平地研究室技術メモ No.20090930

連系インバータの回路方式

（読んでほしい人：パワエレ初心者）

2009/9/30 舞鶴高専 平地克也

平地研究室技術メモ No.20090831「連系インバータの基本」では連系インバータの動作原理や基本的な機能を紹介しました。今回は連系インバータの回路方式を説明します。「連系インバータの基本」で説明したように、連系インバータは電圧ではなく電流を制御する、という特徴があります。まず、電流の制御を実現するためにいろんな回路方式や制御方式が開発されました。さらに、小型軽量化、高効率化と経済性の向上をめざして様々な回路方式が開発されました。今回の技術メモではその概要を説明します。

■通常のインバータとその制御回路

図１によく用いられるインバータとその制御回路を示します。図２にこの回路各部の半サイクル分の波形を示します。まずマイコンで基準正弦波 v_{ref} を作ります。v_{ref} を変調波 v_T と比較することによりパルス幅変調（PWM）された波形 v_M を得ます。v_M を論理回路で 4 つに振り分け、駆動回路で各トランジスタに与えます。このように制御することにより図２に示すようにインバータの出力電圧 v_I に v_M と同じように変化するパルス列を得ることができます。最後に v_I から L と C のローパスフィルタで高周波成分を除去すると歪みのない正弦波 v_{out} を得ることができます。v_{out} は v_{ref} と比例の関係にあります。このような制御方法を正弦波パルス幅変調（正弦波 PWM）と言います。

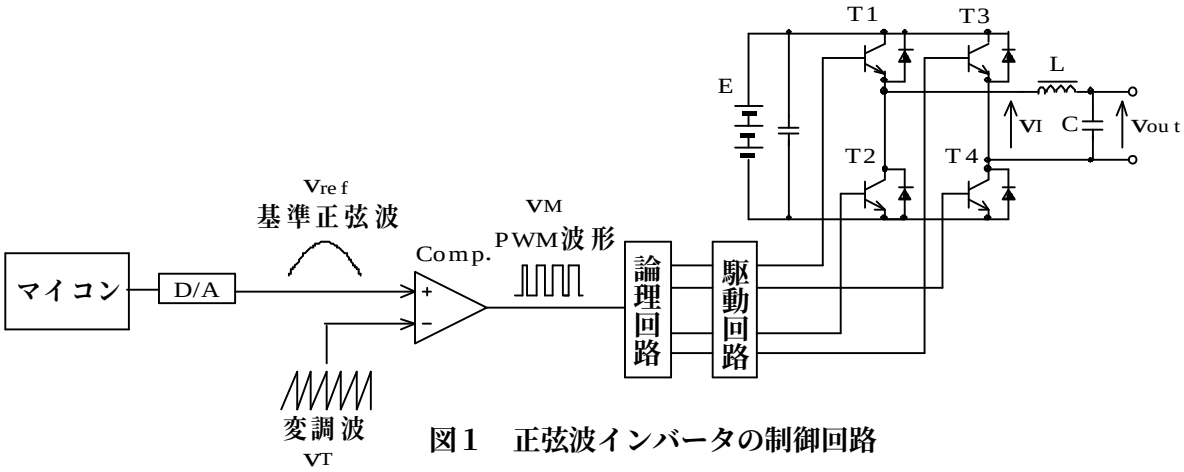

図１　正弦波インバータの制御回路

この制御方法を用いるとマイコンでインバータの出力電圧 v_{inv} の周波数と振幅を自由に制御することができます。マイコンが作る基準正弦波の v_{ref} の周波数を 1/2 にすれば v_{inv} の周波数も 1/2 になります。v_{ref} の振幅を 1/2 にすれば v_{inv} の振幅も 1/2 になります。変調波 v_M のピーク値と v_{ref} のピーク値の比を変調率と言います。

変調率＝v_{ref} のピーク値÷v_M のピーク値≦１

変調率＝１の時に v_{out} のピーク値は直流電源電圧 E と等しくなり、v_{out} の振幅は最大になります。

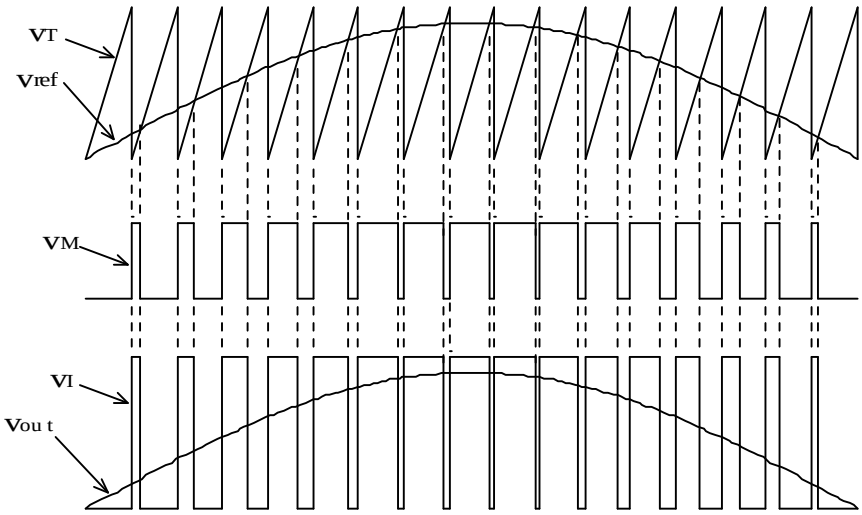

図２　正弦波パルス幅変調(正弦波 PWM)原理図

■電圧形インバータと電流形インバータ

以上のように図１の回路を用いると任意の周波数と振幅の正弦波の出力電圧を得ることができますが、このままでは連系インバータとして使用することはできません。平地研究室技術メモ No.20090831「連系インバータの基本」で説明したように、連系インバータは出力電圧ではなく、出力電流を制御しなければなりません。

図３のインバータは通常のインバータであり、図１と同じものです。ただし、スイッチ素子は IGBT を用いることが多いので図３ではバイポーラトランジスタの代わりに IGBT を使って記載しています。このようなインバータは電源が定電圧源であり、また、図２の方法で出力電圧を制御できるので電圧形インバータと呼ばれています。一方、図４のインバータは電源が定電流源になっています。そして図１の制御回路をそのまま図４のインバータ使用すれば出力電圧ではなく、出力電流を制御することができます。図２の v_I を i_I に、v_{out} を i_{out} に置き換えれば図２の波形はそのまま図４のインバータに対して適用できます。図４のようなインバータは電流形インバータと呼ばれています。なお、電圧形インバータでは IGBT と並列にダイオードを挿入する必要がありますが、電流形インバータでは IGBT と直列にダイオードを挿入する必要があります。電流形インバータは出力電流を制御できるので連系インバータに用いることができます。図５に電流形インバータを用いた太陽光発電の系統連系システムを示します。

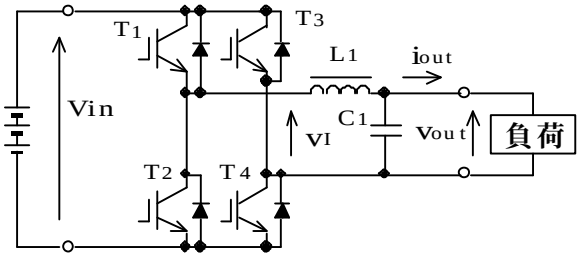

図３　通常のインバータ（電圧形インバータ）

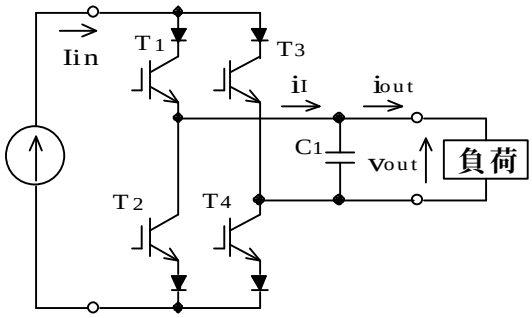

図４　電流形インバータ

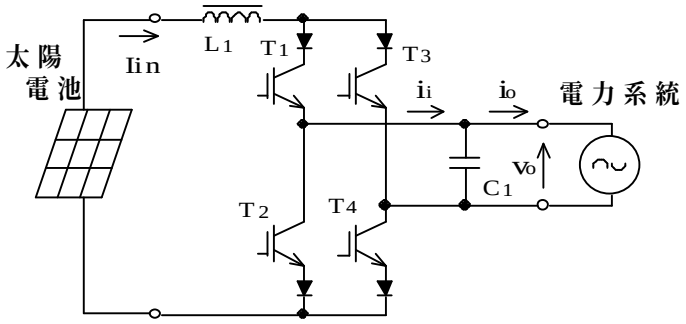

図５　電流形インバータを用いた太陽光発電システム

■連系リアクトルを用いる方法

このように電流形インバータを用いれば連系インバータを実現することができますが、電流形インバータには次の２つの欠点があります。

① 大きなリアクトル L1 が必要

電流形インバータを正常に動作させるためには図４のように定電流源が必要です。しかし、太陽電池は理想的な定電流源ではありません。出力電圧が変化すれば電流も変化してしまいます。そこでインバータの入力を定電流源と見なすことができるように太陽電池と直列に大きなリアクトル L1 を挿入する必要があります。

② IGBT と直列にダイオードが必要

図４のように電流形インバータでは IGBT と直列にダイオードを挿入する必要があります。このダイオードには IGBT と同じ大きな電流が流れるので大きな電流容量が必要です。また、常時電流が流れるので大きな電力損失が発生します。

このように電流形インバータには欠点があるので電圧形インバータを連系インバータとして使用する方法が検討されました。かつて良く使用された方法が図６の連系リアクトル L2 を用いる方法です。図６のベクトル図を図７に示します。電圧形インバータは出力電圧 v_{out} の大きさと位相を自由に制御することができます。ベクトル図から明かなように v_{out} を制御することにより出力電流 i_{out} の大きさを制御することができます。なお、連系リアクトルを用いた場合、L1 と C1 は省略することができます。

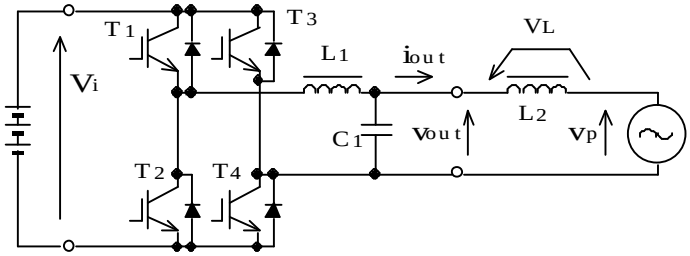

図６　連系リアクトルを用いた回路

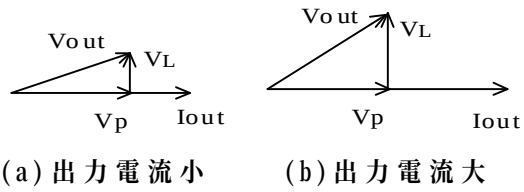

図７　図６のベクトル図

■電圧形インバータの電流モード制御

上記のように、連系リアクトルを用いると電圧形インバータで連系インバータを実現することができますが、連系リアクトルは商用周波数で動作するので大型になります。そこで、回路構成は通常の電圧形インバータのままで制御のしかたを工夫して連系インバータを実現する方法が考えられました。図８にその制御方法を示します。通常の制御回路（図１）ではマイコンが生成した基準正弦波を直接変調波と比較して PWM 波形を作っていますが、図８ではインバータ出力電流 iout をフィードバックして基準正弦波 Vref と比較し、その差を増幅して変調波と比較しています。このように制御することにより iout を Vref と一致させることができ、iout をマイコンで制御することができます。この制御方法を電流モード制御と言います。最近の連系インバータではこの方式（電圧形インバータを電流モード制御）が最も広く普及しています。

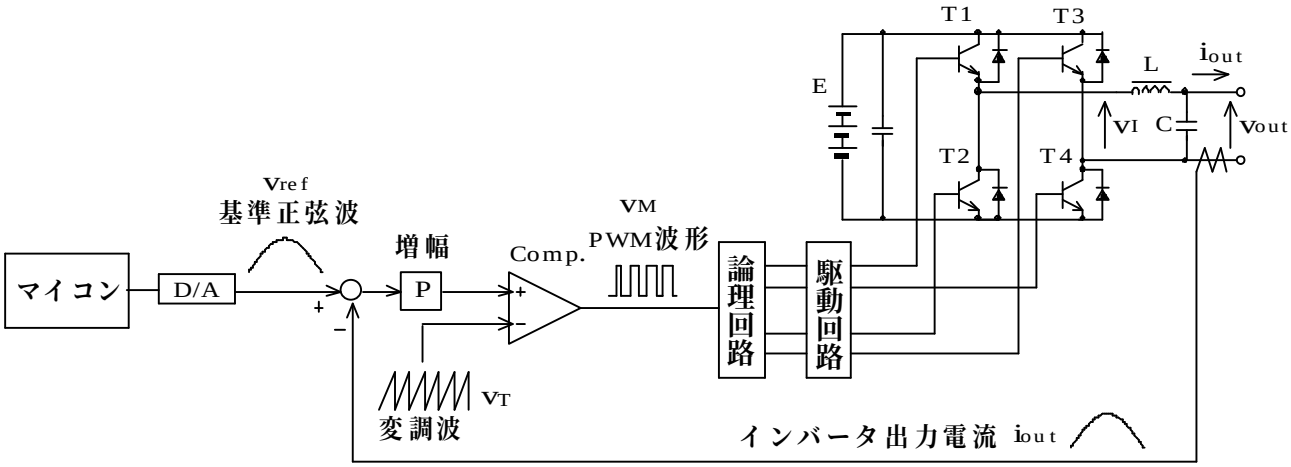

図８　電圧形インバータの電流モード制御

これは余談ですが、図９の制御回路を使うと１台の電圧形インバータで制御の対象を出力電流と出力電圧に切り替えることができます(1)。したがって、１台のインバータを電流を制御する連系インバータと電圧を制御する通常のインバータに切り替えて使用することができます。最近、蓄電池を有する太陽光発電システムが注目されていますが、このシステムにはこの制御方法が使用されています。

(1) 平地克也、特許第 3255304 号

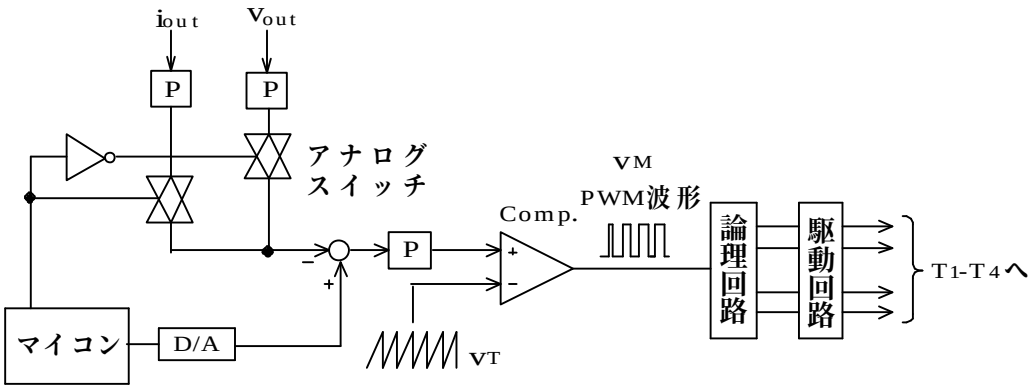

図９　電圧制御／電流制御切り替え方式

■高周波トランスを用いた連系インバータ

図３～図６では入力と出力の間に変圧器を設けない「非絶縁形」の回路構成になっています。非絶縁形では１つ大きな問題が生じます。図１０に電圧形インバータを用いた太陽光発電システムを示します。太陽電池は広い面積があるので大地との間に大きな浮遊容量 C_G が存在します。一方、電力系統には接地があります。したがって、T3 が ON、T4 が OFF の時には図のように「太陽電池→T3→大地→C_G→太陽電池」の径路で電流が流れて C_G が充電されます。逆に T3 が OFF、T4 が ON の時には「C_G→大地→T4→C_G」の径路で C_G が放電します。したがって、T3 と T4 は高周波で ON/OFF しているのでこのシステムには大きな高周波の漏洩電流が流れることになります。このような漏洩電流は周辺の電子機器へのノイズの混入など、さまざまな障害を引き起こすことになるでしょう。漏洩電流を防ぐには図１１のように電力系統とインバータの間に変圧器を設置して C_G の充放電の径路を遮断する必要があります。

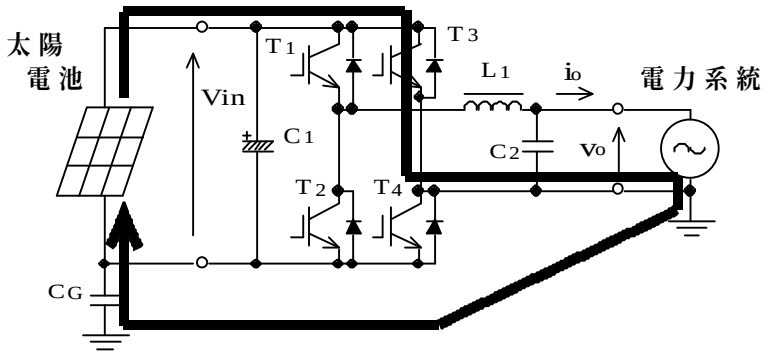

図１０　高周波漏洩電流の径路

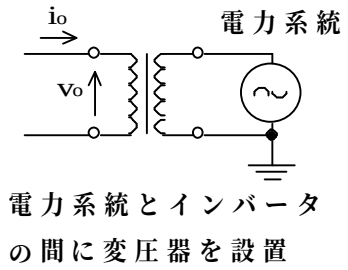

図１１　漏洩電流の防止

家庭用太陽光発電システムが普及し始めた頃（1990 年代後半）にはこのような変圧器を持つ連系インバータが広く用いられていました。しかしながら、変圧器は寸法重量が大きく、かつ高価格であり家庭用太陽光発電システムのさらなる普及のための障害になっていました。

そこで、高周波の変圧器を用いて小型軽量化と低価格化を実現した回路方式が検討されました。この方式の最も基本的な回路構成を図１２に示します。電圧形インバータの前段に DC/DC コンバータを配置した回路構成になっています。DC/DC コンバータの高周波トランス TR1 で入出力を絶縁しています。このような高周波トランスを用いた連系インバータを高周波トランス方式連系インバータと呼んでいます。この方式は図１１の低周波トランス方式に続いて実用化され、さらなる小型軽量化と効率の向上を求めて様々な回路方式が開発されました。高周波トランス方式連系インバータの多岐に渡る開発状況については別の機会に紹介したいと思います。

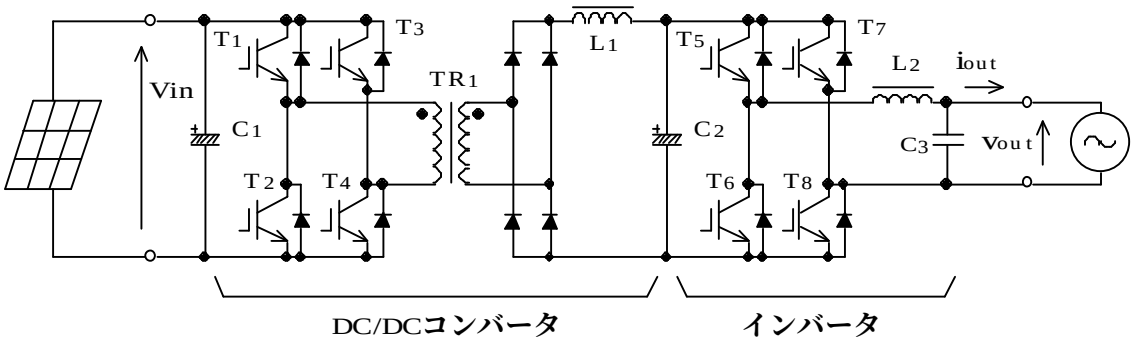

図１２　高周波トランス方式連系インバータ

■トランスレス方式連系インバータ

高周波トランス方式では高周波トランスを駆動するための高周波インバータが必要であり、図１２のように回路構成が複雑になります。そこでトランスを省略したトランスレス方式連系インバータが開発されました。図１０で説明したように、通常の回路構成ではトランスを省略すると高周波の漏洩電流が発生します。しかしながら、回路を工夫すればトランスを省略しても高周波の漏洩電流を防止することができます。

そのような回路方式の例を図１３に示します。インバータの出力は単相３線式になっています。一般の家庭用電源は単相３線式になっている場合が多く、その場合は連系インバータの出力も単相３線式にしなければなりません。インバータはハーフブリッジを 2 つ組み合わせた回路構成になっています。ハーフブリッジ形のインバータを用いると入力と出力の 1 線を共有することができます。図１３では入力側は太陽電池のプラス端子、出力側は交流電源の中性点（N 相）が共有されており、N 相と太陽電池が同一電位になっています。したがって、スイッチ素子が ON/OFF しても太陽電池の電位は常に一定であり、図１０のような高周波の漏洩電流が流れることはありません。また、ハーフブリッジ形のインバータは高い入力電圧が必要なので図１３では太陽電池の電圧を昇圧するために昇圧チョッパを用いています。

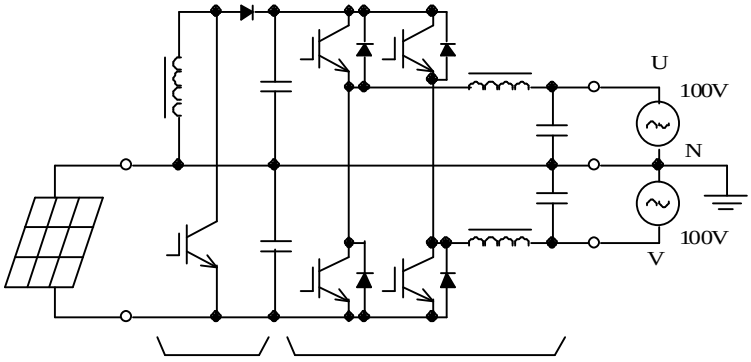

図１３　トランスレス方式連系インバータ

トランスレス方式を使うと最も小型軽量で安価な連系インバータを実現することができるので、今日の家庭用太陽光発電システムではこの回路方式が主流となっています。そしてさらなる小型軽量化と効率の向上を求めて様々な回路方式が開発されています。この開発状況も別の機会に紹介したいと思います。

家庭用太陽光発電システムに用いられる連系インバータの回路方式は以上のようにおおむね「商用トランス方式→高周波トランス方式→トランスレス方式」のように変遷しています。この変遷はミニ UPS の回路方式の変遷と一致しています[(2)(3)]。連系インバータと UPS には共通する技術課題が多数含まれており、UPS の回路方式を調査すれば連系インバータの開発に役立ちます。

(2) 平地克也、「ミニ UPS の回路方式の変遷」、平地研究室技術メモ No.20060809、(2006)
(3) 平地克也、「ミニ UPS の回路方式の変遷と今後の課題」、電子情報通信学会技術研究報告、Vol.103, No.652, pp.1-6, (EE2003-57), (2004)

以上