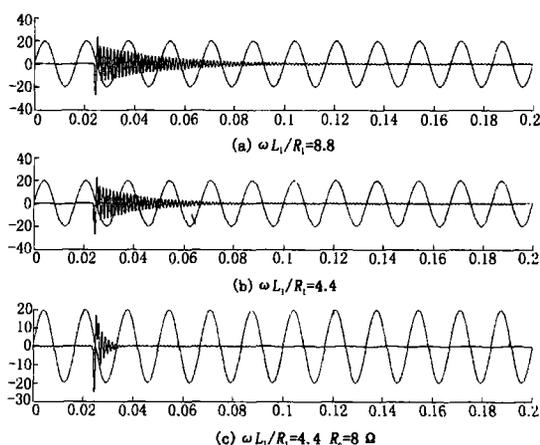


图 4 调制信号的波形

Fig 4 Waveform of modulation signal

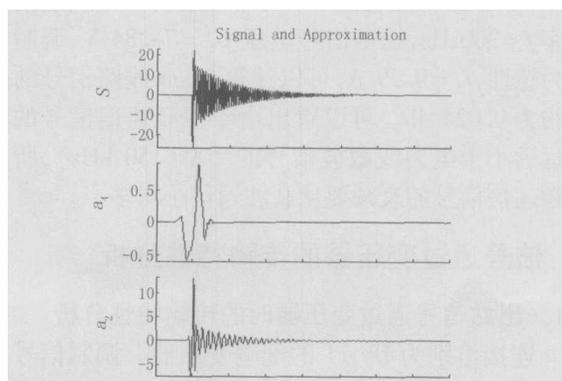


图 5 调制信号的小波分解

Fig 5 Wavelet decomposition of TWACS signal

(3) 工频通信以调制信号相对于电网电压 (电流) 的位置来表示信息“0”和信息“1”。如果 u_{mod} 在晶闸管截止后的振荡时间超过一个周期就有可能与下一个调制信号混叠, 引起接收端误判, 可以从两方面来避免这种错误: 第一、加大发送端振荡阻尼, 可以在补偿电容回路中串接电阻, 当阻尼电阻 $R_c = 8$

时, u_{mod} 的波形如图 4(c) 所示; 第二、如上所述 u_{mod} 在 0 到 t_1 和 t_1 以后的振荡频率不同, 对 u_{mod} 用 db3 小波作 5 层小波分解, 结果如图 5 所示。可以看出在尺度 a_4 上信号呈现快速衰减特性, 据此在接收端选择适当的滤波器截止频率, 使接收到的调制信号能够快速衰减。

2.3 调制信号在线路中的衰减

以出站信号为例, 可以定义信号的衰减

$$= 20 \lg \frac{u_{m1}}{u_{m2}}$$

式中: u_{m1} 为调制变压器高压侧信号的有效值, u_{m2} 为配电变压器高压侧信号的有效值。调制信号的频率在 200 Hz 到 600 Hz 之间, 线路对于信号的电抗、电纳要大于工频时的情况, 所以模型使用了线路的型等效电路, 将电路方程以 T 参数表示, 写成矩阵的形式

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{ZY}{2} + 1 & Z \\ Y \left(\frac{ZY}{4} + 1 \right) & \frac{ZY}{2} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

求 T 参数的逆矩阵

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{ZY}{2} + 1 & -Y \left(\frac{ZY}{4} + 1 \right) \\ -Z & \frac{ZY}{2} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix}$$

仿真参数为: 线路电阻 $r=0.2568 \text{ } \Omega/\text{km}$, 电感 $l=2 \times 10^{-3} \text{ H/km}$, 电容 $c=1.15 \times 10^{-8} \text{ F/km}$, 调制信号频率 $f=300 \text{ Hz}$, 始端信号电压 $U_1=74.84 \text{ V}$, 调制电流为感性, $I_1=0.39 \text{ A}$, 可以计算 5 km 线路信号的衰减约为 0.024 db。可以看出由于工频通信信号的频率远远小于电力线载波信号的频率 (150 kHz), 所以工频通信信号的衰减要比载波通信小得多^[5]。

3 信号通过变压器的传输特性分析

3.1 出站信号通过变压器时的传输特性分析

连接组别为 $D_{y_n}11$ 的配电变压器。调制信号加在 AB 线电压上, 可以设 A 相调制信号为 $\frac{1}{2} u_{\text{mod}}$, B 相调制信号为 $-\frac{1}{2} u_{\text{mod}}$, 在配电变压器高压侧有

$$u_{AB} = -\frac{1}{2} u_{\text{mod}} + u_{ab} - \frac{1}{2} u_{\text{mod}} = u_{ab} - u_{\text{mod}}$$

$$u_{BC} = u_{bc} + \frac{1}{2} u_{\text{mod}}$$

$$u_{CA} = u_{ca} + \frac{1}{2} u_{\text{mod}}$$

在配变低压侧有

$$u_{an} = \frac{1}{k\sqrt{3}} u_{AB} = \frac{1}{k\sqrt{3}} (u_{ab} - u_{\text{mod}})$$

$$u_{bn} = \frac{1}{k\sqrt{3}} u_{BC} = \frac{1}{k\sqrt{3}} (u_{bc} + \frac{1}{2} u_{\text{mod}})$$

$$u_{cn} = \frac{1}{k\sqrt{3}} u_{CA} = \frac{1}{k\sqrt{3}} (u_{ca} + \frac{1}{2} u_{\text{mod}})$$

在高压侧 AB 线电压上加入调制信号后, 低压侧 a、b、c 三相电压中均含有调制信号, 其中 a 相幅值最大。低压侧 a 相电压 u_{an} 与高压侧 AB 线电压 u_{AB} 同相位, 所以调制信号中心在 u_{an} 过零点附近, 而对于 u_{bn} 和 u_{cn} 调制信号中心位置并不在电压过零点附近。同理连接组别为 $Y_{y_n}0$ 的配电变压器, 低压侧 u_{ab} 线电压幅值最大, 调制信号中心在 u_{ab} 过零的时刻, 在相电压中, 信号幅值减半, a 相调制信号中心在 u_{an} 负过零点前 30° ; b 相中调制信号以反相的形式出现, 中心在正过零点后 30° 。

3.2 入站信号通过变压器时的传输特性分析

连接组别为 $Y_{y_n}0$ 的配电变压器, 设用户端在低压侧 a 相调制出畸变电流 i_{mod} , 即 $i_a = i_{\text{mod}}$, 在高压侧 $i_A = \frac{1}{N} i_{\text{mod}}$, 由于中性点不接地, $i_A + i_B + i_C = 0$, 则有 $i_B + i_C = -\frac{1}{N} i_{\text{mod}}$, 设变压器 B、C 两相磁路对称, i_{mod} 引起的磁通变化被 B、C 两相平分, 则

$$i_B = i_C = -\frac{1}{2N} i_{\text{mod}}$$

连接组别为 $D_{y_n}11$ 的配电变压器, 低压侧 a 相调制电流 i_{mod} , 高压侧 $i_{AB} = \frac{1}{\sqrt{3}N} i_{\text{mod}}$, $i_C = 0$,

$$i_{CA} = 0, \text{ 所以 } i_A = \frac{1}{\sqrt{3}N} i_{\text{mod}}, i_B = -\frac{1}{\sqrt{3}N} i_{\text{mod}}, i_C = 0$$

即在高压侧 A、B 两相中可以检测到信号电流。同理可分析对于连接组别为 $D_{y_n}1$ 的配电变压器, 在高压侧 A、C 两相中可以检测到信号电流。

4 仿真分析

双向工频通信的仿真模型如图 6 所示。主变容量 3150 kVA, 两条 10 kV 馈线, 每条馈线含两条分支线, 配变容量 $4 \times 160 \text{ kVA}$, 低压有功负荷 $8 \times 50 \text{ kW}$, 无功负荷 $8 \times 50 \text{ kVar}$, 10 kV 母线上无功补偿容量 346 kVar。

切无功补偿时, 电网的运行数据如下:

变电站输出有功功率: 412.56 kW

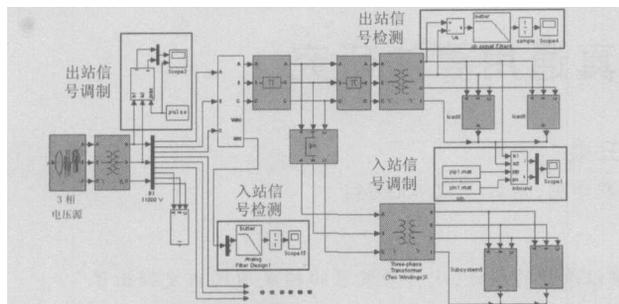


图 6 工频通信的仿真模型

Fig 6 Simulation model of TWACS

用户侧得到有功功率: 399.90 kW

线路损耗功率: 12.66 kW

功率因数: 0.6937

在变电站和用户端分别调制一个出站信号和进站信号,检测滤波器的截止频率设为 1000 Hz,采样率 4000 Hz,所检测到的出站信号幅值 1.2 V,进站信号峰值 0.6 A,波形如图 7 所示,图中将调制信号作了放大,并画出回路电压电流作参考。

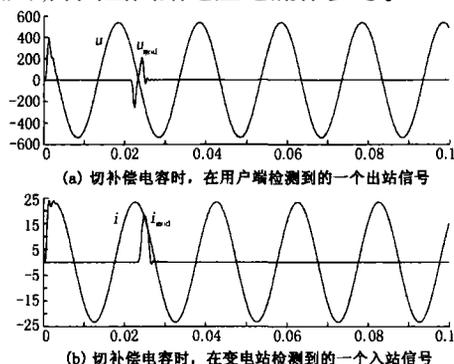


图 7 切补偿电容时的信号波形

Fig 7 Signal waveform when compensating capacitors is off

投无功补偿后功率因数为 0.9773,所检测到的出站信号幅值 2 V,进站信号峰值 0.6 A,波形如图 8 所示。这时 u_{mod} 的振荡时间大于一个周期。

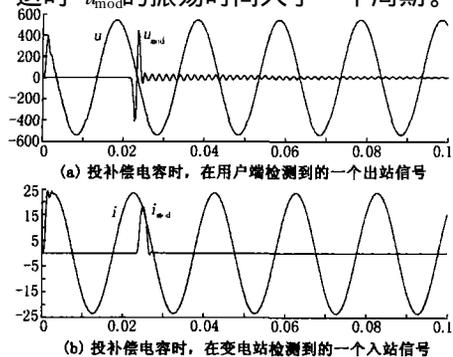


图 8 投补偿电容时的信号波形

Fig 8 Signal waveform when compensating capacitors is on

无功补偿串联 2 电阻,并将出站信号检测滤波器的截止频率减小为 400 Hz,采样率 4000 Hz,所检测到的出站信号幅值 1 V,进站信号峰值 0.6 A,波形如图 9 所示。

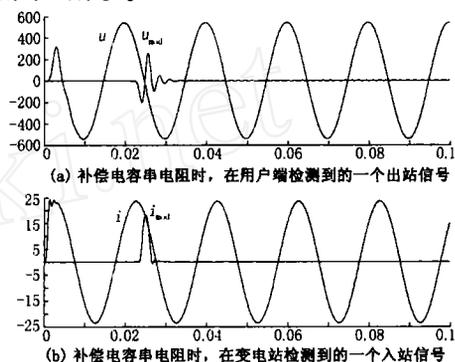


图 9 补偿电容串联电阻时的信号波形

Fig 9 Signal waveform when compensating capacitors in series with resistance

5 结论

本文建立了双向工频通信在配电网中的传输模型,对信号的产生、在线路中的传播以及通过变压器时的传输特性做了理论分析和仿真实验。双向工频通信虽然是一种低频通信,但其调制原理与信号特点决定了这种通信方式具有设备简单、可靠性高、不受线路结构和负荷影响的特点,在某些场合下还会取得比高频载波更好的通信效果。应用这一技术对于提高我国的配电自动化水平有很高的实用价值。

参考文献:

- [1] United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution Technology Briefs: Overview of Advanced Electric Delivery Technologies [A]. 2004: 18-19.
- [2] 张世平,张绍卿,刘瑞叶. 双向工频通信信号在配电网中的传输特性 [J]. 电网技术, 2003, 27(5): 63-66
ZHANG Shi-ping, ZHANG Shao-qing, LU Rui-ye Two-way Power Frequency Automatic Communication System (TWACS) Signal Transmission Characteristic Analysis on Power Distribution Network [J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 63-66
- [3] Mak S T. Power Frequency Communication on Long Feeder and High Levels of Harmonic Distortion [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(4): 1731-1736

(下转第 77 页 continued on page 77)

分析及其应用[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 84-87.

ZHAO Hai-xiang, CHEN Mo-zi, DA I Hui-zhu Error Analysis of Discrete Calculation Method of Flicker Severity and Its Application[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 84-87.

- [8] 同向前, 余健明, 苏文成. 电压闪变信号发生原理[J]. 电网技术, 1996, 20(10): 44-49.

TONG Xiang-qian, YU Jian-ming, SU Wen-cheng The Principle of Generation Voltage Flicker Signal[J]. Power System Technology, 1996, 20(10): 44-49.

收稿日期: 2005-08-15; 修回日期: 2005-09-04

作者简介:

邢耀广(1980-),男,硕士研究生,从事电能质量分析与控制、虚拟仪器等方面的研究; E-mail: xingyaog@163.com

黄纯(1966-),男,博士,教授,从事电力系统自动化、电能质量分析与控制、数字信号处理等研究;

刘稳坚(1979-),男,硕士研究生,从事电能质量分析与控制、虚拟仪器等方面的研究。

Design of digital flicker based on virtual instrument

XING Yao-guang, HUANG Chun, LU Wen-jian, WU Yan-hua

(School of Electronic and Electrical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Voltage fluctuation and flicker are two important indices for power quality assessment. With study of the key technology to design digital flicker meter based on virtual instrument, a digital calculation method based on FFT and its concrete realization way are presented. The effects of different sampling parameters, harmonics, and system frequency shifting are investigated and ways to improve measurement accuracy are given. The method discussed has been put into practice.

This project is supported by Hunan Province R & D Program (No. 20030301).

Key words: flicker; virtual instrument; voltage fluctuation; error analysis

(上接第 43 页 continued from page 43)

2000, 24(8): 37-40

- [4] Mak S T. Propagation of Transients in a Distribution Network [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(1): 337-343.

- [5] 焦邵华, 刘万顺, 等. 配电网载波通信的衰耗分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(8): 37-40.

JIAO Shao-hua, LIU Wan-shun, et al. Attenuation Analysis of Distribution Line Carrier Channels in a Distribution Network [J]. Automation of Electric Power Systems,

收稿日期: 2005-11-07; 修回日期: 2005-11-26

作者简介:

陈晓辉(1981-),男,硕士研究生,研究方向为双向工频通信技术在农网中的应用; E-mail: cxhk@126.com

杨凌霄(1965-),女,副教授,研究方向为微机原理与应用。

Two-way power frequency automatic communication system (TWACS) signal transmission characteristic analysis by simulation

CHEN Xiao-hui, YANG Ling-xiao

(College of Electrical Engineering & Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozhuo 454003, China)

Abstract: TWACS is a new communication technology for distribution networks. This paper introduces the basic principle of TWACS and creates a simple simulation model. The generation of signal and the transmission characteristics when propagate in line and through transformers are presented. Time-scale analysis is performed by wavelet transform, and the results are helpful in signal extraction.

Key words: TWACS; transmission characteristic; distribution network; simulation