

電力変換の応用

長岡技術科学大学 電気系 近藤 正示
kondo@vos.nagaokaut.ac.jp

1 直流と交流

直流と交流の区別はよく知っていると思うが、本当だろうか？図1において、(a)は直流で、(d)は交流であることは一目瞭然である。それでは、(b)や(c)は直流・交流のどちらだろう？

ここでは、極性変化がないものを直流といい、極性変化があるものを交流とする。そうならば、(b)は直流で、(c)は交流となる。

さらに、(b)の直流波形のうちで、斜線でハッチングした部分を**直流成分**といい、+字でハッチングした部分を**交流成分**ということがある。直流成分は(b)の時間平均値である。交流成分は、(b)から直流成分をひいた残りで、その時間平均値は0になる。

ところで、(c)は交流であるのに、時間平均値が0ではない。交流なら時間平均値が必ず0になるわけではない。0になるのは交流成分である。交流の時間平均値が0にならない部分は直流成分になる。

つまり、いいたいことは、直流と交流という分かりきったように見えることでも、突き詰めて考えると、結構複雑だということである。このようなときは、基本に立ち返って考えることである。そのために、基本の理解を「あっそうか！なるほど！」というレベルまで深めておかななくてはいけない。

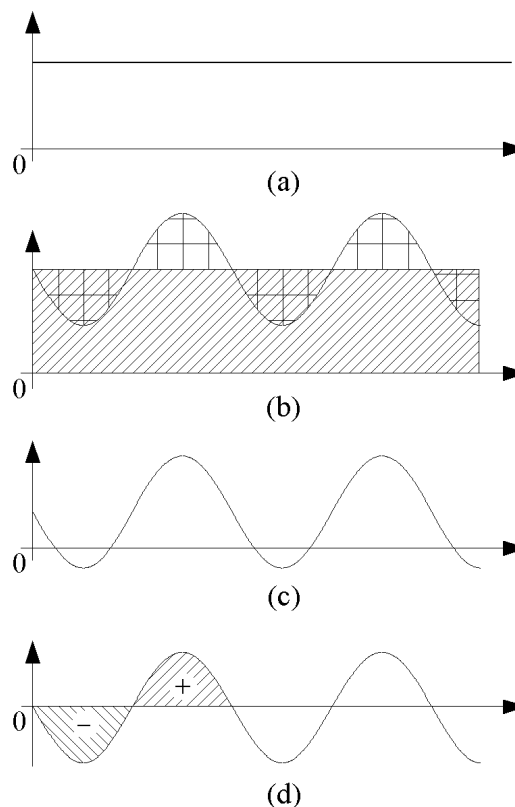


図1 直流か交流か？

2 インバータ回路

直流から交流に電力変換する回路をインバータという。ここでは、直流電圧を交流電圧に変換する電圧形インバータの原理回路を説明する。(電流形インバータもあるが省略する。)

2.1 直流から交流の作り方

図2の回路をハーフブリッジインバータという。白丸と黒丸のスイッチを交互にオンオフすれば、負荷(四角)に交流電圧が供給できる。この回路では、スイッチが2つで済む代わりに、直流電圧源も2つ必要で、交互にしか使われないから電源の利用率がよくない。交流出力は電池1つ分の電圧しか出せないが、オフ・スイッチには電池2つ分の電圧が加わり、耐圧が必要である。電源から負荷への電流経路にスイッチが1つしか入らないから、スイッチの導通損失が問題となるような大電流・低電圧の用途、たとえば、溶接機などに向いている。

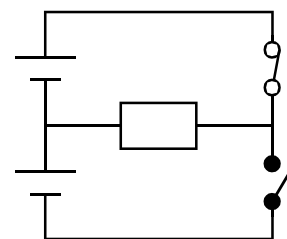


図2 ハーフブリッジインバータ

図3の回路をフルブリッジインバータという。直流電圧源を一つで済ませるには、同図(a)のようにスイッチの数を増やして直流電圧の極性を反転すればよい。この回路では、交流出力電圧とオフ・スイッチに加わる電圧はどちらも電池一つ分である。ただし、電源と負荷の電流経路にスイッチが2つ入るから、低電圧用途ではオン・スイッチの順方向電圧が問題となる。出力電圧が数十V以上であれば問題ない。

図3の(a)と(b)は、番号を付けたスイッチ端子が1対1に対応しているから、同じ回路である。図(a)は、動作原理の直感的な理解のためにあえて示したが、ほとんど見かけない。フルブリッジ回路といえば、図(b)のように描かれる。

図3をよく見れば分かるが、1'-1''および2'-2''の端子をつないではいけない。直流電圧源を短絡することになって、過電流でインバータを破壊するからである。半導体スイッチはオフ信号を与えても、その直後短時間はオン状態が続くから注意する必要がある。あるスイッチにオフ信号を与えた後、しばらく待ってからもう一方のスイッチにオン信号を与えるようにすればよい。この待ち時間を短絡防止期間、または、**デッドタイム**という。デッドタイムの長さは、GTOでは数十 μ s、パワートランジスタでは10 μ s程度、IGBTは1~2 μ s、パワーMOSFETは数百nsである。

上記とは逆に、図3では白丸と黒丸のスイッチを同時にオンしてよい組み合わせがある。それは、1-1'と2-2''、および、1-1''と2-2'の組み合わせである。これらは、結局1-2を閉じて交流負荷の端子間を短絡することになる。それでも問題は起きない。なぜならば、電圧形インバータの交流負荷はインダクタのある誘導性のものに限られ、負荷のインダクタが短絡電流を抑制するからである。この負荷短絡は、負荷の端子電圧が0になるので、ゼロ電圧モードと呼ばれ、出力電圧をきめの細かく制御するために、積極的に利用されることがある。

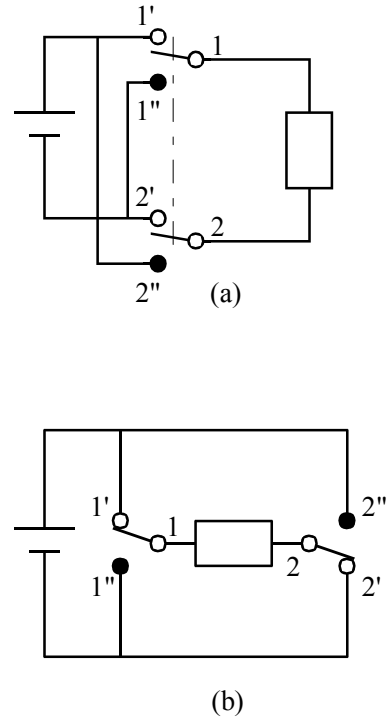


図3 フルブリッジインバータ

2.2 単相および三相ブリッジインバータ

図3(b)のスイッチを半導体スイッチ素子に置き換えれば、図4(a)の単相ブリッジインバータ回路となる。このインバータは、単相交流電圧を出力できて、コンピュータの非常用電源である無停電電源装置(UPS)や、家庭用太陽電池発電システムなどに用いられている。

図4(a)にもう一相分を追加すれば、図4(b)の三相ブリッジインバータの回路となる。このインバータは、モータ駆動や、大容量電源、さらには、アクティブフィルタ(無効電力補償装置)など、非常に多くの分野で用いられている。

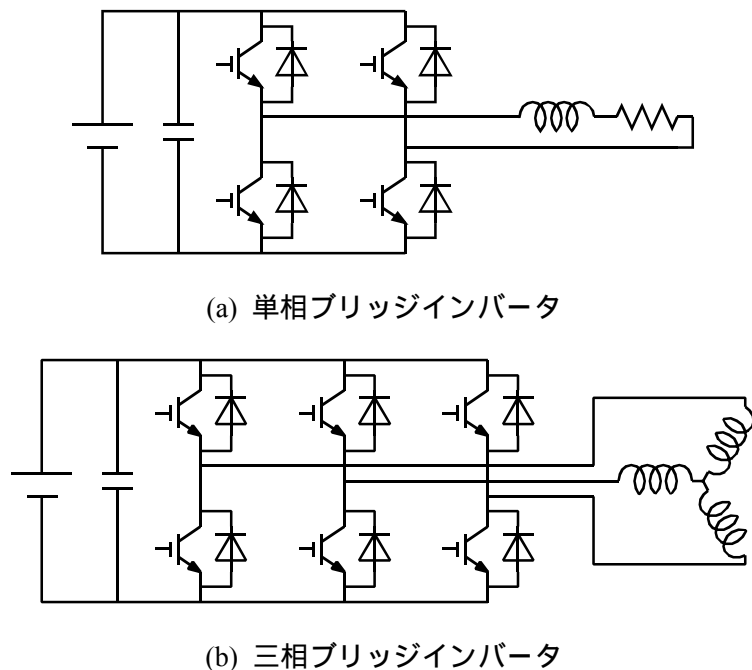


図4 電圧形ブリッジインバータ

3 交流の扱い方

3.1 有効電力と無効電力

電気回路の要素に、図5のように電流 i [A] が流れて、その端子電圧を v [V] とする。ただし、 v の矢印は電圧上昇の向きとする。 i と v の向きが逆であるから、ここでは、その要素が受け取る電力を正にしていることになる。(なお、電源のときは、 i と v が同じ向きの方が考えやすいが、そうしない。電気回路では、電源の数より、抵抗のように電力を受け取る要素の方が多いからである。電源は、電力を出すからそれは負で赤字になる要素と考えておけばよい。) その要素に入る電力 p [W] は

$$p = i \times v \quad [\text{W}]$$

である。 i と v が一定の直流のときは p も一定値になるからこれでおわりである。しかし、交流のときは、もう少し先まで続けておく必要がある。

簡単化のため、 $v(t)$ は単一周波数の正弦波電圧であるとして、 $i(t)$ は基本波だけでなく高調波も含んでいることにしよう。(つまり、電流波形は純正弦波ではなく、歪んでいる。) すなわち、

$$v(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2}I_k \sin(k\omega t + \varphi_k)$$

とする。この2つの積から、電力 $p(t)$ は、

$$\begin{aligned} p(t) &= 2 \sum_{k=1}^{\infty} VI_k \sin(\omega t) \sin(k\omega t + \varphi_k) \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} VI_k [\cos((k-1)\omega t + \varphi_k) - \cos((k+1)\omega t + \varphi_k)] \end{aligned} \quad (1)$$

となる。(注意1: 上式の1行目から2行目への変形で、係数の2が消えていることに注意。この先は(1)式を使うから変な係数を付けたくない。そのため、あらかじめ電圧と電流に $\sqrt{2}$ という係数を付けておいたのである。電力計算を楽にする係数は正弦波のときに $\sqrt{2}$ なのである。)

さて、電圧の1周期 $T = 2\pi / \omega$ [s] あたりに回路部品に入っていく平均電力 P_{av} は

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = VI_1 \cos \varphi_1 \quad (2)$$

となる。(注意2: 自分でやってみること! (1)式の第1項で $k=1$ のときだけが残る、それ以外は(2)式のように1周期積分するとみんな0になってしまう。このことは、平均電力 P_{av} は電圧と同じ周波数の電流成分が運び、それ以外の周波数の電流成分は平均電力を全く運ばない、という重要な性質を示している。)

大切なので、 $k=1$ のときの電力 $p(t)$ を丁寧に計算しておく、(1)式は

$$\begin{aligned} p(t) \Big|_{k=1} &= VI_1 [\cos \varphi_1 - \cos(2\omega t + \varphi_1)] \\ &= VI_1 \cos \varphi_1 (1 - \cos 2\omega t) + VI_1 \sin \varphi_1 \sin 2\omega t \\ &= P_{real}(t) + P_{imag}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。(3)式を図示すると、図6のように電圧・電流周波数の2倍の周波数で各電力が脈動する。

- 図6(a)の電力 $p(t)$ は、瞬時電力と呼ばれ、平均電力 $P_{av} = VI_1 \cos \varphi_1$ を中心にして振幅 VI_1 で脈動する。この振幅 VI_1 を皮相電力(単位は[VA])という。

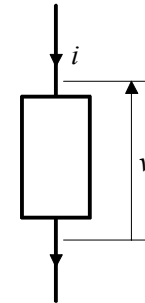


図5 回路要素の電圧・電流

- 図6 (b)の $P_{real}(t)$ は，平均値と振幅がともに $VI_1 \cos \phi_1$ であるから最小値は0で，符号が変わらない。 $P_{real}(t)$ は，符号が変わらないから回路要素に入る（または，出る）だけの一方方向の電力である。つまり，エネルギーの移動に関わるから， $P_{real}(t)$ は**実電力**と呼ばれる。 $P_{real}(t)$ の平均値は， $P_{av} = VI_1 \cos \phi_1$ だから，瞬時電力 $p(t)$ の平均値 P_{av} に等しい。単位時間当たりのエネルギーの移動量 $VI_1 \cos \phi_1$ を，**有効電力**（単位は[W]）という。
- 図6 (c)の $P_{imag}(t)$ は，振幅は $VI_1 \sin \phi_1$ であるが，平均値は0である。つまり， $P_{imag}(t)$ は，各瞬時に於いて回路要素に入ったり出たりしているだけの電力である。エネルギーの移動には寄与しないから $P_{imag}(t)$ を**虚電力**と呼ぶことがある。出入りするだけの電力の振幅 $VI_1 \sin \phi_1$ を，**無効電力**（単位は[Var]）という。

無効電力とは，何も無い電力とか，役に立たない電力とかいう意味ではない。無効電力は，行ったり来りする電力の大きさである。電圧と電流の周波数が同じでも移相ずれ ϕ_1 があると，図6 (c)のよう

に電力が行ったり来りするようになり，無効電力が生じる。電圧と電流の周波数が異なる場合も，注意2に述べたように平均電力は0となるが，電力の行ったり来りがあり，やはり無効電力が生じる。

このように，無効電力は行ったり来りするだけの電力の大きさであるが，回路要素が使ってしまう電力ではないから，電力会社としてはお金を取り難いものではある。しかも，無効電力が行ったり来りする間に送電線や配電線で抵抗損失を生じたり，トランスなどの電気設備を無駄に使用する。これを理由として，大量に無効電力を発生する工場などに対しては，電力会社が（有効）電力の単価を高くしたりすることがある。

3.2 電力の流れる向き

図7 (a)直流回路では，電圧の高い電源 E から電圧の低い電源 V へ向かって電力が流れることは，よく知っていると思う。

それでは，同図(b)の電力の流れ方が分かるだろうか？左電圧源 $E\epsilon^{j0}$ より右電圧源 $V\epsilon^{j\delta}$ のほうが位相 δ だけ進んでいるのである。まず，電流 i を求めると，

$$i = \frac{E - V\epsilon^{j\delta}}{j\omega L}$$

右電圧源 $V\epsilon^{j\delta}$ に流れ込む電力を求めると，

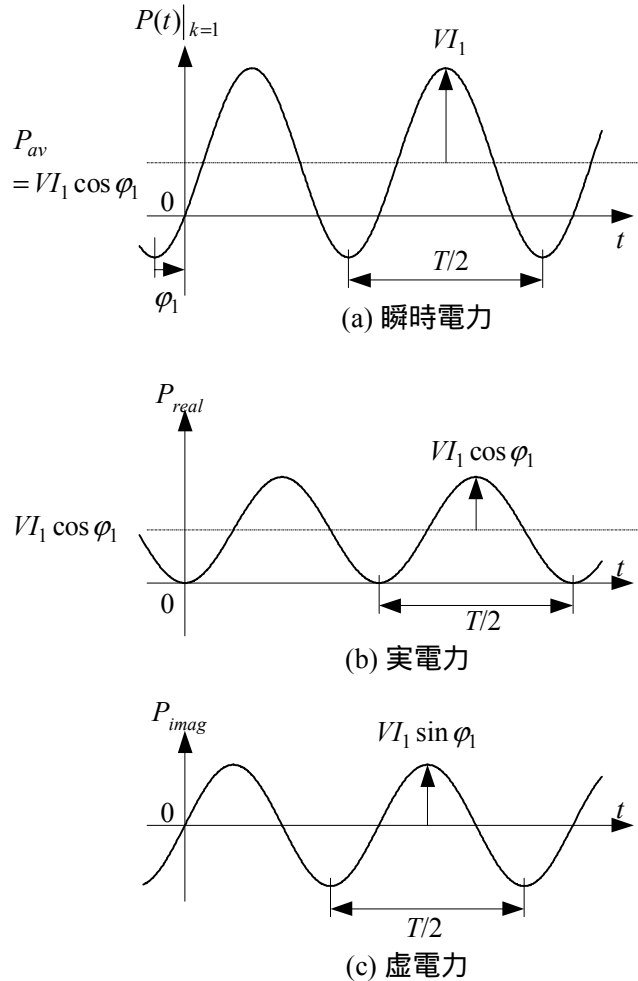


図6 電力の時間的变化

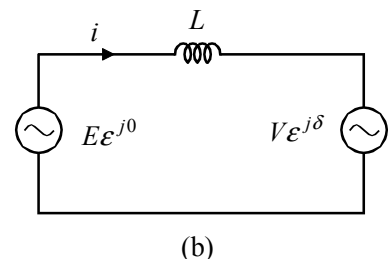
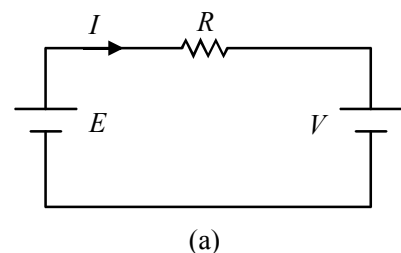


図7 電力の流れる向き

$$P + jQ = (V\epsilon^{j\delta})^* i = \frac{VE\epsilon^{-j\delta} - V^2}{j\omega L} = \frac{-VE \sin \delta}{\omega L} + j \frac{V^2 - VE \cos \delta}{\omega L} \quad (4)$$

(4)式から次のことが分かる。これらの結果は、ちょっと意外である。

[1] 左右の電圧源の位相が等しいとき、 $\delta = 0$:

このとき $\sin \delta = 0$ だから(4)式の第 1 項は常に 0 になり、有効電力 P は流れない。直流で $E > V$ ならば電力が流れるのに、交流では $E > V$ でも有効電力が流れないことがある！

さらに、 $E > V$ のときを考えると、第 2 項の無効電力 Q は負となる。つまり、右電圧源は、進み位相の無効電力を出している。進み位相 90 度と後れ位相 90 度は互いに符号が逆であることに注意すれば、進み位相の Q が負ということは、後れ位相では正ということになる。結局、右側の電源は電流遅れ位相の無効電力を受け取っていることになる。

すなわち、 $\delta = 0$ かつ $E > V$ のとき右電圧源は、遅れ位相の無効電力を受け取り、有効電力を受け取らない。

[2] 左電圧源より右電圧源が位相が進んでいるとき、 $\delta > 0$:

簡単にするため、 $E = V$ のときを考えよう。このとき(4)式の第 1 項 P が負になるから、右電圧源は有効電力 $|P|$ を出している。(4)式の第 2 項は、たとえ $\delta > 0$ でも δ が小さければ $\cos \delta \approx 1$ であり $E = V$ としたから、ほとんど 0 になる。(厳密には、(4)式の Q は小さな正の値となり、小さな進み力率の無効電力を受け取る。いいかえると、小さな遅れ力率の無効電力を出す。)

すなわち、 $\delta > 0$ かつ $E = V$ のとき右電圧源は、有効電力を出し、ごくわずかな遅れ力率の無効電力を出す。

以上を整理すると、位相が進んでいるほうから遅れているほうへ有効電力が流れ、振幅の大きいほうから小さいほうへ後れ位相の無効電力が流れる、ことになる。

4 交流電源への応用

4.1 無効電力補償(アクティブフィルタ)

負荷が発生する無効電力を、それとは別の装置でキャンセルすることを無効電力補償という。無効電力補償の目的は、無効電力が電源系統に返らないようにすることである。その原理は、単純で分かりやすい。

図 8 のように接続された電力系統で、負荷は有効電力を受け取るだけでなく、無効電力を生じているとする。すなわち、負荷電流 i_L が、

$$i_L = i_P + i_Q$$

のように、有効電流 i_P と無効電流 i_Q からなっていると。このとき、電源電流 i_S に無効電流 i_Q を含まないようにすることが目的である。補償装置 AF が i_{AF} を出しているとする、図 8 から

$$i_S = i_L - i_{AF} = i_P + (i_Q - i_{AF})$$

となる。ここで、 $i_{AF} = i_Q$ とできれば、上式の (...) の中が 0 となって、 i_S は i_P だけとなり無効電力補償を達成できる。つまり、負荷の i_Q を補償装置 AF が肩代わりするから、電源電流 i_S は有効電流 i_P だけになる。

同じことを、図 6 で説明する。まず、ある負荷が図 6 (a)の瞬時電力 $p(t)$ を必要としているとする。ここで、援軍 (AF) が現れて図 6 (c)の虚電力 P_{imag} を肩代わりしてくれれば、電源からは図 6 (b)の実電力 P_{real} だけをもらえばよい。しかも、虚電力 P_{imag} は図 6 (c)のように出たり入ったりするだけであるから、この援軍 (AF) の持ち出しは何もない。

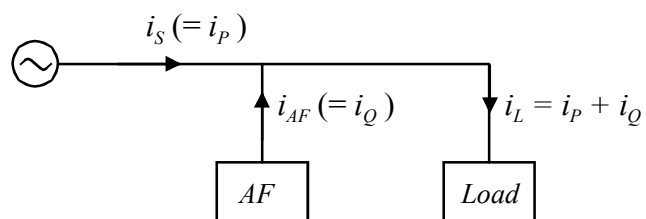


図 8 無効電力補償の原理図

以上のことから，原理的には，無効補償装置が電源を持つ必要はなく，エネルギーを一時的に貯めるだけでよいことが分かる。ただし，先に「火事場のバケツリレー」の例で説明したように，無効電力の出入りの周波数が低いときは，（大きなバケツではなく）大容量のエネルギー蓄積装置が必要になる。

無効電力の問題は，意外に身近なところにある。図9の i_L は，テレビへの入力電流である。テレビの電源は，ダイオード整流回路と直流側に大きな電解コンデンサをもち，交流電圧の最大値付近だけ尖った入力電流 i_L が流れる。テレビに必要なエネルギーは，交流電圧 v と同位相の有効電流 i_P だけが運んでいる。 i_L から i_P を引いた残りの i_Q は，無効電力を出し入れするだけで，エネルギーを運んでいない。問題はそれではない。図9の i_Q のために，電源電圧が v のように歪んでしまう。特に夏の甲子園決勝戦のときは，テレビを見る人が多くて，電圧歪みがひどいらしい。

この電源電圧の歪みが困った問題を引き起している。配電系統では，全ての負荷が並列接続されているから，電圧の歪みは全ての負荷に届く。その中には，正弦波電圧を前提に設計されたものがある。つまり，リアクトルやコンデンサを持つものである。これらの負荷では，電圧が歪むと，リアクトルやコンデンサに高調波電流が流れ，過熱して火事になったことがある。

このため，身近な家電機器でも，高調波電流のを小さくするように規制がかけられている。

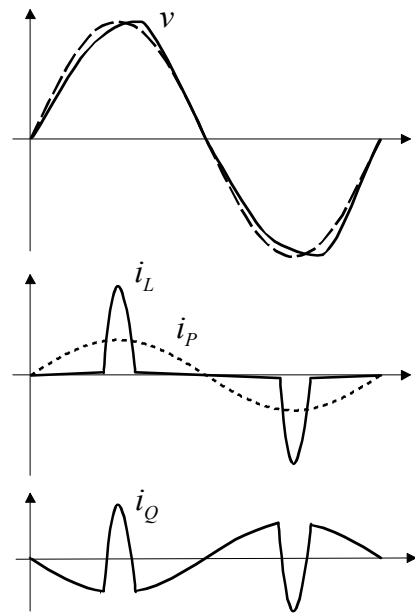


図9 テレビの入力電流 i_L と補償が必要な電流 i_Q

4.2 UPS(無停電電源装置)

最近では，めったに停電しなくなった。しかし，雷が鳴って蛍光灯がちらちらすると，はらはらする。瞬時電圧低下で，パソコンが止まるかもしれないからである。そこで，パソコンにUPS(無停電電源装置)を付けた。雷が鳴り始めてもデータをセーブする時間を稼いでくれる。

UPSの構造は，図10のようになっている。瞬時電圧低下したときに，内臓バッテリーの直流をインバータで交流に変換して出力するだけである。実際に発生する瞬時電圧低下のほとんどのものが0.2秒以内なので，パソコン程度ならバッテリーはそれほど大きくなくてよい。

しかし，絶対にダウンしてはいけないコンピュータを抱えた銀行や鉄道会社では，信頼性を高めるために，単機500kVA程度のUPSを多数並列接続して，冗長システム構成をとるのが普通である。そうした方が，保守性も向上するし，入出力回路の変圧器による多重化は，入力電源系統の高潮波を軽減し，出力電圧波形の改善に有利だからである。

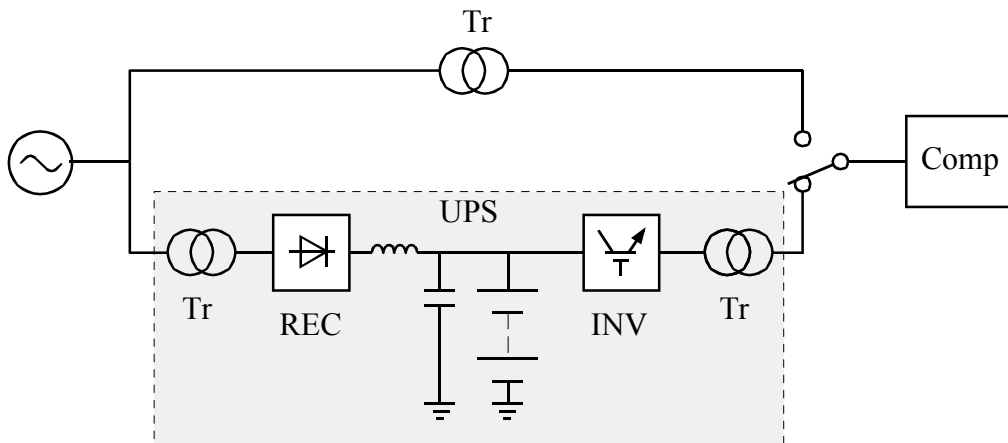


図10 UPS(無停電電源装置)