

# サイリスタ負荷の発生する無効電力の 制御に関する研究

UDC 621.314.58.016.25  
621.316.728

On the Control of Reactive Power Required by Thyristor Loads

坪井邦夫\*・原島文雄\*\*・稲葉博\*\*

Kunio TSUBOI, Fumio HARASHIMA and Hiroshi INABA

## 1. はじめに

サイリスタなどの半導体電力素子を使った電力変換装置がひろく普及するにつれて、それらが発生する無効性の電力による電源系の力率の低下や障害の発生が顕著となり、その防止法や無効電力補償の研究が盛んに行なわれるようになってきた。半導体電力変換装置が発生する無効性の電力の種類としては、通常の基本波無効電力のほかに高調波成分、フリッカ成分、変動電力成分、三相不平衡電力成分などがある。典型的な例としては、数Hzから数百Hzまでいくつもの周波数成分が分布しているサイクロコンバータ（周波数変換回路の一種）の入力電流があげられる（Fig. 5 (a), (b)参照）。これに対して従来は無効電力の補償といえばほとんどが基本波成分だけを考慮し、他の成分については各々について個別に対策がとられてきた。それゆえ、サイリスタ負荷の発生するさまざまな無効性電力成分についての統一的な理論の無いままに、装置だけが発達してしまったのである。そしてこの点は、無効性各成分を個別的にではなく、全体として最適に制御していく補償システムを構成する上での重大な弱点となっている。

この問題は無効電力の定義自体から再検討しなければならない問題である。すなわち従来は定常線形の交流回路を基礎として無効電力を定義していたために、基本波無効電力しか定義されなかった。ところが、サイリスタなどの半導体素子は非線形で時変係数の系である。それゆえに基本波成分以外のさまざまな無効性成分が発生するのである。これに対して従来の定義でだけ問題を考えようとするものの不十分性は明らかである。著者らは、サイリスタ負荷の発生する無効性電力諸成分を統一的に定義できるような新しい無効電力の概念を検討し、それに基づいて電源系の無効性電力諸成分を全体として最適に制御するための理論研究と実験を行なってきた<sup>1)~11)</sup>。

その結果、従来の無効電力の概念を拡張した仮想無効電力の概念を提案するに至った<sup>6), 8)</sup>。この仮想無効電力の概念によれば、さまざまな無効性電力成分を統一的に定義でき、かつ従来の無効電力の定義を包含している。ま

た、その瞬時値は電源および補償装置の容量からくる制約条件のもとに、ある任意の値に決定される。その最適な決定の方法は最適フィルタ理論に基づき、補償装置がその能力を十分に発揮し、かつ無効性電力成分の電源への影響の総和を最小に行なわれる。これによってサイリスタ負荷が発生するさまざまな無効性電力の制御に関するシステム論的アプローチが可能となる。実際の負荷では、その発生する無効性電力は負荷条件によってさまざまに変化するし、また補償上の要求、電源容量、補償装置の容量などによっても補償の設定は左右される。仮想無効電力理論では無効性電力を一義的には決定せず任意性を残し、諸条件を考慮して選択できるような柔軟な定義になっている。したがって実際の補償においても、前記の条件が変化してもそれぞれの条件下で常に全体として最適な無効電力補償が行なわれるような、適応的な制御が行なわれる。

本小論では、仮想無効電力の概念と最適化の方法、及び典型的な例としてサイクロコンバータの入力の補償実験例について述べる。

## 2. 仮想無効電力の考え方と定義

仮想無効電力の考え方では、有効電力は瞬時電力の平均値として定義される。これは従来の有効電力の定義と基本的には同じであるが、系の時変性を考慮するために平均する時間区間は交流の一周期とは限らず、問題ごとに適合するように決められる。また有効電力の瞬時値は一義でなく、電源に許容される範囲で任意に選ぶことができる。一方、無効電力はその瞬時値が負荷の瞬時電力と瞬時有効電力との差として定義される。通常、瞬時有効電力は電源にとって望ましい時間関数に近づけるようにする。以下にこれらの定義を示す。

$v$  : 瞬時電圧

$i$  : 瞬時電流

とすれば、

$$\text{瞬時電力 } p \triangleq vi \quad (1)$$

$$\text{有効電力 } P \triangleq \text{Mean} \{ p \} \triangleq \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p dt \quad (2)$$

(real power)

仮想瞬時有効電力 (arbitrary instantaneous real po-

\* 東京商船大学

\*\* 東京大学生産技術研究所 第3部

wer, AIRLP)

$$\tilde{p} \triangleq [\text{Mean} \{ \tilde{p} \} = P \text{である任意の時間関数}] \quad (3)$$

仮想瞬时无効電力 (arbitrary instantaneous reactive power, AIRCP)

$$\tilde{q} \triangleq p - \tilde{p} \quad (4)$$

仮想無効電力 (arbitrary reactive power, ARCP)

$$\tilde{Q} \triangleq \sqrt{\text{Mean} \{ \tilde{p}^2 \}} \sqrt{\text{Mean} \{ \tilde{i}^2 \}} \quad (5)$$

である。ただし、 $[t_1, t_2]$ は各々の問題に適合するように決められる時間区間、また $\tilde{i}$ は次のような無効分電流である。

$$\tilde{i} \triangleq \frac{\tilde{q}}{v} \quad (6)$$

この定義は無効電力の一般的概念を表わし、また従来の無効電力の定義をも含んでいる。この定義を用いると、サイリスタ回路等が発生する種々の無効性電力を统一的に定義することができる。

### 3. 仮想無効電力の適用例

多くの問題が仮想無効電力の考え方によって説明できる。

(a) 基本波無効電力、高調波歪電流、フリッカ成分などを含む無効電力

サイクロコンバータの入力無効電力はこの例である。この無効電力は仮想瞬时有効電力を各相とも  $P \sin^2 \omega t$  ( $P$ は有効電力の大きさ、位相は各相  $2\pi/3$ ずらす)と決めた場合の仮想無効電力で定義される。またこれら個々には、有効電力を考える時間区間を基本波無効電力では電源周期の一周期、高調波では高調波周期、フリッカではフリッカ周期にそれぞれするだけで、その時間区間の瞬時電力の変動として同様に考えられる。

(b) 三相回路の不均衡成分

三相不均衡負荷によって生ずる不平衡電力は、仮想瞬时有効電力を平衡した電力とすれば、仮想無効電力として表現される。

(c) 直流の無効電力

仮想無効電力によれば、時変性の負荷やDC/AC変換器などによって発生する直流電力の変動やリップル成分は、直流の無効電力として定義される。

(d) ステップ状負荷変動の仮想無効電力

ある時点で負荷がステップ状に変動する場合には、仮想瞬时有効電力をなめらかに変動するように選べば、急激な変動成分は仮想無効電力として表わされる。補償装置によってこの仮想無効電力を補償すれば、電源への急激な負荷変動の影響を減少できる。

(e) 非定常負荷の仮想無効電力

アーク炉やサイクロコンバータのような非定常負荷は、フリッカや低周波数の無効電力を発生する。Fig. 1で非

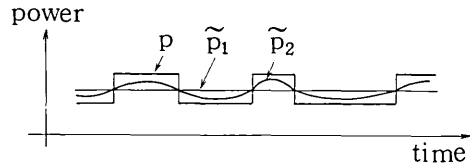


Fig. 1 ARCP of fluctuant power

定常瞬時電力  $p$  に対して仮想瞬时有効電力は  $\tilde{p}_1$  または  $\tilde{p}_2$  のように決めることができる。無効電力が補償容量より小さい場合には仮想有効電力は  $\tilde{p}_1$  すなわち一定に決められ、仮想無効電力は全ての無効性電力成分を含む電力として与えられる。一方、無効電力が補償容量より大きい場合には、仮想瞬时有効電力は  $\tilde{p}_2$  のように決められ、仮想無効電力は無効成分の一部として与えられる。前者は完全補償、後者は部分補償である。

### 4. 最適仮想無効電力の推定

部分補償は無効電力補償における一般の場合であり、完全補償はその特別な場合である。部分補償の場合の仮想瞬时有効電力（または無効電力）は多義的であり、その決め方により補償動作が変化する。したがって仮想瞬时有効電力・仮想瞬时无効電力を特定化するにあたっては、補償のシステム構成、無効成分の障害度、コストなどのトレード・オフをとりつつ、補償システムの能力を最大に発揮させ、無効成分の電源系への影響を最小にするような最適な仮想瞬时有効電力・無効電力を推定してやらなければならない。また、この最適値は、

- (i) 負荷が発生する無効性電力成分の状態
- (ii) 電源系と補償装置のそれぞれの容量
- (iii) 無効電力各成分に対する補償の必要度（各成分の電源系への障害度）

によって影響されるので、これらの変化に適合して推定値を変更し、常に最適な補償を行なうように適応制御される。

#### 4.1. 仮想瞬时有効電力と仮想瞬时无効電力の制約条件

仮想瞬时有効電力は電源容量を超えないように決められなければならない。すなわち仮想瞬时有効電力の値は電源の最大出力  $P_{smax}$  を超えてはならず、かつ、その微分は電源の最大応答速度  $DP_{smax}$  を超えてはならない。また、その平均値は有効電力  $P$  に等しい。すなわち、

$$|\tilde{p}| \leq P_{smax} \quad (7)$$

$$\left| \frac{d}{dt} \tilde{p} \right| \leq DP_{smax} \quad (8)$$

$$\text{Mean} \{ \tilde{p} \} = P \quad (9)$$

である。一方、仮想瞬时无効電力は補償装置の容量によって制約を受ける。すなわち仮想瞬时无効電力の値は

補償装置の最大出力  $Q_{cmax}$  を超えず、かつ、その積分すなわちエネルギーは補償装置のエネルギー容量  $U_{cmax}$  を超えないように選ばれるべきである。すなわち、

$$|\tilde{q}| \leq Q_{cmax} \tag{10}$$

$$-U_{c0} \leq \int \tilde{q} dt \leq U_{cmax} - U_{c0} \tag{11}$$

である。ただし  $U_{c0}$  はエネルギー蓄積量の初期値。

### 4.2. 最適仮想瞬時有効電力・無効電力の推定

前記の制約のもとで最適仮想瞬時有効電力と最適仮想瞬时无効電力の値が決定される。最適とは補償装置の能力を十分に発揮させ、かつ電源への無効性電力諸成分の影響の総和を最小にするという意味である。この最適値の推定法は最適フィルタ理論に基づいている。ここでは従来の高調波やフリッカについての取扱いと合わせるために周波数領域で議論する。

まず、推定の評価関数は各周波数ごとの仮想瞬時有効電力  $\tilde{p}(\omega)$  を、各周波数ごとの電源への障害度で重み付けしたものの総和とする。すなわち、

$$J = \frac{1}{\omega_N} \int_0^{\omega_N} w(\omega) \tilde{p}(\omega) d\omega \rightarrow \min \tag{12}$$

$$\int \tilde{q}(\omega) d\omega = \theta Q_c \tag{13}$$

$$0 \leq \tilde{p}(\omega) \leq P_{smax}(\omega) \tag{14}$$

ここで、 $\tilde{p}(\omega)$  は仮想瞬時有効電力、 $\tilde{q}(\omega)$  は仮想瞬时无効電力、 $w(\omega)$  は電源への影響の加重関数、 $\omega$  は角周波数、 $\omega_N$  は補償角周波数の上限、 $\theta$  は係数、 $P_{smax}(\omega)$  は電源の最大出力である。

この評価関数を最小にする最適仮想瞬時有効電力は次のように決定される。

$$\tilde{p}^0(\omega) = \begin{cases} \min [p(\omega), P_{smax}(\omega)] \\ 0 \end{cases} \tag{15}$$

ただし、任意の  $\omega, \omega' (\omega \neq \omega')$  に対して

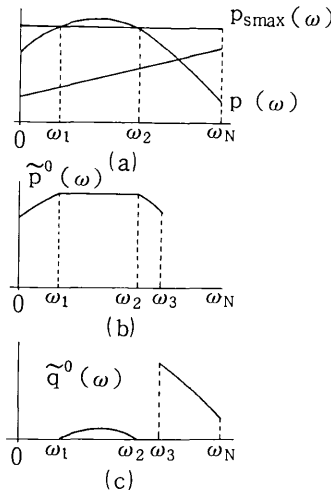


Fig. 2 The optimal AIRLP and AIRCP (Example 1)

$$w(\omega) \left| \tilde{p}^0(\omega) = \min [p(\omega), P_{smax}(\omega)] \right.$$

$$w(\omega') \left| \tilde{p}^0(\omega') = 0 \right. \tag{16}$$

ここで、 $\tilde{p}^0(\omega)$  は最適仮想瞬時有効電力、 $p(\omega)$  は負荷の瞬時電力である。負荷の瞬時電力  $p(\omega)$  から最適仮想瞬時有効電力と最適仮想瞬时无効電力を推定する最適フィルタは次式により求められる。

$$F^0(\omega) = \frac{\tilde{p}^0(\omega)}{p(\omega)} \quad \text{(有効分)} \tag{17}$$

$$F^{0'}(\omega) = \frac{\tilde{q}^0(\omega)}{p(\omega)} = 1 - F^0(\omega) \quad \text{(無効分)} \tag{18}$$

### 4.3. 最適仮想瞬時有効電力・無効電力の例

Fig. 2 は無効性電力成分の電源系への障害度が周波数が高くなればなるほど大きくなる例である。この場合、加重関数  $w(\omega)$  は周波数とともに増加する。いま図のように  $P_{smax}(\omega)$  が平坦で、 $p(\omega)$  が凸型その一部が  $P_{smax}(\omega)$  を超えているとすれば、 $p(\omega)$  のうち  $P_{smax}(\omega)$  を超えた部分と電源系への障害度が高い高周波部分とが補償すべき仮想無効電力とみなされ、最適仮想瞬時有効電力と最適仮想瞬时无効電力とは同図の (b), (c) のように決定される。

Fig. 3 はフリッカのように特定の周波数の前後の障害度が大きい場合の例である。この場合には障害度の大きい(加重関数が大きい)周波数帯域  $[\omega_1, \omega_2]$  に入る  $p(\omega)$  の部分が補償すべき仮想無効電力とみなされて、最適仮想瞬時有効電力・無効電力はそれぞれ同図の (b), (c) のように決められる。仮想無効電力の周波数帯域  $[\omega_1, \omega_2]$  は補償装置の容量がいっぱいになるまで広くひろげられる。

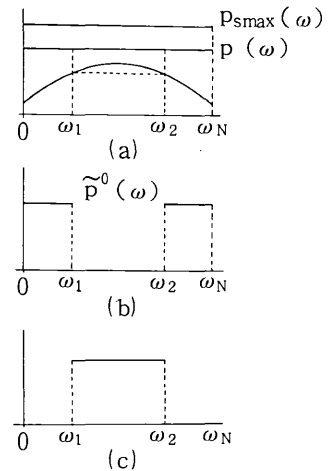


Fig. 3 The optimal AIRLP and AIRCP (Example 2. flicker problem)

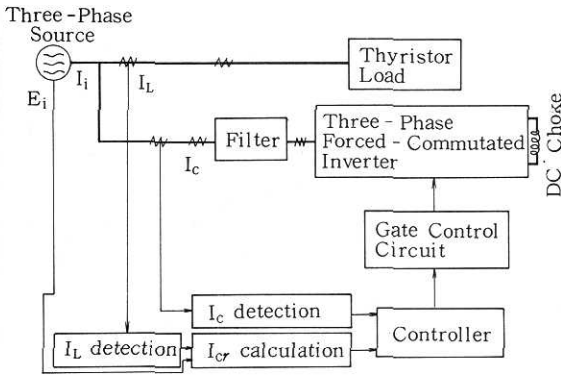


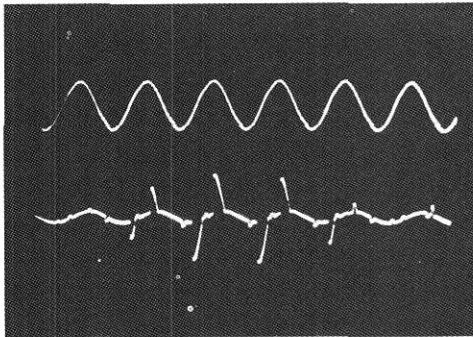
Fig. 4 Block diagram of three-phase reactive power compensator

5. 仮想無効電力の考え方に基づく補償実験

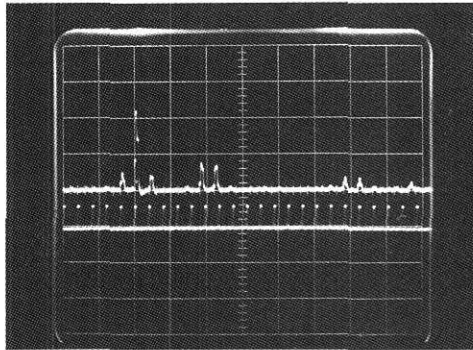
前にも述べたように、無効性電力諸成分の補償を考える上で、サイクロコンバーターは一台の装置で多種類の無効性電力成分を同時に発生するという意味では、典型的なサイリスタ回路である。回路自体の説明は他の文献などに譲り、ここでは省略する。Fig. 5(a)は三相入力単相出力サイクロコンバータの入力電流波形、Fig. 5(b)はその周波数スペクトラムである。電源周波数の50 Hzの有効分以外は全て無効成分であり、それらは数 Hz から数百 Hz までにわたり多数存在している。無効成分がこのような周波数分布をもつ負荷に対しては、もはや従来の無効電力の概念だけではとらえきれないことは明らかであろう。このサイクロコンバータが発生する無効成分は、電源周波数よりも低い周波数成分を含むうえに、それぞれが出力周波数の変化によってその周波数を変えるというやっかいな性質をもっているため、従来の補償法では補償が困難であった。しかし、仮想無効電力の考え方に基づいて適応制御された補償装置によれば、実験結果で明らかのように完全に補償することができる。

5. 1. 無効電力補償装置の構成

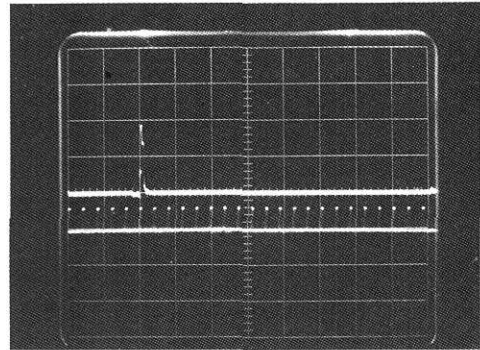
Fig. 4 がこの無効電力補償装置の構成を示すブロック線図である。Thyristor Loadと書いてある部分が、いまの場合は負荷のサイクロコンバータである。この補償装



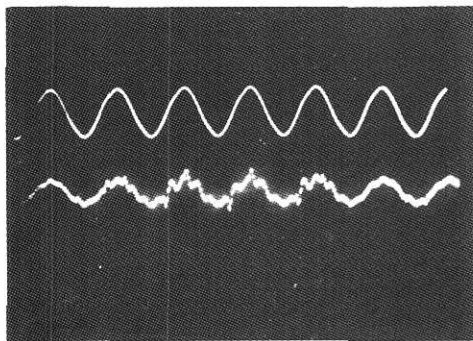
(a)



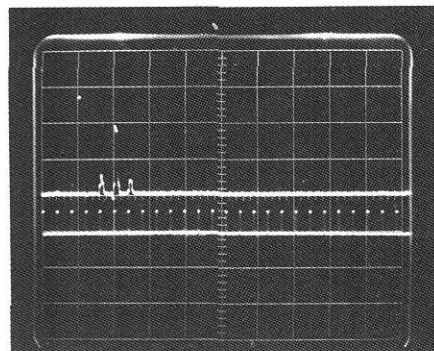
(b)



(d)



(c)



(e)

Fig. 5 Compensation results of the reactive power required by a cycloconverter

置は次の三つの部分から成り立っている。

- (1) 無効電力の推定部……最適フィルタにより最適な仮想瞬时无効電力を推定する。
- (2) クローズドループ制御系……推定された仮想瞬时无効電力の逆符号波形を目標値として、補償電流が、その目標値に精度良く一致するようにネガティブ・フィードバックをかけて追従制御する。
- (3) エネルギー蓄積素子を持つ可制御無効電力源……サイリスタ・インバータとDCチョークから成り、インバータのゲート制御によって無効電力の流れが制御される。DCチョークはエネルギー蓄積素子として無効電力の蓄積・放出を行なう。サイクロコンバータの入力の側帯波成分や、三相回路の不平衡電力成分の補償には、このようなエネルギー蓄積素子が不可欠である。

なお、本装置の詳細については文献(3), (4), (5), (7)を参照されたい。

## 5.2. 実験結果

Fig. 5(a)は三相入力单相出力サイクロコンバータの入力電流波形である。上側は参考のための入力電圧波形で周波数は50 Hz、出力周波数は5 Hzである。この入力電流波形を周波数分析するとFig. 5(b)のようなスペクトラムが得られる。無効分として50 Hz基本波の両側の側帯波、100 Hzと200 Hz各々の前後の側帯波が出ている。

Fig. 5(c)は補償装置によって補償した結果の電流波形で、電圧波形と位相がほぼ一致し基本波力率が1に近く改善されている。この電流波形の周波数分析結果がFig. 5(d)に示す周波数スペクトラムである。この場合は補償装置の容量が充分大きいので、全ての無効成分が除去されて50 Hzの基本波有効分のみが存在する。これに対してFig. 5(e)は補償装置の容量の制限などにより、部分補償を行なった場合の補償された電流波形の周波数分析結果である。この場合には、Fig. 5(b)に表われている種々の無効成分に対して、高い周波数ほど障害度が高いという設定のもとで仮想無効電力の推定を行なっているので、90 Hz以上の周波数の無効成分及び50 Hzの基本波無効分は除去され、60 Hz以下の周波数の無効成分は除去されずに残っている。このように、仮想無効電力を推定するフィルタの設定が変更され、どの場合でも電源系への無効成分の影響の総和が最小になるように最適な補償が行なわれる。

## 6. ま と め

- (1) 無効電力の概念を拡張した新しい概念として仮想無効電力を定義し、その最適値の推定法を示した。仮想無効電力の概念は従来の無効電力の概念を含み、さらにそれ以外のサイリスタ負荷などが発生するさまざまな無効性電力成分をも一括して定義できる。
- (2) 仮想無効電力の概念に基づくことにより、種々の無

効成分があった場合に、電源系へのそれらの影響の総和が最小になるように無効電力を制御することができる。この考え方により、ある電源系への補償装置類を一つのシステムとして全体的に最適に制御していくことができる。また条件の変化に対しても、各場合に応じて常に最適な補償をするように補償装置を適応制御することができる。

(3) 基本波無効電力以外にもさまざまな無効成分を発生するサイリスタ負荷の典型としてサイクロコンバータをとりあげ、仮想無効電力の概念に基づき完全補償、部分補償の実験を行なった。その結果、従来補償が困難だったサイクロコンバータの発生する種々の無効成分を完全に補償することができ、また、電源系への影響度の高い特定の周波数帯域の成分を特に狙って除去することもできることを示した。このことはサイリスタ負荷などが発生するさまざまな無効性電力成分を補償するにあたって、仮想無効電力の考え方が極めて有効であることを示している。

本稿を終えるにあたり、研究にご協力いただいた電元社製作所㈱の奈良栄二氏に厚く感謝いたします。

(1977年9月7日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 坪井, 稲葉, 原島: サイリスタ負荷の無効電力の検出とその制御, 生産研究, 第27巻10号, pp. 403~405 (1975.10)
- 2) 坪井, 原島: 追従制御方式による3相無効電力補償装置とそのデジタル・シュミレーション, 昭和51年電気学会全国大会講演論文集 (1971.4)
- 3) F. Harashima, H. Inaba, & K. Tsuboi: A Closed-loop Control System for the Reduction of Reactive Power Required by Electronic Converters, IEEE Trans. on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol. IECI-23, No.2 (1976.5)
- 4) 坪井, 原島, 稲葉, 奈良: 追従制御方式による三相無効電力補償装置の動作原理, 構成とADSLによるシュミレーション, 生産研究, 第28巻9号, pp. 406~408 (1976.9)
- 5) 原島, 稲葉, 坪井, 奈良, 藤田: 追従制御方式による三相無効電力補償と三相電力平衡化装置, 第19回自動制御連合講演会論文集, pp. 333~334 (1976.11)
- 6) K. Tsuboi & F. Harashima: Real Time Measurement and Estimation of Reactive Power Required by Semiconductor Power Converters, IEEE-IECI '77 Conference Proceeding (1977.3)
- 7) K. Tsuboi, F. Harashima, & H. Inaba: Reduction of Reactive Power and Balancing of Supply Current for Three-Phase Converter Systems, IEEE/IAS 1977 International Semiconductor Power Converter Conference, pp. 365~370 (1977.3)
- 8) 坪井, 原島: サイリスタ回路における無効電力の考え方とその推定, 昭和52年電気学会全国大会講演論文集 (1977.7)
- 9) 奈良, 原島, 稲葉, 坪井: サイクロコンバータの無効電力補償, 昭和52年電気学会全国大会講演論文集 (1977.7)
- 10) 坪井, 原島: 仮想無効電力の概念に基づいた適応制御によるサイリスタ回路の無効性電力の補償, 第16回計測自動制御学会学術講演会論文集, pp. 665~666 (1977.8)
- 11) F. Harashima, K. Tsuboi, H. Inaba: An Adaptive Method for the Reduction of Reactive Power Required by Cycloconverters, IEE 1977 Conference Proceeding (1977.9)