

三相四线制系统谐波检测 p - q - 0法的研究

张金斗, 张勇, 程新功

(济南大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250022)

摘要: 以瞬时无功功率理论为基础,介绍了针对三线四线制系统谐波电流检测和无功补偿所提出的 p - q - 0法,分析了瞬时无功功率理论在三线四线制电力系统下的物理意义,并给出了该系统下谐波和无功电流的检测控制算法原理图,详细讨论了三相负载不平衡时的补偿效果。通过理论分析,在 Matlab环境下对三相不平衡负载电路仿真证明,当电网电流发生严重畸变时,p - q - 0法不仅能准确、实时地消除三相四线制系统中的谐波电流,对中线电流抑制及无功功率补偿也有较好的效果,并且补偿后的电源瞬时三相功率为定值。

关键词: 瞬时功率; p - q - 0法; 三相四线制; 谐波抑制; 无功补偿

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)20-0053-04

0 引言

在低压配电系统中,三相四线制供电方式是最主要的供电方式,在工厂、民用住宅和城市等电力系统中广为应用。随着电力电子器件的广泛应用,谐波和三相不平衡问题越来越受到人们的重视,各种补偿和治理方法应运而生^[1]。早期的 RC 无源滤波检测补偿方法虽然简单,但对不稳定的电网和变负载系统来说,可靠性低、误差大。20世纪 80年代,日本赤木泰文(H. Akagi)等人提出了三相电路瞬时无功功率理论^[2],该理论首先在三相三线制系统谐波和无功电流的实时检测方面得到了成功的应用^[3],有力地推动了有源电力滤波技术的发展。

三相四线制电力系统与三相三线制电力系统的区别在于存在零线,因而用于三相四线制系统中谐波和无功电流的检测方法与三相三线制系统相比,根本的区别在于对三相电流中零序分量的处理。三相电路瞬时无功功率理论不能直接应用到三相四线制系统中,如何将基于瞬时无功功率理论的检测方法应用到三相四线制系统中,这是许多国内外专家和学者所关心的问题^[4,5]。对于三相四线制系统,因为中线的存在,更具一般性,故研究瞬时无功功率理论在三相四线制电路中的应用具有重要的实际意义。

本文提出的基于瞬时无功功率理论的 p - q - 0法,其基本原理是通过空间变换,将 a - b - c 空间坐标下的电压、电流变换至三相正交坐标 - - 0下,并对零序功率 p_0 的物理意义进行了定义。同时,该理论建立在时域上,可以实时操作有源电力滤

波器,另一个重要特性是计算简单,仅包含代数运算(需要分离直流和交流功率的计算除外)。通过 Matlab 仿真研究表明,p - q - 0法能够有效地抑制谐波、补偿无功及抑制中线电流。

1 三相四线制系统中的瞬时功率

在三相四线制系统中,考虑其零序分量的存在,在进行坐标变换时,不再是一正交的平面坐标系,而是在 0 坐标系下进行变换,对电压、电流矢量,在功率不变的约束条件下作正交变换,公式为:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i \\ i \end{bmatrix} = C_0 \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v_0 \\ v \\ v \end{bmatrix} = C_0 \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $C_0 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$

称为 - - 0 变换阵。

相对应的反变换为:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = C_{abc} \begin{bmatrix} i_0 \\ i \\ i \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = C_{abc} \begin{bmatrix} v_0 \\ v \\ v \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $C_{abc} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$

称为 a - b - c 变换阵。

于是瞬时有功功率 p , 瞬时无功功率 q 及瞬时零序功率 p_0 , 在 0 坐标下的表达式为:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v & v \\ 0 & -v & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i \\ i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$p_0 = v_0 \cdot i_0 \quad \text{瞬时零序功率} \quad (4)$$

$$p = v \cdot i + v \cdot i \quad \text{瞬时有功功率} \quad (5)$$

$$q = v \cdot i - v \cdot i \quad \text{瞬时无功功率} \quad (6)$$

在 0 坐标下,三相电力系统中各功率的成分及传递情况如图 1 所示,并且其物理意义如下:

\bar{p}_0 为瞬时零序功率的直流分量,代表单位时间内由电压和电流的零序分量产生从电源传递到负载的能量。

\tilde{p}_0 为瞬时零序功率的交流分量,代表单位时间内由电压和电流的零序分量产生的在电源到负载之间交换的能量。零序功率只在带有中线的三相电路系统中存在,并且该系统含有不平衡电压电流,或至少一相的电压电流中含有 3 的倍数次谐波。

\tilde{p} 为瞬时有功功率的交流分量,代表单位时间内在电源到负载之间交换的能量。

\bar{p} 为瞬时有功功率的直流分量,反映了单位时间内从电源传递到负载的能量。

q 为瞬时无功功率,反映了系统中各相之间能量的流动。它对电源到负载之间的能量传输没有任何影响,但是产生有害电流在系统各相之间流动。在电源为正弦波,平衡负载的情况下, \bar{q} (瞬时无功功率的直流分量) 等于传统的无功功率 ($\bar{q} = 3V I \sin\phi_1$)。

在三相四线制系统中,瞬时总功率如下式所示:

$$p_3 = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c = v \cdot i + v \cdot i + v_0 \cdot i_0 = p + p_0 = \bar{p}_3 + \tilde{p}_3 \quad (7)$$

从式 (7) 可以看出,三相电路瞬时等于有功功率和零序功率之和。 p_3 反映了单位时间内从电源传递到负载的总能量。直流分量 \bar{p}_3 反映了从电源传输到负载的有效能量,交流分量 \tilde{p}_3 反映了单位时间内在电源和负载之间流动的能量,理想情况下应该被补偿。如果 \tilde{p}_3 被补偿,电源将提供一恒定的瞬时功率 ($=\bar{p}_3$)。

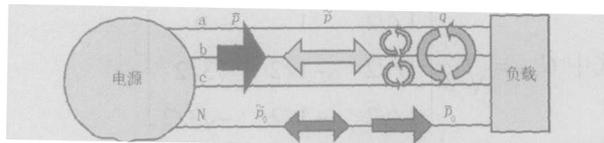


图 1 三相电力系统中各功率的成分及传递原理
Fig 1 Power component and delivery of the method in three-phase four-wire power system

2 p - q - 0 法在并联型有源滤波器中的应用

从上述分析可知,只有瞬时有功功率直流分量 \bar{p} 和瞬时零序功率直流分量 \bar{p}_0 (负载平衡时) 反映单位时间内从电源传递到负载的能量,故只需对其它功率成分使用有源电力滤波器进行补偿,功率补偿结构示意图如图 2 所示。

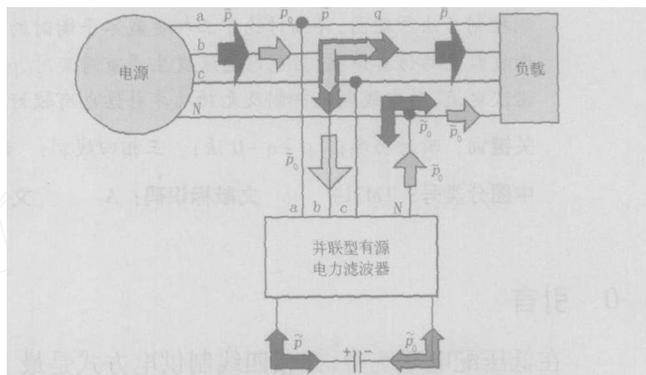


图 2 功率补偿结构

Fig 2 Power compensation structure

当三相负载不平衡时,零序瞬时功率直流分量 \bar{p}_0 的补偿不需要有源滤波器提供能量,这意味着通过电压电流的零序分量从电源传输到负载的能量,现在以平衡的方式通过电网各相传输到负载。从图 2 中可以看出,有源滤波器的电容只需补偿 \tilde{p} 和 \bar{p}_0 。瞬时无功功率 q 的补偿不需要电容器作用,因此电容器的大小与需要补偿的无功功率量无关。

p - q - 0 法谐波补偿指令电流算法原理如图 3 所示。

该方法首先根据瞬时无功功率理论定义计算出 p, q, p_0 经高通滤波器 HPF 得其交流分量 \tilde{p}, \tilde{p}_0 经过低通滤波器得其直流分量 \bar{p}, \bar{p}_0 。于是,由 \tilde{p}, q, \bar{p}_0 即可计算出 α 轴下的补偿参考电流,对式 (3) 作反变换得:

$$\begin{bmatrix} i_c^* \\ i_b^* \\ i_a^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v^2 + v_0^2} \begin{bmatrix} v & -v \\ v & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} - \bar{p}_0 \\ q \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $\tilde{p} - \bar{p}_0, q$ 为补偿的功率。

最后由公式 (2) 得到 a - b - c 坐标下参考补偿电流 $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$,

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0^* \\ i_c^* \\ i_b^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $i_0^* = i_0$ 。

中线参考补偿 \hat{i}_{cn}^* 为:

$$\hat{i}_{cn}^* = -(\hat{i}_{ca}^* + \hat{i}_{cb}^* + \hat{i}_{cc}^*) \quad (10)$$

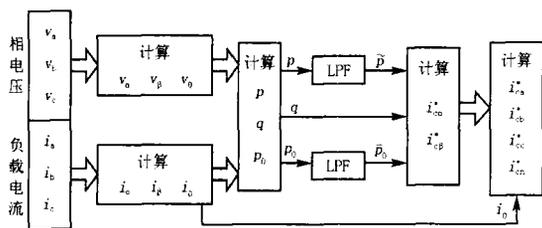


图 3 补偿电流算法原理

Fig 3 Algorithm principle of compensation current

3 仿真

p-q-0检测法是由 p-q检测法变换而来,主要是针对三相四线制系统下存在中线电流的情况。不论电网电压是否发生畸变,只要电网电流中存在谐波分量,在电网的中线上就会有中线电流。本文在仿真过程中,为了更好地解释 p-q-0检测法的特性,选用假想的非线性负载,并假设三相四线制系统处于稳定状态,有源电力滤波器为理想状态,这意味着有源电力滤波器的控制没有考虑其动态特性。

根据上述分析,采用上述图 3 补偿电流算法,在 Matlab 环境下对图 4 所示三相四线制系统进行仿真,三相不平衡负载由一个带感性负载的三相二极管整流桥和带电阻性负载的一个单相二极管整流桥组成。

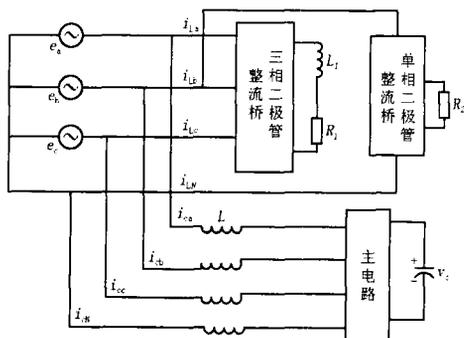


图 4 三相四线制系统仿真图

Fig 4 Simulation diagram of the three-phase fourwire system

仿真结果如图 5~8 所示。从图 5 可以看出补偿前三相负载电流不对称,波形畸变严重,并且零线中存在较大电流,并且其 a 相、c 相电流总畸变 (THD_i) 约为 22%, b 相电流总畸变 (THD_i) 约为 54%。图 6 为各相补偿指令电流及中线补偿指令电流波形。图 7 为各相补偿后电源侧电流及中线电流波形,可以看出补偿后的三相电源电流波形对称,且

为正弦波,其各相电流总畸变 (THD_i) 均在 2% 以下,零线电流基本消除。

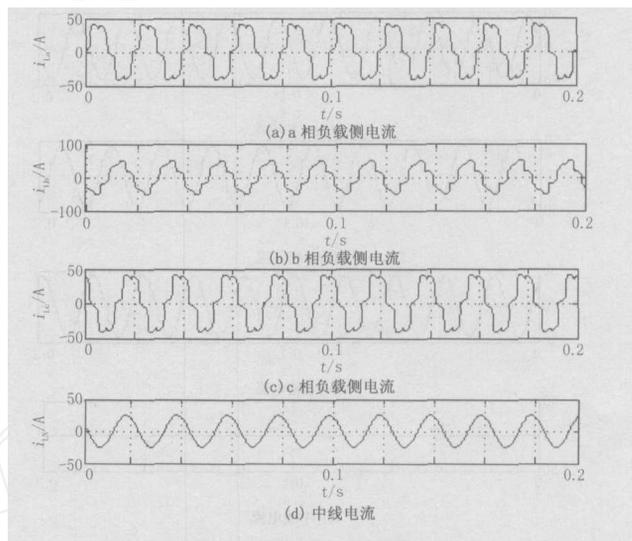


图 5 各相补偿前负载侧电流及中线电流波形

Fig 5 Load currents waveforms and neural line current before compensation

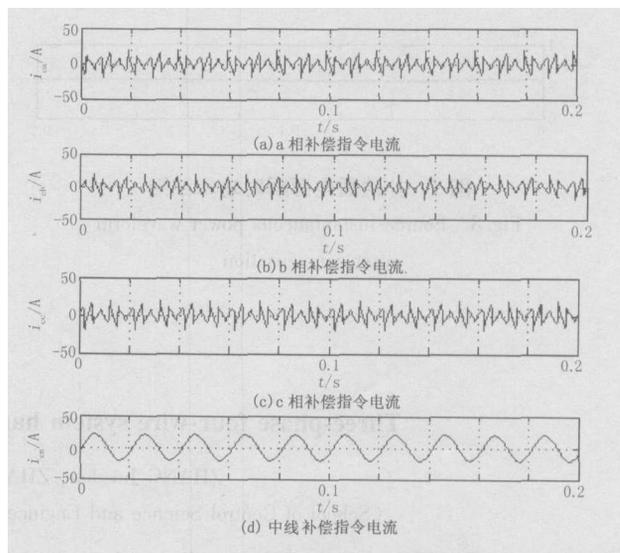


图 6 各相补偿指令电流及中线补偿电流波形

Fig 6 Compensation currents waveforms of the three phases and neural line

图 8 为补偿后的电源瞬时总功率 p_{3s} 的波形图 (即 $p_{3s}(t) = v_a \cdot i_{sa} + v_b \cdot i_{sb} + v_c \cdot i_{sc}$), 可以看出补偿后的电路电源瞬时输出总功率为恒定值。

4 结束语

通过理论分析和 Matlab 仿真研究表明,在电网电流发生严重畸变时,p-q-0法不仅能准确、实时地消除三相四线制系统中的谐波电流,对中线电流

抑制及无功功率补偿也有较好的效果,并且补偿后的电源瞬时输出功率为一定值。

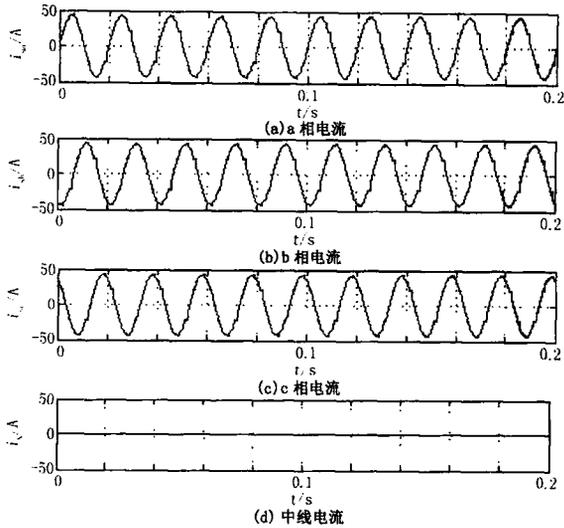


图 7 各相补偿后电源侧电流及中线电流波形

Fig 7 Source currents and neutral line current waveforms after compensation

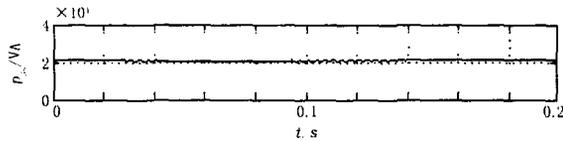


图 8 补偿后电源瞬时功率波形

Fig 8 Source instantaneous power waveform after compensation

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京:机械工业出版社,1998
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation [M]. Beijing: China Machine Press, 1998
- [2] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-phase Circuits [A]. IEEE & JIEE Proceedings IPEC Tokyo: 1983. 1375-1386
- [3] Kagi H. Trends in Active Power Line Conditioners [J]. IEEE Trans on Power Electron, 1994, 9 (3): 263-268
- [4] Aredes M, Watanabe E H. New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10 (3): 1649-1656
- [5] Peng F Z, Lai J S. Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-phase Power Systems [J]. IEEE Trans on Instrum and Meas, 1996, 45 (1): 293-297.

收稿日期: 2006-05-31; 修回日期: 2006-07-01

作者简介:

张金斗 (1981 -),男,研究生,研究方向为智能控制,电力系统; E-mail: jindouzhang@163.com

张勇 (1965 -),男,教授,研究方向为智能控制,电力系统及图像处理。

Three-phase four-wire system harmonics detection by the p-q-0 method

ZHANG Jin-dou, ZHANG Yong, CHENG Xin-gong

(School of Control Science and Engineering, Jinan University, Jinan 250022, China)

Abstract: The p-q-0 method which is applied in three-phase four-wire harmonic current detecting and reactive power compensation is introduced based on the instantaneous reactive power theory. The physical meaning of instantaneous reactive power theory is analyzed in the three-phase four-wire system, and the control strategy block diagram of harmonics and reactive power currents detection is given. The effect on compensating the unbalanced load harmonic and reactive power currents are researched in detail. Through theoretical analysis and simulation, it testifies that the p-q-0 theory can not only eliminate harmonic currents precisely in real-time, but also compensate the instantaneous reactive power and eliminate the neutral-line current as well, and the source instantaneous three-phase power becomes into a constant value after active power filter tuning on.

Key words: instantaneous power; p-q-0 theory; three-phase four-wire method; harmonics restraint; reactive power compensation