

負荷電流利用型ソリッド・ステート無効電力補償装置の研究

A Solid-State Reactive Power Compensator Using Transformed Load Currents

坪井邦夫*・檜垣成敏**・原島文雄**

Kunio TSUBOI, Shigetoshi HIGAKI and Fumio HARASHIMA

1. はじめに

80年代において資源・エネルギー問題が国民生活と産業活動を直接左右する重要課題であることは論をまたない。電力エネルギーについては、新エネルギー源の開発と並んで、その効率の利用、損失の減少が重要な課題である。よく知られているように交流電力には有効電力と無効電力が存在し、有効電力は負荷により電力系の外部へエネルギーが取り出されるのに対し、無効電力は電力系内部に滞り、外部へは何らのエネルギーも出さない成分である。この無効電力は電力系内で独自の意味を持つ成分ではあるが、多くの場合、電力損失の増大や電流増大による電力設備の肥大化を招き、利用効率を低下させたり、電圧変動や電力系統不安定化の原因になっている。

有効電力と無効電力の割合を表す言葉に「力率」がある。一般に有効電力の大きさを P 、無効電力の大きさを Q とすると、 $P/\sqrt{P^2+Q^2}$ が力率である。無効電力の割合が多い場合は力率は低くなる。すなわち、無効電力の補償と力率改善とは同類である。従来から工業用電力負荷には低力率のものが多くあり、力率改善の努力は行われていた。しかし、近年、サイリスタなどの電力用半導体が広く普及してくると、これらの半導体が低力率負荷の新たな一群として登場し、全社会的な省エネルギーの課題や電力各社の力率改善の要請とも相まって、無効電力の補償は焦眉の課題となってきたのである。

無効電力の発生源としては容量性のもの(コンデンサなど)と誘導性のもの(インダクタ類)があり、一般には誘導性の負荷が多い。これらはそれぞれ進み無効電力(容量性)と遅れ無効電力(誘導性)を発生する。この進みと遅れの両無効電力は電流位相が互いに180度ずれている。すなわち、正負が逆転しているので、進みと遅れの両無効電力が同量ある場合には打ち消しあってしまう。したがって、進み無効電力に対しては誘導性負荷を、遅れ無効電力に対しては容量性負荷をそれぞれ接続してやることによって無効電力を除去することができる。これが無効電力補償の基本原理である。

* 東京商船大学

** 東京大学生産技術研究所 第3部

上記のような無効電力補償は、従来は進相用コンデンサ、同期調相機(ロータリー・コンデンサ)、サイリスタスイッチ付インダクタなどによって行われている。これらの無効電力補償装置において本質的役割を担っているのは、コンデンサ、インダクタ、回転子などのエネルギー蓄積部であり、サイリスタはそれらの電流をスイッチングにより制御する役割を果たしているにすぎなかった補償装置においてコンデンサやインダクタは大きさの点でも、コストの上でも大きな部分を占め、補償装置の設置の上での問題点ではあったが、それらの役割の本質的な面から、やむをえないものとされてきた。

1976年、Westinghouse Electric社のL. Gyugyiはコンデンサやインダクタをほとんど使わず、サイリスタ回路のみによって三相無効電力の補償に成功した研究結果を発表した^{1),2)}。また日本でも1977年に野村、藤原、高橋が、異なった構成のスイッチング回路により、同様の成功結果を発表した³⁾。無効電力補償装置がコンデンサやインダクタを用いずに半導体素子だけで構成できれば、スペースやコストの大幅な減少を実現でき、普及は容易になり、省エネルギーにとって極めて革新的な技術となる。しかしながら、これらの研究では、主回路が強制転流サイクロコンバータを使ったパワーダブリング方式であるなど、構成が複雑であり実用化には問題がある。著者らは、この全半導体無効電力補償装置を通常のAC/DCコンバータとDC/ACインバータとを組合せることによって簡単に構成する方法を考案し、1978年に発表した^{4),5)}。本報告では、そのうちの一つである電流型方式についてシミュレーションにより詳細に検討したところ、良好な補償結果が得られたので報告する。本方式ではPWM(パルス幅変調)の電流型インバータを使用しているため、極めて応答速度が速い。さらに電流源として負荷電流を電流トランス(CT)を介して利用するため、負荷電流の増減とともに補償電流も自動的に増減し、負荷力率が一定ならばパルス幅制御の設定値の変更を必要としない。すなわち負荷変動に対して時間遅れなしに応答できるなどの優れた特徴を有している。

2. 回路構成

図1に負荷電流利用型ソリッド・ステート無効電力補償装置の回路構成を示す。また図2に各部の波形を示す。サイリスタ群 (Th1~6) は120度タイプの電流型インバータであり、それに短絡モード (たとえば、図1中のTh1およびTh4が同時にON状態となるモード)を導入した結果、図2-bに示した補償電流パターンを得る。したがって実際の補償電流波形は、補償電流パターンと負荷電流を電流トランス (CT) を介して整流した i_d との積で得られる。そこで問題となるのは、この補償電流が実現された場合、図1中に示した整流器にかかる電圧 v_o は、Th1~Th6の導通状態に対応して a, b, c 相の線間電圧の一部となる (図2-C参照)。 v_o は図2-Cの波形からも明らかなように交流であるので、図1中のTh7~Th12が単なるダイオードブリッジ整流器であれば、 v_o の半分の期間は電源短絡状態となるため、不適当である。そこで点弧角 $\alpha=0$ のサイリスタブリッジを使用している。

3. PWMインバータのパルス幅の決定

補償電流の基本波無効電力は、図2-bにおける補償電流パターン (以下 $f(t, \theta)$ とする) の θ を調節して大きさを变化させる。この θ は前節で説明した短絡モードの期間で、図中に示した様に、この短絡モードの継続モードの継続期間は電気角で 2θ である。以下、負荷電流の遅れ力率角 ϕ と、それを100%補償する θ との関係について述べる。

平衡した三相交流を対象としているので、一相に着目して議論をし、他相はその位相を $2\pi/3$ ずつ遅らせて考えればよい。電源電圧 e および負荷電流 i_L は、遅れ力率角を ϕ として、

$$e = E_o \sin \omega t \quad (1)$$

$$i_L = I_o \sin (\omega t - \phi) \quad (2)$$

である。また補償電流 i_c は、 i_d に $f(t, \theta)$ を掛けて、

$$i_c = i_d \cdot f(t, \theta) \quad (3)$$

で与えられる。したがって電源電流 i は、

$$i = i_L + i_c \quad (4)$$

ゆえに基本波無効電力補償を行うためには、 i をフーリエ級数に展開した場合の基本波の余弦成分を零にすればよい。つまり周期 $T=2\pi/\omega$ として、

$$0 = \frac{2}{T} \int_0^T i \cos \omega t \, dt$$

$$= \frac{2}{T} \int_0^T i_L \cos \omega t \, dt + \frac{2}{T} \int_0^T i_d f(t, \theta) \times \cos \omega t \, dt \quad (5)$$

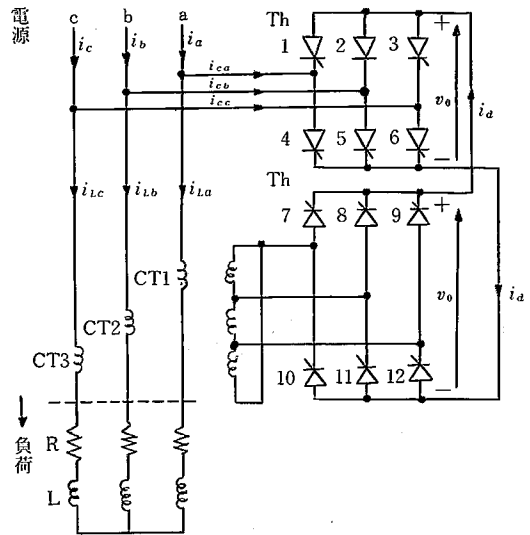


図1 回路構成

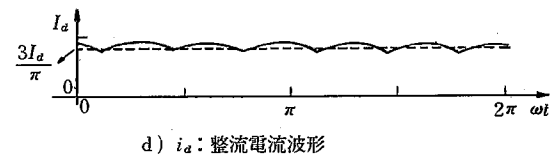
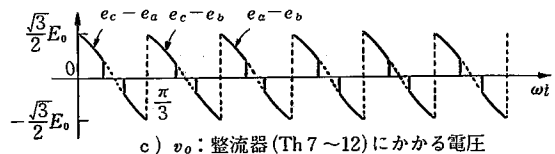
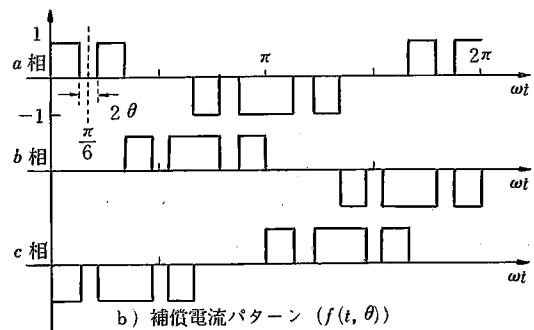
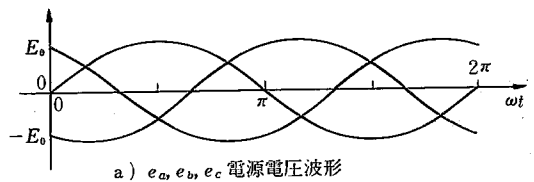


図2 各部の波形

(5) の右辺第一項は、 $-I_o \sin \phi$ である。右辺第二項の i_d は図2-dに示したように $\pi/3$ の周期で脈動しているが、これをその平均値 \bar{I}_d で平滑であると考え、積分の外へ出す。

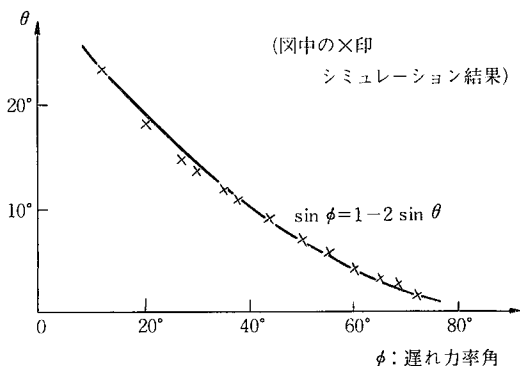


図3 φ-θ の関係

$$\bar{I}_d = \frac{1}{T} \int_0^T i_d dt = \frac{3}{\pi} I_d \quad (6)$$

ただし、 I_d は i_d のピーク値。
さらに I_d と i_L のピーク値 I_o との関係は、CTの巻数比を $k:1$ とすると

$$I_d = \sqrt{3} k I_o \quad (7)$$

以上より(5)を変形すると

$$I_o \sin \phi = \frac{18}{\pi^2} k I_o (1 - 2 \sin \theta) \quad (8)$$

θ は図2-bより明らかのように、その変化範囲は $0 \sim \pi/6$ である。これで ϕ の $0 \sim 90^\circ$ を補償するためには k の値は $\pi^2/18$ であればよい。以上より θ と ϕ の関係は

$$\sin \phi = 1 - 2 \sin \theta \quad (9)$$

(9)式の関係の理論値とシミュレーションでの値を図3に示す。

4. シミュレーション結果

図1中の Th1~Th12 は理想的なスイッチング素子、CTは理想変圧器、また負荷はRL、電源電圧は正弦波としてシミュレーションを行った。図3中×印はシミュレーションにより得られた θ の値である。図4は負荷電流波形、整流電流波形および補償後の電源電流波形の一例である。また図5に負荷電流の基本波力率(遅れ)と、補償後の電源電流の基本波力率の関係を示す。なお、 P : 基本波有効電力、 Q : 基本波無効電力として、

$$\text{基本波力率} = P / \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (10)$$

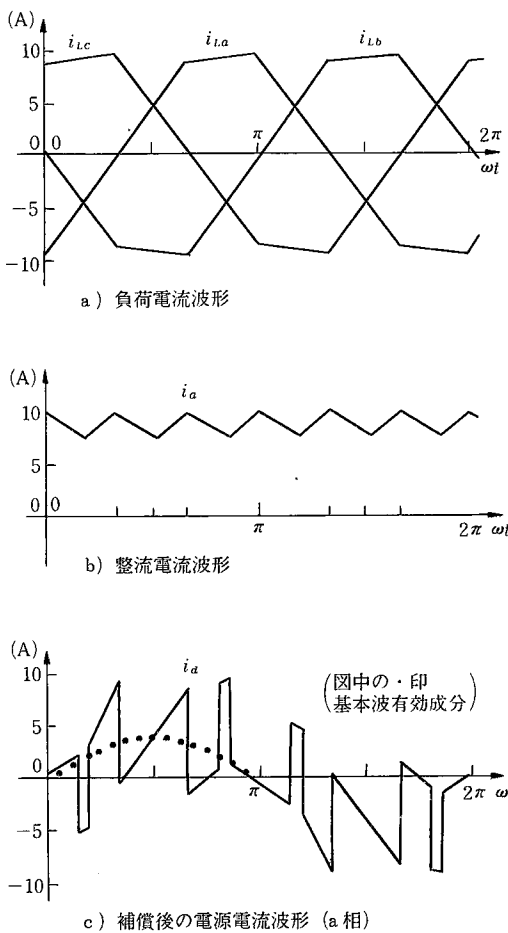


図4 各部電流波形の一例

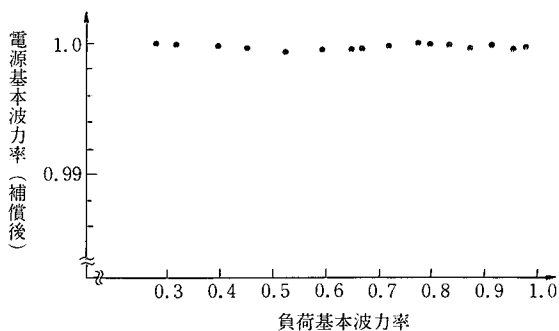


図5 基本波力率

5. あとがき

負荷電流利用型ソリッド・ステート三相無効電力補償装置についてシミュレーションした結果、基本波無効電

力補償に関してその動作が確認され、良好なる補償結果が得られた。問題点として、高調波成分の発生が多いこと、負荷電圧が乱れることなどがあり、改善の余地がある。実際の実験装置ではマイクロ・コンピュータで θ の決定およびサイリスタのゲート制御をする予定である。

なお、本研究は昭和53、54年度科学研究補助金によって行われたものである。(1980年1月14日受理)

参 考 文 献

- 1) Laszlo Gyugyi: Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits, Westinghouse Electric Corporation Research Laboratories Report, 1976
- 2) L. Gyugyi and B. R. Pelly: Static Power Frequency Changers (Book) Chap. 9
- 3) 野村, 藤原, 高橋: スイッチング装置で構成された電力調相器, 電気学会論文誌, 52-B-42, vol. 97, No. 6, 1977. 6
- 4) 坪井, 稲葉, 原島: PWMコンバータ方式による全半導体三相無効電力補償装置, 昭和53年電気学会全国大会講演論文集, No. 563, pp. 669~670 (1978. 4)
- 5) 坪井, 原島, 稲葉: AC/DCコンバータ回路を使ったソリッド・ステート無効電力補償装置の原理, 生産研究, vol. 30, No. 12, pp. 437~439 (1978, 12)

次 号 予 告 (4月号)

研 究 解 説

LiNbO₃と鉛ガラスを用いた電流, 電圧, 電力同時測定..... { 齋藤 成一
藤井 陽一
横山 幸嗣

研 究 速 報

Cyclic Undrained Strength of Sand by Simple Shear Test and Triaxial Test III (Test Results and Discussions) { 龍岡 文夫
マーシャル L. シルバー
アピチャート
フクナファン
アブラミディス
アナスティス

サブスペース実ベクトル反復法による複素固有値問題解法..... { 山田 嘉昭
岡村 知郎

自動車の発進に伴う交通騒音のシミュレーション..... { 立石 泰三
板倉 博

ボルタンメトリ検出器を用いたHPLCの基礎的研究 { 高橋 浩乃
馬場 昭治
高井 信

鋼繊維とポリエチレン繊維の混成系繊維を用いた繊維補強コンクリートの曲げ特性..... { 小林 一輔
趙 力次
西村 采男
今泉 和郎

鋼繊維補強コンクリートのせん断試験方法に関する実験的研究..... { 小林 一輔
魚本 健人
峰松 敏和