中性線電流分離合成法による 三相四線式系統の瞬時無効電力補償

正 員 中野 博民 (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)

准 員 村瀬 剛 (東芝システムテクノロジー)

Instantaneous Reactive Power Compensation Based on Neutral Line Current Separating and Combining Method

Hirokami Nakano, Member, Satoshi Togasawa, Student Member,

Akira Nabae, Life Member (Tokyo Institute of Polytechnics)

Tsuyoshi Murase, Associate (TOSHIBA SYSTEM TECHNOLOGY Co.,Ltd)

Instantaneous compensation theory of reactive power is conventionally based on coordinate transformation method. That is, three phase voltages and currents on three dimensional coordinate are transformed into $\alpha\beta$ coordinate or rotating coordinate quantities. Therefore, it is unavoidable for the control system to be complicated and also it is difficult to understand physical meanings of voltages and currents on the original three dimensional coordinate.

The authors have been proposed the instantaneous reactive power compensation theory using a three dimensional cross vector. 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 is essentially simpler than any conventional reactive power compensation system based on such coordinate transformations.

In this paper, we apply the Cross vector theory to three-phase four-wire system. Since there is a neutral line in three-phase four-wire system, simplification of a reactive power compensation system is very difficult. Here, the authors develop a new method, that is, neutral line current separating and combining method. Applying the neutral line current separating and combining method to the Cross vector theory, control system of the instantaneous reactive power compensator for the three-phase four-wire system can be simplified.

キーワード：三次元直交座標、瞬時無効電力補償、三次元クロスベクトル、三相四線式系統、中性線電流分離合成法、中性線電流空間ベクトル

1. 緒論

従来、瞬時の無効電力の補償方法は、座標変換を出発点として理論の展開を行なっている為、制御システムが複雑であった^{(1)~(4)}。先に、筆者らはクロスベクトル理論を用いた新しい補償システムを提案した。本理論は、従来の座標変換を必要とせず、直接三次元の直交座標系において三相一括して瞬時の無効電力の補償ができ、また、その制御

システムは極めてシンプルであることを示した。

本論文では、これまで示してきた三相三線式系統の補償システムの応用として三相四線式系統の補償システムについて示している。三相四線式系統の場合、中性線が存在している為、本理論をそのまま適用するとシステムの構成の簡略化が非常に困難である。そこで筆者らは、三相四線式系統へのクロスベクトル理論の適用法として、中性線電流分離合成法を提案する。この新しい概念を導入することに

より、三相四線式系統でもこれまでの三相三線式系統とほとんど変わらず制御システムが簡略化されることを論じている。また、その中性線電流が本理論での三次元空間においてどのようなものであるか、三相三線式系統での瞬时无効電流空間ベクトルとの関係をふまえ物理的意味と共に示している。また、三相半波整流回路を負荷とした時に発生する瞬时无効電力の補償効果を示しているが、中性線電流分離合成法を用いて容易に補償が行なえることの有用性を、シミュレーション及び、実験において検証している。

2. クロスベクトル理論とその理論の拡張

本章では、先に筆者らが提案したクロスベクトル理論、及び、これまで示してきた三相三線式系統の応用として三相四線式系統の瞬时无効電力の補償システムの構成について示している。三相四線式系統の場合は、各相に中性線電流成分が存在しているので、その成分を分離、合成させることにより制御システムが簡略化される。また、その中性線電流が三次元直交座標系でどのようなものであるか示している。図1に三相四線式系統の概略図を示す。

図1 三相四線式系統の概略図

Fig.1. Outline Figure of three-phase four-wire system

< 2・1 > クロスベクトル理論 瞬时无効電流空間ベクトル $\mathbf{i}_\perp$ の一般式は、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 $\mathbf{i}$ ($\mathbf{i} = i_u \mathbf{x} + i_v \mathbf{y} + i_w \mathbf{z}$) との外積である三次元クロスベクトル $\mathbf{C}$ により表わされる。

$$\mathbf{C} = \mathbf{e} \times \mathbf{i} = \begin{vmatrix} \mathbf{x} & \mathbf{y} & \mathbf{z} \\ e_u & e_v & e_w \\ i_u & i_v & i_w \end{vmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

$$\mathbf{i}_\perp = \frac{\mathbf{C} \times \mathbf{e}}{\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}} \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C} \times \mathbf{e} &= (\mathbf{e} \times \mathbf{i}) \times \mathbf{e} \\ &= \{(e_v^2 + e_w^2) i_u - (e_w i_w + e_v i_v) e_u\} \mathbf{x} \\ &\quad + \{(e_w^2 + e_u^2) i_v - (e_w i_w + e_u i_u) e_v\} \mathbf{y} \\ &\quad + \{(e_v^2 + e_u^2) i_w - (e_v i_v + e_u i_u) e_w\} \mathbf{z} \end{aligned} \dots\dots\dots (3)$$

$$\mathbf{e} \cdot \mathbf{e} = e_u^2 + e_v^2 + e_w^2 \dots\dots\dots (4)$$

よって、

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

図2に上記(5)式に基づいた瞬时无効電流空間ベクトル検出回路を示す。

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

図2の検出回路は乗除算器15個、オペアンプ10個で構成されるアナログ回路であるが、従来の補償理論で構成したものと比較すると乗除算器の個数が増加している。

< 2・2 > 三相四線式系統のクロスベクトル理論 クロスベクトル理論の拡張として、三相四線式系統における本理論の展開である中性線電流分離合成法を以下に示す。また、図3に中性線電流分離合成原理図を示す。

図3 中性線電流分離合成原理図

Fig.3. Neutral line current separating and combining method

三相四線式系統の場合、中性線電流空間ベクトル $\mathbf{i}_N$ は、

$$\mathbf{i}_N = i_u \mathbf{x} + i_v \mathbf{y} + i_w \mathbf{z} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、あらかじめ各相の中性線電流成分のみを先に分離させ、三相三線式系統で用いた演算回路をそのまま使用することを考案した。そして、三相三線式系統で用いた演算回路で演算を行った後に、各相の電流にあらためて中性線電流成分を合成させることにより、三相四線式系統の補償電流が得られることになる。ここで、三相各相の電流を以下のように定義する。

$$\left[\begin{array}{l} i_u = i_u' + i_n \\ i_v = i_v' + i_n \\ i_w = i_w' + i_n \end{array} \right] \dots\dots\dots (7)$$

i_n は各相の中性線電流成分であり、その値は等しい。よって、

$$i_N = i_u + i_v + i_w = 3 i_n$$

$$\therefore i_n = (1/3)(i_u + i_v + i_w) \dots\dots (8)$$

となる。また、

$$i_u + i_v + i_w = i_u' + i_v' + i_w' + 3 i_n$$

より、

$$i_u' + i_v' + i_w' = 0 \dots\dots\dots (9)$$

となることがわかる。

従って、瞬時電流空間ベクトル $\mathbf{i}$ は、以下の(10)式のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{i} &= i_u \mathbf{x} + i_v \mathbf{y} + i_w \mathbf{z} \\ &= (i_u' + i_n) \mathbf{x} + (i_v' + i_n) \mathbf{y} \\ &\quad + (i_w' + i_n) \mathbf{z} \dots\dots (10) \end{aligned}$$

これを用いて理論の展開を示す。

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= \mathbf{e} \times \mathbf{i} \\ &= (e_v i_w - e_w i_v) \mathbf{x} + (e_w i_u - e_u i_w) \mathbf{y} \\ &\quad + (e_u i_v - e_v i_u) \mathbf{z} \\ &= \{e_v(i_w' + i_n) + (e_u + e_v)(i_v' + i_n)\} \mathbf{x} \\ &\quad + \{(-e_u - e_v)(i_u' + i_n) - e_u(i_w' + i_n)\} \mathbf{y} \\ &\quad + \{e_u(i_v' + i_n) - e_v(i_u' + i_n)\} \mathbf{z} \\ &= \{e_v(-i_u' - i_v') + (e_u + e_v)i_v'\} \mathbf{x} \\ &\quad + \{e_v i_n + (e_u + e_v)i_n\} \mathbf{x} \\ &\quad + \{(-e_u - e_v)i_u' + e_u(i_u' + i_v')\} \mathbf{y} \\ &\quad + \{(-e_u - e_v)i_n - e_u i_n\} \mathbf{y} \\ &\quad + (e_u i_v' - e_v i_u') \mathbf{z} \\ &\quad + (e_u i_n - e_v i_n) \mathbf{z} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= (e_u i_v' - e_v i_u') (\mathbf{x} + \mathbf{y} + \mathbf{z}) \\ &\quad + (2e_v + e_u)i_n \mathbf{x} + (-2e_u - e_v)i_n \mathbf{y} \\ &\quad + (e_u - e_v)i_n \mathbf{z} \\ &= \{(e_u i_v' - e_v i_u') + (2e_v + e_u)i_n\} \mathbf{x} \\ &\quad + \{(e_u i_v' - e_v i_u') \\ &\quad + (-2e_u - e_v)i_n\} \mathbf{y} \\ &\quad + \{(e_u i_v' - e_v i_u') \\ &\quad + (e_u - e_v)i_n\} \mathbf{z} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} A &= (e_u i_v' - e_v i_u') + (2e_v + e_u)i_n \\ B &= (e_u i_v' - e_v i_u') + (-2e_u - e_v)i_n \\ C &= (e_u i_v' - e_v i_u') + (e_u - e_v)i_n \end{aligned}$$

とすると、

$$\mathbf{C} \times \mathbf{e} = \begin{vmatrix} \mathbf{x} & \mathbf{y} & \mathbf{z} \\ A & B & C \\ e_u & e_v & e_w \end{vmatrix}$$

となる。従って、

$$\begin{aligned} \mathbf{C} \times \mathbf{e} &= (B e_w - C e_v) \mathbf{x} + (C e_u - A e_w) \mathbf{y} \\ &\quad + (A e_v - B e_u) \mathbf{z} \\ &= \{(e_u i_v' - e_v i_u') \\ &\quad + (-2e_u - e_v)i_n\} e_w \\ &\quad - \{(e_u i_v' - e_v i_u') \\ &\quad + (e_u - e_v)i_n\} e_v \mathbf{x} \\ &\quad + \{(e_u i_v' - e_v i_u') \\ &\quad + (e_u - e_v)i_n\} e_u \\ &\quad - \{(e_u i_v' - e_v i_u') \\ &\quad + (2e_v + e_u)i_n\} e_w \mathbf{y} \\ &\quad + \{(e_u i_v' - e_v i_u') \\ &\quad + (2e_v + e_u)i_n\} e_v \\ &\quad - \{(e_u i_v' - e_v i_u') \\ &\quad + (-2e_u - e_v)i_n\} e_u \mathbf{z} \\ &= (e_u i_v' - e_v i_u') \\ &\quad \times \{(e_w - e_v) \mathbf{x} + (e_u - e_w) \mathbf{y} \\ &\quad + (e_v - e_u) \mathbf{z}\} \\ &\quad + 2(e_u^2 + e_v^2 + e_u e_v) i_n (\mathbf{x} + \mathbf{y} + \mathbf{z}) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} 2e_u^2 + 2e_v^2 + 2e_u e_v &= e_u^2 + e_v^2 + e_u^2 + e_v^2 + 2e_u e_v \\ &= \{e_u^2 + e_v^2 + (-e_u - e_v)^2\} \\ &= e_u^2 + e_v^2 + e_w^2 \quad (= \mathbf{e} \cdot \mathbf{e}) \\ &= 2\{(e_u + e_v)^2 - e_u e_v\} \end{aligned}$$

より、これを(2)式に代入し、三相四線式系統の瞬時無効電流空間ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_{\perp}$ を求めると、(12)式となる。

$$\dot{\mathbf{i}}_{\perp} = \frac{\begin{bmatrix} (e_u i_v' - e_v i_u') \\ \times \{(e_w - e_v)x + (e_u - e_w)y \\ + (e_v - e_u)z\} \end{bmatrix}}{2\{(e_u + e_v)^2 - e_u e_v\} + i_n(x + y + z)} \quad \dots (12)$$

図4は上式に基づいて構成した中性線電流分離合成法を用いた瞬時無効電流空間ベクトル検出回路である。この検出回路は、乗除算器7個、オペアンプ15個で構成されるアナログ回路である。中性線電流分離合成法を適用したことにより前述の図2の検出回路に比べ、乗除算器の個数が8個も簡略化された構成となっている。

図4 中性線電流分離合成法を用いた瞬時無効電流空間ベクトル検出回路

Fig.4. Block Diagram of detecting circuit using neutral line current separating and combining method

クロスベクトル理論の応用として三相四線式系統への適用を示した。提案した中性線電流分離合成法を用いることにより、かなりシステムが簡略化されることがわかり、また、図2の検出回路に比べ、図4の検出回路の乗除算器が格段に減少されることが伺える。

<2・3> 中性線電流空間ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_N$ の検討

(12)式において、中性線電流成分である第二項を零にすると第一項のみが残るので、第一項目は三相三線式系統で用いられた瞬時無効電流空間ベクトル(以下、三相四線式系統の瞬時無効電流空間ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_{\perp}$ と区別するため三相三線式系統の瞬時無効電流空間ベクトルを $\dot{\mathbf{i}}_{\perp}'$ と表記する。)と同じであり⁽⁵⁾⁽⁷⁾、第二項目は中性線電流空間ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_N$ である。従って(12)式は、(13)式となる。

$$\dot{\mathbf{i}}_{\perp} = \dot{\mathbf{i}}_{\perp}' + \dot{\mathbf{i}}_N \quad \dots (13)$$

三相四線式系統の瞬時電力は、

$$P = \mathbf{e} \cdot \dot{\mathbf{i}} \quad \dots (14)$$

より求められる。

瞬時電流空間ベクトル $\dot{\mathbf{i}}$ は、瞬時有効電流空間ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_{\parallel}$ と瞬時無効電流空間ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_{\perp}$ で構成されているので、(15)式となる。

$$\dot{\mathbf{i}} = \dot{\mathbf{i}}_{\parallel} + \dot{\mathbf{i}}_{\perp} \quad \dots (15)$$

これを(14)式に代入すると、(16)式となる。

$$P = \mathbf{e} \cdot \dot{\mathbf{i}}_{\parallel} + \mathbf{e} \cdot \dot{\mathbf{i}}_{\perp} = P_{\parallel} + P_{\perp} \quad \dots (16)$$

上式の $P_{\parallel}$ は瞬時有効電力であり、瞬時電圧空間ベクトル $\mathbf{e}$ とそれに平行な瞬時有効電流空間ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_{\parallel}$ との内積である。また、上式の $P_{\perp}$ は瞬時無効電力であり、瞬時電圧空間ベクトル $\mathbf{e}$ とそれに垂直な平面に存在する瞬時無効電流空間ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_{\perp}$ との内積である。

ここで、瞬時無効電力 $P_{\perp}$ に(13)式を代入すると、(17)式のように変形できる。

$$\begin{aligned} P_{\perp} &= \mathbf{e} \cdot \dot{\mathbf{i}}_{\perp} = \mathbf{e} \cdot (\dot{\mathbf{i}}_{\perp}' + \dot{\mathbf{i}}_N) \\ &= \mathbf{e} \cdot \dot{\mathbf{i}}_{\perp}' + \mathbf{e} \cdot \dot{\mathbf{i}}_N \\ &= P_{\perp}' + P_N \quad \dots (17) \end{aligned}$$

上式の $P_{\perp}'$ は三相三線式系統での瞬時無効電力であり、 P_N は中性線電力である。

$$\dot{\mathbf{i}}_{\perp}' = i_{\perp u}' x + i_{\perp v}' y + i_{\perp w}' z$$

$$\dot{\mathbf{i}}_N = i_N x + i_N y + i_N z \quad \dots (18)$$

として、三相四線式系統の瞬時無効電力 $P_{\perp}$ を求めると、

$$\begin{aligned} P_{\perp} &= P_{\perp}' + P_N \\ &= \mathbf{e} \cdot \dot{\mathbf{i}}_{\perp}' + \mathbf{e} \cdot \dot{\mathbf{i}}_N \\ &= \{e_u i_{\perp u}' + e_v i_{\perp v}' + e_w i_{\perp w}'\} \\ &\quad + \{(e_u + e_v + e_w) i_N\} \quad \dots (19) \end{aligned}$$

となり、三相電圧が瞬時平衡、即ち、 $e_u + e_v + e_w = 0$ であると、

$$P_N = \mathbf{e} \cdot \dot{\mathbf{i}}_N = 0 \quad \dots (20)$$

であるから、

$$\begin{aligned} P_{\perp} &= P_{\perp}' \\ &= e_u i_{\perp u}' + e_v i_{\perp v}' + e_w i_{\perp w}' \quad \dots (21) \end{aligned}$$

となり、三相三線式系統の瞬時無効電力と同様になることがわかる。また、中性線電力 P_N が零になることより、中性線電流は電力に全く寄与しないことも明白である。

三相四線式系統の場合、瞬時無効電流空間ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_{\perp}$ は、(12)式のように二つのベクトルで成り立っており、中性線電流空間ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_N$ は瞬時電圧空間ベクトル $\mathbf{e}$ と三相三線式系統の瞬時無効電流空間ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_{\perp}'$ で構成される平面に対して垂直となる。これについて、以下に証明すると、(12)式より、ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_{\perp}'$ とベクトル $\dot{\mathbf{i}}_N$ の成分はそれぞれ、 $A' = e_u i_v' - e_v i_u'$ とすると、

$$\dot{\mathbf{i}}_{\perp}' = \frac{A' (e_w - e_v)}{\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}} \mathbf{x} + \frac{A' (e_u - e_w)}{\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}} \mathbf{y} + \frac{A' (e_v - e_u)}{\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}} \mathbf{z}$$

$$\dot{\mathbf{i}}_N = i_N \mathbf{x} + i_N \mathbf{y} + i_N \mathbf{z}$$

この二つのベクトルの内積は、

$$\dot{\mathbf{i}}_{\perp}' \cdot \dot{\mathbf{i}}_N = \frac{A' (e_w - e_v) i_N}{\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}} + \frac{A' (e_u - e_w) i_N}{\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}} + \frac{A' (e_v - e_u) i_N}{\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}} = 0$$

より、 $\dot{\mathbf{i}}_{\perp}' \perp \dot{\mathbf{i}}_N$ となる。図5にベクトル $\dot{\mathbf{i}}_{\perp}'$ とベクトル $\dot{\mathbf{i}}_N$ の概念図を示す。

図5 ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_{\perp}'$ とベクトル $\dot{\mathbf{i}}_N$ の概念図
Fig.5. Concept of vector $\dot{\mathbf{i}}_{\perp}'$ and vector $\dot{\mathbf{i}}_N$

これより、三相四線式系統の瞬時無効電流空間ベクトル

$\dot{\mathbf{i}}_{\perp}$ は、三相三線式系統の瞬時無効電流空間ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_{\perp}'$ と中性線電流空間ベクトル $\dot{\mathbf{i}}_N$ の二つのベクトルから成り立っている。個々のベクトルは完全に独立されたベクトルであることがわかる。

< 2・4 > 本提案理論と従来理論⁽²⁾との比較

前節まで、座標変換に依存しない瞬時無効電力補償理論について述べたが、本節では従来理論で行なわれてきた瞬時有効電流の検出、瞬時無効電流の基本波と高調波成分との分離等について本提案理論を用いての考察を行なう。

先ず瞬時有効電流の検出であるが、これは、 $\dot{\mathbf{i}} - \dot{\mathbf{i}}_{\perp}$ で求めることができるので、減算器を3個程度つけることにより簡単に検出することが可能である。

次に、瞬時無効電流の基本波と高調波の分離であるが、負荷電流から中性線電流成分を除去し、(1)式を用いて $\mathbf{C}$ を求めLPFを用いて $\mathbf{C}$ を検出し、(2)式で演算させることにより瞬時基本波無効電流が得ることができる。また、 $\mathbf{C}$ をHPFに通し $\mathbf{C}$ を検出し、(2)式で演算させることにより瞬時高調波無効電流が得ることができる。従って、基本的に分離は可能である。しかし、検出回路は多少複雑になることが予想される。

更に本論文と文献(2)の比較を行なうと、文献(2)では中性線電流について十分考慮されていないため、三相四線式系統の瞬時無効電力補償は困難であると思われる。それに対し、筆者らの提案したクロスベクトル理論、中性線電流分離合成法を用いることで三相四線式系統の瞬時無効電力補償が容易に行なえる。

本論文では、瞬時無効電力補償を主体をおいているので、有効電流補償、また基本波と高調波の分離等は扱わなかった。

3. シミュレーション結果

本章では、前章で示した理論の展開についての有用性をシミュレーションにより検証する。

シミュレーションで使用する瞬時無効電力補償システムの原理図を図6に示す。負荷には三相サイリスタ半波整流回路を用い、整流器の直流出力電流は一定としている。また、瞬時無効電力補償装置は理想的な電流源とし、三相各相の瞬時無効電流の検出方法は、前章で示した(12)式を用いている。図7にサイリスタの制御角 $\alpha = 0^\circ$ と $\alpha = 90^\circ$ の時のシミュレーション結果を示す。図8に、u相線を欠線させ負荷電流を三相半波から二相半波に変更した場合の定常状態のシミュレーション結果を示す。

図7、図8のシミュレーション結果から分かるように、瞬時無効電流が補償装置により出力されるため補償後の系統側の基本波力率は1になる。但し、瞬時高調波有効電流を補償していないために、系統電流は完全な正弦波とはならない。

図6 瞬时无効電力補償の原理図
Fig.6. Schematic Diagram of simulational instantaneous reactive power compensator

図7 (a) 三相サイリスタ半波整流負荷時のシミュレーション結果 ($\alpha = 0^\circ$)
Fig.7(a). Simulation results of three-phase thyrister half-wave rectifier circuit ($\alpha = 0^\circ$)

図7 (b) 三相サイリスタ半波整流負荷時のシミュレーション結果 ($\alpha = 90^\circ$)
Fig.7(b). Simulation results of three-phase thyrister half-wave rectifier circuit ($\alpha = 90^\circ$)

図8 二相ダイオード半波整流回路負荷時のシミュレーション結果
Fig.8. Simulation result of two-phase diode half-wave rectifier circuit

4. 実験システムの構成

図9に本実験システムの構成を示す。電源は、三相50 [Hz]・220 [V]、負荷には三相ダイオード半波整流回路を用い、整流器の直流出力電流を一定とするため電流源を挿入している。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4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、IGBT保護用である周波数リミッター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。

5. 実験結果

図10はダイオード整流回路を負荷とした時の定常状態での実験波形である。電圧 e_u と系統側の電流 i_{su} からもわかるように基本波力率は1であり、また、高調波電流においても良好な補償効果が得られ、ほぼ正弦波状の結果が得られた。図11に示すのは、本理論の応用として負荷電流をシミュレーション同様、三相半波整流から二相半波整流に変更した場合の定常状態での実験波形である。三相半波整流時とは異なり二相半波整流を負荷とした場合、各相は平衡ではなく不平衡であるが三相半波整流時と同様に瞬時に補償している。また、過渡状態(図12)においても瞬時に補償電流が出力されており、良好な補償結果が得られている。

図9 実験システムの構成
Fig.9. Configuration of experimental system

図10 三相半波整流負荷時の実験結果
Fig.10. Experimental result of three-phase half-wave rectifier circuit

図 1 1 二相半波整流負荷の実験結果

Fig.11. Experimental result of two-phase half-wave rectifier circuit

図 1 2 過渡状態での実験結果

Fig.12. Experimental result of transient state

6. 結言

本論文では、先に提案したクロスベクトル理論の応用として三相四線式系統における瞬時無効電力補償システムの原理と構成を示した。クロスベクトル理論をそのまま展開するより、中性線電流分離合成法を用いることで、三相四線式系統における瞬時無効電力補償システムが、これまで示してきた三相三線式系統の補償システムとほとんど変わらず非常にシンプルであり、シミュレーション、及び、実験において良好な補償効果が得られたことを示した。また、負荷電流が三相平衡ではなく三相不平衡、並びに、定常状態と過渡状態でも瞬時に補償できることも同様に示した。

以上のように、いかなる状態でも瞬時に制御を行なうことが出来る本理論を用いた制御システムは三相四線式系統を電力系統で用いているアメリカなどでは、非常に有効であると思われる。今後、この制御システムを三相四線式系統の不平衡負荷に適用する実験を展開してゆく予定である。

(平成6年9月22日受付、平成7年1月9日再受付)

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・金澤喜平・藤田光悦・難波江章：「瞬時無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) 松川誠・高橋勲・難波江章：「他励サイリスタ変換器を用いた万能障害電力補償装置」電気学会半導体電力変換研究会、SPC-80-26 (昭55)
- (4) 木幡雅一・塩田剛・中村充利・阿藤聡：「SIサイリスタを用いた高調波・無効電力補償装置の試作」電気学会電力技術研究会、PE-86-151 (昭61)
- (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による無効電力補償」電学論D、114、340～341 (平6-3)
- (6) 村瀬剛・戸賀澤智・中野博民・難波江章：「中性線電流分離合成法による無効電力補償」電学論D、114、800～801 (平6-7/8)
- (7) 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)
- (8) 村瀬剛・戸賀澤智・中野博民・難波江章：「クロスベクトル理論の応用」電気学会半導体電力変換研究会、SPC-94-3 (平6)

- (9) 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
- (10) 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装置の過渡特性」、平6電気学会全大、No. 633
- (11) 村瀬剛・戸賀澤智・中野博民・難波江章：「三次元クロスベクトルを用いた無効電力補償」、平6電気学会全大、No. 632
- (12) 中島康博・中野博民・難波江章：「三相四線式無効電力補償における系統直流電流補償効果」、平6電気学会全大、No. 631

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。

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。同年4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(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開発研究に従事。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。

村瀬 剛 (准員)

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。