

三相电压不对称时谐波和无功电流的准确检测新方法

王玉斌¹, 吕燕¹, 李英俊²

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 济南大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250022)

摘要: 基于理论推导和分析, 指出了在三相电压不对称时, 应用瞬时无功功率理论检测谐波和基波正序有功及无功电流分量存在的问题。提出了一种准确检测这些电流分量的方法, 即先构造出一个理想的基波对称系统, 使该三相系统的电压等于原来非对称系统的基波正序电压, 在此基础上进行谐波和无功电流的检测。对该检测方法进行了理论分析和仿真, 仿真结果证明了在三相电压不对称时该检测方法仍然能正确地检测出谐波和基波有功、无功电流。

关键词: 瞬时无功功率理论; 谐波; 基波正序; 无功电流; 检测方法

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)18-0047-05

0 引言

自从 1984 年 H. Akagi 提出“瞬时无功功率理论”^[1]以来, 其作为一种有效的检测谐波和无功电流的方法, 在有源滤波和无功补偿领域得到了广泛的应用。但是, 它只适合于三相电压对称正弦的情况下的三相电路谐波和无功电流的检测^[1,2]。当三相电压不对称时, 谐波和无功电流的检测将出现误差。文献 [3] 中提出了一种三相电压不对称时, 谐波和无功电流的检测方法, 即将三相电压经窄带滤波器 NBPF 滤波后, 然后利用对称分量法得到 A 相基波正序电压, 并以此作为锁相同步信号, 利用 $i_b - i_c$ 方法计算负载电流中的谐波和无功电流。作者认为窄带滤波器本身具有相位滞后, 且会导致有用信号的衰减, 从而带来检测误差。文献 [4] 中没有很好地解决负序电流和无功电流的检测问题。

本文首先介绍了基于瞬时无功功率理论的谐波和无功电流两种常用检测方法 p-q 法与 $i_b - i_c$ 法, 并进行了理论分析, 指出这两种检测方法仅适用于三相电压对称正弦时的情况, 当三相电压不对称或含有谐波时, 在检测基波正序有功和无功电流分量将带来误差。由此本文提出了一种针对三相电压不对称时, 谐波和无功电流的新的检测方法, 并通过详细的理论分析、仿真说明该方法可准确检测出不对称三相电路中基波正序有功和无功电流。

1 基于瞬时无功理论的谐波和无功检测方法

目前基于瞬时无功理论的谐波和无功检测主要有两种方法 p-q 法和 $i_b - i_c$ 法, 为了下文的分析,

简介如下。

1.1 p-q 法

设三相电路的电压和电流瞬时值分别为 e_a, e_b, e_c 和 i_a, i_b, i_c , 则通过三相变两相的变换阵 C_{32} , 可以得到 $\alpha - \beta$ 平面的电压、电流和瞬时有功(无功)功率:

$$\begin{bmatrix} e \\ e \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e & e \\ e & -e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} = C_{pq} \begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} \quad (3)$$

瞬时有功 p 和瞬时无功 q 可以分解为直流分量 \bar{p}, \bar{q} 和交流分量 \tilde{p}, \tilde{q} , 即:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (4)$$

当电压波形无畸变时, \bar{p} 为基波有功电流与电压的作用产生, \bar{q} 为基波无功电流与电压的作用产生。于是, 由 \bar{p}, \bar{q} 即可检测出三相电流中的基波分量 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} , 进而得到谐波分量 i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} 。即:

$$\begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - C_{32}^T C_{pq}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.2 $i_b - i_c$ 法

$i_b - i_c$ 法的原理如图 1 所示。

此时需要用到与 A 相电压 e_a 同相位的正弦信号 $\sin t$ 和余弦信号 $\cos t$, 一般由一个锁相环

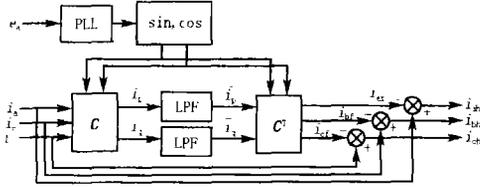


图 1 $i_p - i_q$ 检测法原理

Fig 1 Schematic diagram of $i_p - i_q$ method

(PLL)和一个正余弦发生电路得到。然后通过一种三相变两相的正交旋转变换 C , 将三相电流变换为两个正交分量 i_p 、 i_q 。

$$C = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \sin t & \sin(t - 120^\circ) & \sin(t + 120^\circ) \\ -\cos t & -\cos(t - 120^\circ) & -\cos(t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

i_p 、 i_q 经低通滤波器 (LPF) 滤波后得出 i_p 、 i_q 的直流分量 \bar{i}_p 、 \bar{i}_q ，由 \bar{i}_p 、 \bar{i}_q 即可计算出 i_{af} 、 i_{bf} 、 i_{cf} ，进而得到谐波分量 i_{ah} 、 i_{bh} 、 i_{ch} 。

$$\begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - C^T \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

当 APF 同时用于补偿谐波和无功之和时，则只需断开 i_q 通道即可，得到的谐波和无功分量 i_{ad} 、 i_{bd} 、 i_{cd} 为：

$$\begin{bmatrix} i_{ad} \\ i_{bd} \\ i_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{apf} \\ i_{bpf} \\ i_{cpf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - C^T \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

如果只需检测无功电流，则只需对 i_q 进行反变换即可。

1.3 p - q法和 $i_p - i_q$ 法的适用范围

上面介绍的谐波和无功电流检测方法特别是 $i_p - i_q$ 法在实际工程中得到了广泛的应用。但它们在具体应用时却有一定的适用范围。以下作简要分析。

三相三线制电路中 $i_a + i_b + i_c = 0$ ，没有零序电流分量，可将三相瞬时电流分解为基波正序电流 i_1 、基波负序电流 i_2 和谐波电流 i_h ，即： $i = i_1 + i_2 + i_h$ 。

对于 p - q法，当三相电压对称正弦时，很容易证明，瞬时有功 p 和瞬时无功 q 的直流部分 \bar{p} 、 \bar{q} 仅由基波正序电流 i_1 贡献，因此，假定 APF 输出式 (5)

所示的补偿电流，可将三相电流补偿为基波正序电流，此时 APF 补偿掉的是谐波电流和基波负序电流之和。

当三相电压不对称或含有谐波时，可将三相瞬时电压分解为基波正序电压 e_1 、基波负序电压 e_2 、谐波电压 e_h 和零序电压 e_0 ，即： $e = e_1 + e_2 + e_h + e_0$ ，此时由式 (4) 计算出瞬时有功 p 和瞬时无功 q ，经滤波得到的直流部分 \bar{p} 、 \bar{q} 为：

$$\bar{p} = \sum_{n=1} E_n I_n \cos \alpha_n \quad (10)$$

$$\bar{q} = \sum_{n=1} E_n I_n \sin \alpha_n \quad (11)$$

式中： E_n 、 I_n 分别是三相电压、电流基波和各次谐波的有效值。 α_n 为电压、电流基波或同次谐波之间的相位差。这说明当电压、电流都含有谐波时， \bar{p} 、 \bar{q} 除了由基波电压、电流贡献外，还包含同次的谐波电压、电流的贡献。因此，将 \bar{p} 、 \bar{q} 反变换不能得到准确的基波正序电流，也就不能得到准确的补偿电流指令值。

对于 $i_p - i_q$ 运算方式，可以得到同样的结论。这是因为：

$$\begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} = C_{pq} \begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} = C_{pq} C_{32} i = \sqrt{3} E C i = \sqrt{3} E \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} \quad (12)$$

也就是说， $i_p - i_q$ 法与 p - q法是完全等价的，变换结果只是相差一个常数而已，因此 $i_p - i_q$ 法与 p - q法的适用范围是一样的，即仅适用于三相电压对称正弦时的情况，当三相电压不对称或含有谐波时，将带来检测误差。

2 三相电压不对称时谐波和无功电流的准确检测方法

以上分析可知，三相电压不对称情况下，基波正序有功、无功电流分量的检测会产生误差，其原因就是三相电压不对称造成的。本文综合应用 $i_p - i_q$ 法和 p - q法，提出了一种有效的检测方法，可以应用于电网电压不对称的三相电路。

由前面的分析可知，当三相电路的电压为对称正弦时， $i_p - i_q$ 法和 p - q法都可以准确检测谐波和无功电流。为此，可先构造出这样一个理想的基波对称系统，使该三相系统的电压等于原来非对称三相电路的基波正序电压。

首先对三相非对称正弦的瞬时电压 e 实施 $i_p - i_q$ 变换，取其中的直流分量 (低通滤波) 进行反变换，必然对应于原三相系统电压的基波正序分量

(对称正弦) e_1 , 见式 (13) ~式 (15)。

$$\begin{bmatrix} e_p \\ e_q \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} e_p \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{e}_p \\ \bar{e}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{e}_p \\ \tilde{e}_q \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$e_1 = \begin{bmatrix} e_{a1} \\ e_{b1} \\ e_{c1} \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} \bar{e}_p \\ \bar{e}_q \end{bmatrix} \quad (15)$$

利用 e_1 构成一个基波电压对称正弦系统, 对此系统实施 p - q 变换, 类似于式 (1) ~式 (4), 得到:

$$\begin{bmatrix} e \\ e \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} e_{a1} \\ e_{b1} \\ e_{c1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = C_{pq} \begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (19)$$

这里, \bar{p} 为基波正序有功电流与基波正序电压的作用产生, 将其反变换即可得到基波正序有功电流分量 i_{a1p} 、 i_{b1p} 、 i_{c1p} ; \bar{q} 为基波正序无功电流与基波正序电压的作用产生, 将其反变换即可得到基波正序无功电流分量 i_{a1q} 、 i_{b1q} 、 i_{c1q} ; 同时对 \tilde{p} 、 \tilde{q} 进行反变换即可得到三相电流中的基波正序电流分量 i_{a1f} 、 i_{b1f} 、 i_{c1f} 。进而得到谐波电流等其它分量。即:

$$\begin{bmatrix} i_{a1p} \\ i_{b1p} \\ i_{c1p} \end{bmatrix} = C_{32}^T C_{pq}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} i_{a1q} \\ i_{b1q} \\ i_{c1q} \end{bmatrix} = C_{32}^T C_{pq}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \\ \bar{p} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} i_{a1f} \\ i_{b1f} \\ i_{c1f} \end{bmatrix} = C_{32}^T C_{pq}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

相应的检测算法框图示于图 2。图中:

$$C = \begin{bmatrix} \sin t & -\cos t \\ -\cos t & -\sin t \end{bmatrix}。$$

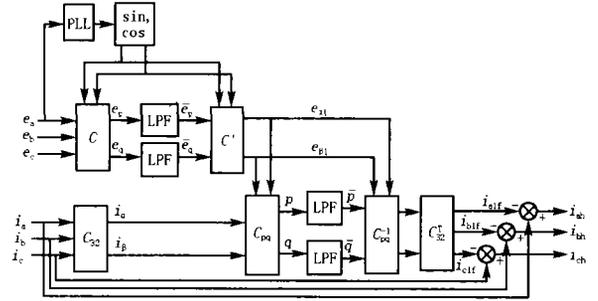


图 2 本文提出的检测法原理图

Fig 2 Schematic diagram of the presented algorithm

3 仿真结果分析

以三相电源电压相位不对称, 负载为接在 AB 两相的单相整流桥, 整流桥接一阻感负载为例, 分别用 $i_p - i_q$ 法和本文提出的方法进行了仿真。

所用的仿真参数如下:

三相电源电压:

$$e_a = 311 \times \sin(2 \times 50t),$$

$$e_b = 311 \times \sin(2 \times 50t - 100^\circ),$$

$$e_c = 311 \times \sin(2 \times 50t + 120^\circ)。$$

整流桥负载为: $R = 30 \Omega$, $L = 4 \text{ H}$ 。图 3 给出了 A 相负载电流的波形, 相电流有效值为 10 A。

经不对称分量法计算得到, 三相电源电压正序分量为 306.8 V, A 相正序电压的初相位为 6.6° ; 也就是说, 由于三相电压不对称, 使三相电压与其正序分量不同相, 图 4 给出了 A 相电压 e_a 及其正序分量 e_{a1} 的波形。

图 5 和图 6 分别给出了利用本文提出的方法和 $i_p - i_q$ 法得到的三相基波正序有功及无功电流的仿真波形。通过波形对比可以看出, 在三相电压不对称的情况下, 利用 $i_p - i_q$ 法检测三相基波正序有功电流和无功电流将产生幅值和相位误差, 且三相基波正序无功电流的幅值误差较大。

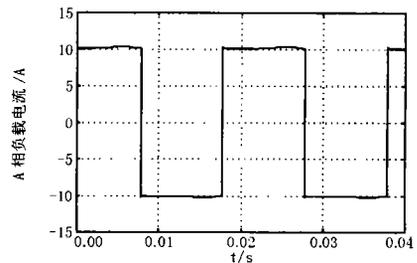


图 3 A 相负载电流的波形

Fig 3 Load current wave of phase A

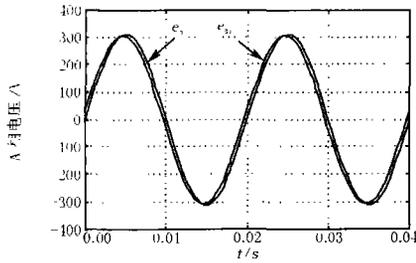


图 4 A相电压 e_a 及正序分量 e_{a1} 的波形

Fig 4 Voltage wave of phase A and its positive sequence wave

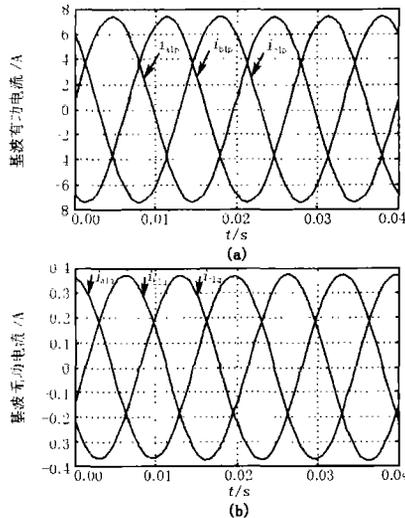


图 5 本文提出的方法得到的三相基波正序有功及无功电流的波形

Fig 5 Fundamental active and reactive current wave gained by the new detection method

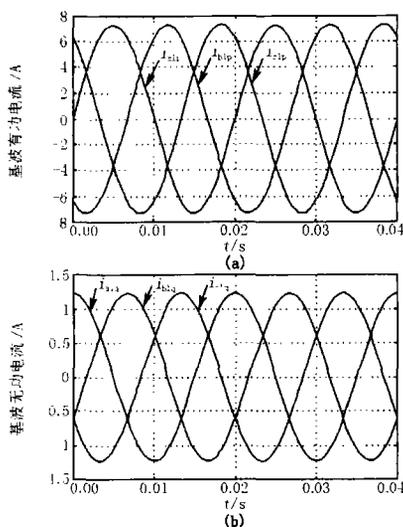


图 6 $i_p - i_q$ 法得到的三相基波正序有功及无功电流的波形

Fig 6 Fundamental active and reactive current wave gained by $i_p - i_q$ method

4 结论

本文对基于瞬时无功功率理论的谐波和无功电流检测方法进行了理论分析,指出 $p - q$ 法与 $i_p - i_q$ 法仅适用于三相电压对称正弦时的情况,当三相电压不对称或含有谐波时,在检测基波正序有功和无功电流分量将带来误差。由此本文提出了一种准确检测基波正序有功和无功电流分量以及其它分量的方法,仿真结果表明该方法是正确的。

在我国,低压配电网中由于单相负载的不平衡,使得三相电压、电流不对称。本文所提的方法为准确检测低压配电网中的谐波和无功电流提供了一条正确路径,有望在电压不对称时的有源滤波和瞬时无功补偿中应用。

参考文献:

- [1] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components [J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 1984, 20(3): 625-630.
- [2] 杨君,王兆安,邱关源. 不对称三相电路谐波及基波负序电流实时检测方法研究 [J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(3): 94-99.
YANG Jun, WANG Zhao-an, QIU Guan-yuan. A Study on Real-time Detecting Method for Harmonic and Fundamental Negative Sequence Currents in Unbalanced Three-phase Circuits [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1996, 30(3): 94-99.
- [3] 杨万开,肖湘宁,杨以涵. 不对称三相电路畸变电流和负序电流的一种实时检测方法 [J]. 电工电能新技术, 1998, (1): 68-72.
YANG Wan-kai, XIAO Xiang-ning, YANG Yi-han. A Real-time Detecting Method for Distortion and Negative Current in Unbalanced Three-phase Circuit [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1998, (1): 68-72.
- [4] Chen L, Lin C E, Huang C L. Reactive and Harmonic Current Compensation for Unbalanced Three-phase Systems Using the Synchronous Detection Method [J]. Electric Power Research, 1993, (6): 163-170.
- [5] 王茂海,刘会金. 非正弦及不对称电路中功率现象的探讨 [J]. 电工技术学报, 2002, 17(3): 93-96.
WANG Mao-hai, LIU Hui-jin. Approach of Power Phenomenon in Nonsinusoidal Circuit and Asymmetrical Circuit [J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2002, 17(3): 93-96.

收稿日期: 2006-02-10; 修回日期: 2006-06-14 现代电力电子技术及应用; E-mail: yb_wang@sdu.edu.cn
 作者简介: 吕燕(1980-),女,硕士研究生,研究方向为现代电力电子技术及应用。
 王玉斌(1967-),男,副教授,博士生,主要研究方向为

New precision detection method of harmonics and reactive current under asymmetrical three-phase voltages

WANG Yu-bin¹, LÜ Yan¹, LI Ying-jun²

(1. Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Jinan University, Jinan 250022, China)

Abstract: Based on mathematical deduction and analysis, the problems are pointed out that concern the detection of harmonics and fundamental positive-sequence active & reactive current components with instantaneous reactive power theory under asymmetrical three-phase voltages. A new precision method to detect these current components is presented and analyzed by mathematical deduction in this paper. In this new method, an ideal fundamental symmetrical system, of which voltages are equal to the fundamental positive-sequence voltages of the original system, is constructed first, then harmonics and corresponding current components can be detected accurately. Simulation results show that the proposed method can accurately detect harmonics, active current and reactive current of fundamental when three-phase voltage is unbalanced and distorted.

Key words: instantaneous reactive power; harmonics; fundamental positive-sequence; reactive current; detection method

(上接第 17 页 continued from page 17)

Abstract: The configuration and setting of transformer protection is very important to ensure the safety of power equipment. This paper introduces the system connection and transformer protection configuration of 750 kV Guanting to Lanzhoudong substation. The application principle on the configuration and setting of this 750 kV transformer protection is analysed and discussed in detail. The problem needing to regard is also discussed for others reference. Since there are so much contradiction in the selectivity and sensitivity of transformer protection setting, the principle to ensure the safety of power equipment should be chiefly take into account in order to achieve a reasonable configuration and setting.

Key words: 750 kV; protection configuration; setting; transformer

(上接第 34 页 continued from page 34)

Studies on software reliability for substation automation system

LU Yang¹, LUO Yi¹, YI Xiu-cheng², TU Guang-yu¹, CHEN Wei-li¹, Jiang Wei¹

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hangzhou Yilong power Technology Corporation, Hangzhou 310000, China)

Abstract: The software fault is becoming one of the main reasons resulting in disasters in real-time system. To guarantee and improve the software reliability for substation automation system (SAS), it brings software reliability engineering to bear during the software development period. A software reliability model for substation automation system based on improved JM model is set up in this paper. Compared with the old JM model, it defines fault eliminating probability in the improved one, which makes the assumptions become more accordant with practice. It forecasts the reliability improving curve of the software system according to the fault data collected in the process of software test, and then concludes the reliable index that the software can achieve and the software test time to reach the reliable index. The computation results show the validity and efficiency of the method in the software development of substation automation system.

Key words: substation automation system; software development; software reliability; JM model; software reliability forecasting