

⑦【DC-AC 変換器 1】 講師: 吉野輝雄

 <p>DC-AC変換器 1</p> <p>講師 東芝三菱電機産業システム(株) 吉野輝雄</p>	
<p><b>講義の概要</b></p> <p><b>アブストラクト</b> 単相インバータの構成と動作原理、矩形波の基本波・高調波成分、特定高調波除去の原理を説明する。PWM制御と発生高調波を説明する。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 単相インバータの構成と動作原理 最も単純な構成であるハーフブリッジ回路を用い、単相インバータの動作原理を説明、フルブリッジ回路に展開する。</li> <li>2. 単相インバータ出力(矩形波)の基本波と高調波成分 単相インバータをワンパルスで動作させた場合の矩形波電圧出力について、フーリエ級数展開し、パルス幅に対する基本波成分・高調波成分の特性を説明する。</li> <li>3. 特定高調波除去の原理 2で求めた高調波成分の特性から、図式的に特定高調波成分の除去をイメージを説明する。同時に、その理論的背景を数式を用いて説明する。</li> <li>4. PWM制御 PWM制御の原理を説明する。振幅変調や周波数変調と比較を通じ、PWM制御に含まれる周波数成分を説明する。シミュレーションを用い、PWM波形と周波数成分のイメージを説明する。</li> <li>5. 三相インバータの構成と動作原理 三相インバータの構成と動作原理を説明する。シミュレーションにより、三相回路の動きのイメージを説明する。また、単相インバータとの差異を紹介する。(モータードライブ実験の基礎知識)</li> </ol>	
<p><b>Index</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 単相インバータの構成と動作原理</li> <li>2. 矩形波中の基本波・高調波成分</li> <li>3. 特定高調波除去の原理</li> <li>4. PWM制御と発生高調波</li> <li>5. 三相インバータの構成と動作原理</li> </ol>	
<p><b>1. 単相インバータの構成と動作原理</b></p> <p>交流電圧が出力できる回路の内、最も単純なハーフブリッジ回路からスタートし、単相インバータによるDC-AC変換の原理を学びます。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.1 ハーフブリッジの構成と基本動作</li> <li>1.2 単相インバータの構成と基本動作</li> </ol>	
<p><b>DC-AC変換の原理</b></p> <p>直流と交流間の電力変換は、DC-AC変換器により行われますが、その基本構成を示します。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 単相インバータは、4個のスイッチング素子から構成されます。</li> <li>▶ 大容量装置では、スイッチング素子として、一般にIGBTが使用されます。(注: この講義では便宜的にIGBTを用いて説明します。)</li> </ul>  <p>IGBT変換器</p> <p>直流回路 DC</p> <p>交流回路 AC</p> <p>A相 B相</p> <p>IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor 絶縁ゲートバイポーラトランジスタ</p>	

⑦【DC-AC 変換器 1】 講師: 吉野輝雄

<p><b>インバータの動作イメージ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>IGBTは、高速(1/1000秒以下)でオン・オフします。</li> <li>IGBTにより、直流の+と-の電圧を交互に出力し、交流電圧を作ります。</li> </ul> <p>TMEiC In Active Industry Page 6</p>	
<p><b>1.1 ハーフブリッジの構成と基本動作</b></p> <p>理解しやすいように、IGBT2個で構成される単純なハーフブリッジ回路で、スタートします。この回路には、4つの状態(モード)があります。</p> <p>TMEiC In Active Industry Page 7</p>	
<p><b>ハーフブリッジの動作モード</b></p> <p>IGBT1に着目し、オンしている状態、オフしている状態、また、その移り変わりの間にあるデッドタイムと呼ばれる状態について学びます。</p> <p>TMEiC In Active Industry PD-8 Page 8</p>	
<p><b>Mode 1 IGBT1 オン</b></p> <p>IGBT1がオンする。直流電源の正電圧が出力される。負電流の方向に流れる。電流は負の方向に流れる。リアクトルは電流を遅延させる。IGBT1のスイッチング損失は、IGBT1のスイッチング時に発生する。</p> <p><b>Mode 2 デッドタイム(Dead time)</b></p> <p>IGBT1とIGBT2の両方がオフになる期間がある。この期間中にリアクトルは電流を遅延させる。IGBT1のスイッチング損失は、IGBT1のスイッチング時に発生する。</p> <p><b>Mode 3 IGBT2 オン</b></p> <p>IGBT2がオンする。直流電源の逆電圧が出力される。負電流の方向に流れる。電流は負の方向に流れる。リアクトルは電流を遅延させる。IGBT2のスイッチング損失は、IGBT2のスイッチング時に発生する。</p> <p><b>Mode 4 デッドタイム</b></p> <p>IGBT1とIGBT2の両方がオフになる期間がある。この期間中にリアクトルは電流を遅延させる。IGBT2のスイッチング損失は、IGBT2のスイッチング時に発生する。</p> <p>TMEiC In Active Industry Page 9</p>	
<p><b>電流の方向が逆の場合</b></p> <p>IGBT2とIGBT1の動作が逆になります。デッドタイム期間、電流はIGBT1の逆並列ダイオードを通り、流れます。</p> <p>TMEiC In Active Industry PD-10 Page 10</p>	

⑦【DC-AC 変換器 1】 講師: 吉野輝雄

**電流の方向が逆の場合**

その他の通電モードは、下図のようになります。

Mode 2      Mode 3      Mode 4

TMEiC Page 11

**1.2 単相インバータの構成と基本動作**

単相インバータは、4つのIGBTで構成されます。  
ハーフブリッジ回路に対し、フルブリッジ回路とも呼ばれます。

TMEiC Page 12

**線間電圧出力**

単相インバータの線間電圧は、正、負に加え、ゼロ電圧が出力されます。

正電圧      負電圧      ゼロ電圧

TMEiC Page 13

**正の電圧出力**      **負の電圧出力**

インバータの正の電圧を出力する際は、IGBT1とIGBT2が導通します。  
負の電圧を出力する際は、IGBT3とIGBT4が導通します。

TMEiC

**デッドタイムでの動作**      **デッドタイムでの動作**

IGBT1とIGBT2のオン期間と、IGBT3とIGBT4のオン期間との間に、デッドタイムを設けます。  
デッドタイムの間に、電流が負の方向に流れることがあり、この間、電流が流れなくなることで、電流がゼロになります。  
また、電流がゼロになることで、電流がゼロになります。

TMEiC Page 14

**連続モード**      **連続モード**

連続モードでは、交流出力電圧がゼロになる瞬間も一時的に発生します。  
この瞬間に発生する電流は、電流がゼロになる瞬間に発生します。IGBT1とIGBT2が導通して電流が流れることで、電流がゼロになる瞬間に発生します。IGBT1とIGBT2が導通して電流が流れることで、電流がゼロになる瞬間に発生します。

TMEiC Page 15

⑦【DC-AC 変換器 1】 講師: 吉野輝雄

<p><b>演習問題</b></p> <p>単相インバータの4つのモードにつき、どのIGBTに、どの方向で電流が流れるか矢印で示しなさい。選流モードは無しとして、検討しなさい。          モード1: IGBT1とIGBT4オン モード2: デッドタイム          モード3: IGBT3とIGBT2オン モード4: デッドタイム</p> <p>電流方向 正 電流方向 負</p> <p>モード1      モード2      モード3      モード4</p> <p>TMEiC Page 16</p>	
<p><b>2. 矩形波中の基本波・高調波成分</b></p> <p>DC-AC変換のインバータからの出力電圧は、矩形波の集合となりますので、矩形波に含まれる基本波・高調波成分を学びます。</p> <p>2.1 単相インバータによる矩形波電圧出力          2.2 基本波成分と高調波成分</p> <p>TMEiC Page 17</p>	
<p><b>2.1 単相インバータによる矩形波電圧出力</b></p> <p>単相インバータを制御することで、パルス幅を制御した矩形波電圧が出力されます。</p> <p>TMEiC Page 18</p>	
<p><b>位相制御によるパルス幅制御</b></p> <p>180° 幅のゲート信号をずらすことで、出力電圧の幅を制御します。</p> <p>1のゲート      オン      オフ      2のゲート      オフ      オン      3のゲート      4のゲート</p> <p>TMEiC Page 19</p>	
<p><b>位相制御によるパルス幅制御</b></p> <p>1-3のIGBTが同時にオンしている期間は選流モードとなり、線間の出力電圧がゼロになり、パルス幅が短くなります。2-4のIGBTが同時にオンしている期間も同様です。</p> <p>1のゲート      オン      オフ      2のゲート      オフ      オン      3のゲート      4のゲート</p> <p>TMEiC Page 20</p>	

⑦【DC-AC 変換器 1】 講師: 吉野輝雄

### 2.2 基本波成分と高調波成分

矩形波は、様々な周波数成分の正弦波に分解できます。フーリエ級数というもので表現されます。ここで、 $\omega$  は角周波数と呼ばれ、 $\omega=2\pi f$  で計算されます。高調波成分を計算する際には、 $f$  は交流系統の周波数50Hzまたは60Hzとなります。  
 ( $\omega$  を単に周波数と呼ぶことがあります。)

フーリエ級数の計算

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t)$$

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos n\omega t d\omega t$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin n\omega t d\omega t$$

正弦波を合成して矩形波が近似できる

TMEiC Page 21

### 矩形波に含まれる基本波と高調波

パルス幅  $\theta$  と各周波数成分の関係を図に示します。  
 位相シフト量を  $\alpha$  とすると、各成分の大きさは、次のように表現されます。

$$B_n = \frac{2E_p}{n\pi} \cos \frac{n\alpha}{2} (1 - \cos n\pi)$$

ただし、 $\alpha = \pi - \theta$

TMEiC Page 22

### 3. 特定高調波除去の原理

2章で学んだ高調波の特性から、特定高調波除去の原理について学びます。

- 3.1 ある次数の高調波成分がゼロになる矩形波
- 3.2 矩形波の組合せによる高調波除去の原理
- 3.3 特定高調波を除去した矩形波電圧の例

TMEiC Page 23

### 3.1 ある次数の高調波成分がゼロになる矩形波

パルス幅がある値のとき、高調波成分がゼロになる場合があります。一例として、3次調波成分は、 $\alpha=60^\circ$  ( $\pi/3$  rad) ( $\theta=120^\circ$ ) でゼロになります。

$$B_3 = \frac{2E_p}{3\pi} \cos \frac{3\alpha}{2} (1 - \cos 3\pi) = \frac{2E_p}{3\pi} \cos \left( \frac{3\pi}{2} \right) (1 - \cos 3\pi) = \frac{2E_p}{3\pi} \cos \frac{\pi}{2} (1 - \cos 3\pi) = 0$$

TMEiC Page 24

### 3.2 矩形波の組合せによる高調波除去の原理

一つの例として、3つの矩形波を組合せたパルス波形を考えます。このように正負のパルスを組合せると、2か所で中抜けしたパルスを作れます。  
 3つのパルス幅を適宜選択して組合せることで、高調波を除去できます。

TMEiC Page 25

⑦【DC-AC 変換器 1】 講師: 吉野輝雄

<p><b>高調波成分の打消し原理</b></p> <p>5次成分を例に説明します。  <math>\alpha_1</math>の矩形波は負電圧を出力しているため、全ての周波数成分の極性が、他の正電圧を出力している矩形波とは逆になることを利用します。  <math>\alpha_2</math>の矩形波の5次成分の大きさが<math>k_1</math>と<math>k_2</math>の和に等しくなるよう、<math>\alpha_1</math>、<math>\alpha_2</math>、<math>\alpha_3</math>を選択すると、5次成分を打ち消すことができます。</p>  <p>極性が他とは逆</p> <p>矩形波の5次成分特性</p> <p>TMEiC Page 26</p>	
<p><b>高調波を打ち消すための連立方程式</b></p> <p>基本波の大きさをV1としたとき、3次調波、5次調波を打ち消すための連立方程式は次のようになります。</p> <p><math>4E(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3) / \pi = V_1</math> 基本波成分を所望の値とする条件  <math>4E(\cos 3\alpha_1 - \cos 3\alpha_2 + \cos 3\alpha_3) / (3\pi) = 0</math> 3次調波成分をゼロにする条件  <math>4E(\cos 5\alpha_1 - \cos 5\alpha_2 + \cos 5\alpha_3) / (5\pi) = 0</math> 5次調波成分をゼロにする条件</p> <p>解析的には解けないので、数値計算で解を得ます。</p> <p>出典: パワーエレクトロニクス学入門 p117</p> <p>TMEiC Page 27</p>	
<p><b>3次5次調波を打ち消す波形の例</b></p> <p><math>\alpha_1 = 17.1^\circ</math> <math>\alpha_2 = 28.8^\circ</math> <math>\alpha_3 = 41.4^\circ</math>      とすると、3次と5次調波を打ち消すパルスとなります。</p>  <p>3次と5次成分が打ち消されている</p> <p>出典: パワーエレクトロニクス学入門 p118</p> <p>TMEiC Page 28</p>	
<p><b>4. PWM制御と発生高調波</b></p> <p>DC-AC変換器の出力波形を作る制御として、最も広く使われているPWM制御の原理について学びます。また、その出力波形に含まれる基本波、高調波について学びます。</p> <p>4.1 PWM制御の原理          4.2 PWM波形に含まれる周波数成分          4.3 PWM波形の作図演習</p> <p>TMEiC Page 29</p>	
<p><b>4.1 PWM制御の原理</b>  <b>Pulse Width Modulation</b></p> <p>キャリア波に参照波が交差したタイミングでIGBTへのパルスをオンオフし、変換器出力電圧を制御します。      ここでは、原理が理解しやすいバイポーラ波形で説明しています。</p>  <p>参照波=出力したい交流電圧      キャリア波      制御信号      変換器出力電圧</p> <p>TMEiC Page 30</p>	

⑦【DC-AC 変換器 1】 講師: 吉野輝雄

### 振幅変調

最も単純な変調方式として、振幅変調がある。Amplitude Modulationの頭文字をとってAM変調とも呼ばれる。AMラジオに使われている変調方法である。

キャリア周波数を $\omega_c$ 、変調信号の周波数を $\omega_m$ とすると、その信号は下式で表される。信号波とキャリア波の周波数の和と差の周波数成分、側帯成分が生じる。

$$v(t) = (k_c + k_m \sin \omega_m t) \sin \omega_c t = k_c \sin \omega_c t + \frac{k_m}{2} \cos(\omega_c + \omega_m) t + \frac{k_m}{2} \sin(\omega_c - \omega_m) t$$

時間領域の波形 周波数成分

TMEiC Page 31

### 周波数変調

周波数変調は、Frequency Modulationの頭文字をとって、FM変調と呼ばれる。信号波形に粗なところと密なところが現れ、周波数に変化している様子が分かる。

キャリア周波数を $\omega_c$ 、変調信号の周波数を $\omega_m$ とすると、その信号は下式で表される。周波数変調方式では複数の側帯成分が生じることが分かる。

$$v(t) = \sin(\omega_c t + k \sin \omega_m t)$$

時間領域の波形 周波数成分

TMEiC Page 32

### 4.2 PWM波形に含まれる周波数成分

PWM制御は矩形波が疎になるところ密になるところが現れる点で、FM変調に似ているので、複数の側帯波が生じます。しかし、矩形波の集合であるため、簡単な式では表せません。

$\omega_c$ をキャリア周波数、 $\omega_m$ を参照信号の周波数、 $n$ と $k$ を整数とすると、PWM制御の矩形波電圧には、下式で示される周波数成分が含まれます。

$$\omega = n\omega_c \pm k\omega_m$$

時間領域の波形 周波数成分(次数)

TMEiC Page 33

### PWM変調の各次数の成分

参照信号 $\omega_m$ の成分は、参照信号の振幅 $a$ と直流電圧に比例します。

$$V_{\omega_0} = aE_d$$

PWMの各次数の成分はベッセル関数(Bessel function)で表されます。

周波数が $n\omega_c \pm k\omega_m$ の周波数成分の振幅は、 $V(n, k) = \frac{4E_d}{\pi} J_k\left(\frac{an\pi}{2}\right)$

ただし、 $n$ と $k$ の組合せは次の通り。  
 $n=1,3,5...$ (奇数)の場合は、 $k=0,2,4...$ (偶数)  
 $n=2,4,6...$ (偶数)の場合は、 $k=1,3,5...$ (奇数)

一般には、シミュレーションを行い、周波数分析をして高調波成分を計算します。

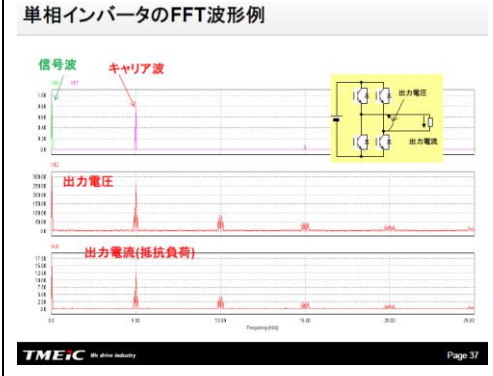
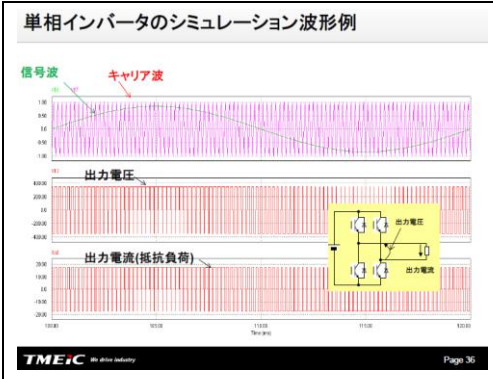
TMEiC Page 34

### PSIMデモ版によるシミュレーション

デモ版で作れる回路でシミュレーションしたものを紹介します。

TMEiC Page 35

⑦【DC-AC 変換器 1】 講師: 吉野輝雄



### 4.3 PWM波形の作図演習

PWM制御は一見、複雑に見えますが、参照波とキャリア波が与えられれば、出力電圧の矩形波を作図することができます。

演習: 下図の2つの制御信号の交点に着目し、出力電圧波形を作図して下さい。

(1) 参照波>キャリア波の時、IGBT1がオンすると、IGBT1のオン信号を作図して下さい。IGBT2はその逆の関係のときオンすると、IGBT2のオン信号を作図して下さい。

(2) IGBT1がオンすると+Ed、IGBT2がオンすると、-Edが出力するとして、単相インバータの出力電圧を作図して下さい。

TMEiC Page 38

### 作図演習用紙

PWM電圧波形、リアクトル電流の作図のための用紙です。

参照波>出力電圧

このタイミングで、電流がゼロとして作図します。

TMEiC Page 39

### 5. 三相インバータの構成と動作原理

モータードライブ装置や三相交流系統に連系するDC-AC変換器として、三相インバータの構成と動作原理を学びます。基本的には、既に学んだ単相インバータと同様な考え方で理解できます。また、その相違点も学びます。

- 5.1 三相インバータの構成
- 5.2 三相インバータの動作原理
- 5.3 単相インバータと三相インバータの相違点

TMEiC Page 40



⑦【DC-AC 変換器 1】 講師: 吉野輝雄

### 5.1 三相インバータの構成

IGBTを6つ使った回路となります。  
 ここでは、三相インバータの出力端子名は、A、B、Cと呼びます。  
 IGBTの名称は、U、V、W、X、Y、Zとする場合もありますが、ここでは数字で呼びます。

TMEiC Page 41

### 三相インバータと単相インバータの比較

単相インバータに比べ、少し複雑になりますが、基本的には同じ動作原理です。  
 単相インバータに1レグ追加しただけで、線間電圧が3つ出力できるようになります。

TMEiC Page 42

### 三相交流回路の復習

三相交流の「相電圧」「線間電圧(相間電圧)」を復習します。

TMEiC Page 43

### 三相インバータの相電圧と線間電圧

A相とB相に着目し、「相電圧」と「線間電圧(相間電圧)」を考えます。  
 インバータの直流回路の中性点が接地していると仮定します。  
 1つの相の出力電圧は、 $E_d/2$ と $-E_d/2$ の2つの値の矩形波となります。  
 2つの相の間の線間電圧は、 $E_d$ 、 $0$ 、 $-E_d$ の3つの値を取る矩形波となります。  
 波形は矩形波ですが、三相インバータは三相交流電源と同様なものと考えられます。

TMEiC Page 44

### 5.1 三相インバータの動作原理

3つの相の矩形波電圧出力(180°幅)が、120°ずれて制御される三相インバータを考えます。IGBT1~6のゲート信号は、下図のようになります。

TMEiC Page 45

⑦【DC-AC 変換器 1】 講師: 吉野輝雄

<p><b>矩形波出力の三相インバータ電圧波形</b></p> <p>最後に、<math>V_o</math>と<math>V_A</math>から<math>V_{o-A}</math>を作図します。</p> <p>TMEiC Page 46</p>	
<p><b>三相インバータの基本電圧ベクトル</b></p> <p>三相インバータの電圧出力状態を電圧ベクトルで表現する方法があります。</p> <p>出典: パワーエレクトロニクス入門 p107</p> <p>TMEiC Page 47</p>	
<p><b>三相インバータ負荷の中性点電圧</b></p> <p>三相負荷の中性点の電圧を検討してみます。          キルヒホッフの法則により、インバータ出力電流の和は、ゼロになります。</p> $I_A + I_B + I_C = 0$ <p>1つの相から流れ出た電流は、残りの2つの相から戻ってきます。</p> <p>TMEiC Page 48</p>	
<p><b>三相インバータ負荷の中性点電圧</b></p> <p>それぞれの相の電流は、相電圧と中性点の電圧から計算できます。負荷は平衡しており、インピーダンスをZとします。</p> $I_A = \frac{V_A - V_N}{Z}, I_B = \frac{V_B - V_N}{Z}, I_C = \frac{V_C - V_N}{Z}$ <p>TMEiC Page 49</p>	
<p><b>インバータ三相負荷の中性点電圧</b></p> <p>三相の電流の和はゼロなので、</p> $\frac{V_A - V_N}{Z} + \frac{V_B - V_N}{Z} + \frac{V_C - V_N}{Z} = 0$ <p>分母が等しいので、分子の和もゼロ。</p> $V_A - V_N + V_B - V_N + V_C - V_N = 0$ <p>したがって、</p> $V_N = \frac{V_A + V_B + V_C}{3}$ <p>TMEiC Page 50</p>	

⑦【DC-AC 変換器 1】 講師: 吉野輝雄

<p><b>三相インバータ負荷の中性点電圧の作図</b></p> <p>負荷の中性点電圧<math>V_N</math>は、常に変動していることが分かる。          PWMの場合も波形は異なるが、中性点電圧は変動する。</p> <p>TMEiC Page 51</p>	
<p><b>交流電源の場合の三相負荷の中性点電圧</b></p> <p>交流電源が平衡しているとする、相電圧の和もゼロになります。</p> $V_A + V_B + V_C = 0$ <p>したがって、<math>V_N = \frac{V_A + V_B + V_C}{3} = 0</math></p> <p>TMEiC Page 52</p>	
<p><b>三相インバータのPWM制御</b></p> <p>三相インバータでは、A、B、C相の相電圧に対応する参照波を作成し、3つの参照波を用いて、PWM制御をします。</p> <p>参照波=出力したい相電圧</p> <p>キャリア波</p> <p>TMEiC Page 53</p>	
<p><b>三相インバータのシミュレーション波形例</b></p> <p>TMEiC Page 54</p>	
<p><b>PSIMデモ版でできる三相PWMインバータの構成</b></p> <p>TMEiC Page 55</p>	

⑦【DC-AC 変換器 1】 講師: 吉野輝雄

<p><b>5.3 単相インバータと三相インバータの相違点</b></p> <p>交流出力電圧は、単相と三相では、相の数異なるだけで大きな相違は有りません。相違点の一つとして、直流回路に流れる電流波形が異なります。</p> <p>したがって、直流電圧を一定に保つための直流コンデンサ容量に違いが出ます。</p> <p>出力電流 出力電流          直流電流 直流電流</p> <p>単相インバータ 3相インバータ</p> <p>TMEiC We drive Industry Page 56</p>	
<p>Thank you</p> <p>TMEiC We drive Industry</p> <p>TOYOTA MOTOR ELECTRIC INDUSTRIAL SYSTEMS CORPORATION</p>	
<p><b>演習問題 回答</b></p> <p>単相インバータの4つのモードにつき、どのIGBTに、どの方向で電流が流れるか矢印で示さない。還流モードは無いとして、検討しない。</p> <p>モード1: IGBT1とIGBT4オン モード2: デッドタイム          モード3: IGBT3とIGBT2オン モード4: デッドタイム</p> <p>電流方向 正</p> <p>電流方向 負</p> <p>TMEiC We drive Industry Page 58</p>	