
圧電トランスを採用した省電力液晶バックライトインバータ

Novel Power-Saving Type Inverter with Piezo-Electric Transformer for Back Light of Liquid Crystal Panel

山下 友文*
Tomofumi YAMASHITA

要 旨

電気電子機器に搭載される電源は、常に軽薄短小、省電力化（高効率）が求められその電源開発に取り組んできた。しかし、従来の巻き線トランス（電磁トランス）を用いた電源回路技術では頭打ちをしている状態である。そこで新たなパワーデバイス“圧電トランス”を研究しその駆動方法および制御方法を考案し圧電トランスを用いた新たな電源技術を構築し液晶用バックライトインバータとして製品化した。

ABSTRACT

Small-sized, lightweight and power-saving (high efficiency) power supply is highly required for today's electronic equipment. However, the conventional power supply circuit is in a difficult state to fulfill these required properties. Then, a new power device of "piezo-electric transformer" has been studied, and newly devised drive method and control method have been presented. This new power supply technology utilizing the piezo-electric transformer has been successfully incorporated into commercial back light inverters for liquid crystal panels.

* リコー計器（株） 市場開発室
Research & Development Office, Ricoh Keiki Co., Ltd.

1. 背景と目的

従来から省電力型電源の開発に取り組んできたが、昨年来の自然災害等、また京都議定書の発効により更なる環境技術への取り組みを加速すべきとの考えからエレクトロニクスパワーマネジメント（Electronics power management）に注力している。

電源はあらゆる電気、電子機器に搭載されており常に軽薄短小はもとより、最近では省電力（省エネ/高効率）が求められている。その要求は省電力を通して温室効果ガスCO₂の発生を低減させ、また軽薄短小化することでプリント基板等の部品を小さくし、部品製作時の消費エネルギーを削減し、同じくCO₂の発生を低減することを目的としている。

しかし、従来の巻き線（電磁）トランスを用いた電源は省電力回路技術として限界にきている状態である。新たなデバイスを開発し、それを用いた新規電源回路技術が必要と考えた。そこでパワーデバイスのひとつである“圧電トランス”を用い、その制御方法を研究、考案し、新たな電源技術を構築した。その電源のソリューションとして、軽薄短小、省電力化の要求が最も厳しい、ノート型パソコン等に採用されている液晶用バックライトインバータを製品化したのでここに紹介する。

2. 技術

2-1 圧電トランスについて

2-1-1 セラミック材料の広がり

セラミック電子材料はFig.1に示すように半導体材料、絶縁体材料、誘電体材料、磁性体材料そして圧電体材料と幅広く使われている。更に圧電体材料はアクチュエータ、センサー、フィルター、そしてトランスと活躍の場を広げて、インクジェットプリンターのインク噴射制御、SAWフィルター、インバータトランス等に活発に採用されている。

電子工業の分野で使用されている圧電セラミックス材料は、年々着実に増加している。電子機械工業会の統計資料によると、圧電セラミックス材料の売上は、伸展のめざましい積層セラミックコンデンサ（MLCC）の半分のにぼり、電子

セラミックスの中ではMLCCに次いで第2位に位置している。

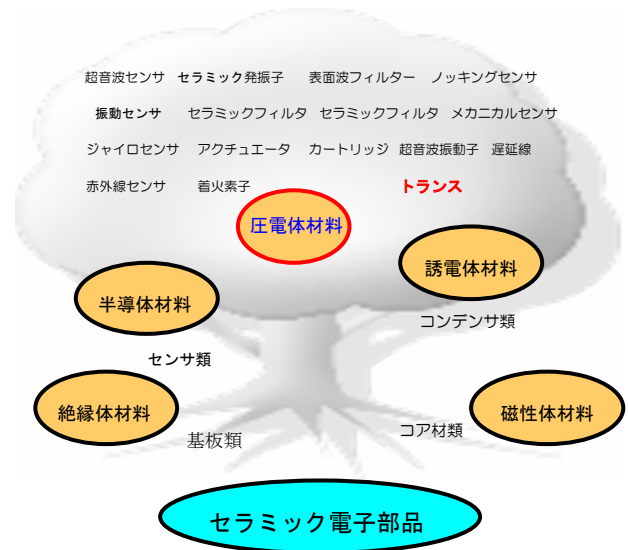
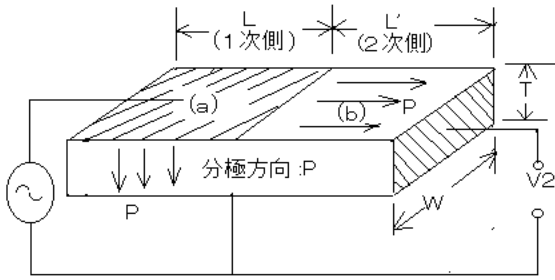


Fig.1 A spread of ceramic electronic parts.

2-1-2 圧電トランスの構造

圧電トランスとは、チタン酸バリウム（BaTiO₃）やチタン酸ジルコン酸鉛（PZT）等に代表される強誘電性材料に電極を形成し、厚み方向と長さ方向に分極処理*を施したものである。Fig.2に圧電トランスの原理図を示す。圧電トランス長さ方向（L+L'）で決まる固有共振周波数の入力電圧（V1）を印加すると、Fig.3に示すように電歪効果により長さ方向に強い機械振動が生じる。この機械振動により発電部（b）では、圧電効果によって電荷が発生し、出力端に昇圧された電圧（V2）が得られる。

*分極処理：多結晶強誘電性材料において、直流の高電圧を印加して分極の方向を揃える処理をいう。この処理を行うことによって、初めて電歪効果及び圧電効果を生じるようになる。



圧電トランスの原理図

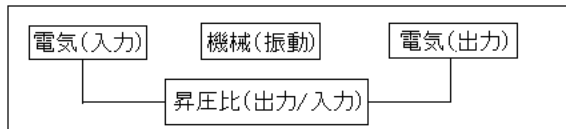


Fig.2 Construction of piezoelectric transformer.

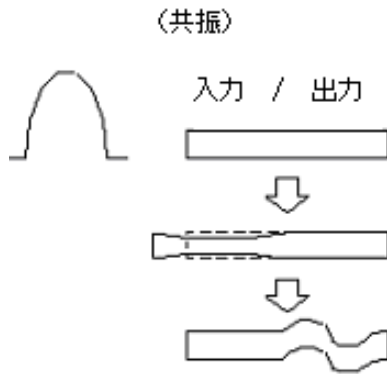


Fig.3 Principle of drive of piezoelectric transformer.

Fig. 4は積層型圧電トランスの構造を示す。積層型圧電トランスの入力側の内部電極は電位差があるので交互に配置され出力側電極は電位差がないので交互にずらしていない。内部電極は一般的には圧電材料の焼成温度が1000°C以上だったので高融点貴金属の銀パラジウムを使う必要があったが900°C以下で焼成可能な圧電材の開発に着手、完成させた。これにより安価な銀100%の内部電極を持つ積層型圧電トランスが完成した。

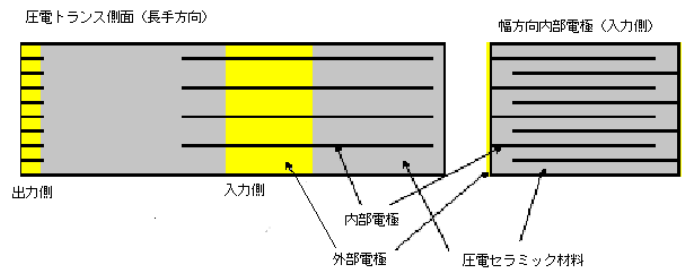


Fig.4 Internal electrode structure of a multilayer type piezoelectric transformer.

Fig.5に実際の圧電トランスを示す。左2個が単板型圧電トランスでありケーシングがない状態である。残りは積層型圧電トランスでケーシングがほどこされ、プリント基板へ半田付けロボットによって実装可能である。

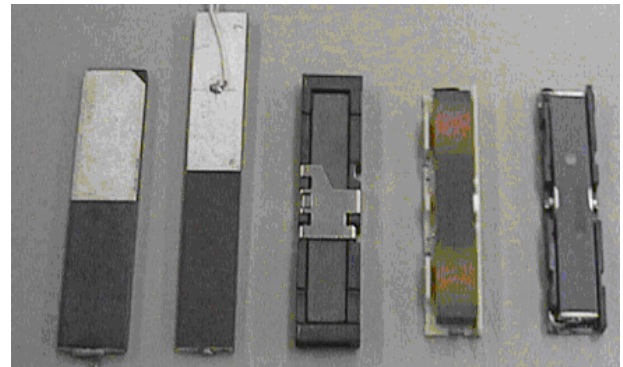


Fig.5 Various piezoelectric transformers.

2-1-3 圧電トランスの特性

圧電トランスの等価回路をFig.6に示す。LC直列共振回路を有している為、鋭い周波数特性や大きな負荷依存性を示す。電気エネルギーが1次側で機械的振動に変換され、これが2次側で電気エネルギーに再変換される。

入力端子から圧電トランスをみるとキャパシタンスが見える。これを効率良く駆動させることがポイントである。また、2次側もキャパシタンスであり、これに機械的振動を通して電荷が注入されることにより電圧が発生する。

圧電トランス等価回路

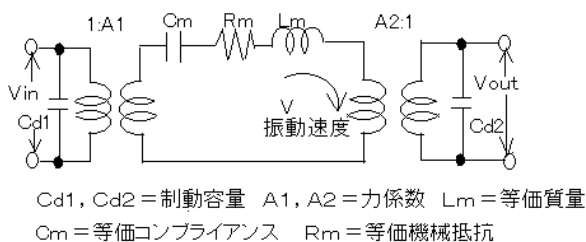


Fig.6 Equivalent circuit of a piezoelectric Transformer.

$Cd1 = 100nF, Cd2 = 10pF, Cm = 4.5nF$

$Rm = 450m\Omega, Lm = 1.5mH$ at 60KHZ

Fig.7に示すように、圧電トランスは駆動周波数によって効率と昇圧比が変化する。従って駆動信号レベル、温度、負荷などで共振特性が変化する。

圧電トランスは以下の点に注意して駆動する。

- ・実駆動時には Qm （最大振幅）が低下して昇圧比も低下する。
- ・共振周波数は温度や負荷によって変化する。
- ・非線形が大きくなると動作不安定な領域が現れる。

従って圧電トランスの駆動は一定周波数で駆動するのではなく共振周波数を自動追従する駆動回路が必要になる。そのために、電流検出する、駆動電圧と電流の位相をみる必要がある。

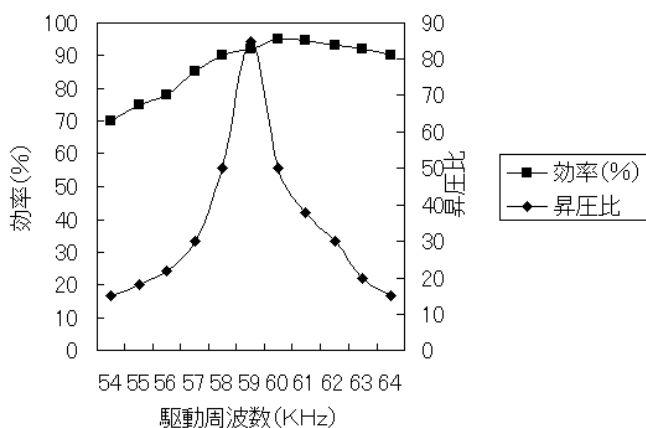


Fig.7 Drive Frequency vs Efficiency / boost up ratio.

2-2 液晶バックライトインバータの開発

2-2-1 液晶バックライトについて

近年、マルチメディア関連機器の中で液晶ディスプレイ市場が急速な伸びを示した。液晶ディスプレイはノートパソコン、携帯電話、テレビなど幅広い分野で実用化されている。

大型液晶ディスプレイは殆どが透過型でバックライトを必要とする構成になっておりバックライトは冷陰極管を点灯させる方式が一般的である。

冷陰極管には水銀が封入してあり、高い電圧を印加する事で発生した電子が水銀に衝突し、紫外線を発生する。この紫外線が管の内側に塗布した蛍光体を励光発光させ可視光に変換する。冷陰極管の電極にはフィラメントがないので、熱電子を発生させる予熱は行わない。その為、電子を発生させる始動時には高い電圧を印加する必要がある。しかし、一度放電を開始すると、放電を維持する電圧は始動電圧の1/3程度で済む。この時冷陰極管には5~6mArms程度の電流を流せばよく、大電流は必要ない。大電流を流してしまうと、電流密度が高くなり電極がスパッタされて寿命が短くなる。

管の長さが長いほど或いは管の径が細くなるほど、そして周囲温度が低くなるほど、高い放電開始電圧が必要になる。またノートパソコンの液晶表面輝度（中心）は150cd/m²以上の明るさが求められ、この時の管電流は6mArms程度となる。

今までこのインバータには巻き線トランス方式が採用されていたが、ここにきて液晶ディスプレイの薄型化が進み、低背化、高効率という要求を満足することが出来なくなっている。

2-2-2 制御回路について

従来の巻き線インバータではバラストコンデンサを介して冷陰極管を点灯していた。冷陰極管の放電が始まると、電流がバラストコンデンサを介して冷陰極管へ流れ放電開始に伴い電流が増大しようとするが、バラストコンデンサのインピーダンスが高い為に冷陰極管へ流れる電流は制限される。この方式では冷陰極管点灯後も巻き線トランスの2次側の出力に1000V以上の高い電圧が出力される。この為に、トランスの2次側は絶縁構造が複雑となり変換効率の低下や薄型化

への障害となった。

一方、圧電トランスの駆動方法は従来から主流となっている自励発振方式に対して、本圧電トランスでは電圧変換方式で有利な2次出力を帰還して周波数制御を行う他励発振方式を採用した。自励発振方式では負荷抵抗により周波数、位相を調整する事が困難であり、また高効率動作が難しいと考えられることから、他に発振器を設けその周波数を圧電トランスの共振周波数に自動的に合致させることで、負荷変動や温度変動があっても常に共振点近傍で圧電トランスを駆動することができる他励発振方式を採用した。また調光（明るさを調節する）も可能にした。

制御方法は、冷陰極管を流れる電流を検出し、これが一定となるように発振周波数を制御する事で定電流動作を行う。また圧電トランスへの入力波形は効率の良い形をチョークコイルと圧電トランスの容量成分との共振作用によって得る。

この方法はFETのスイッチ損失を大幅に低減すると共に、励振電圧に含まれる高周波成分が低減し高効率駆動が可能である。Fig.8は本圧電インバータの出力波形、Fig.9は巻線インバータの出力波形である。圧電インバータの波形は巻線インバータの波形より高調波成分の少ない正弦波であることが分る。また、Fig.10に示すように同じ輝度ならば入力電力を10%程度削減できる。

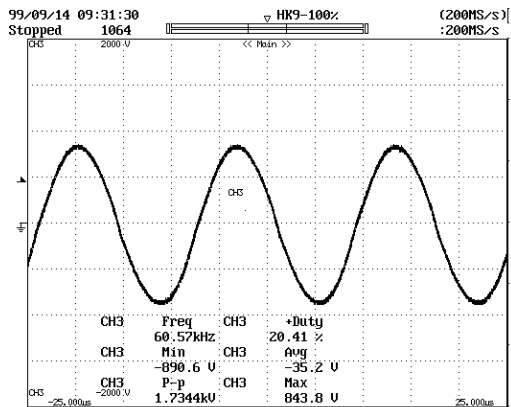


Fig.8 The output wave of a piezoelectric transformer inverter.

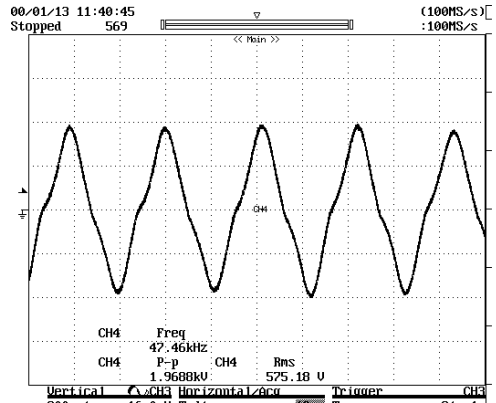


Fig.9 The output wave of a conventional inverter.

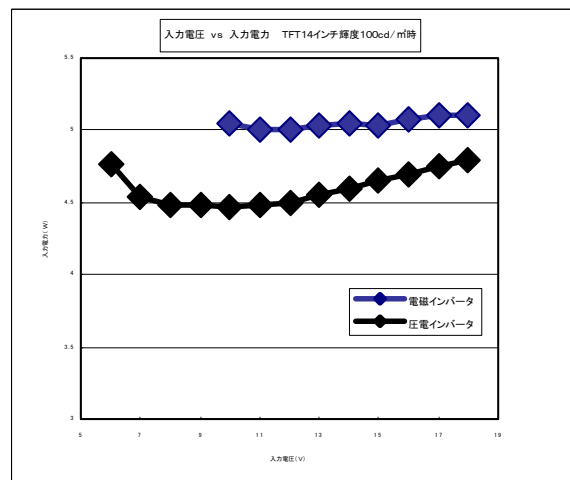


Fig.10 Input voltage (abscissa axis : V) vs Input power(W).

Fig.11のように負荷となる冷陰極管は点灯直前の負荷インピーダンスが極めて高く（数M Ω ）、安定時には100k Ω 程度の負荷インピーダンスとなる。

巻き線トランスでは安定時も点灯開始電圧と同じ高電圧をトランスの2次側に出力していたのに対して圧電トランスでは負荷インピーダンスの変化によって昇圧比が変化するという特性があり点灯開始時に一瞬1000Vrms以上になるが、一旦点灯開始すると出力電圧が5-600Vrms程度に低下する為に、動作の安定という面からも有利な特性となっており、巻き線インバータで必要とされた高耐圧バラストコンデンサも削除することができた。さらに安全性も高めることができる。尚、使用部品はすべて表面実装部品として更に薄型/小型化した。

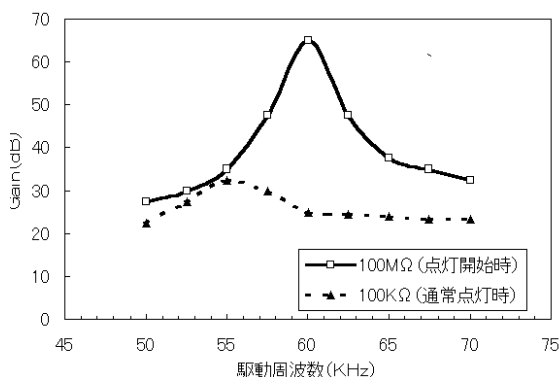


Fig.11 Drive frequency vs gain(boost up ratio) of a practical piezoelectric transformer.

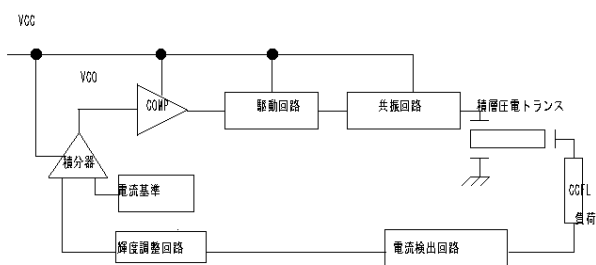


Fig.12 Block diagram of an inverter circuit with piezoelectric transformer for LCD's backlight.

このような特性をもつ圧電トランスを制御する回路Fig.12を考案したので説明する。

まず、始動回路でVCO（電圧制御発振器）の発振周波数が設定される。この時、共振周波数より10数kHz高い周波数に設定されるのが望ましい（ソフトスタート）。この時点では冷陰極管を始動させる為の高い昇圧比は得られず点灯しない。VCOの出力信号はFig.12で示すように、駆動回路を経てパワーMOSFETをスイッチング動作させる。コイルと圧電トランスの入力容量との共振作用によってパワーMOSFETのドレイン波形は半波正弦波となる。この半波正弦波によって圧電トランスは駆動される。ここで圧電トランス出力波形はほぼ正弦波となり、冷陰極管に印加され管電流が流れる。次に冷陰極管に流れる電流は電流検出回路と整流回路で半波正弦波の電圧に変換され輝度調整回路を介してバッファを通り積分器へフィードバックされる。このフィードバック信号が積分器に入力されると、積分器の出力回路は上昇しVCOの発振周波数を下げるように制御する。発振周波数が下がると

徐々に圧電トランスの共振周波数に近づく、すると昇圧比は上昇し始め冷陰極管が点灯開始する電圧に達し点灯する。冷陰極管のインピーダンスは、放電が開始すると100kΩ程度に低下する。圧電トランスの出力電流は負荷インピーダンスが低下するために増え始めると同時に圧電トランスの出力電圧は昇圧比が低下するために低くなる。この時積分器では輝度設定電圧とフィードバック信号である半波正弦波を併せて積分し、その和がゼロとなったとき、冷陰極管に流れる電流値は設定値となりVCOの発振周波数は安定する。この方式を使えば電源電圧の変動をカバーでき調光もできる。

冷陰極管の調光はフィードバック回路の帰還利得（簡単には可変抵抗などで）を調整することで容易に変えられる。但し、電源電圧の変動が広範囲になる場合は周波数を大きく変動させる必要がある。その時、共振周波数から離れてしまい駆動効率が低下する。従って上記の場合はパルス幅制御（PWM制御）と併用することで安定した駆動効率が得られる。

これらの制御回路をICメーカーと共同開発で制御回路と保護回路をFig.13のようにワンチップにし回路の簡素化とブラックボックス化をおこなった。

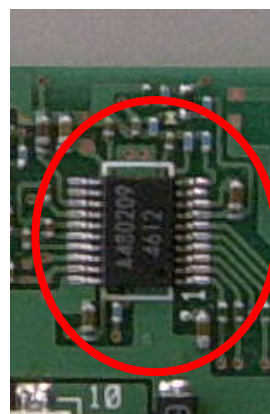


Fig.13 Custom control IC.

2-2-3 駆動回路について

駆動回路は圧電トランスを効率良く安定して駆動させるために最も重要な回路である。しかし構成は簡単で、共振回路への充放電の電子スイッチ（今回はFETを使用）とそのタイミングをとる発振器のみからなる。その駆動回路の構成を第3世代まで考案し実用化した。

① 第1世代 ; 圧電トランス基本駆動回路

(開発当初1995年)

Fig.14に示すようにFETの1石駆動回路である。小型化は実現できたが駆動効率は80%程度で、FETとコイルの発熱が問題として残った。

Fig.15のようにわずかなスペースに配置され、巻き線インバータでは全く入らないスペースであった。ノートパソコンメーカー2社に採用された。

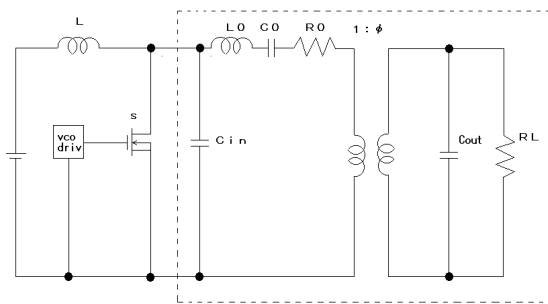


Fig.14 Single FET drive circuit.

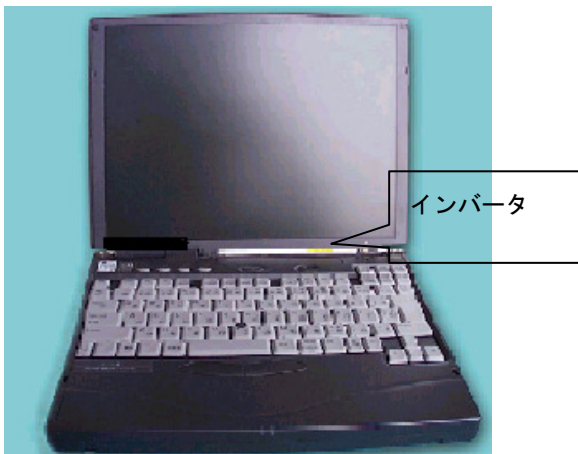


Fig.15 Notebook PC application.

② 第2世代 ; プッシュプル駆動回路

(2000年)

Fig.16のようにFETの2石駆動である。小型化とDVD1枚再生2時間30分点灯という明確な省電力目標に対して2回路多石化によりFETとコイルの発熱を抑制し駆動効率85%を達成した。

Fig.17はポータブルDVDプレーヤーである。3社に採用された。

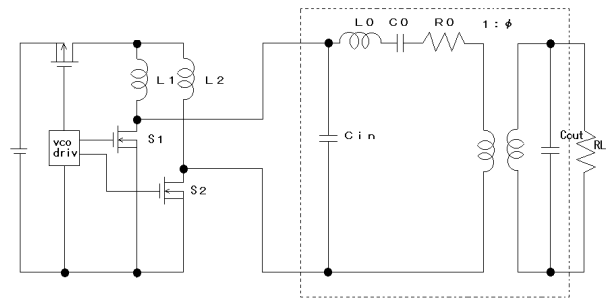


Fig.16 Push pull drive circuit.



Fig.17 DVD Player application.

③ 第3世代 ; フルブリッジ駆動回路

(2002年)

Fig.18のようにFETの4石駆動である。Fig.19はフルブリッジ圧電インバータである。4個のFETのスイッチングによる共振波形を生成し、コイルをフィルターとして使い発熱を大きく抑制し、また更なるFETの多石化から発熱を抑制した。

駆動効率90%を超え、世界一のパソコンメーカーと日本最大手の液晶メーカーに採用された。また(株)リコー及び(株)リコー関連会社からも採用が始まった。

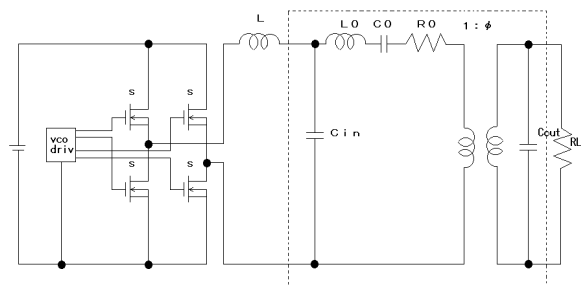


Fig.18 Full Bridge drive circuit.

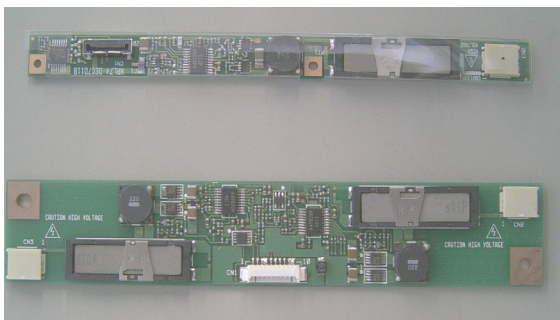


Fig.19 Full Bridge drive inverter.

3. 成果

圧電インバータと巻き線インバータとの大きさ（体積）の比較をすると圧電インバータの体積はW13×L130×H5=8450mm³，一方巻き線インバータはW19×L140×H10=26600mm³で体積比1：3となり圧電インバータの大きさは巻き線インバータの1/3になる．駆動効率は圧電インバータは約90%，巻き線インバータは78%であり10%以上も圧電インバータの駆動効率が良い．

一方，輝度効率は出力波形に依存するところが大きい．圧電インバータの出力波形はほぼ正弦波で，巻き線インバータは三角波出力であり，同じ管電流で比較すると圧電トランスインバータが10%程度輝度が高くなる．このことは同じ輝度の場合，10%小さい消費電力になるということである．Fig.20にまとめたが圧電インバータは小型で高効率な最適なインバータである．

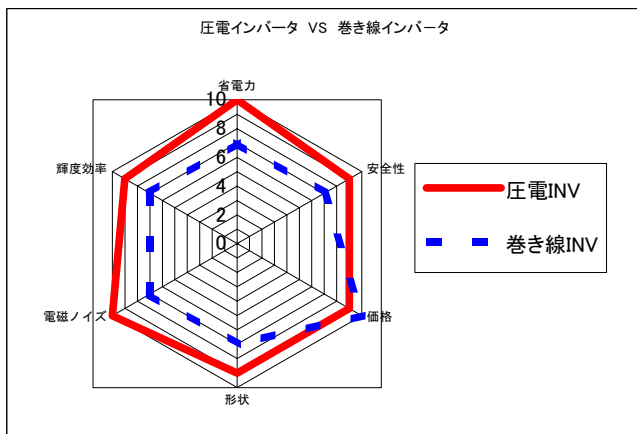


Fig.20 Comprehensive evaluation.

4. 今後の展開

今回の研究開発で得た技術を応用してpower electronics managementを実施するがコピー機，プリンターに使われる高圧電源はそのまま圧電トランス技術が応用できるので現行電源の大きさ1/2以下，消費電力1/2以下，不燃性で電磁ノイズの発生がなく高圧電線の這い回しがない等の特長を持った高圧電源を開発中である．

謝辞

本研究を行うにあたり，ご懇篤なご指導と試料（資料）を頂き，ご高配を賜った圧電メーカー各社様，半導体メーカー各社様に厚くお礼申し上げます．