

XTAP 例題集		番 号	PE-01
例題名	三相 PWM インバータ回路のシミュレーション		
分 野	パワーエレクトロニクス		
文 献	電気学会技術報告 第 761 号 「パワーエレクトロニクスシステムのシミュレーション技術」		
概 要	<p>電気学会の産業応用部門に設置された「パワーエレクトロニクスシステムのシミュレーション技術協同研究委員会」では、各種解析プログラムの評価を目的としていくつかのベンチマーク回路を作成した。最初のベンチマーク回路である「ベンチマーク I」では、パワーエレクトロニクス回路の代表的回路として三相 PWM インバータ回路を取り上げており、これが本例題である。</p> <p>本例題のインバータは、直流を 100 Hz の三相交流に変換するものである。制御ブロックを組み合わせる三相交流に対応する PWM パターンを発生し、これにより三相ブリッジを構成する 6 つのスイッチをオン・オフすることにより、直流を交流に変換する。上記スイッチや還流ダイオードはオン抵抗とオフ抵抗による単純化した特性で模擬している。</p>		

## 解析回路・解析条件

図 1 に解析回路を示す。

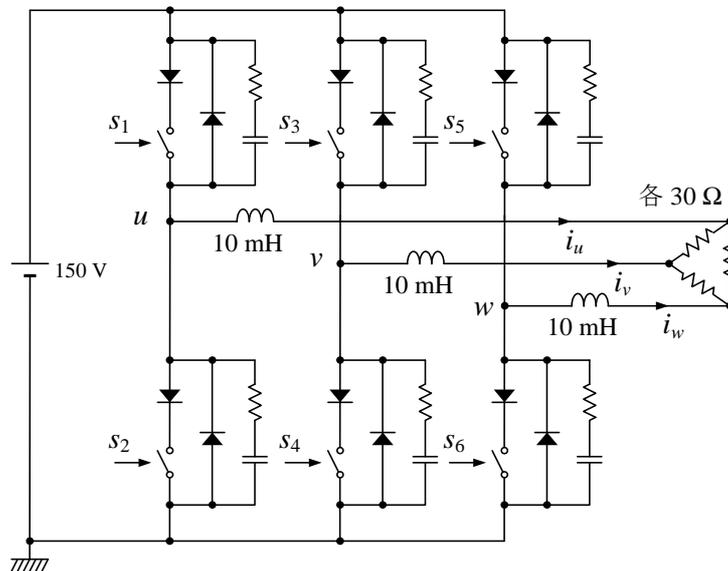


図 1 解析回路

### 【回路動作】

図 1 左側の直流電圧源により発生した 150 V の直流電圧を三相ブリッジに印加する。三相ブリッジの 6 つのスイッチ  $S_1, S_2, \dots, S_6$  は、三相交流に対応する PWM パターンに従ってオン・オフし、印加された直流電圧を  $u, v, w$  相からなる三相交流電圧に変換する。なお、三相交流に対応する PWM パターンは別途制御系により生成する。上記の三相交流電圧は、高調波フィルタである 10 mH のリアクトルを介して負荷に印加される。負荷は 30  $\Omega$  の抵抗 3 つをデルタ結線としたものである。

### 【PWM パターンの発生】

PWM パターンの発生は、三角波比較方式とする。ここでは、 $u$  相の正弦波を発生させるための PWM パターンを例として図 2 により説明を行う。キャリアと呼ばれる振幅 1 の三角波に、指令値となる  $u$  相の正弦波を重ねてプロットする。 $u$  相の正弦波の振幅は 0.8 であり、このとき変調度が 0.8 であるという。三角波よりも正弦波が小さい時には 0 を出力し、三角波よりも正弦波が大きいときには 1 を出力したものが  $u$  相正弦波に対応した PWM パターンとなる。指令値が小さいところでは PWM パターンが 0 である時間が長く、逆に指令値が大きいところでは PWM パターンが 1 である時間が長くなる。図 2 では、図が煩雑とにならないようにキャリアの周波数を低くして波形を描いているが、実際にはキャリア周波数は正弦波の周波数よりもずっと高く設定するため、PWM パターンはもっと頻繁に変化し、1 である時間の比率（デューティ比）の時間変化により指令値を忠実に再現できることになる。

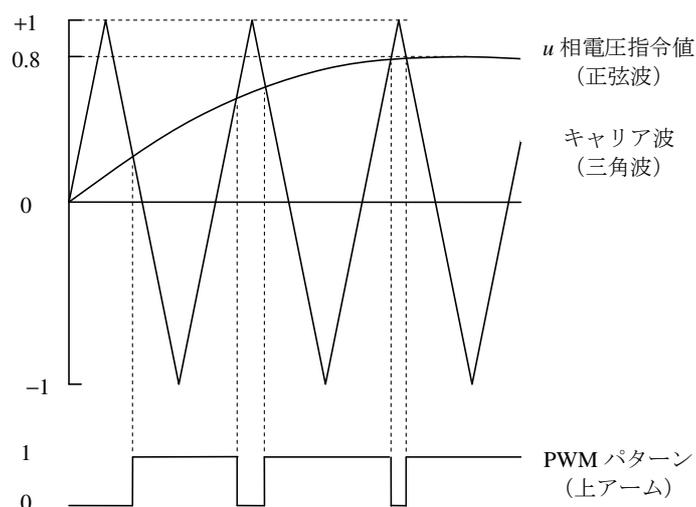


図2 三角波比較方式

三相ブリッジの  $u$  相に対応するレグの上アームのスイッチ  $S_1$  は、PWM パターンが 1 のときオンし、0 のときオフとする（なお、スイッチ 1 つをアームと呼び、上下アームをあわせてレグと呼ぶ）。 $u$  相レグの下アームのスイッチ  $S_2$  は、逆に、PWM パターンが 0 のときオンし、1 のときオフとする。ただし、同相の上下アームが同時にオンして直流電源を短絡することが無いように、両アームのスイッチに対してある微小時刻  $T_d$  だけターン・オンするタイミングを遅らせ、 $T_d$  だけターン・オフするタイミングを進める。この  $T_d$  をデッドタイムと呼ぶ。

本例題において、PWM パターン発生に関するパラメータは以下の通り設定することとする。

- キャリア周波数： 5 kHz
- 正弦波の周波数： 100 Hz
- 変調度： 0.8
- デッドタイム： 5  $\mu$ s

#### 【スイッチング素子，還流ダイオード，スナバ回路】

PWM インバータ実機では、スイッチング素子に MOSFET や IGBT が使用される。しかし、本例題では簡単のため、オン抵抗 10 m $\Omega$ ，オフ抵抗 1 M $\Omega$  の単純化した特性で模擬する。この特性は、オン抵抗 10 m $\Omega$ ，オフ抵抗 1 M $\Omega$  のダイオードに理想スイッチ（オン抵抗 0，オフ抵抗  $\infty$ ）を直列に接続することで実現する。

インバータ回路では、スイッチング素子と逆並列にダイオードを接続する。これを還流ダイオードと呼ぶ。還流ダイオードは、誘導性負荷の電流を遮断して過電圧を生じないようにするためのものである。この還流ダイオードも上記と同じオン抵抗 10 m $\Omega$ ，オフ抵抗 1 M $\Omega$  の特性で模擬する。

通常、スイッチング素子が動作したときの過電圧や過電流によりスイッチング素子自体が破壊しないように、保護回路を設ける。この保護回路をスナバ回路と呼ぶ。本例題ではキャパシタと抵抗の直列回路である CR スナバを用いている。キャパシタの値を  $0.05 \mu\text{F}$ 、抵抗の値を  $300 \Omega$  とする。

#### 【解析条件】

解析条件は以下の通りとする。

- ・ 計算時間刻み  $1 \mu\text{s}$
- ・ 計算開始時間  $0 \text{ ms}$
- ・ 計算終了時間  $40 \text{ ms}$
- ・ 表示開始時間  $20 \text{ ms}$
- ・ 表示終了時間  $40 \text{ ms}$

#### 【XTAP 入力例】

本例題を XTAP 上に作成した例を図 3 に示す。

例題名：三相 PWM インバータ回路のシミュレーション 番号：PE-01

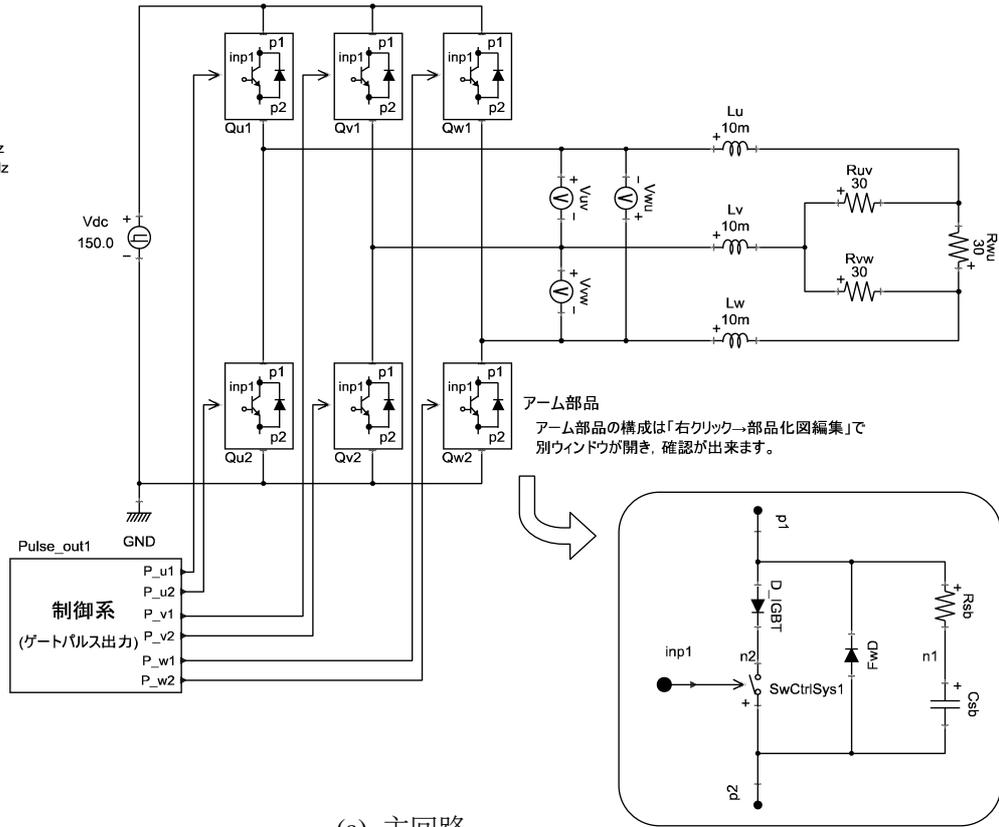
電気学会「パワーエレクトロニクスシステムのシミュレーション技術共同研究委員会」により作成されたベンチマークテスト I の三相 PWM インバータ回路です。  
部品化機能によりアームを部品化し、u, v, w 各相の上下アームとして使用した回路になっています。

インバータの動作条件

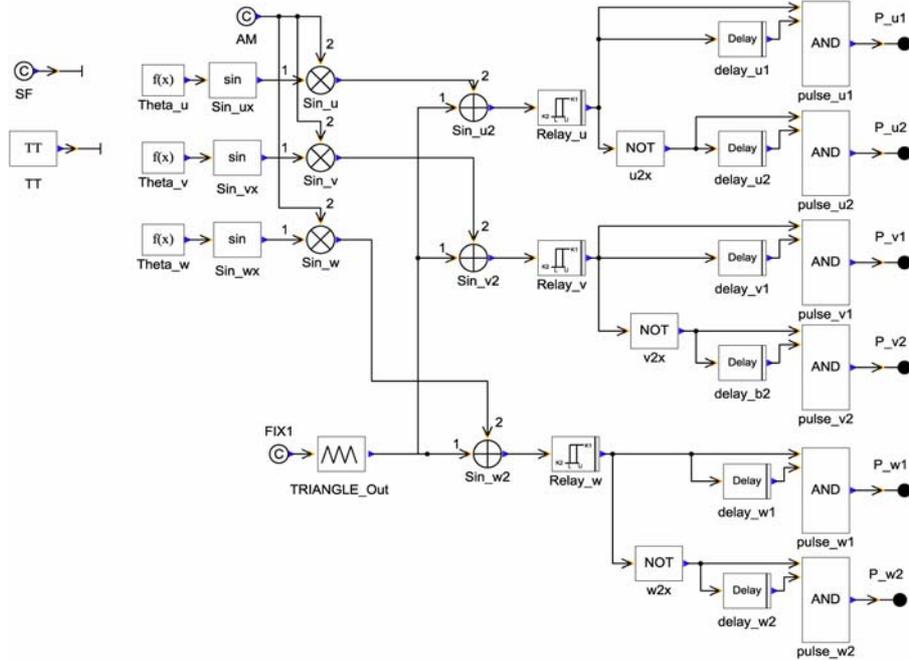
キャリア周波数 : 5 kHz  
正弦波周波数 : 100 Hz  
変調度 : 0.8  
デッドタイム : 5  $\mu$ s

解析条件

計算時間刻み : 1  $\mu$ s  
計算開始時間 : 0 ms  
計算終了時間 : 40 ms  
表示開始時間 : 20 ms  
表示終了時間 : 40 ms



(a) 主回路

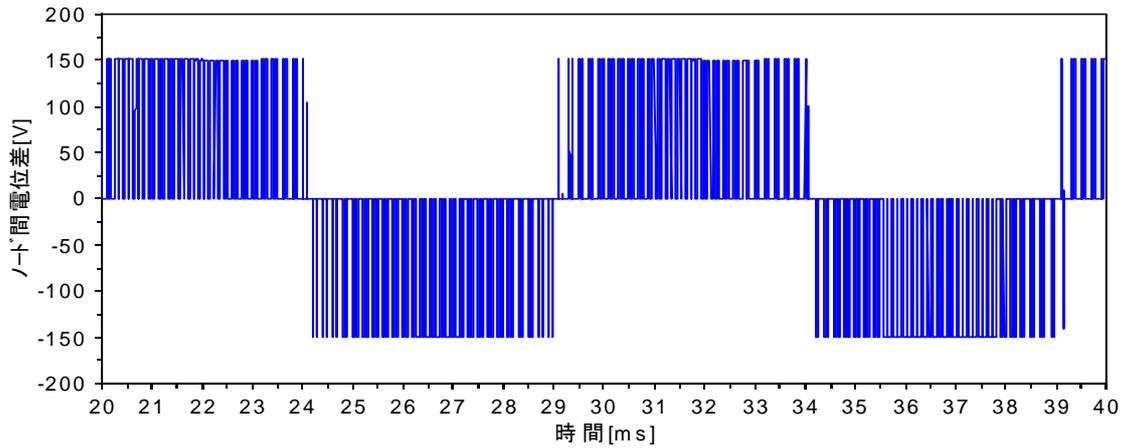


(b) 制御系

図3 XTAP 入力例

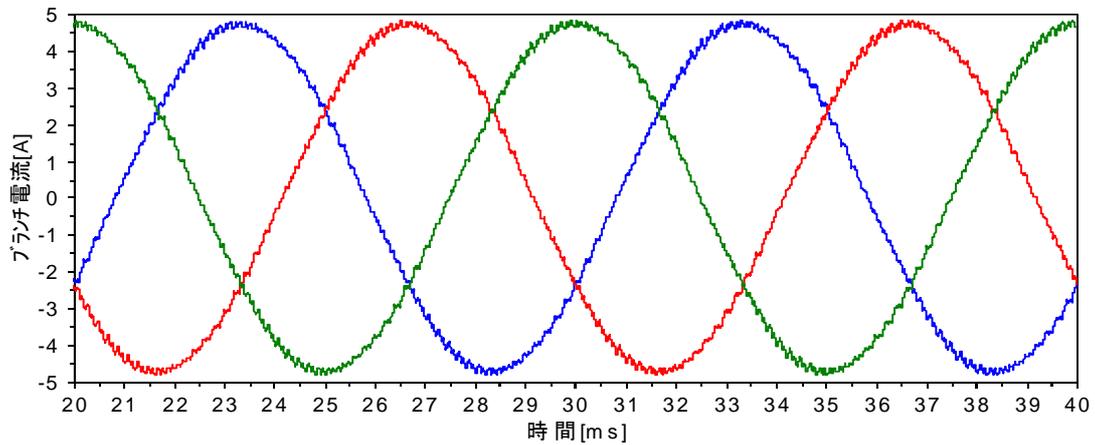
## 解析結果

本例題を XTAP により実行した結果を図 4 に示す。シミュレーションの結果、インバータにより直流が 100 Hz の交流に変換され負荷に供給されていることが確認できる。



— u(Node\_u)-u(Node\_v) #1

(a)  $u - v$  間線間電圧



— i(Lu) #1 — i(Lv) #1 — i(Lw) #1

(b) 負荷電流

図 4 解析結果

以上

## 更 新 履 歴

日 付	例題ファイル バージョン	変 更 内 容
2014/11/19	2.0	XTAP Version 2.00 用に修正
2012/07/19	1.3	XTAP Version 1.20 用に修正
2011/10/18	1.2	制御系ブロックの中の遅延ブロック【delay_v2】内のパラメータが、数値（5e-6）となっていたため、変数（Td）に変更。
2011/02/14	1.1	XTAP Version 1.11 用に修正
2010/09/02	1.0	初版作成（XTAP Version 1.10 用）

