

基于综合矢量的功率定义及在无功和谐波电流检测中的应用

陶 骏, 刘正之

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 本文在综合矢量平面上定义了三相电路的有功功率及无功功率, 以电压为参考, 直接对三相瞬时电压、电流运算, 获得三相电流的谐波及无功电流, 该方法算法简单。仿真结果证明该方法具有满意的检测效果。本文中功率的定义不仅具有明确的物理意义, 而且适用于谐波及无功电流的检测。

关键词: 综合矢量; 有功功率; 无功功率; 无功及谐波电流

中图分类号: TM131.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-3076(2001)01-0026-04

1 引言

近年来, 随着电力电子装置的广泛应用, 谐波和无功给电网造成了日益严重的危害, 由此诞生了各种动态补偿装置。这些补偿装置的控制信号的获得很难依靠建立在平均值基础上的传统功率理论, 在此背景下, 八十年代初, H. Akagi 等人提出了建立在电压、电流瞬时值基础上的瞬时无功功率理论^[1], 并成功地应用于一些有源滤波器及动态无功静补装置中。根据瞬时无功功率理论, 从完全补偿的角度出发, 在三相电路中引入 Park 变换及反变换可运算出补偿电流, 这种方法具有较好的实时性, 但需进行两次坐标变换, 计算量较大。同时此种功率定义的物理意义比较模糊, 难以完成对谐波及无功功率的辨识。

本文在三相电路综合矢量的基础上, 建立了功率定义。根据电压、电流的综合矢量,

直接基于电压参考, 获得三相电路中各相的有功电流、无功及谐波电流。同时本文中的功率定义与 Czarnecki 的功率定义是统一的^[1], 此种定义方法, 不仅有利于对无功及谐波的辨识, 具有明确的物理意义, 而且为谐波及无功电流的实时检测提供了依据。仿真计算表明, 此方法用于动态补偿装置可以获得满意的结果。

2 综合矢量平面上的功率定义

在公共电网中, 电压的畸变往往很小, 研究中可认为三相电压为对称的正弦波, 而电流可能有较大的畸变, 这种研究方法在实际中具有较大的意义。

在三相系统中, 三相电压的瞬时值为 e_a 、 e_b 、 e_c , 将它们看成三个矢量的模, 矢量的方向位于三个相轴上, 若变量为正, 矢量方向与相轴一致, 反之则取相反方向。三个矢量的合

收稿日期: 2000-01-10

作者简介: 陶骏(1971-), 男, 安徽籍, 博士生, 主攻电网的无功补偿及谐波抑制;

刘正之(1943-), 男, 安徽籍, 研究员, 博导, 主攻高功率脉冲电源及聚变工程的研究。

成,取合成矢量的 $\sqrt{2/3}$ 倍,即得电压综合矢量 e 。同样的方法,对于三相瞬时电流 i_a, i_b, i_c ,可以获得电流综合矢量 i ,如图1所示。

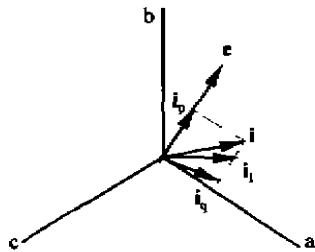


图1 综合矢量平面

由此:

$$\begin{cases} e = \sqrt{2/3}(e_a + e_b e^{j120^\circ} + e_c e^{j240^\circ}) \\ i = \sqrt{2/3}(i_a + i_b e^{j120^\circ} + i_c e^{j240^\circ}) \end{cases} \quad (1)$$

对于采用三线制的三相系统,零序分量为零,故综合矢量在各相轴线上的投影反映了各相瞬时值。

若三相电压对称无畸变,电压综合矢量 e 在综合矢量平面上以 $\omega = 2\pi f$ 逆时针旋转,且幅值不变。对于畸变的三相电流的综合矢量,其旋转速度及幅值都会瞬时变化。不妨假设电流中除基波外,还有5次、7次谐波,即:

$$i = i_1 + i_5 + i_7 \quad (2)$$

此时综合矢量可以看成是 i_1, i_5, i_7 的合成。其中 i_1 以 $\omega = 2\pi f$ 逆时针旋转,幅值不变;对于属于负序组的 i_5 以 $\omega = 5 \times 2\pi f$ 的速度顺时针等幅旋转;对于属于正序组的 i_7 以 $\omega = 7 \times 2\pi f$ 的速度逆时针等幅旋转。总的来说,5次、7次谐波电流综合矢量相对于电压综合矢量或基波电流综合矢量都是以 $\omega = 6 \times 2\pi f$ 速度旋转,由此引起了六倍频的功率脉动。就每相的这些脉动功率而言,在 $1/6$ 电源周期中完成了由吸收到释放的一个过程。

根据传统的三相电路的有功功率定义,从综合矢量角度出发,可定义有功功率为:

$$P = e \cdot i = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (3)$$

2001年第1期

无功功率为:

$$Q = \|e \times i\| \quad (4)$$

对于电压、电流无畸变的情况,(3)式给出的定义表明了有功功率是基波电压与基波电流相互作用产生的;对于电压无畸变,电流有畸变的情况,(3)式中的有功功率除含有前述的那部分外,还含有基波电压与谐波电流相互作用产生的功率。这种不同频率的电压、电流相互作用产生的功率并不反映负载中的能量消耗,它只反映能量在电源与负载之间交换情况,可以将这部分功率归到无功功率范围。

(3)式定义的有功功率中的基波电压与基波电流相作用产生了一个恒定的直流分量,而基波电压与谐波电流作用产生了一个脉动功率,即:

$$P = \bar{P} + \tilde{P} \quad (5)$$

则 \bar{P} 为基于综合矢量的三相电路的有功功率。实际上,若三相电压中仍含有谐波, \bar{P} 中除表示基波电压、电流作用的结果外,还表示了同次的谐波电压、电流作用结果,它们都属于有功功率的范畴。

对于无功功率,实际就是在电源及三相负载之间交换的功率,它应包括电压、电流综合矢量叉积部分和点积部分的脉动分量。同样在电压无畸变,电流有畸变的情况下,叉积得到的无功功率仍然包括一个直流分量和一个脉动分量,这种脉动分量与(5)式中的脉动分量的频率是一致的。

在综合矢量平面上,重新定义三相电路的有功、无功功率 p', Q' 如(6)式:

$$\begin{cases} p' = \bar{P} \\ Q' = Q + \tilde{P} \end{cases} \quad (6)$$

可见,在三相正弦电路中,建立在平均值基础上的传统功率定义完全可以用综合矢量平面上的功率定义来表述,这种定义实际是传统定义在电流有畸变的三相电路的扩展。同时,它与Akagi, H的瞬时功率定义相比,将其瞬

时有功功率的交流分量归到无功功率范畴,两者仍具有一定的一致性。

3 与 Czarnecki 的功率定义的关系

Czarnecki 在三相非线性对称电路中,对电流进行正交分解,获得三个分量: i_a, i_r, i_s ,及功率的三个分量。

对于对称负载引入负载等效导纳: $G_c + jB_c$,定义三相电压、电流向量为:

$$u = (u_R, u_S, u_T) \quad i = (i_R, i_S, i_T)$$

由此得到电流的正交分量:

$$\begin{cases} i_a = G_c u \\ i_r = B_c u \\ i_s = i - i_a - i_r \end{cases} \quad (7)$$

在综合矢量平面上, i_a, i_u, i_r 的三个分量构成的综合矢量分别对应于图1中 i_p 的直流分量、交流分量及 i_q 。

Czarnecki 在电流正交分解的基础上,得到了三个功率分量:

$$\begin{cases} P = \|u\| \times \|i\| \\ Q_r = \|u\| \times \|i_r\| \\ Q_u = \|u\| \times \|i_u\| \end{cases} \quad (8)$$

(8)式中的 P 代表了电路传递的有功功率, Q_u 代表与负载等效谐波导纳中的电导分量相关的功率, Q_r 代表了三相电路中电源与负载之间相互传递的功率。在电压无畸变时,上式中的 P 与(5)式中的 \bar{P} , Q_u 与(5)式中的 \bar{P} , Q_r 与(6)式中的 Q 是一致的。可见,本文中功率的定义,实际上是 Czarnecki 的功率定义在综合矢量平面上的描述。这种定义不仅使各种功率分量具有明确的物理意义,而且由于引入了综合矢量,将功率、电流、电压与瞬时值联系起来,更有利于为谐波及无功功率的实时补偿和抑制提供检测方法。

4 无功及谐波电流检测方法

在电网电压无畸变时,以电压为参考,根据综合矢量平面下的功率定义,可以避免使

用坐标变换,直接获得无功及谐波电流。

设三相电流的基波有功分量分别为: i_{ap}, i_{bp}, i_{cp} ,根据有功功率的定义:

$$\bar{P} = e_a i_{ap} + e_b i_{bp} + e_c i_{cp} \quad (9)$$

在综合矢量平面上(如图1), i_{ap}, i_{bp}, i_{cp} 构成的综合矢量的方向应于电压的综合矢量 e 方向一致,且幅值不变,由此得到:

$$i_{ap} = e_a / A \quad i_{bp} = e_b / A \quad i_{cp} = e_c / A \quad (10)$$

上式中, A 为比例因子。

由(9)、(10)式得:

$$A = (e_a^2 + e_b^2 + e_c^2) / \bar{P} \quad (11)$$

而 \bar{P} 可以根据三相电压及电流的瞬时值作用(即(3)、(5)式)获得。因此,三相瞬时无功及谐波电流 i_{aq}, i_{bq}, i_{cq} 为:

$$i_{aq} = i_a - i_{ap} \quad i_{bq} = i_b - i_{bp} \quad i_{cq} = i_c - i_{cp} \quad (12)$$

基于电压参考的无功及谐波电流检测框图如图2所示:

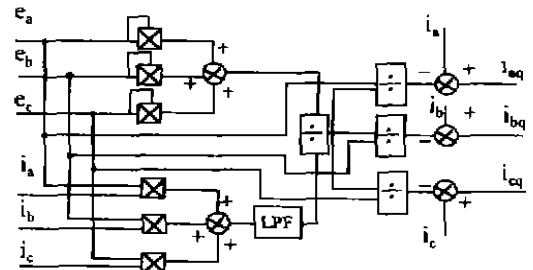


图2 基于电压参考的无功及谐波电流检测框图

在这种检测方法中,避免了3/2坐标变换及其反变换,简化了计算,提高了系统的快速性。

5 检测算法的仿真计算

对于电压无畸变,电流为典型的六脉冲晶闸管相控变流器(驱动阻感负载)的输出,

利用本文的检测方法,进行仿真计算。

设三相电网电压为:

$$\begin{cases} e_a = E_m \sin(\omega t) \\ e_b = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_c = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (13)$$

图3为该变流器的触发延迟角为 30° ,电路稳态运行两个周期中,电网A相电流的EMTP仿真波形。图4、图5为根据本文检测算法获得的谐波及无功电流的波形和基波有功电流波形。

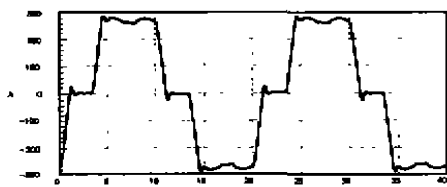


图3 A相电流波形

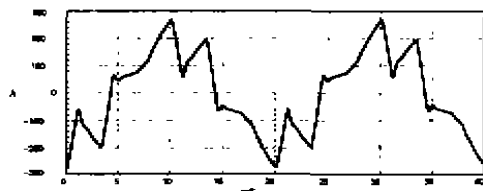


图4 A相无功及谐波电流波形

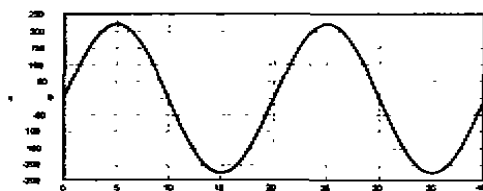


图5 A相基波有功电流波形

可见,图5给出的波形基本是与电压同相位的正弦波,利用该检测方法,可以将任何畸变电流中的基波有功和谐波及无功分量分离出来,并为动态补偿装置提供给定信号。

2001年第1期

6 结论

本文的研究,得到如下结论:

① 基波电压的综合矢量与基波电流的综合矢量的点积中的直流分量定义为有功功率,对于电压无畸变的系统,只有它才能反映出负载中能量消耗情况。电压的综合矢量与基波电流的综合矢量的叉积和它们点积中的脉动分量构成了无功功率。

② 综合矢量平面上的功率定义与Czarnecki的功率定义具有一致性,它不仅具有明确的物理意义,而且能为动态补偿装置的信号检测提供依据。

③ 基于无畸变的电压参考,直接通过电压、电流的瞬时值运算,可获得三相瞬时无功及谐波电流。该检测方法相对于建立在瞬时无功功率理论及Park变换基础上的方法,算法得到简化。在多数情况下,公共电网的电压可以认为是无畸变的,所以这种方法具有一定的工程实用性,对于电压有畸变的情况,稍加处理后,该方法仍然适用。同时,仿真结果表明,它具有比较满意的检测效果。

参考文献:

- [1] Akagi H, *et al.* Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Trans. on IA, 1984, 20(3): 625-630.
- [2] L S Czarnecki. Orthogonal decomposition of the currents in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source[J]. IEEE Trans. on IM, 1988, 37(1): 30-34.
- [3] 李庚银,等. dq0坐标系下广义瞬时无功功率定义及其补偿[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 176-179.
- [4] Takeshi Furuhashi, *et al.* A study on the theory of instantaneous reactive power[J]. IEEE Trans. on IE, 1990, 37(1): 86-90.

(下转第34页, cont. on p. 34)

Influence of DC bias on properties of power electronic ferrite

LI Zhi-hua, LUO Heng-lian, FEI Hong-jun
(Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In many power electronic applications ferrite cores of magnetic components are biased with a DC or low-frequency premagnetization. Because the information about their influence on ferrite's properties is very limited, the effects are not considered in the component design. This paper focuses on the varieties of ferrite's permeability and core loss with DC bias. The results measured indicate that the influence of DC bias is very obvious in some applications and can not be neglected.

Key words: power electronic ferrite; DC bias; permeability; core loss

(上接第29页, cont. from p. 29)

- | | |
|--|--|
| <p>[5] 刘进军,王兆安. 瞬时无功功率与传统功率理论的统一数学描述及物理意义[J]. 电工技术学报, 1998, 13(6): 6-12.</p> <p>[6] L S Czarnecki. Reactive and unbalanced currents compensation in three-phase asymmetri-</p> | <p>calcircuits under nonsinusoidal conditions[J]. IEEE Trans. on IM, 1989, 38(5): 754-759.</p> <p>[7] 谢磊,等. 综合电力滤波器中谐波检测系统的研究[J]. 电工电能新技术, 1993, 17(3): 17-21.</p> <p>[8] 孙士乾,等. 电力系统中非正弦功率的定义[J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(5): 42-54.</p> |
|--|--|

Definition of power based on integrated vector and its application in detecting reactive and harmonic current

TAO Jun, LIU Zheng-zhi
(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In this paper, the active and reactive power are defined with the integrated vector in 3-phase circuit, and the reactive and harmonic current is obtained with the calculation of instantaneous voltage and current on the reference of voltage vector. Also the algorithm is simplified. The simulation result shows that the method leads to satisfactory detecting performance. The definition of power in this paper not only has special physical meaning but also can be applied in the detection of reactive and harmonic current.

Key words: integrated vector; active power; reactive power; reactive & harmonic current