三次元クロスベクトルに基づく瞬時無効電力補償

正 員 中野 博民 (東京工芸大学)

学生員 村瀬 剛 (東京工芸大学)

学生員 戸賀澤 智 (東京工芸大学)

終身員 難波江 章 (東京工芸大学)

Instantaneous Reactive Power Compensation Theory Using a Three Dimensional Cross Vector

Hirokami Nakano, Member, Tsuyoshi Murase, Student Member,
Satoshi Togasawa, Student Member, Akira Nabae, Life Member (Tokyo Institute of Polytechnics)

A new theory of instantaneous reactive power compensation on three-phase power systems is proposed. The validity of the proposed theory is demonstrated by the simulation and experimental results.

The proposed theory is based on a new concept, that is, a three dimensional cross vector which is newly proposed and defined in this paper. The three dimensional cross vector is the cross product of a voltage space vector and an instantaneous current space vector on three-dimensional rectangular coordinates. And an instantaneous reactive current space vector is easily detected by using the three-dimensional cross vector.

Therefore, the proposed theory does not use any coordinate transformations, such as a rotating coordinate transformation or a three-phase to two-phase coordinate transformation. Hence, the instantaneous reactive power compensation system based on the proposed theory in this paper is essentially simpler than any conventional reactive power compensation system based on such coordinate transformations.

キーワード：瞬時無効電力補償、クロスベクトル理論、三次元クロスベクトル、瞬時無効電流空間ベクトル検出回路、三相三線式系統無効電力補償

1. 緒論

従来、瞬時の無効電力補償理論は、回転座標変換や $\alpha\beta$ 座標変換等の種々の座標変換を出発点として、瞬時の無効電力補償理論を構築していた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。すなわち、三相系統のu相、v相、w相から構成される三次元空間の座標系上から新しい座標系である回転座標系上や $\alpha\beta$ 座標系上に変換された電圧電流量を基に、瞬時の無効電力補償理論を展開していた。それ故、本質的にそれらの制御システムは複雑であり、また、もとの三相の座標系での物理的意味の把握が困難であった。

そこで、筆者らは、座標変換に依存しない新しい瞬時の無効電力補償理論を提案する。提案する新しい理論は、三相のu相、v相、w相で構成される三次元空間の瞬時電圧・電流空間ベクトルからなる三次元クロスベクトルを用いている。そして、この理論を用いることで、極めてシンプ

ルな瞬時の無効電力補償方法が得られることを示す。また、三相三線式系統のみならず、より一般的な、電流に零相成分を含む三相四線式系統においても本提案理論の適用が可能である。

本論文では、まず三次元クロスベクトルを定義する。そして、この三次元クロスベクトルを基に、瞬時無効電流空間ベクトル検出式を導出する。次に、座標変換に依存しない新しい無効電力補償システムを構成し、その有用性をシミュレーション、及び実験により確認する。

2. クロスベクトル理論

従来より、回転座標変換や $\alpha\beta$ 座標変換等を用いた無効電力補償理論では、暗黙的に三相のu相、v相、w相により構成される三次元空間の座標系上から、新しい座標系である回転座標系や $\alpha\beta$ 座標系上に変換された電圧・電流量を基に、瞬時の無効電力補償理論を構築している。

ここでは、座標変換を一切用いることなく、三相系統のu相、v相、w相から構成される三次元空間の座標系を基に、瞬時の無効電力補償理論を展開する。

以下に、筆者らの提案するクロスベクトル理論を示す。

<2・1> 三次元クロスベクトルの定義

三次元の直交座標において、三相の瞬時電圧空間ベクトル $\mathbf{e}$ ($\mathbf{e} = e_u \mathbf{x} + e_v \mathbf{y} + e_w \mathbf{z}$) と瞬時電流空間ベクトル $\mathbf{i}$ ($\mathbf{i} = i_u \mathbf{x} + i_v \mathbf{y} + i_w \mathbf{z}$) とにより、以下のように三次元クロスベクトル $\mathbf{C}$ を定義する。

$$\mathbf{C} = \mathbf{e} \times \mathbf{i}$$

$$= \begin{vmatrix} \mathbf{x} & \mathbf{y} & \mathbf{z} \\ e_u & e_v & e_w \\ i_u & i_v & i_w \end{vmatrix}$$

$$= (e_v i_w - e_w i_v) \mathbf{x} + (e_w i_u - e_u i_w) \mathbf{y} + (e_u i_v - e_v i_u) \mathbf{z} \quad \dots \dots (1)$$

但し、 e_u 、 e_v 、 e_w は三相各相の電圧の瞬時値を、 i_u 、 i_v 、 i_w は三相各相の電流の瞬時値を示している。また、 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}$ 、 $\mathbf{z}$ はx軸、y軸、z軸の単位ベクトルを示している。

<2・2> 三次元クロスベクトルによる補償概念

(a) 三次元クロスベクトル $\mathbf{C}$ の側面図

(b) 三次元クロスベクトル $\mathbf{C}$ の上面図

図1 概念図

Fig.1. Figure of concept

図1は、ベクトル $\mathbf{e}$ とベクトル $\mathbf{i}$ とによって決定される

三次元クロスベクトル $\mathbf{C}$ の概念を図示したものである。図1(a)は、クロスベクトル $\mathbf{C}$ の側面図であり、そして、図1(b)は、図1(a)のクロスベクトル $\mathbf{C}$ の上方から観測した平面図である。

三相の瞬時有効電力 S を瞬時電圧空間ベクトル $\mathbf{e}$ と瞬時電流空間ベクトル $\mathbf{i}$ との内積によって、(2)式の様に定義する。

$$\begin{aligned} S &= \mathbf{e} \cdot \mathbf{i} \\ &= (e_u \mathbf{x} + e_v \mathbf{y} + e_w \mathbf{z}) \cdot (i_u \mathbf{x} + i_v \mathbf{y} + i_w \mathbf{z}) \\ &= e_u i_u + e_v i_v + e_w i_w \quad \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

従って、三相瞬時有効電力に寄与するベクトル $\mathbf{i}$ の成分は、ベクトル $\mathbf{e}$ に平行な成分 $\mathbf{i}_{\parallel}$ のみとなる(図1参照)。それ故、ベクトル $\mathbf{i}_{\parallel}$ は瞬時有効電流空間ベクトルと言える。しかし、ベクトル $\mathbf{e}$ に垂直なベクトル $\mathbf{i}$ の成分 $\mathbf{i}_{\perp}$ は、なんら三相瞬時有効電力に寄与しないので、ベクトル $\mathbf{i}_{\perp}$ は瞬时无効電流空間ベクトルと言える。

一方、三相の瞬时无効電力空間ベクトルは、ベクトル $\mathbf{e}$ とベクトル $\mathbf{i}$ との外積によって表わせる三次元クロスベクトル $\mathbf{C}$ となる(付録(1)参照)。従って、三相瞬时无効電力空間ベクトル $\mathbf{C}$ に寄与するベクトル $\mathbf{i}$ のベクトル $\mathbf{e}$ に垂直な成分 $\mathbf{i}_{\perp}$ は瞬时无効電流空間ベクトルと言える(図1参照)。当然のことながら、ベクトル $\mathbf{e}$ に平行なベクトル $\mathbf{i}$ の成分、すなわち瞬時有効電流空間ベクトル $\mathbf{i}_{\parallel}$ は、なんら三相瞬时无効電力空間ベクトルに寄与しない。

以上のことより、三相系統の瞬时无効電力を補償するには、瞬时无効電流空間ベクトル $\mathbf{i}_{\perp}$ を零ベクトルとなるように補償すれば良い。それにより、瞬时无効電力空間ベクトルすなわち三次元クロスベクトル $\mathbf{C}$ が零ベクトルになるように制御される。

よって、次節以降で、ベクトル $\mathbf{i}_{\perp}$ を検出するための瞬时无効電流空間ベクトル検出式を導出する。

<2・3> 瞬时无効電流空間ベクトル検出式の

一般式の導出

ベクトル $\mathbf{i}$ をベクトル $\mathbf{i}_{\parallel}$ とベクトル $\mathbf{i}_{\perp}$ に分離するとクロスベクトル $\mathbf{C}$ の定義式は、以下の様に変形される。

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= \mathbf{e} \times \mathbf{i} \\ &= \mathbf{e} \times (\mathbf{i}_{\parallel} + \mathbf{i}_{\perp}) \\ &= \mathbf{e} \times \mathbf{i}_{\perp} \quad (\because \mathbf{e} \times \mathbf{i}_{\parallel} = 0) \quad \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

(3)式の両辺を $\mathbf{e}$ で外積をとると、次式となる。

$$\mathbf{e} \times \mathbf{C} = \mathbf{e} \times (\mathbf{e} \times \mathbf{i}_{\perp})$$

上式の右辺にベクトル三重積の公式を適用すると、

$$\begin{aligned} \mathbf{e} \times \mathbf{C} &= (\mathbf{e} \cdot \mathbf{i}_\perp) \mathbf{e} - (\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}) \mathbf{i}_\perp \\ &= -(\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}) \mathbf{i}_\perp \quad (\because \mathbf{e} \cdot \mathbf{i}_\perp = 0) \\ \mathbf{C} \times \mathbf{e} &= (\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}) \mathbf{i}_\perp \end{aligned}$$

上式において、 $(\mathbf{e} \cdot \mathbf{e})$ はスカラー量であるので上式より次式の瞬时无効電流空間ベクトル検出式が導出される。

$$\mathbf{i}_\perp = \frac{\mathbf{C} \times \mathbf{e}}{\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、(4) 式はベクトル表示なので、各相の成分で表示すると次式となる。

$$\mathbf{i}_\perp = \frac{\begin{bmatrix} \{(e_w i_u - e_u i_w) e_w \\ - (e_u i_v - e_v i_u) e_v\} \mathbf{x} \\ + \{(e_u i_v - e_v i_u) e_u \\ - (e_v i_w - e_w i_v) e_w\} \mathbf{y} \\ + \{(e_v i_w - e_w i_v) e_v \\ - (e_w i_u - e_u i_w) e_u\} \mathbf{z} \end{bmatrix}}{e_u^2 + e_v^2 + e_w^2} \quad \dots \dots \dots (5)$$

(5) 式を更に変形し整理すると、(6) 式となる。

$$\mathbf{i}_\perp = i_{u\perp} \mathbf{x} + i_{v\perp} \mathbf{y} + i_{w\perp} \mathbf{z} \quad \dots \dots \dots (6)$$

但し、 $i_{u\perp}$ 、 $i_{v\perp}$ 、 $i_{w\perp}$ は各相の瞬时无効電流であり以下の様に示される。

u相瞬时无効電流：

$$i_{u\perp} = \frac{\begin{bmatrix} (e_v^2 + e_w^2) i_u \\ - (e_v i_v + e_w i_w) e_u \end{bmatrix}}{e_u^2 + e_v^2 + e_w^2}$$

v相瞬时无効電流：

$$i_{v\perp} = \frac{\begin{bmatrix} (e_w^2 + e_u^2) i_v \\ - (e_w i_w + e_u i_u) e_v \end{bmatrix}}{e_u^2 + e_v^2 + e_w^2}$$

w相瞬时无効電流：

$$i_{w\perp} = \frac{\begin{bmatrix} (e_u^2 + e_v^2) i_w \\ - (e_u i_u + e_v i_v) e_w \end{bmatrix}}{e_u^2 + e_v^2 + e_w^2}$$

(6) 式が瞬时无効電流空間ベクトル検出式の一般式である。

<2・4> 三相三線式系統における

瞬时无効電流空間ベクトル検出式

前節では、クロスベクトル理論を用いて、瞬时无効電流空間ベクトル検出式の一般式を導出したが、本節では、三相三線式系統における瞬时无効電流空間ベクトル検出式について考察する。

三相三線式系統の場合は、一般に $e_u + e_v + e_w = 0$ 、 $i_u + i_v + i_w = 0$ の条件が成立するので、これらの条件を(5)式に当てはめると次式となる。

$$\mathbf{i}_\perp = \frac{\begin{bmatrix} \{(-e_u - e_v) i_u \\ - e_u (-i_u - i_v)\} e_w \\ - (e_u i_v - e_v i_u) e_v\} \mathbf{x} \\ + \{(e_u i_v - e_v i_u) e_u \\ - \{e_v (-i_u - i_v) \\ - (-e_u - e_v) i_v\} e_w\} \mathbf{y} \\ + \{e_v (-i_u - i_v) \\ - (-e_u - e_v) i_v\} e_v \\ - \{(-e_u - e_v) i_u \\ - e_u (-i_u - i_v)\} e_u\} \mathbf{z} \end{bmatrix}}{e_u^2 + e_v^2 + (-e_u - e_v)^2}$$

上式をさらに整理すると、次式となる。

$$\mathbf{i}_\perp = \frac{\begin{bmatrix} e_u i_v - e_v i_u \\ 2 \{(e_u + e_v)^2 - e_u e_v\} \\ \times \{(e_w - e_v) \mathbf{x} + (e_u - e_w) \mathbf{y} + (e_v - e_u) \mathbf{z}\} \end{bmatrix}}{\dots \dots \dots (7)}$$

即ち、(7) 式が三相三線式系統の瞬时无効電流空間ベクトル検出式である。提案するクロスベクトル理論を適用すると、回転座標変換や $\alpha\beta$ 座標変換のように座標変換を用いていないので、(7) 式のようにシンプルな瞬时无効電流空間ベクトル検出式が得られる。

図2に(7)式に基づく瞬时无効電流空間ベクトル検出回路を示す。図2の検出回路は乗除算器7個、オペアンプ7個で構成されるアナログ回路である。また、三相三線式系統においては、瞬时无効電流成分の自由度は2であり、三相のうち二相分の瞬时无効電流成分を求めることで、残りの一相分の瞬时无効電流成分は従属となる。よって、

$$i_{w\perp}^* = -i_{u\perp}^* - i_{v\perp}^*$$

が成り立つ。(7) 式にこれを適用することによりさらに簡略化が進み、従来のものに比し乗算器は1個、そして、オペアンプは座標変換部が存在しないため大幅に低減されたシンプルな瞬时无効電流空間ベクトル検出回路が構成できることが明らかになった。

また、DSPなどソフトウェアで制御を構成する場合に

図2 瞬时无効電流空間ベクトル検出回路

Fig.2. Block Diagram of detecting circuit

は、座標変換を使用していないので、ルートの計算部分がなくなり精度が向上され、乗算器が1個、オペアンプが大幅に減ったことにより、演算速度がかなり短くなるものと思われる。

以上、本節では、クロスベクトル理論なる新しい補償理論について述べてきたが、提案してきた理論の検証のために、次章でシミュレーション、及び実験を行なう。

3. シミュレーション及び実験

本章では、前章で述べてきたクロスベクトル理論についての有用性について検証するために、シミュレーション並びに実験を行なう。

<3・1> シミュレーション

シミュレーションで使用する瞬时无効電力補償システムの原理図を図3に示す。シミュレーションでは、電源は三相平衡正弦波電圧、負荷は三相整流器を用い、整流器の直流出力電流は一定としている。また、瞬时无効電力補償装置は理想的な電流源とし、三相各相の瞬时无効電流の検出方法は、前章で示した(7)式を用いている。

図4に定常状態でのシミュレーション結果を示す。

図3 瞬时无効電力補償の原理図

Fig.3. Schematic Diagram of simulational instantaneous reactive power compensator

図4のシミュレーション結果から分かるように、瞬时无効電流が補償装置により補償されるため補償後の系統側の基

図4 定常時のシミュレーション結果

Fig.4. Simulation results of normal state

図5 実験システムの構成

Fig.5. A component of experimental system

本波力率は1になる。但し、瞬时有効電流の高調波成分を補償していないために系統側の電流波形は完全な正弦波とはならない⁽²⁾。

本節では、シミュレーション結果について示したが、次

図6 (a) 定常状態における実験結果
Fig.6(a). Experimental results of stationary state

図6 (b) 過渡状態における実験結果
Fig.6(b). Experimental results of transient state

節から、実験システム、並びに実験結果について述べる。

<3・2> 実験システム

図5に本実験システムの構成を示す。電源は、三相50Hz、220V、負荷には三相ダイオード整流器を用い、整流器の直流出力電流を一定とするため電流源（瞬時電流制御方式の精密電力増幅器）を挿入している。瞬时无効電力補償装置はIGBTで構成し、フィルタ用のリアクトルLとコンデンサC、平滑用のコンデンサCdを設けている。制御系の構成は、図2に示した検出回路、瞬時電流制御のためのヒステリシスコンパレータ（ヒステリシス幅、約300mA）、IGBT保護用である周波数リミッター（リミット値、約15kHz）とデッドタイム作成回路、IGBT駆動用のドライブ回路である。

<3・3> 実験結果

図6に瞬时无効電力補償を行なった時の定常状態と過渡状態においての実験結果を示す。

図6の e_u 、 i_{su} より、定常状態や過渡状態においても電源側の基本波力率は1となっており、シミュレーション波形とも一致している。本装置の制御回路は、乗除算器7個、オペアンプ7個という極めてシンプルな構成にもかかわらず、充分な制御が可能である。

以上、本章で行なったシミュレーション並びに実験より、定常状態のみならず過渡状態においても瞬時の無効電力補償が可能であると言える。したがって、提案したクロスベクトル理論の有用性が確認できた。

4. 結言

本論文では、筆者らが提案するクロスベクトル理論を用いることにより、瞬时无効電力補償システムの瞬时无効電流空間ベクトル検出回路が極めてシンプルに構成できることを理論的に示した。そして、シミュレーションと実験を通し本理論の有用性を検証した。

なお、本論文では三相三線式系統においての三次元クロスベクトルの適用について示したが、今後は、三相四線式系統への適用について研究を進めていく予定である。

（平成6年6月10日受付）

付録

（1）瞬时无効電力空間ベクトル $\mathbb{C}$ （クロスベクトル）と従来の無効電力との比較 クロスベクトル $\mathbb{C}$ の物理的意味について検討する。説明を容易にするため、ベクトル $\mathbf{e}$ とベクトル $\mathbf{i}$ が各々三相平衡正弦波電圧・電流空間ベクトルの時について、検討する。

$$\begin{bmatrix} e_u = E_m \sin \omega t \\ e_v = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ e_w = E_m \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_u = I_m \sin(\omega t + \theta) \\ i_v = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3 + \theta) \\ i_w = I_m \sin(\omega t - 4\pi/3 + \theta) \end{bmatrix}$$

$$\mathbb{C} = \mathbf{e} \times \mathbf{i}$$

$$= (e_v i_w - e_w i_v) \mathbf{x} + (e_w i_u - e_u i_w) \mathbf{y} + (e_u i_v - e_v i_u) \mathbf{z}$$

$$= \{E_m \sin(\omega t - 2\pi/3)\} \{I_m \sin(\omega t - 4\pi/3 + \theta)\} \mathbf{x} - \{E_m \sin(\omega t - 4\pi/3)\} \{I_m \sin(\omega t - 2\pi/3 + \theta)\} \mathbf{y} + \{E_m \sin(\omega t - 4\pi/3)\} \{I_m \sin(\omega t + \theta)\} \mathbf{z} - \{E_m \sin \omega t\} \{I_m \sin(\omega t - 4\pi/3 + \theta)\} \mathbf{y} + \{E_m \sin \omega t\} \{I_m \sin(\omega t - 2\pi/3 + \theta)\} \mathbf{z} - \{E_m \sin(\omega t - 2\pi/3)\} \{I_m \sin(\omega t + \theta)\} \mathbf{x}$$

$$= -(E_m I_m / 2) [\{\cos(2\omega t + \theta - 2\pi) - \cos(-\theta + 2\pi/3) - \cos(2\omega t + \theta - 2\pi) + \cos(-\theta - 2\pi/3)\} \mathbf{x} + \{\cos(2\omega t + \theta - 4\pi/3) - \cos(-\theta - 4\pi/3) - \cos(2\omega t + \theta - 4\pi/3) + \cos(-\theta + 4\pi/3)\} \mathbf{y} + \{\cos(2\omega t + \theta - 2\pi/3) - \cos(-\theta + 2\pi/3) - \cos(2\omega t + \theta - 2\pi/3) + \cos(-\theta - 2\pi/3)\} \mathbf{z}]$$

$$= (E_m I_m / 2) \{\sqrt{3} \sin \theta \mathbf{x} + \sqrt{3} \sin \theta \mathbf{y} + \sqrt{3} \sin \theta \mathbf{z}\}$$

$$= \sqrt{3} E I \sin \theta (\mathbf{x} + \mathbf{y} + \mathbf{z})$$

ここで、 $\mathbf{x} + \mathbf{y} + \mathbf{z}$ は各軸の単位ベクトルの和であることから、 $\sqrt{3} \mathbf{\gamma}$ に等しくなる。また、 $\mathbf{\gamma}$ はクロスベクトル $\mathbb{C}$ の単位ベクトルである（ $\mathbf{\gamma} = (1/\sqrt{3})(\mathbf{x} + \mathbf{y} + \mathbf{z})$ ）。

$$= \sqrt{3} E I \sin \theta \times \sqrt{3} \mathbf{\gamma}$$

$$= 3 E I \sin \theta \mathbf{\gamma}$$

上式より、 $\mathbf{\gamma}$ はクロスベクトル $\mathbb{C}$ の単位ベクトルであり、係数は従来の三相無効電力を表していることが分かる。

（平成6年6月10日受付）

文 献

- （1）高橋勲・藤原憲一郎・難波江章：「他励サイリスタ変換器を用いた障害電流補償システム」電学論B、101、121～128（昭56-3）
- （2）赤木泰文・金沢喜平・藤田光悦・難波江章：「瞬时无効電力の一般化理論とその応用」電学論B、103、483～490（昭58-7）
- （3）矢野昌雄：「パワーエレクトロニクスによる無効電力と高調波電流の制御」電気学会半導体電力変換研究会、SPC-92-6（平4）
- （4）戸賀澤智・中野博民・難波江章：「クロスベクトルを用いた無効電力補償」、平5電気学会産業応用部門全国大会、NO. 97
- （5）戸賀澤智・村瀬剛・中野博民・難波江章：「クロスベクトル理論を用いた無効電力補償システム」電気学会半導体電力変換研究会、SPC-93-61（平5）

中野 博民 (正員)

昭和32年7月31日生。同55年3月長岡技術科学大学電子機器工学課程卒業。同57年3月同大学院工学研究科修了。同62年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。平成5年東京工芸大学助手。現在に至る。

誘導電動機可変速駆動システム、半導体電力変換器、無効電力補償システムの研究に従事。工学博士。

村瀬 剛 (学生員)

昭和46年10月7日生。平成2年3月北海道帯広三条高等学校普通科卒業。同6年3月東京工芸大学工学部電子工学科卒業。同年4月東芝システムテクノロジー(株)入社、現在に至る。

戸賀澤 智 (学生員)

昭和46年1月8日生。平成5年3月東京工芸大学工学部電子工学科卒業。同4年月同大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程入学。現在に至る。

難波江 章 (終身員)

大正13年9月13日生。昭和22年9月東京大学電気工学科卒業。同26年9月東京芝浦電気東芝(株)(現、東芝)入社。同53年4月長岡技術科学大学教授。平成2年4月東京工芸大学教授。工学博士。主として、回転

機の高速制御法やパワーエレクトロニクスとその応用システムに関する研究開発に従事。現在に至る。IEEE Fellow。昭和55年、58年IEEE/IAS Committee Prize Paper Award、昭和60、平成3年電気学会論文賞。'91 IEEE-IAS Tr. Paper Award。平成5年電気学会業績賞。IEEE会員。