三相回路の瞬時有効無効電流および 瞬時有効無効電力の新しい定義とその応用

終身員 難波江 章 (東京工芸大)

学生員 吉川 章 (東京工芸大)

正員 曹 立 宇 (東京工芸大)

正員 田中俊彦 (職業能開大)

A New Definition of Instantaneous Active-Reactive Current and Power

Based on Instantaneous Space Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits

Akira Nabae, Life Member, Akira Yoshikawa, Student Member, Liyu Cao, Member (Tokyo Institute of Polytechnics)

Toshihiko Tanaka, Member (The Polytechnic University, Japan)

Conventionally, the active, reactive and apparent powers in three-phase circuits have been defined by extending the concept based on the RMS values of voltage and current with respect to time in single-phase circuits. Applying the definition based on single-phase circuits to three-phase systems with non-sinusoidal conditions has resulted in many options in the methods of power properties description, interpretation and compensation, and this has led to a controversy on which method should be chosen, or on how power quantities should be defined. This paper proposes a new definition of the instantaneous active-reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits. The instantaneous active-reactive power and current are defined in the voltage-current vector plane without any special fictitious power. The new definition proposed here leads to the same formulas as the conventional ones. The authors claim that this is a great advantage of the new definition. Comparing it to the p - q theory, we discuss the new definition in detail. It is shown that using the new definition one is able to calculate the instantaneous active-reactive power and current directly from the voltage and current space vectors. The new definition, thus, offers a lucid concept of electric power in three-phase circuits. Using digital simulation, an application example is shown to confirm the validity and practicability of the new definition.

キーワード：瞬時有効無効電流, 瞬時有効無効電力, 三相瞬時有効無効電流, 三相瞬時有効無効電力, p - q 理論, 瞬时无効電力補償

1. まえがき

三相回路の電力は、平均値の概念を用いた単相回路上の定義を拡張することにより定義されている。従来の単相回路上で定義された電力を高調波を含む三相回路へ適用する場合、高調波を含む電力についての定義に関し対称座標法や Park の定理を用いた検討結果が報告されている^{(1)~(4)}。しかしながら、時間領域における三相瞬時有効無効電力および電流の定義について詳細に検討されていないように思われる。1983 年に発表された p - q 理論は、従来の瞬時有効電力 p に加え瞬時虚電力 q を新たに定義し、三相回路の瞬時有効無効電力及び瞬時有効無効電流の物理的な意味合いを初めて明快に説明した⁽⁵⁾。この p - q 理論では、 α - β 座標上の電圧電流ベクトルから p および q を一度計算し、これらから瞬

時有効無効電流を定義している。このため、三相回路の瞬時有効無効電流の物理的な意味を初学者が理解することは難しいように思われる。一方、Willems 氏さらに Marschalko 氏等は瞬時電流ベクトルを瞬時電圧ベクトルに対して、同相成分と直交成分に分解し瞬時有効電流および瞬时无効電流を定義している^{(6),(7)}。しかしながら、これらの理論において瞬時有効無効電力の物理的な意味について、著者らの知る限り、詳細な検討はなされていないように思われる。

本論文では、極座標上の瞬時空間電圧電流ベクトルを用いた三相瞬時有効無効電流および三相瞬時有効無効電力の新しい定義を提案する⁽⁸⁾。これは、極座標上の瞬時空間電圧電流ベクトルから同一平面内で、直接、三相瞬時有効無効電流を定義可能な点に特長があり、瞬時虚電力の概念を用い

ることなく三相回路における瞬時有効無効電力及び電流の物理的な意味をより明快に説明することができる。また、平均値の概念を用いた従来の定義と本論文の定義が同一形式となることを示し、本論文で提案した三相瞬時有効無効電力の定義の有効性を明らかにする。次に、本論文で提案した新しい定義を p-q 理論と比較し、その物理的な意味を詳細に検討する。さらに、本論文で提案した三相瞬時有効無効電流の新しい定義を用いて三相瞬时无効電力補償装置を構成し、工学的な有用性を計算機シミュレーションにより確認する⁽⁹⁾。

2. 三相回路の瞬時有効無効電流と瞬時有効無効電力の新しい定義

本章では、提案する新しい三相瞬時有効無効電流と三相瞬時有効無効電力の定義を詳細に述べ、その物理的な意味を明確にする。また、従来の理論との比較を行い新しい定義の有効性を明らかにする。

<2.1> 三相瞬時有効無効電流と三相瞬時有効無効電力の新しい定義 三相非正弦波(各種高調波を含む歪み波)に対して、瞬時電圧・電流空間ベクトルは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{2}{3}}(v_a + v_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + v_c e^{j\frac{4\pi}{3}}) \\ &= v(t) e^{j\theta(t)} \\ i &= \sqrt{\frac{2}{3}}(i_a + i_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_c e^{j\frac{4\pi}{3}}) \\ &= i(t) e^{j\{\theta(t) + \phi(t)\}} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 v_a, v_b, v_c は各相の瞬時電圧であり、 i_a, i_b, i_c は各相瞬時電流である。また、 $v(t), i(t)$ は瞬時空間ベクトルの大きさである。これらのベクトルを α - β 座標上で表すと図 1 となる。 θ は電圧基準軸、即ち、 α 軸からの電圧空間ベクトル回転角を表している。(1) 式において、 $\phi(t)$ はそれ自身で正負の符号を持ち電圧空間ベクトルに対する電流空間ベクトルの“進み”または“遅れ”の瞬時角度を表す。このとき、単相回路における時間軸で考えている“進み・遅れ”の概念とは異なり、三相一括した瞬時空間ベクトルで表した“進み・遅れ”は、どの瞬時にも一義的に定められている点に注意しなければ

図1 α - β 座標上の電圧・電流ベクトル

Fig.1. Space vectors on α - β orthogonal coordinates.

図2 γ - δ 座標上の電圧・電流ベクトル

Fig.2. Space vectors on γ - δ coordinates.

ならない。 $v(t), i(t), \phi(t)$ が時変数で表されているのは歪波を取り扱うためであり、平衡三相正弦波の場合、定常状態で $v(t)$ および $i(t)$ が一定値となる。瞬時角速度 $\dot{\theta}(t) = d\theta(t)/dt$ についても同様で、歪波の場合は時変数であるが平衡三相正弦波の場合、定常状態で一定値となる。ここで、電圧ベクトル v を基準に γ - δ 座標上に回転座標変換する。このとき、(1) 式の電圧・電流ベクトルは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} v &= v(t) \\ i &= i(t) e^{j\phi(t)} \end{aligned} \quad (2)$$

図 2 は γ - δ 座標上の電圧・電流空間ベクトルを示している。図 2 において、瞬時電流空間ベクトル i を瞬時電圧空間ベクトル v に平行な成分と垂直な成分に分解する^{(6),(7),(11)}。このとき、これらの物理量は三相一括したものであることに着目し、それぞれ三相瞬時有効電流 i_p 、三相瞬时无効電流 i_q と定義する。このとき、三相瞬時有効電流 i_p と三相瞬时无効電流 i_q は次式で定義される。

$$\begin{aligned} i_p(t) &= i(t) \cos \phi(t) \\ i_q(t) &= i(t) \sin \phi(t) \end{aligned} \quad (3)$$

さらに、(3) 式の i_p, i_q をそれぞれ 2 種類の成分に分解する。即ち、

$$\begin{aligned} i_p(t) &= \bar{i}_p + \tilde{i}_p \\ i_q(t) &= \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{aligned} \quad (4)$$

を得る。(4) 式において、

$\bar{i}_p$: 基本波に起因する三相瞬時有効電流

$\tilde{i}_p$: 高調波または不平衡に起因する三相瞬時有効電流

$\bar{i}_q$: 基本波に起因する三相瞬时无効電流

$\tilde{i}_q$: 高調波または不平衡に起因する三相瞬时无効電流

となる⁽¹⁰⁾。なお、(1) 式ならびに(2) 式から明かなように、(3) 式の三相瞬時有効電流 i_p 、三相瞬时无効電流 i_q は、電圧に高調波成分が含まれている場合においても常に定義可能である。

次に、(3) 式の三相瞬時有効電流 i_p 、三相瞬时无効電流 i_q に基づく電力量をそれぞれ三相瞬時有効電力 $p(t)$ 、三相瞬時

無効電力 $q(t)$ と名付け次式で定義する*。

$$\begin{aligned} p(t) &= v(t) i_p(t) \\ &= v(t) i(t) \cos \phi(t) \\ &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q(t) &= v(t) i_q(t) \\ &= v(t) i(t) \sin \phi(t) \\ &= \bar{q} + \tilde{q} \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

三相瞬時有効・無効電流と同様に, (5) 式の $\bar{p}$, $\tilde{p}$, $\bar{q}$ および $\tilde{q}$ は,

$\bar{p}$: 基本波に起因する三相瞬時有効電力

$\tilde{p}$: 高調波または不平衡に起因する三相瞬時有効電力

$\bar{q}$: 基本波に起因する三相瞬時無効電力

$\tilde{q}$: 高調波または不平衡に起因する三相瞬時無効電力

を表わしている⁽¹⁰⁾。本論文で提案した新しい定義では, 三相瞬時有効・無効電流および三相瞬時有効・無効電力を瞬時電圧・電流ベクトルと同一平面内で表すことができる。また, p-q 理論に比べ, 瞬時実電力 p ならびに瞬時虚電力 q を求めることなく三相瞬時有効・無効電流を直接定義可能である。これが, 極座標形式を用いた本論文の新しい定義の大きな利点であると考えられる。

<2.2> 平均値の概念に基づく単相回路上で定義された従来の有効無効電力との整合性 次に, 平均値の概念を用いて単相回路上で定義された従来理論との対比を行う。正弦波三相回路において, 皮相電力, 有効電力, 無効電力および力率は以下のように定義されている。

$$\begin{aligned} P &= 3VI \cos \phi \\ Q &= 3VI \sin \phi \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2} \\ &= 3VI \\ P.F. &= \frac{P}{S} \\ &= \cos \phi \\ \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

ここで, V, I は単相回路の実効値を表す。一方, 本論文で提案した瞬時有効無効電力の新しい定義を用いると, 三相瞬時皮相電力 $s(t)$ および三相瞬時力率 $I. P. F.$ を以下のように定義できる。まず, (2), (3), (5) 式から次式を得る。

$$\begin{aligned} v(t) i(t) e^{j\phi(t)} &= v(t) i(t) \{ \cos \phi(t) + j \sin \phi(t) \} \\ &= v(t) \{ i(t) \cos \phi(t) + j i(t) \sin \phi(t) \} \\ &= v(t) \{ i_p(t) + j i_q(t) \} \\ &= p(t) + j q(t) \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

*従来の瞬時有効電力と瞬時無効電力は三相回路の各相に着目した電氣量であるのに対し, 本論文で定義する電力は三相一括した電氣量である。この理由から, 本論文で定義した電氣量には“三相”を付けている。

(7) 式において, $v(t) i(t) e^{j\phi(t)}$ の絶対値が三相瞬時皮相電力 $s(t)$ である。従って, 従来の電力の定義に関し本論文で提案した定義を用いると次式が得られる。

$$\begin{aligned} s(t) &= v(t) i(t) \\ &= \sqrt{p(t)^2 + q(t)^2} \\ p(t) &= v(t) i(t) \cos \phi(t) \\ q(t) &= v(t) i(t) \sin \phi(t) \\ I.P.F. &= \frac{p(t)}{s(t)} \\ &= \cos \phi(t) \\ \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

(8) 式において, $I. P. F.$ は“三相瞬時力率”である。極座標上の電圧電流空間ベクトルを用いた三相回路の新しい定義を用いると, 三相瞬時皮相電力 $s(t)$, 三相瞬時力率 $I. P. F.$ は, 単相回路に基づく従来理論の実効値を瞬時空間ベクトルの大きさに, 位相差を瞬時位相差に置き換えることで同様の表現が可能である。このため, 三相回路の電力の物理的な意味の把握が容易である。

次に, 各相の瞬時有効電力と無効電力について検討する。図 1 から, 三相瞬時有効電力 $p(t)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} p(t) &= p_\alpha + p_\beta \\ &= v_\alpha i_{\alpha p} + v_\beta i_{\beta p} \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

これより, α 相瞬時有効電力:

$$p_\alpha = v(t) i(t) \cos \phi(t) \cos^2 \theta(t)$$

β 相瞬時有効電力:

$$p_\beta = v(t) i(t) \cos \phi(t) \sin^2 \theta(t)$$

となる。従って,

$$p(t) = v(t) i(t) \cos \phi(t)$$

を得る。これは, (5) 式に一致する。一方, 三相瞬時無効電力に関して次式が得られる。

$$q_\alpha + q_\beta = v_\alpha i_{\alpha q} + v_\beta i_{\beta q} \dots \dots \dots (10)$$

三相瞬時有効電力 $p(t)$ と同様に, α 相瞬時無効電力:

$$q_\alpha = -v(t) i(t) \sin \phi(t) \sin \theta(t) \cos \theta(t)$$

β 相瞬時無効電力:

$$q_\beta = v(t) i(t) \sin \phi(t) \cos \theta(t) \sin \theta(t)$$

を得る。これら各相の瞬時無効電力 q_α および q_β は以下のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} q_\alpha &= -\frac{1}{2} v(t) i(t) \sin \phi(t) \sin 2\theta(t) \\ &= -\frac{1}{2} q(t) \sin 2\theta(t) \\ q_\beta &= \frac{1}{2} v(t) i(t) \sin \phi(t) \sin 2\theta(t) \\ &= \frac{1}{2} q(t) \sin 2\theta(t) \\ 0 &= q_\alpha + q_\beta \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

$q(t)/2$ は、各相の瞬時無効電力 q_α, q_β の振幅を表しており、これらは電圧空間ベクトル v の 2 倍の周波数で変化している。従って、(5) 式で定義した三相瞬時無効電力 $q(t)$ は、各相を一括した“瞬時最大値”を定めている。正弦波単相回路において定義された無効電力の平均値は 0 になるため、その振幅を無効電力の大きさ Q と定義している。これと同様に、本論文で提案する極座標形式でも各相無効電力 q_α, q_β の和が 0 になるので、その“瞬時最大値”を三相瞬時無効電力 $q(t)$ と定義している。従来理論では、平均値で定義しているのに対し、極座標形式では瞬時空間ベクトルで定義しているため、どの瞬時にも任意波形に対して上式の関係が常に成立するという点に注意しなければならない。(11) 式において、各相の瞬時無効電力 q_α, q_β は符号が反対で大きさが等しく、常に、 $q_\alpha + q_\beta = 0$ が成立する。これは、三相瞬時無効電力 $q(t)$ は各相の間を循環している電力であり、電源から負荷への電力フローには無関係であることを示している^{(5),(10)}。

ここで、従来の電力の定義を簡単に述べる。単相回路で定義された電力は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 p(t) &= \sqrt{2}V \sin \omega t \sqrt{2}I \sin(\omega t - \phi) \\
 &= VI \cos \phi (1 - \cos 2\omega t) - VI \sin \phi \sin 2\omega t \\
 &\dots\dots\dots (12)
 \end{aligned}$$

右辺の第 1 項目は、瞬時有効電力を表わしており、この平均値を“有効電力”と定義している。第 2 項目は無効電力の瞬時値であり、 $VI \sin \phi$ が無効電力の瞬時値の振幅に等しい。従来の定義では、この無効電力の瞬時値の平均値が零となり、数学的に無効電力を定義できないために、振幅 $VI \sin \phi$ を“無効電力”と名付けている。一方、平衡三相、正弦波定常状態を仮定すると、 q_α, q_β および $q(t)$ は次式となる。

$$\begin{aligned}
 q_\alpha &= -\frac{1}{2} VI \sin \phi \sin 2\omega t \\
 q_\beta &= \frac{1}{2} VI \sin \phi \sin 2\omega t \\
 q &= VI \sin \phi \dots\dots\dots (13)
 \end{aligned}$$

ここで、 $\omega = \dot{\theta}(t)$
 (13) 式より、(5) 式で定義した三相瞬時無効電力は各相の瞬時無効電力を一括した場合の振幅の最大値を示している。これは、(12) 式の単相回路の無効電力に等しい。これらを明確にするために、平衡三相、正弦波定常状態における三相瞬時有効・無効電力の関係を図 3 に示す。図 3 において、 α 相の瞬時無効電力 q_α と β 相の瞬時無効電力 q_β に関して $q_\alpha + q_\beta = 0$ がどの瞬時にも成立していることがわかる。また、三相瞬時無効電力 $q(t)$ の大きさは、最大値で表されている。このとき、 $p(t)$ は一定値となり、従来の定義から求めたものと一致する。次に、電圧・電流に高調波を含んだ場合を考える。図 4 にサイリスタ整流回路を接続した回路を示す。この回路において、本論文で提案した三相瞬時有効・無効電流および電力を計算機シミュレーションにより求めた。図 5 は、制御角 $\alpha = 30^\circ$ の場合のシミュレーション結果を示している。(5) 式から、三相瞬時有効電力 p および三相瞬時無効

電力 q を求めている。このとき、 q を α 相、 β 相に分解すると q_α, q_β を得る。これらは、互いに逆位相となっており、常に、その和が零となっている。また、 q は q_α と q_β を一括した振幅の瞬時最大値を示している。さらに、 α 相瞬時有効電流 i_{pa} と α 相瞬時無効電流 i_{qa} は、(3) 式から求めたものを、 α 相上に逆変換したものである。本論文の新しい定義を用いると、瞬時有効・無効電流は電力量の計算をすることなく、直接、検出した三相電圧および電流から検出可能である。これらのシミュレーション結果は、p-q 理論を用いた結果と良く一致している⁽⁵⁾。

3. p-q 理論との比較

<3.1> 瞬時有効・無効電力 p-q 理論では、瞬時実電力 p 、瞬時虚電力 q は、 $\alpha - \beta$ 座標上の電圧・電流ベクトルを用いて定義されている。このとき、 p および q は次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

図 1 において、(14) 式の瞬時実電力 p は以下のように変形できる。

$$\begin{aligned}
 p &= v(t) \cos \theta(t) i(t) \cos \{\theta(t) + \phi(t)\} \\
 &\quad + v(t) \sin \theta(t) i(t) \sin \{\theta(t) + \phi(t)\} \\
 &= v(t) i(t) \cos \phi(t) \dots\dots\dots (15)
 \end{aligned}$$

(15) 式は、(5) 式で定義した三相瞬時有効電力と同一の結果を与える。さらに、(14) 式の瞬時虚電力 q は、

$$\begin{aligned}
 q &= v(t) \cos \theta(t) \cdot i(t) \sin \{\theta(t) + \phi(t)\} \\
 &\quad - v(t) \sin \theta(t) \cdot i(t) \cos \{\theta(t) + \phi(t)\} \\
 &= v(t) i(t) \sin \phi(t) \dots\dots\dots (16)
 \end{aligned}$$

となる。この瞬時虚電力 q もまた(5) 式で定義した三相瞬時無効電力と同一の結果を与える。

<3.2> 瞬時有効・無効電流 さらに、p-q 理論では、 $\alpha - \beta$ 座標上の電流 i_α, i_β を 2 つの成分、即ち、 p に起因する成分と q に起因する成分に分解している。これらは、次式で

図3 平衡三相正弦波定常状態における三相瞬時有効・無効電力

Fig.3. Instantaneous active and reactive powers under purely sinusoidal condition.

図4 サイリスタ整流回路の構成図

Fig. 4. Circuit configuration of simple thyristor converter.

図5 図4のシミュレーション結果

Fig. 5. Simulation results for Figure 4 under $\alpha = 30^\circ$.

与えられる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} p \\ 0 \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ q \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (17) \end{aligned}$$

(17) 式に関して、瞬時電力を求めることなくこれらの電流を定義する検討結果が報告されている⁽⁶⁾。

一方、本論文で提案した三相瞬時有効・無効電流の定義によると、いかなる電力の計算をすることなく、直接、瞬時空間電圧・電流ベクトルからこれらの電流を定義できる。即ち、

$$\begin{aligned} i_{\alpha p} &= i(t) \cos \phi(t) \cos \theta(t) \\ i_{\alpha q} &= -i(t) \sin \phi(t) \sin \theta(t) \\ i_{\beta p} &= i(t) \cos \phi(t) \sin \theta(t) \\ i_{\beta q} &= i(t) \sin \phi(t) \cos \theta(t) \\ &\dots \dots \dots (18) \end{aligned}$$

(18) 式は、p-q 理論から定義した(17)式に一致する。さらに、

図6 瞬時無効電力補償装置

Fig. 6. System configuration of instantaneous reactive compensator.

(9) 式の p_{α} , p_{β} , q_{α} , q_{β} は、p-q 理論に基づく (9) 式、(10) 式の各電力成分に一致する^{(5),(10)}。

4. 瞬時無効電力補償装置の構成

本論文で提案した三相瞬時有効無効電流の新しい定義を応用し、瞬時無効電力補償装置を構成する。図6に、瞬時無効電力補償装置の基本的な構成図を示す。図6において、添え字“S”は電源側、“L”は負荷側、“C”は補償装置側を表し、“T”は受電端を表している。サイリスタ整流回路に流れ込む電流 i_L から(3)式の瞬時無効電流 i_{Lq} を検出し、これを補償電流 i_c として注入することで電源側の無効電力の補償を行う。この無効電力補償装置は、(3)式の三相瞬時有効電流 i_p に起因する高調波成分を補償しない。このため、エネルギー蓄積要素を必要としない^{(5),(10)}。図7は、瞬時無効電力補償装置の制御ブロック図を示したものである。検出した受電端電圧 v_a , v_b , v_c およびサイリスタ整流回路に流れ込む電流 i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc} を変換行列 (C_1) を用いて極座標上の瞬時電圧空間ベクトル $v_T(t) \angle \theta(t)$ 、瞬時電流空間ベクトル $i_L(t) \angle \{\theta(t) + \phi(t)\}$ に変換される。このとき、 v_T と i_L の瞬時電角の差 $\phi(t)$ から(3)式より三相瞬時無効電流の絶対値を求める。また、三相瞬時無効電流の位相角は、電圧ベクトルの電角 $\theta(t)$ から $\frac{\pi}{2}$ を引くことで求めることができる。従って、極座標上の三相瞬時無効電流は次式で与えられる。このとき、極座標上の三相瞬時無効電流 i_{Lq} は、次式で与えられる。

$$i_{Lq} = i_{Lq}(t) \angle \left(\theta(t) - \frac{\pi}{2} \right) \dots \dots \dots (19)$$

(19) 式で与えられる極座標上の三相瞬時無効電流 i_{Lq} を変換行列 (C_2) で a-b-c 座標に変換することで各相の補償電

図7 瞬時無効電力補償装置の制御ブロック図

Fig. 7. Control scheme for Figure 6.

流を求める。従って、 $a-b-c$ 座標上の補償電流は、

$$\begin{pmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{pmatrix} = (C_2) i_{Lq} \dots \dots \dots (20)$$

となる。この無効電流を電源側に注入することで、電源側の無効電力(電流)を補償できる。図7の制御方式では、瞬時電力の計算を全く用いていない点に特長がある。

図8に、シミュレーション結果を示す。なお、図6において、サイリスタ整流器の制御角 $\alpha = 30^\circ$ および $\alpha = 90^\circ$ についてシミュレーションを行った。それぞれ、 a 相の受電端電圧 v_{Ta} 、電源電流 i_{Sa} 、補償電流 i_{Ca} ならびに負荷側電流 i_{La} を示している。 $\alpha = 30^\circ$ の場合、 i_{Sa} は無効電流が補償され基本波力率が1となっている。 i_{Sa} が完全な正弦波とならないのは、瞬時有効電流 i_p に基づく高調波成分を補償していないためである。従って、瞬时无効電流と瞬時有効電流の高調波分を同時に補償した場合に、電源電流 i_{Sa} は力率が1の完全な正弦波となる^{(5),(10),(11)}。一方、 $\alpha = 90^\circ$ の場合、 p の平均値が0となる。このため、有効電流の基本波成分は現れない。 q に基づく基本波分と高調波分は無効電力補償装置によって補償されているので i_{Sa} には現れず、 p に基づく高調波電流のみが流れている。本論文で提案した定義では、系統電圧に歪みが存在した場合でも三相瞬時有効無効電流を検出可能である。図8のシミュレーション結果では、受電端電圧 v_a にサイリスタ整流回路の電流の重なりに起因する歪みが生じているが、三相瞬时无効電流 i_q は完全に補償されている。これらのシミュレーション結果は、 $p-q$ 理論を用いた瞬时无効電力補償装置の結果とよく一致している。

なお、三相不平衡回路への本論文で提案した定義の応用については述べなかったが、これは今後の重要な検討課題である。この詳細については、別の機会に報告したいと考えている。

5. むすび

本論文では、極座標上の瞬時空間電圧電流ベクトルを用いた三相瞬時有効無効電流および三相瞬時有効無効電力の新しい定義を提案した。これは、極座標上の瞬時空間電圧電流ベクトルから同一平面内で、直接、三相瞬時有効無効電流を定義可能な点に特長があり、瞬時虚電力の概念を用いることなく三相回路における瞬時有効無効電力及び電流の物理的な意味をより明快に説明することが可能である。提案した三相有効・無効電力および電流の定義は、平均値の概念を用いた従来の定義と同一形式を与えることから、教育的な目的において威力を発揮するものと考えている。また、本論文の定義と $p-q$ 理論と比較しその物理的な意味を詳細に考察し、本論文の定義が $p-q$ 理論と同一の結果を与えることを明らかにした。さらに、三相瞬时无効電力補償装置に本論文の定義を応用し、電力の計算を全く行うことなく瞬时无効電流を補償可能であることを示し、提案した定義の工学的な有用性を明らかにした。

図8 図6のシミュレーション結果
Fig.8. Simulation results for Figure 6.

最後に、本論文は半導体電力変換研究会で発表した研究会資料⁽¹²⁾について加筆修正を加えたものであることを付記し、貴重な御討論を賜りました各位に厚くお礼申し上げます。

(平成8年3月22日受付、平成8年9月19日再受付)

文 献

- (1) A. E. Emanuel, "The Need for a Simple and Practical Resolution of the Apparent Power," *ETEP*, vol. 3, p. 103, 1993.
- (2) L. S. Czarnecki, "Power Theory of Electric Circuits: Common Data Base of Power Related Phenomena and Properties," *ETEP*, vol. 4, p. 491, 1994.
- (3) A. Ferrero, and G. S. Furga, "A New Approach to the Definition of Power Components in Three-Phase Systems Under Nonsinusoidal Conditions," *IEEE Trans. on Instrum. and Meas.* vol. IM-40, p. 568, 1991.
- (4) P. Tenti, "The Relation Between Global Performance Indexes: Power Factor and FBD Factor," *ETEP*, vol. 4, p. 505, 1994.
- (5) H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits," *IEEE IPEC-Tokyo'83*, p. 1375, 1983.
- (6) J. L. Willems, "A New Interpretation of the Akagi-Nabae Power Components for Nonsinusoidal Three-Phase Situations," *IEEE Trans. on Instrum. and Meas.* vol. IM-41, p. 523, 1992.

- (7) R. Marschalko, and M. Weinhold, "Optimal Control and Appropriate Pulse Width Modulation for a Three-Phase Voltage dc-link PWM Converter," *IEEE/IAS Annual Meeting*, p. 1042, 1992.
- (8) 難波江, 瀬川: 「三相電力系統における瞬時有効・無効電流と瞬時有効・無効電力の極座標形式による定義」, 平成7年電気学会産業応用部門全国大会, No. 58
- (9) 難波江, 中島, 吉川, 田中: 「瞬時空間ベクトルに基づく瞬時有効無効電流検出法とその応用」, 平成7年電気学会産業応用部門全国大会, No. 57
- (10) H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. IA-20, p. 625, 1984.
- (11) A. Nabae, H. Nakano, and S. Togasawa, "An Instantaneous Distortion Current Compensator without Any Coordinate Transformation," *IEEJ IPEC-Yokohama'95*, p. 1651, 1995.
- (12) 吉川, 曹, 難波江, 田中: 「極座標形式による瞬時有効無効電流と電力の新しい定義とその応用」, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-96-14(平成8年)

難波江 章

(終身員) 昭和22年9月東京大学電気工学科卒業。26年9月東京芝浦電気(株)(現, 東芝)入社。53年4月長岡技術科学大学電気系教授。平成2年4月東京工芸大学教授。現在, 東京工芸大学情報処理教育研究センター長。工学博士。主として, 交流電動機の変速システムならびに瞬時無効電力補償システムに関する研究に従事。1991年IEEE/IAS First Prize Transactions Paper Award, 1996年IEEE/PELS William E. Newell Power Electronics Award, 昭和60年, 平成3年電気学会論文賞。平成5年電気学会業績賞。IEEE Fellow。

吉川 章

(学生員) 昭和47年12月5日生。平成3年3月神奈川県立汲沢高等学校卒業。平成8年3月東京工芸大学工学部電子工学科卒業。同年4月(株)第一エレクトロニクス入社, 現在に至る。在学中は, 三相回路の瞬時電力に関する研究に従事。

曹 立宇

(正員) 1959年4月12日生。89年10月清華大学博士課程修了。工学博士。同年10月清華大学電気工学科講師。93年東京大学工学部電気工学科研究員。95年7月東京工芸大学情報処理教育研究センター助手, 現在に至る。主として, 電力変換器を含む系の制御に関する研究に従事。IEEE 会員。

田中 俊彦

(正員) 昭和34年7月29日生。59年3月長岡技術科学大学大学院修士課程電気電子システム工学専攻修了。同年4月東洋電機製造株式会社入社。平成元年4月雇用促進事業団に入り, 北海道職業訓練短期大学校講師を経て平成3年4月職業訓練大学校(現, 職業能力開発大学校)講師, 現在に至る。博士(工学)。主として, 電力変換器が発生する高調波電流とその補償法に関する研究に従事。IEEE 会員。