

文章编号:1671-251X(2015)11-0060-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.11.015

黄知超,廖志剑,黄祥莉.一种煤矿供电系统正负序分解方法研究[J].工矿自动化,2015,41(11):60-64.

一种煤矿供电系统正负序分解方法研究

黄知超, 廖志剑, 黄祥莉

(桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:针对煤矿井下电网不平衡时产生的负序分量影响电力机车稳定运行的问题,同时为了满足机车的三相PWM整流控制需求,在分析旋转坐标系下不对称信号特征和改进型自适应陷波滤波器原理的基础上,提出了一种不对称信号正负序分解的方法。该方法将不对称信号进行旋转坐标系运算,再采用改进型自适应陷波滤波器滤除其中的2倍工频信号,以实现正负序分离。Matlab/Simulink仿真结果表明,采用该方法可以准确快速地分解出不对称信号中的正负序直流量,且可以滤除一定的谐波。

关键词:煤矿供电系统;正负序分解;自适应陷波滤波器;不对称;直流量

中图分类号:TD611 文献标志码:A 网络出版时间:2015-11-02 14:57

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20151102.1457.015.html>

Research of a separation method of positive and negative sequence component in coal mine power supply system

HUANG Zhichao, LIAO Zhijian, HUANG Xiangli

(Electromechanical Engineering College, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract:In view of problem that negative sequence components in unbalanced coal mine power system affect stable running of electric locomotive, and in order to satisfy control strategy of three-phase PWM rectifier, the characteristics of asymmetric signal under rotating coordinate system and the principle of enhanced notch filter were studied, and a separation method of positive and negative sequence component was presented. The rotating-coordinate system was used to transform the asymmetric signal and the enhanced adaptive notch filter was used to filter the two-times frequency signal in the method. The Matlab/Simulink simulation results show that the method can extract DC value of positive and negative sequence components in asymmetric signal precisely and quickly and can filter some harmonic waves.

Key words:coal mine power supply system; positive and negative sequence separation; adaptive notch filter; unbalance; DC value

0 引言

直流架线式电机车是煤矿井下巷道长距离运输的主要运输设备之一。目前,PWM整流正逐步运用到直流架线式电机车的变流系统中。然而,由于非线性负载的大量接入、电网的不对称故障、线路破损及绝缘老化等原因,常常会导致电网电压的不平

衡,严重时威胁到变流系统的安全运行^[1-2]。为改善煤矿供电系统三相电压不平衡情况下PWM整流器的控制问题,需要对电网电压和并网电流进行正负序分量检测,实现对正负序分量的独立控制。同时,为了满足三相变流器不对称抑制的控制策略需要,对三相不对称信号检测也提出了更高的要求,而其中最主要的一项也是正负序分量检测。

收稿日期:2015-06-11;修回日期:2015-09-10;责任编辑:胡娴。

基金项目:广西制造系统与先进制造技术重点实验室项目(13-051-09-001Z)。

作者简介:黄知超(1963—),男,广东肇庆人,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为电能质量、智能电器等,E-mail:zaki2015@163.com。

为了解决不对称现象中正负序分离存在的问题,很多文献提出了各种不同的解决方案。参考文献[3]提出一种多 dq 变换法,该方法需在 2 个或更多的同步旋转坐标系下对被测量解耦,运算量大。参考文献[4]提出一种基于改进卡尔曼滤波器的方法,该方法实现了基波正负序分离,但卡尔曼滤波器存在的协方差矩阵选择和测量误差问题对其应用产生较大影响。参考文献[5]在分析对称分量法(Method of Symmetrical Components, MSC)及单同步坐标系锁相环基本原理的基础上,提出了在 (α, β) 坐标系下使用 2 个广义积分器作为 α 分量和 β 分量的正交信号发生器,通过对广义积分器内部 k 值的选取,使其具有一定的滤波性能,然后通过正负序计算单元,实现不对称信号的正负序分离,但该方法增加了系统的运算量和系统结构的复杂性。

基于不对称信号正负序分离方法的研究现状,本文采用了一种结构简单且能在不对称情况下实现基波电压正负序分离的方法。该方法将不对称工况下电网信号分别转换到同步旋转坐标系 (d, q) 和反向旋转坐标系 (r, s) 中,再通过改进型自适应陷波滤波器(Adaptive Notch Filter, ANF)^[6] 滤除其中的 2 倍工频信号,提取出其中的直流信号,实现正负序的分离。采用该方法无需进行对称分量分解与计算,与同类方法相比具有结构更简单、反应速度更快、提取结果更准确的优点。

1 不对称电压旋转坐标系变换

1.1 对称分量法

任何一组三相不对称量都可以分解成 3 组对称的量,这 3 组对称的量就称为对称分量^[7]。任意三相不平衡电压(因电流信号类似,本文均以电压信号为例) U_a, U_b, U_c 可以分解成对称的正序三相电压 U_P 、负序三相电压 U_N 和零序三相电压 U_Z ^[8]。其关系可表示为

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{P_a} \\ U_{P_b} \\ U_{P_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{N_a} \\ U_{N_b} \\ U_{N_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{Z_a} \\ U_{Z_b} \\ U_{Z_c} \end{bmatrix} =$$

$$U_{ZM} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_Z) \\ \cos(\omega t + \varphi_Z) \\ \cos(\omega t + \varphi_Z) \end{bmatrix} + U_{PM} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_P) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_P) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_P) \end{bmatrix} +$$

$$U_{NM} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_N) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_N) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_N) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: U_{PM}, U_{NM}, U_{ZM} 分别为正序、负序、零序的基波幅值; $\varphi_P, \varphi_N, \varphi_Z$ 分别为正序、负序、零序的初始相位角。

1.2 旋转坐标系下信号特征

三相不对称电压的正负序分量在同步旋转坐标系 (d, q) 和反向旋转坐标系 (r, s) 中有相反的结果。正序分量如式(2)所示,在同步旋转坐标 (d, q) 下,它的 2 个分量值为直流值^[9]。

$$\begin{bmatrix} U_{P_d} \\ U_{P_q} \end{bmatrix} = T_{ABC \rightarrow dq0} \times U_P =$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} U_{P_a} \\ U_{P_b} \\ U_{P_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{PM} \cos \varphi_N \\ U_{PM} \sin \varphi_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $T_{ABC \rightarrow dq0}$ 代表同步旋转坐标系下的 Park 变换。

负序分量在同步旋转坐标系 (d, q) 下的 2 个分量值为 2 倍基波角速度的正弦量,如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} U_{N_d} \\ U_{N_q} \end{bmatrix} = T_{ABC \rightarrow dq0} \times U_N = \begin{bmatrix} U_{NM} \cos(2\omega t + \varphi_N) \\ -U_{NM} \sin(2\omega t + \varphi_N) \end{bmatrix} \quad (3)$$

在反向旋转坐标系 (r, s) 下,正序分量为 2 倍基波角速度的正弦量,如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} U_{P_r} \\ U_{P_s} \end{bmatrix} = T_{ABC \rightarrow drs} \times U_P =$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} U_{P_a} \\ U_{P_b} \\ U_{P_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{PM} \cos(2\omega t + \varphi_P) \\ -U_{PM} \sin(2\omega t + \varphi_P) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $T_{ABC \rightarrow drs}$ 代表反向旋转坐标系下的 Park 变换。

负序分量在反向旋转坐标系 (r, s) 下的 2 个分量值为直流值,如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} U_{N_r} \\ U_{N_s} \end{bmatrix} = T_{ABC \rightarrow drs} \times U_N = \begin{bmatrix} U_{NM} \cos \varphi_N \\ U_{NM} \sin \varphi_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

当输入电压不对称时,经过同步旋转坐标系后所得的信号为正序电压的直流量之外再叠加一个 2 倍于基波角速度的正弦量;而在反向旋转坐标系中,所得信号的特征也一样。

2 改进型陷波滤波器直流信号提取

2.1 改进型自适应陷波滤波器原理

改进型自适应陷波滤波器的数学模型^[6]为

$$\begin{cases} \ddot{X} + \bar{\omega}^2 X = 2\varepsilon \bar{\omega} \dot{M} \\ \dot{M} = U(t) - \dot{X} - \beta M \\ \dot{\bar{\omega}} = -\gamma X \bar{\omega} \dot{M} \end{cases} \quad (6)$$

式中: X 为状态方程的值; M 为拉普拉斯变换算子; $\bar{\omega}$ 为频率的估计值; $U(t)$ 为输入信号; $\dot{X}$ 为正弦信号估计值; $\gamma, \beta, \varepsilon$ 为 ANF 的参数。

式(6)为改进型 ANF 算法的数学基础,当输入值为 $U(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \Psi)$ 时,有唯一的解:

$$\begin{cases} M = \frac{A_0}{\beta} \\ X = -\frac{A_1}{\omega} \cos(\omega t + \varphi) \\ \dot{X} = A_1 \sin(\omega t + \varphi) \\ \bar{\omega} = \omega \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)可知,输入信号中的直流分量估计值 $A_0 = \beta M$ 。对式(6)进行拉普拉斯变换^[10]求解得

$$\dot{M} = A_0 - \beta M - K A_1 \cos(\omega t + \varphi + \Delta\varphi) + \sigma''(\bar{\omega}, t) \quad (8)$$

式中: K 为与 ω 相关的系数; $\sigma''(\bar{\omega}, t)$ 为指数衰减项的合成。

根据平均理论,式(8)可表示为

$$\dot{M}_{av} = A_0 - \beta M_{av} \quad (9)$$

式中: M_{av} 为 M 的平均值。

式(9)表明在稳态情况下 $A_0 = \beta M_{av}$,即采用改进型 ANF 可以准确追踪输入的直流偏移量。

改进型 ANF 原理如图 1 所示。 γ 决定系统的收敛速度,不同的 γ 值得到的阶跃响应曲线不同, ε 决定收敛精度, β 决定直流量的追踪速度^[11-12],输入信号 $U(t)$ 经过改进型 ANF 后,可以准确提取出其中的直流量 A_0 。

2.2 正负序直流量信息分离

忽略零序电压,根据式(2)、式(3),任意一组不

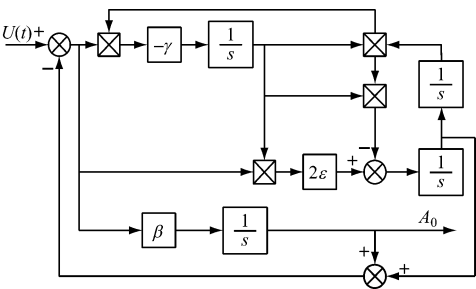


图 1 改进型 ANF 原理

对称电压 U_a, U_b, U_c 经过同步旋转坐标系运算可得

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = T_{ABC \rightarrow dq0} \times \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{PM} \cos \varphi_P + U_{NM} \cos(2\omega t + \varphi_N) \\ U_{PM} \sin \varphi_P - U_{NM} \sin(2\omega t + \varphi_N) \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据式(4)、式(5),不对称电压 U_a, U_b, U_c 经过反向旋转坐标系运算可得

$$\begin{bmatrix} U_r \\ U_s \end{bmatrix} = T_{ABC \rightarrow drs} \times \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{NM} \cos \varphi_N + U_{PM} \cos(2\omega t + \varphi_P) \\ U_{NM} \sin \varphi_N - U_{PM} \sin(2\omega t + \varphi_P) \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(10)、式(11)可知,不对称电压 U_a, U_b, U_c 分别经过同步和反向旋转坐标系后得到的信号均为直流量和正弦量之和。

不对称电压及经过旋转坐标系后的波形如图 2—图 4 所示。从图 2 可知,不对称电压周期为 0.02 s,经过同步旋转坐标系后的波形周期为 0.01 s,即为基波的 2 次倍频,且幅值有偏移;同样,经过反向旋转坐标系后结果类似。

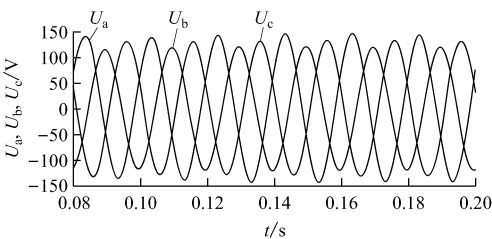


图 2 不对称电压波形

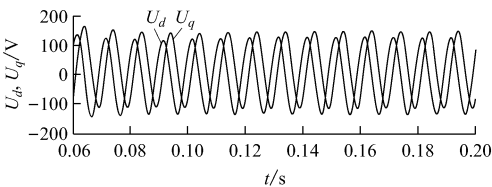


图 3 同步旋转坐标系下的不对称电压波形

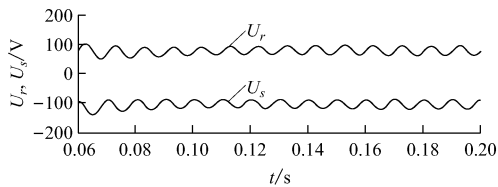


图 4 反向旋转坐标系下不对称电压波形

将坐标变换后的信号作为改进 ANF 的输入信号 $U(t)$ ，即可得到旋转后的直流信号。不对称电压正负序中直流分量提取框图如图 5 所示。

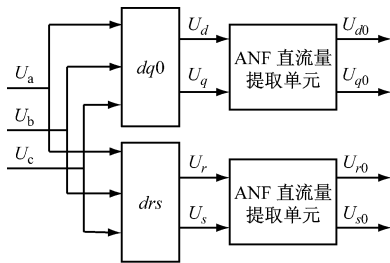


图 5 直流量提取框图

3 实验验证

为了验证本文所用方法的有效性，在 Matlab/Simulink 环境下搭建了如图 6 所示的仿真模型，并与传统的对称分量法进行了对比研究。

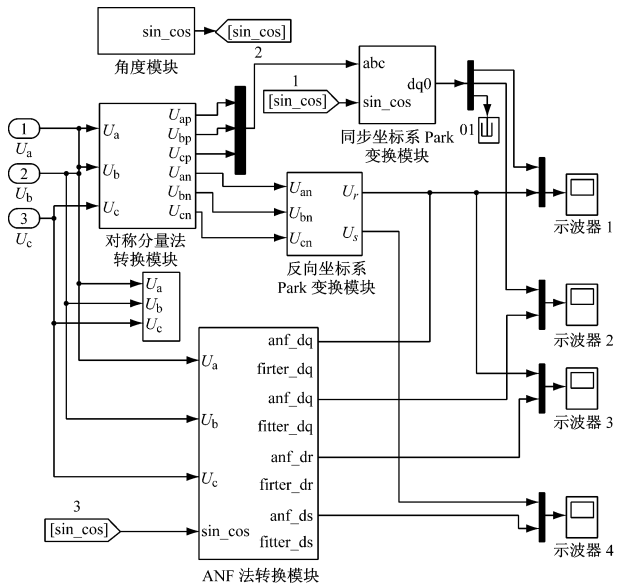


图 6 改进型 ANF 直流量提取仿真模型

改进型 ANF 提取出的不对称电压直流分量如图 7 所示。 $U_a=145\text{ V}$ ， $U_b=120\text{ V}$ ， $U_c=130\text{ V}$ ，相位角相差 120° ，频率为 50 Hz 。从图 7 可知，不对称电压信号旋转后再经过改进型 ANF，基本在 3 个周波即 $t=0.06\text{ s}$ 时可以得到趋于稳定的直流信号，图中 $U_d=16\text{ V}$ ， $U_q=-4\text{ V}$ ， $U_r=78\text{ V}$ ， $U_s=-104\text{ V}$ 。

采用改进型 ANF 和对称分量法提取出直流量

的效果如图 8 所示。从图 8 可以看出，采用对称分量法可以实现直流量的提取，但所得结果有波动，达到稳定状态的时间较长 ($t=0.12\text{ s}$)，且谐波含量高；而采用改进型 ANF 的方法不仅可以滤除谐波，所需时间也较短 ($t=0.06\text{ s}$)，系统动态响应速度快且波动幅度低。

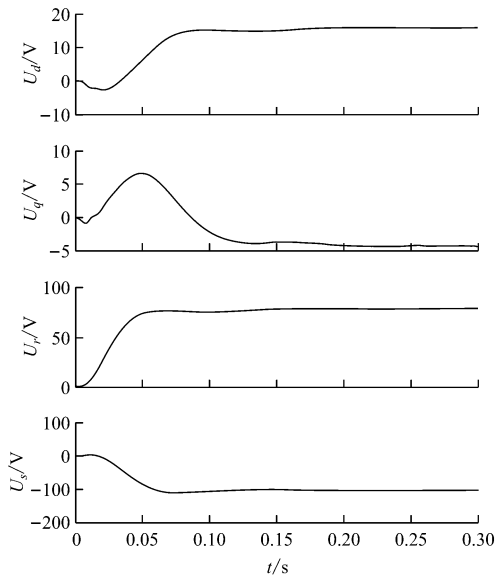


图 7 改进型 ANF 提取出的直流分量

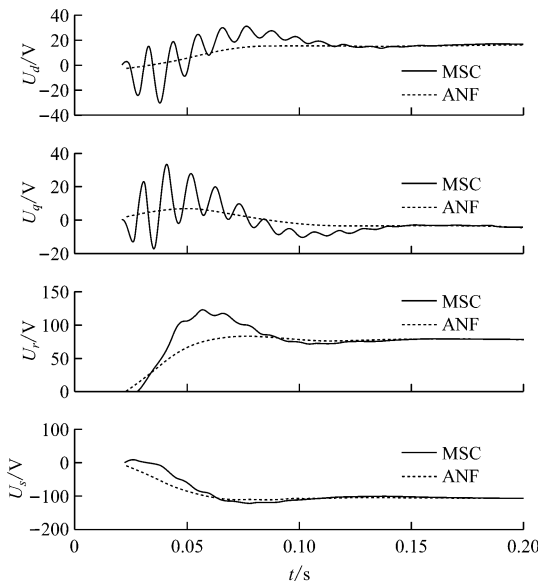


图 8 不同提取方案效果对比

4 结语

分析了不对称信号在同步和反向旋转坐标系下的信号特征，提出了一种基于改进型 ANF 来提取正负序直流量并实现了正负序分解的方法。实验结果表明，该方法能够有效地提取出三相不对称信号中的正负序直流量，可应用到三相变流器的不对称抑制的控制策略中，改善输出的不平衡性。

参考文献:

- [1] 许树楷,宋强,刘文华,等. 配电系统大功率交流电弧炉电能质量问题及方案治理研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(19):93-98.
- [2] 吕康飞,石超越. 三相电压不平衡情况下电机车整流技术的研究[J]. 工矿自动化,2012,38(2):49-52.
- [3] KAURA V,BLASCO V. Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(1):58-63.
- [4] HUANG C H,LEE C H,SHIH K J,*et al.* Frequency estimation of distorted power system signals using a robust algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(1):41-51.
- [5] RODRÍGUEZ P,LUNA A,TEODORESCU M,*et al.* Advanced grid synchronization system for power converters under unbalanced and distorted operating conditions [C]//Proceedings of 2006 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Wisconsin, 2006: 5173-5178.
- [6] 吴晓波,赵仁德,胡超然,等. 基于改进自适应陷波滤波器的锁相方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(5): 103-108.
- [7] FORTESCUE C L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of poly phase networks[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1918, XXXVII (2): 1027-1140.
- [8] 袁旭峰,程时杰,文劲宇. 改进瞬时对称分量法及其在正负序电量检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008,28(1):52-58.
- [9] 曹太强,祁强,王军. 三相逆变电源不平衡负载控制方法的研究[J]. 电机与控制学报,2012,16(4):50-55.
- [10] YAZDANI D,MOJIRI M,BAKHSHAI A. A fast and accurate synchronization technique for extraction of symmetrical components [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2009,24(3):674-684.
- [11] MOJIRI M,BAKHSHAI A R. An adaptive notch filter for frequency estimation of a periodic signal[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(2):314-318.
- [12] MOJIRI M, KARIMI-GHARTEMANI M, BAKHSHAI A. Time domain signal analysis using adaptive notch filter[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2007,55(1):85-93.