

PWMインバータの実験

1. 目的

PWM (Pulse-Width Modulation: パルス幅変調) インバータの入出力特性の測定と出力電圧波形の高調波解析をおこなうことにより、PWMインバータの特性とPWM方式による高調波低減の原理を理解する。

2. 理論

2.1 PWMインバータの概要

インバータは直流電力を交流電力に変換する装置であり、その出力電圧波形は正弦波であること、すなわち高調波がまったくふくまれていないことが理想である。しかし実際のインバータの出力電圧波形にはたくさん的高調波がふくまれている。たとえば方形波の出力電圧は、基本波のほかに第3、第5、第7など低い次数の高調波を多量にふくんでいる(図1)。とくにこのような低い周波数成分はフィルタを使っても除去しにくい。

PWM方式はインバータの出力電圧を多数のパルス状の波形によって構成し、低い次数の高調波を低減または除去する方式である。このような波形は高い次数の高調波はむしろ増加し、ひずみ率は方形波よりも高い(図1参照)。しかし高い周波数の高調波はフィルタによって簡単にとり除くことができるので正弦波が容易にえられるのである。PWM波形にふくまれる各高調波の量はPWMパルスの数や各パルスの幅と間隔によって変化する。低次高調波のすくないPWM波形を発生するには大別してつぎの二つの方法がある。

- (1) 信号波—搬送波比較方式
- (2) 計算によってPWMパルスの幅と間隔を決定する方法

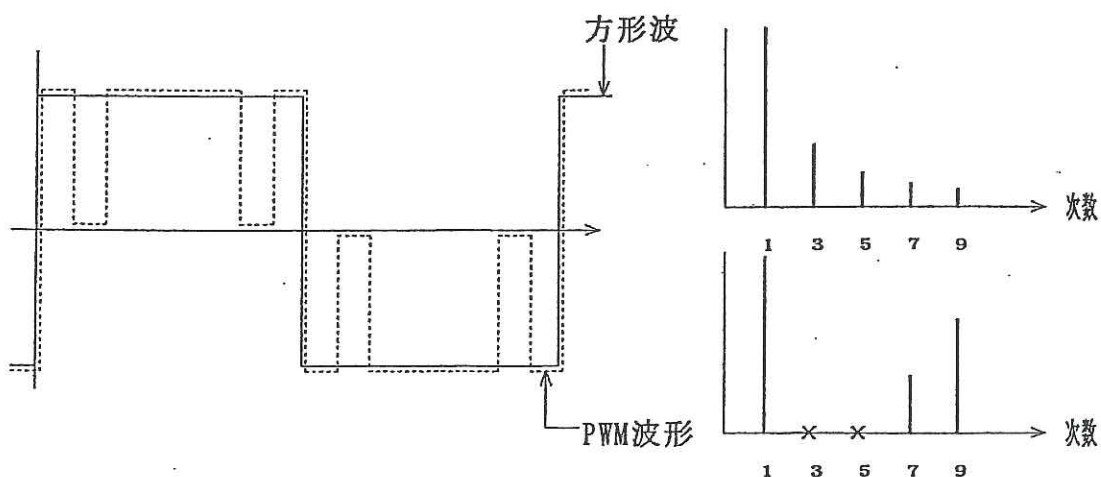


図1 インバータ出力波形とスペクトル

これらのうち(2)は、マイクロプロセッサを使用したデジタル方式であり、あらかじめPWM出力波形を構成する各パルスの幅と間隔を低次高調波がなくなるように計算しておき、ROMに記憶させ、順次読み出してPWMパルスを発生させる方式である。

本実験で使用するインバータでは上の(1)の方法によってPWM波形を発生しているので、以下では搬送波として三角波、信号波として正弦波をつかい、両者の大小を比較することによってPWMパルス波形を発生する方法について説明する。搬送波と信号波として上記以外の波形の組み合わせをつかうこともかんがえられるが、上の組み合わせがもっとも欠点が少なく、広く利用されている。

2. 2 正弦波と三角波の比較によるPWM波形の発生

発振器を使用して、

$$\text{正弦波} \quad e_o = a \sin(\omega_o t + \phi), \quad 0 \leq a \leq 1$$

および

$$\text{三角波} \quad e_c \cdots \cdots \text{振幅 } 1, \text{角周波数 } \omega_c$$

をそれぞれ個別に発生させる(図3参照)。

まず、 e_o と e_c を比較して、その大小にしたがって図2のフルブリッジ形単相インバータ回路のスイッチ S_1 と S_3 をつぎのようにオン、オフさせる。

$$(1) \quad e_o \geq e_c \text{ のとき } S_1 \text{ オン、 } S_3 \text{ オフ}$$

$$(2) \quad e_c > e_o \text{ のとき } S_3 \text{ オン、 } S_1 \text{ オフ}$$

(1)の状態では、図2の点aの、直流電源の負側の端子にたいする電位 v_a は $+E_a$ 、(2)では、 v_a は0となるので、 v_a の波形は図3にしめすようになる。また、 $-e_o$ と e_c の大小を比較して、スイッチ S_2 と S_4 を

$$(1) \quad -e_o \geq e_c \text{ のとき } S_2 \text{ オン、 } S_4 \text{ オフ}$$

$$(2) \quad -e_c > e_o \text{ のとき } S_4 \text{ オン、 } S_2 \text{ オフ}$$

のようにオン、オフさせると、直流電源の負側の端子にたいする点bの電位 v_b は図3にしめしたようになる。このようなスイッチのオン、オフによって、交流負荷RLの両端にえられる電圧(インバータ出力電圧)は v_a と v_b の差

$$v_o = v_a - v_b$$

で、図3にしめしたようなPWM波形となる。

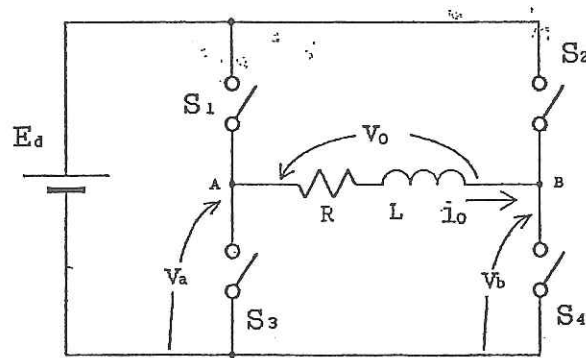


図2 フルブリッジ形インバータ回路

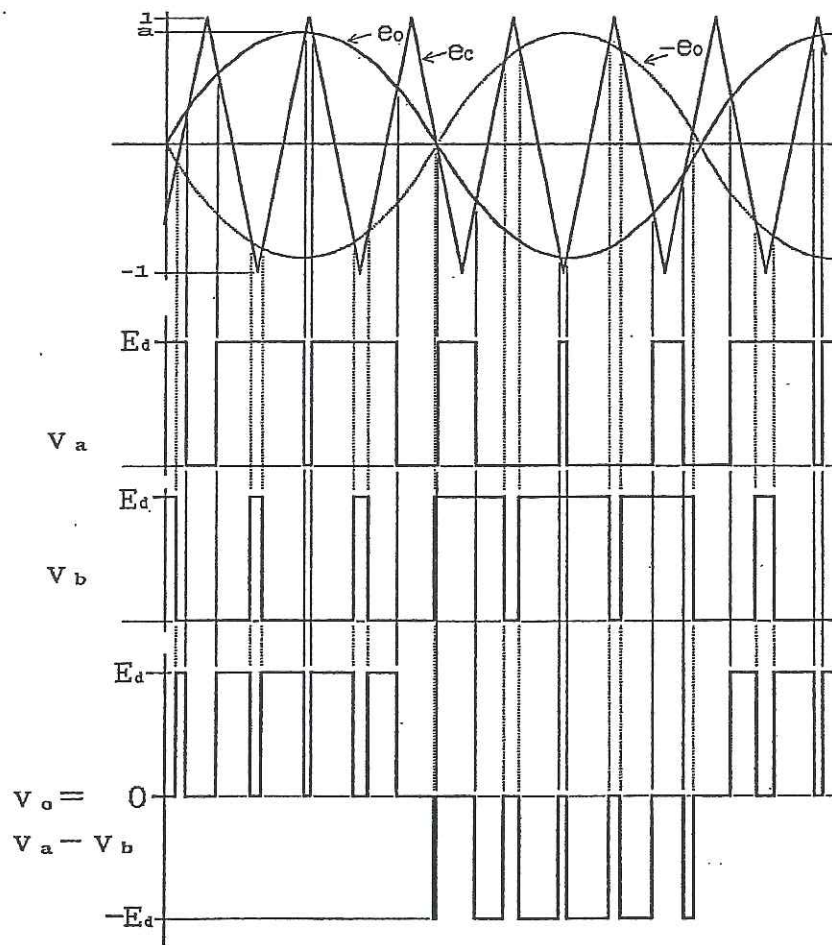


図3 搬送波－信号波比較方式によるPWM波形の発生原理

搬送波と信号波の周波数の比 ω_c/ω_o が整数でなく任意の実数のときはこのようにして発生したPWM波形は厳密には周期波形ではない（この方式は非同期式とよばれる）。しかしこのPWM波形の基本波は角周波数 ω_o であり、その振幅は a に比例する。したがって信号波 e_o の周波数と大きさを変化させればインバータ出力電圧の大きさと周波数を加減することができる。信号波の振幅 a は変調度とよばれる。

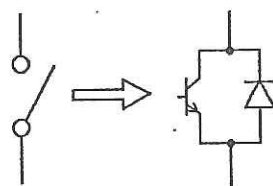
また高調波は(1)式のような周波数成分が含まれていることが知られている。すなわち、搬送波周波数の整数倍 ω_c 、 $2\omega_c$ 、 $3\omega_c$ 、... の両側に信号波 ω_o の整数倍の間隔で側帯波が加わっている。これらのうち周波数が低くて振幅が大きい

$$\left. \begin{array}{llll} \omega_c, & \omega_c \pm 2\omega_o, & \omega_c \pm 4\omega_o, & \omega_c \pm 6\omega_o, \dots \\ & 2\omega_c \pm \omega_o, & 2\omega_c \pm 3\omega_o, & 2\omega_c \pm 5\omega_o, \dots \\ 3\omega_c, & 3\omega_c \pm 2\omega_o, & 3\omega_c \pm 4\omega_o, & 3\omega_c \pm 6\omega_o, \dots \\ & 4\omega_c \pm \omega_o, & 4\omega_c \pm 3\omega_o, & 4\omega_c \pm 5\omega_o, \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{array} \right\} \quad (1)$$

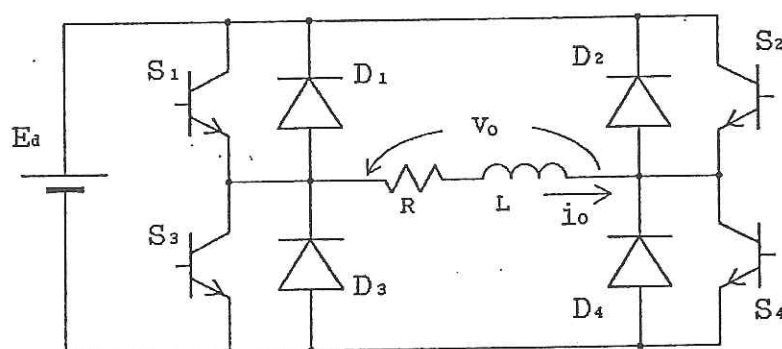
のは $\omega_c - 2\omega_o$ 、 $\omega_c - 4\omega_o$ などであり、これが信号波周波数 ω_o に近づくとビートなどの障害が発生する。したがって非同期式では搬送波周波数 ω_c が十分に高いことが必要である。

これにたいして周波数比 ω_c / ω_o を整数としPLL回路をつかって位相を合わせる方式も考案されている。この方式は同期式とよばれ、回路は若干複雑になるが ω_c / ω_o をより小さくとることができる。

実際の回路では図2のスイッチのかわりに半導体スイッチング素子をつかって回路のオン、オフをおこなう。スイッチを、スイッチングトランジスタとダイオードを逆並列接続したものでおきかえた回路を図4(b)にしめす。



(a) スイッチを半導体スイッチング素子でおきかえる



(b) 単相フルブリッジ形インバータ回路

図4 スイッチング素子としてトランジスタとダイオードを使用したインバータ回路

2. 3 スイッチング素子について

インバータ回路でもっとも重要な役割を演じるスイッチング用半導体素子としては図3のようなバイポーラトランジスタのほかに、GTOサイリスタ、パワーMOSFET、IGBTなどの自己消弧形素子を使用される。これらの素子はそれぞれ一長一短があり、たとえばGTOサイリスタは高耐圧、大電流の素子を作ることにはできるがスイッチング速度はおそい。逆にパワーMOSFETは高速低損失のスイッチングができるが、大容量の素子を作ることにはむずかしい。本実験のインバータに使用しているIGBTは、大容量、高速の素子として最近用途が広がりつつある。実際にインバータ回路を設計するときには、用途におうじて使用電圧、電流容量、スイッチング周波数などを考慮して素子を選定する必要がある。

2. 4 デッドタイム

スイッチング時間は素子の種類に応じて数100nsec～数10 μ sec程度であり、これは各素子がターンオン、ターンオフするのにこれだけの時間がかかることを意味している。したがって、たとえば図2のインバータ回路において、 S_1S_4 がターンオンしてから S_2S_3 がターンオフするまでに若干の時間をおく必要がある（そうしないと S_1 と S_3 および S_2 と S_4 が同時に導通して短絡してしまう）。この時間をデッドタイムとよぶ（図4の t_d ）。デッドタイムのためにインバータの出力電圧は図3の波形とは若干ことなり、図4のように極性がきり換わるたびに電圧ゼロの時間帯が生じる。このため実際の出力電圧波形の高調波含有量は上の解析結果とは若干ことになってくる。

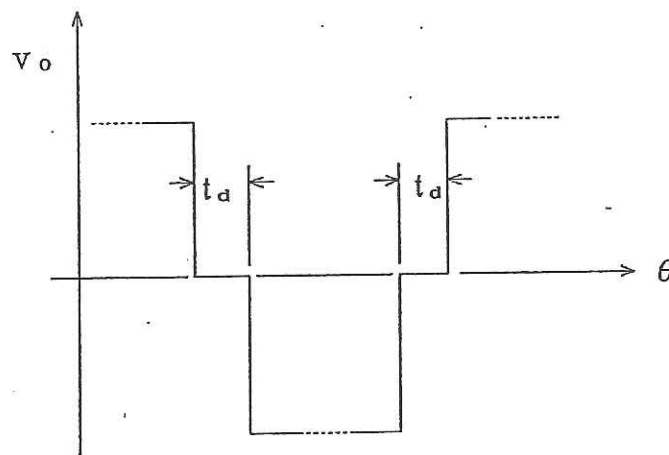


図5 デッドタイム

3. 実験

3. 1 結線図

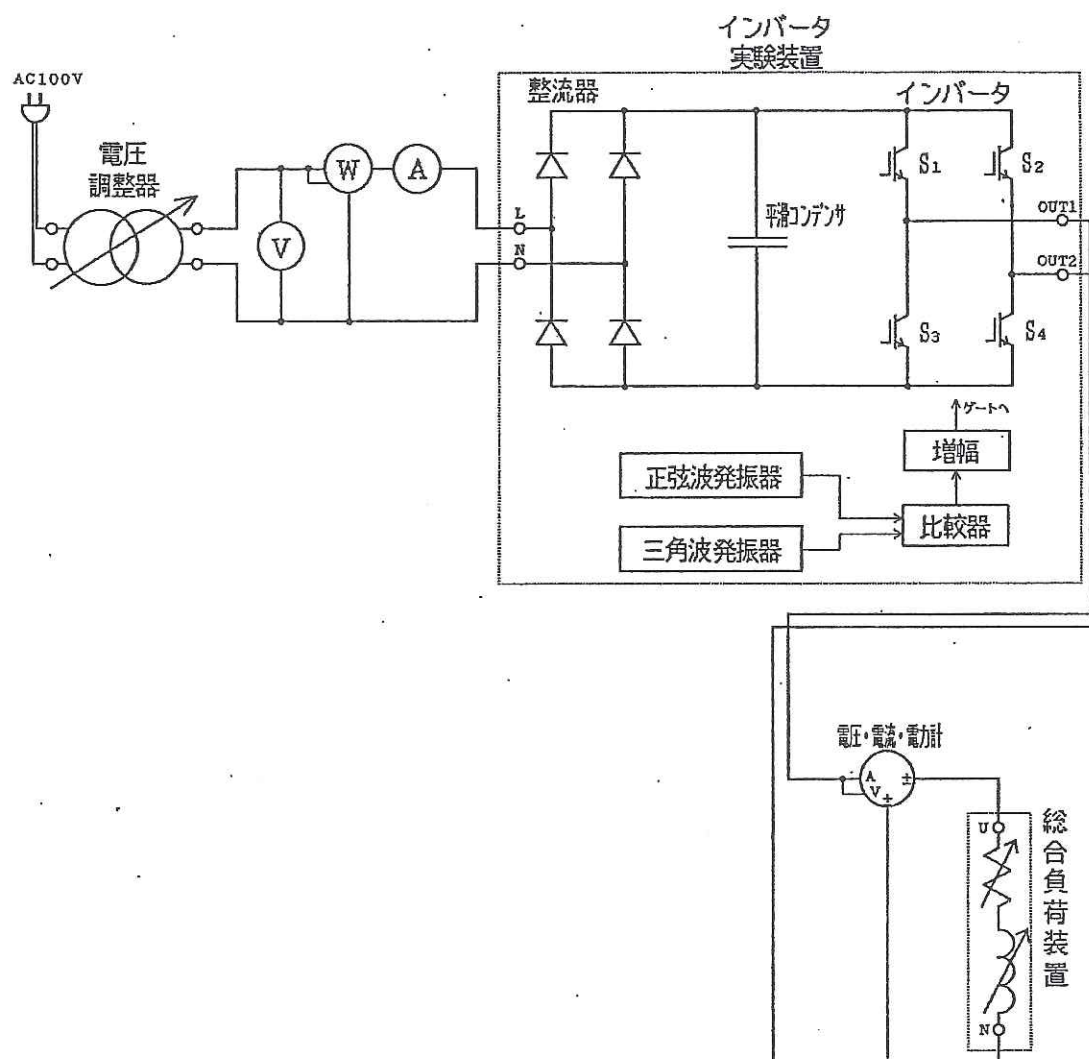


図 6 結線図

3. 2 実験方法

(1) インバータの出力特性

- ① 図 5 のように結線し、インバータ出力の電圧および電流波形を観測するためデジタルオシロスコープを、信号波（正弦波）と搬送波（三角波）の波形観測のため他のオシロスコープを接続する。

- ② インバータの出力周波数を 60[Hz] とし、デジタルオシロスコープ上で信号波と搬送波を重ね合わせ、インバータ出力電圧と比較観測してPWM波形発生 の原理を確認する。
- ③ 電圧調整器および負荷を調節して、インバータ出力電圧 100[V]、出力電流 2 [A] とする。
- ④ インバータ出力電圧を変化させ、変調度（搬送波の振幅）をオシロスコープの画面上で、また入出力を各計器で測定し、入出力特性と変調度にたいするインバータ出力電圧の線形性を測定する（表2）。

表2 インバータの入出力特性

直流入力			交流出力			変調度	効率
電圧 V_i [V]	電流 I_i [A]	電力 P_i [W]	電圧 V_o [V]	電流 I_o [A]	電力 P_o [W]	a	$\eta = P_o/P_i$ $\times 100$ [%]

(2) 出力電圧の高調波解析

- ① オシロスコープで搬送波（三角波）を観測し、その画面上から周波数を測定する。また、負荷として総合負荷装置を接続し、力率を0.5 に設定する。
- ② 出力周波数 90[Hz] および180[Hz] にたいし、それぞれについて波形をデジタルオシロスコープによって記録する。またパソコンにデータを取りこんで高調波含有量とひずみ率を計算し、表3のようにまとめる。

$$\text{ひずみ率} = \frac{\text{全高調波の実効値}}{\text{基本波の実効値}} = \frac{\sqrt{a_3^2 + a_5^2 + \dots}}{a_1} \times 100 [\%]$$

表3 インバータ出力電圧のひずみ率

出力周波数 [Hz]	搬送波との周波 数比 ω_c/ω_o	電圧のひずみ率 [%]	電流のひずみ率 [%]
---------------	-----------------------------------	----------------	----------------

- ③ 信号波（正弦波）と搬送波（三角波）の波形をデジタルオシロスコープで観測し、時間軸を拡大してパソコンにとりいれ波形をプリントアウトせよ。またインバータ出力電圧、電流の対応する部分をやはりデジタルオシロスコープで観測し、プリンターで出力して両者を比較せよ。

3. 3 実験結果の整理

- (1) 表2の結果を、横軸をインバータ出力電圧 V_o をとり、たて軸に出力 P_o 、変調度 a 、効率 η 、をとって曲線によってあらわす。
- (2) 高調波解析の結果から各出力周波数ごとにスペクトル図を描く。

4. 課題

- (1) 搬送波周波数が高いほどインバータ出力電圧にふくまれる低次高調波成分が少なくなるが、とくに 20[kHz] 以上が望ましいとされる。それはなぜか。
- (2) 上の実験(2)の結果から(1)式が成立するかどうか検討せよ。
- (3) 実験結果について考察せよ。