

p-q-r 法在三相四线制谐波抑制中的应用

郭书芳, 陈艳慧

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 分析了 p-q-r 法在电力系统谐波检测中的应用。详细讨论了三相四线制中电压有畸变和负载不对称时中线电流的抑制效果, 从 Hyosung Kim 提出的 p-q-r 法的基本理论出发, 通过理论分析和仿真证明 p-q-r 法在电压畸变明显时不能完全抑制谐波, 而对无功补偿和中线电流抑制有较好的效果。

关键词: p-q-r 法; 中线电流; 谐波; 瞬时功率

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)12-0025-04

0 引言

当三相四线制系统中带不平衡或非线性负载时, 大量电流流经中线, 日益增加的非线性负载将使这一问题更加严重, 当单相二极管整流负载接入三相四线制系统时, 中线电流会增加到相电流的 1.73 倍。

在三相电路有源滤波器中, 基于瞬时无功功率理论的 p-q 检测方法被视为最有效的方法之一, 但它未定义零序瞬时虚功率, 不遵从守恒律。近几年韩国学者 Hyosung Kim 提出了 p-q-r 法^[2,3], 其基本思想是在空间坐标系下把电压电流变换至 p-q-r 坐标系下, 这个变换以电压为基准, 使 p 轴与电压矢量方向相同, q 轴在 - 坐标平面上, 电压只在 p 轴有分量, 从而简化了有功电流和无功电流的计算。与其它理论不同的是, 它单独定义了零序瞬时功率, 在此基础上提出了消除中线电流的新算法, 仿真结果显示, 在负载变化时能有效抑制谐波和无功, 中线电流在稳态和过渡过程均非常接近零。由于理论本身的局限, p-q-r 法在电压畸变明显时, 不能完全消除相电流中的谐波。

1 理论分析

1.1 p-q-r 坐标系的建立

在三相电路中, 对电压电流进行 park 变换, 得到

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e \\ e \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{6}}{3} \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i \\ i \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{6}}{3} \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中
$$i_0 = \frac{\sqrt{3}}{3} (i_a + i_b + i_c) \quad (3)$$

中线电流
$$i_n = \sqrt{3} i_0 \quad (4)$$

将电流变换到由 p 轴 q 轴 r 轴组成的三维正交坐标系中, 得到 i_p, i_q, i_r

令
$$e_p = \sqrt{e_0^2 + e^2 + e^2} = \sqrt{e_a^2 + e_b^2 + e_c^2} \quad (5)$$

$$e = \sqrt{e^2 + e^2} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{e_p} \begin{bmatrix} e_0 & e & e \\ 0 & -\frac{e_p e}{e} & \frac{e_p e}{e} \\ e & -\frac{e_0 e}{e} & -\frac{e_0 e}{e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i \\ i \end{bmatrix} \quad (7)$$

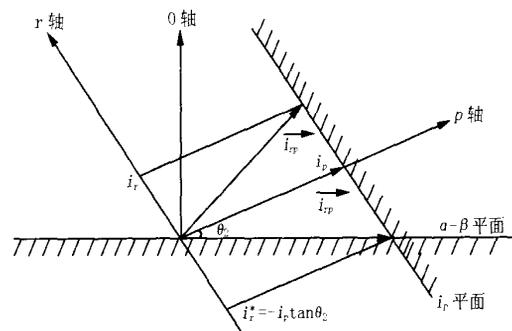


图1 p-q-r 坐标系下中线电流 i_n 和 i_r 电流之间的关系

Fig. 1 Relationship between neutral-line current i_n and current i_r in p-q-r coordinate

1.2 p-q-r 坐标系下, 谐波和无功的补偿原理

根据补偿要求, 可以分别选择对电流 i_p, i_q 或对功率量 p, q_q, q_r 滤波, 分别称为电流控制法和功

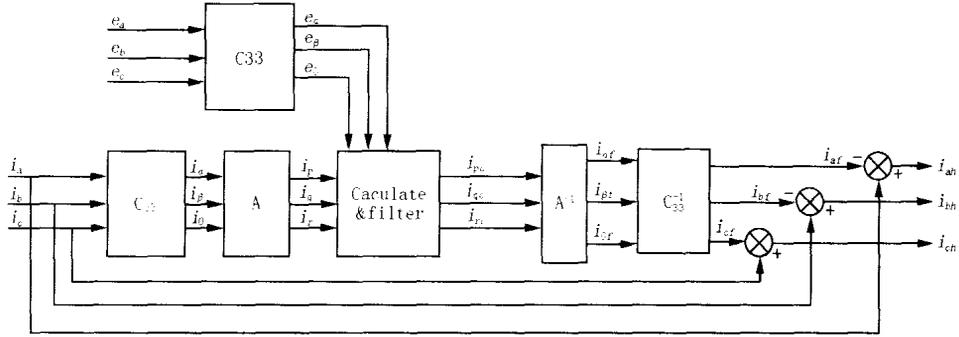


图 2 电流控制法补偿原理图

Fig. 2 p-q-r theory using current-control method to compensate

率控制法。这里使用的是 64 阶均值滤波器,响应速度约是一个周期。电流控制法的原理如图 2 所示。

图 2 中计算和滤波环节说明如下:

r 轴补偿电流

$$i_{rc} = i_r - i_{rf} = i_r + \frac{e_0}{e} i_p \quad (8)$$

q 轴补偿电流

$$i_{qc} = i_q \quad (9)$$

p 轴补偿电流

$$i_{pc} = i_{pac} \text{ (对 } i_p \text{ 低通滤波后相减)} \quad (10)$$

对式(8)、(9)、(10)依次进行式(7)和式(2)的反变换,得到 i_{ac}, i_{bc}, i_{cc} ,再反送电路即可。

补充说明,q 轴补偿电流可以有三种选择: $i_{qc} = i_q$ 或者 i_{qdc} 或者 i_{qac} ,图 2 实际上是一个综合示意图。从本文角度出发,认为 q 轴补偿电流设为 $i_{qc} = i_q$,既节省了一次滤波,提高跟随性能,又能更彻底的补偿无功(其它两种不能使功率因数校正到零),所以本文的仿真,都采用式(9)的算法。

1.3 中线电流的抑制

中线电流可以由以下几种原因引起:

1) 电网电压不对称,用对称分量法将电压分解时,电压的零序分量不为零,作用于电路,零序电流会通过中线;此时必须使电网只提供三相平衡的正序基波有功电流。为实现这一补偿目的,就要对负载电流中基波有功、基波无功和高次谐波电流进行准确的分离,以提供正确的补偿电流参考信号。

2) 电网电压对称,接非线性负载时,不同的换流电路会产生不同的特征性谐波(奇次)。它们均流过中线,若负载不平衡,中线电流各频率分量中幅值最大的是基波。若负载平衡,中线电流各频率分量中幅值最大的是三次谐波。

由前面的变换,将 i_r 单独取出来分析

$$i_r = \frac{1}{e_p} (e i_0 - \frac{e_0 e i}{e} - \frac{e_0 e i}{e}) \quad (11)$$

三相电压对称时,零序电压 $e_0 = 0$,此时,中线电流 $i_n = \sqrt{3} i_r = \sqrt{3} i_0$ 。

图 1 中,q 轴的方向为垂直纸面向内且在 - 平面上, i_r 和 i_r 分别为原 r 轴电流和希望补偿以后的 r 轴电流, i_{rp} 和 i_{rp} 分别是补偿前后 r 轴和 q 轴的电流的矢量和。

在 p-q-r 坐标系中的电流矢量 i_{rp} (i_r 和 i_p 的矢量和)不是在 - 平面上的,这是由于其零序分量产生的,代表零序分量的 0 轴垂直于 - 平面,为了使零序分量减小到零,必须使 i_{rp} 保持在 - 平面,即需使补偿后的 r 轴和 q 轴的电流的矢量和为图中的 i_{rp} 。则 r 轴理想的电流为

$$i_{rf} = - i_p \tan(\alpha) = - \frac{e_0}{e} i_p$$

三相电压对称时,零序电压 $e_0 = 0$,此时,中线电流 $i_n = \sqrt{3} i_r = \sqrt{3} i_0$

$$i_{rc} = i_r$$

反送之后 i_r 可被抑制到零。从而中线电流也为零。

当电压不对称时, $e_0 \neq 0, i_r \neq i_0$

$$i_n = \sqrt{3} i_0 - \sqrt{3} i_r$$

用电流控制法对 i_p 滤波后, i_p 稍有偏离 p 轴,从而引起误差,中线电流可以减至极小,但不能完全消除,这同后面的仿真结果是一致的。

2 仿真结果

以一个三相四线制电路接整流型负载的模型,作为补偿对象。阻感型负载大小可调。

2.1 电流控制法的仿真结果

1) 电网电压对称(所含谐波也对称),整流型负

载是一个谐波源,产生各奇数次谐波,令 $THDi1$ 和 $THDi2$ 分别为补偿前后电流谐波总含量,特地设置了负载阻抗极不平衡的参数值,以检验它对不平衡负载电路的补偿效果。

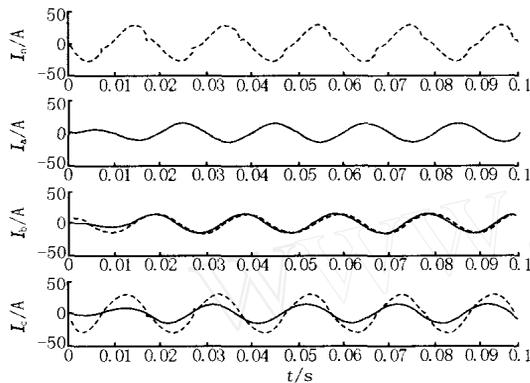
$$I_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$

$$THDi = \frac{I_H}{I_1} \times 100(\%)$$

表1 不平衡负载的电路元件参数表

Tab.1 Component parameters in unbalanced load circuit

R/	L/ mH	E(50Hz RMS)	THDi1	THDi2	
A	1000	10	220	1.9 %	0
B	20	15	220	8.99 %	0
C	10	10	220	11.95 %	0



注:图中虚线表示补偿前的电流,实线表示补偿后的电流

图3 电压对称负载不平衡条件下的补偿结果

Fig.3 Compensation results in the sinusoidal circuit with unbalanced load

补偿后相电流谐波和中线电流均为零,相电流与电压同相位,不再有无功。

若在电压中串入三相对称的三、五次谐波电压源,用 p-q-r 电流控制法补偿,中线电流也可以被完全消除,但相电流谐波无法完全消除,各参数和指标如表 2 所示。

表2 特殊的对称电压下电路参数

Tab.2 Component parameters of circuit with a specially balanced voltage

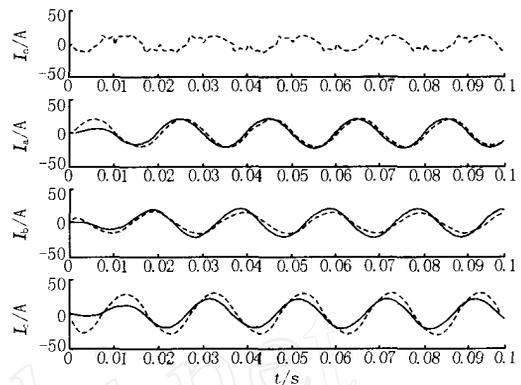
R/	L/ mH	E(50Hz RMS)	E(150Hz RMS)	E(250Hz RMS)	THDi1	THDi2
A	15	10	220	8	5	16.8 % 3.02 %
B	20	15	220	8	5	9.31 % 1.96 %
C	10	10	220	8	5	11.07 % 1.96 %

2) 电网电压不对称,电网含有谐波电压时,中线电流可以有效抑制,但不可能完全为零,电路参数和补偿效果如表 3。

表3 电压负载均不对称时的电路元件参数表

Tab.3 Component parameters in an unbalanced and nonlinear circuit with unbalanced voltage

R/	L/ mH	E(50Hz RMS)	E(150Hz RMS)	E(250Hz RMS)	THD1	THD2
A	15	14	210	10	4	19.33 % 2.01 %
B	20	15	220	5	2	9.13 % 1.13 %
C	10	12	220	8	1	14.11 % 1.29 %



注:图中虚线表示补偿前的电流,实线表示补偿后的电流

图4 电压负载均不对称时的补偿结果

Fig.4 Simulated waveforms of the circuit with unbalanced load and unbalanced voltage

可以看出,中线电流接近零,但有小的波纹,过渡过程中线电流最大时有 0.86 A,稳定后中线电流最大点有 0.14 A,约占稳定后相电流峰值的 7%。

通常电网电压几乎没有畸变,而电流的畸变是常见的,它作用于负载,引起了用户端电压的畸变。负载端的整流电感足够大时,电流中的谐波成分受交流侧影响较小,可以等效成一个谐波电流源。因此电压的畸变对算法影响很小。

p-q-r 坐标系是以电压量 e_p 为基准的,与 e_p 同一矢量方向的 i_p 中的高次谐波可以通过滤波除去,但电压畸变时, e_p 本身含有偶次谐波, i_p 的直流分量也同样受到高次谐波的影响。因此相电流谐波不可能被完全抑制。电压畸变时,以电压量为变换基准的算法,都有这个局限性,而 p-q-r 法中因为 $e_p = \sqrt{e_0^2 + e^2 + e^2}$,增加了 e_0 这一分量,所以它在电压畸变时的计算误差,相对明显一些。

2.2 功率控制法的仿真结果

功率控制法的原理与电流控制法大致相同,差别只在于它是对功率量滤波而已

令

$$P_c = 0$$

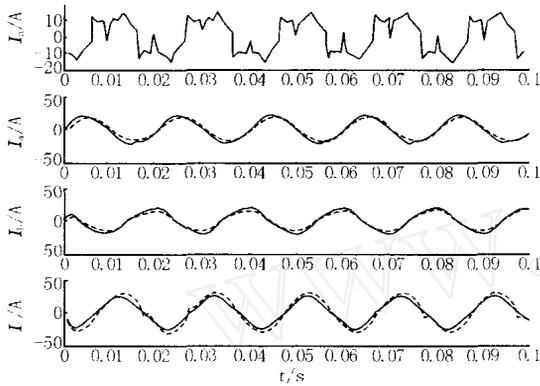
$$q_{qc} = q_q - \frac{e_0}{e_{ab}} P$$

q_r 经低通滤波得到 q_{rc}

再由式(8)、(9)、(10)变换得 i_{pc} 、 i_{qc} 、 i_{rc} ,由式(7)、(2)反变换得到 i_{ac} 、 i_{bc} 、 i_{cc} 反送电路中即可。

与电流控制法相比,功率控制法对相电流的去谐波效果不如前者,这是由于采样和多次计算引起的误差较大,但应用功率控制法在上述任何条件下都能将中线电流完全抑制,这也体现了 $p-q-r$ 补偿理论相对于其它补偿算法的一大优点,电流控制法在电网电压不平衡时做不到这一点, $p-q$ 理论下的补偿算法也做不到。

为了与功率控制法相比较,采用表3的电路参数,做电压负载均不平衡同等条件下的仿真,结果如图5所示。



注:图中虚线表示补偿前的电流,实线表示补偿后的电流

图5 功率控制法仿真结果分析

Fig. 5 Simulated waveforms for the reference power control method

3 结论

$p-q-r$ 法从理论上将零序电流和零序电压引起的瞬时功率也归算为有功功率,是不可能完全消除相电流中所含谐波的,分析表明, e_p 和 i_p 均只含有

少量偶次谐波,而 i_r 只含有少量奇次谐波,因此矢量 e_p 与矢量 i_r 依然正交,电压无畸变时用电流控制法,电压有畸变时用功率控制法就可以完全抑制中线电流。

在 $p-q-r$ 坐标系下补偿无功和谐波,需经过两次比较复杂的变换,计算量大,而且需采样三相电流电压,但它的算法清晰,不需要锁相环直接计算瞬时功率,也不需要使用储能元件。对零序分量及其瞬时功率进行了单独定义和计算,因而能消除中线电流,对三相四线制系统有一定的意义。

参考文献:

- [1] Hyosung K, Frede B, Birgitte B, et al. Instantaneous Power Compensation in Three-phase Systems by Using $p-q-r$ Theory [J]. IEEE Trans On Power Electronics, 2002, 17(5).
- [2] 王兆安,杨君,刘进军(WANG Zhaoan, YANG Jun, LIU Jirjun). 谐波抑制与无功功率补偿(Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation) [M]. 北京:机械工业出版社(Beijing: China Machine Press), 1998.
- [3] 刘开培,张俊敏,陈艳慧(LIU Kaipei, ZHANG Junmin, CHEN Yanhui). 基于重采样的三相谐波检测瞬时无功功率法(Instantaneous Harmonics Detecting Method for Three-phase Circuits Based Resampling) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(12): 45-47.

收稿日期: 2003-09-28; 修回日期: 2004-02-11

作者简介:

郭书芳(1980-),女,硕士研究生,主要研究方向为数字信号处理及其应用;

陈艳慧(1980-),女,硕士研究生,主要研究方向为数字信号处理及其应用。

The usage of $p-q-r$ theory in three-phase four-line system for harmonic restraint

GUO Shufang, CHEN Yanhui

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

Abstract: The $p-q-r$ theory, introduced by Hyosung Kim, is put forward for the power compensation and harmonic restraint in the paper. It analyzes how to eliminate the neutral-line current, when the source voltages are distorted and the loads are unbalanced in three-phase four-line system. Through theory analysis and simulation, it proves that the $p-q-r$ theory can only eliminate harmonics partially. However, it can eliminate the neutral-line current and the instantaneous reactive power well.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 2003ABA046).

Key words: $p-q-r$ theory; neutral-line current; harmonics; instantaneous power