

小型・低損失インバータを実現する新回路技術

Innovative Circuit Technology for More Compact and Effective Inverters

餅川 宏 小山 建夫

■ MOCHIKAWA Hiroshi ■ KOYAMA Tateo

交流電動機駆動などに用いるインバータの主素子には、現在、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor : 絶縁ゲートバイポーラトランジスタ) を用いている。しかし、IGBTはPN接合部のしきい値電圧降下のため損失低減に限界がある。

東芝は、電力変換効率が約99%まで向上する革新的な低損失インバータ技術(リカバリアシスト)を開発した。この技術により、インバータからの発熱が大幅に減少し、弱い風だけで十分冷却できるため、インバータ体積を小型化できる。

この技術を応用して、10 W/cm³という世界最高レベルのパワー密度のインバータを試作した。また、軽負荷域の効率が高い特長を生かし、ルームエアコンへ適用した。

Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs) are commonly used as the core device of inverters for AC motor drives. However, IGBTs have a limitation in terms of loss reduction because they produce a threshold voltage drop at the PN junction.

Toshiba has taken up the challenge of overcoming this limitation so as to realize low-loss inverters, and developed an innovative circuit technology called "Recovery Assist." This new circuit technology has demonstrated the ability to improve power conversion efficiency to around 99%. This, in turn, allows inverters to be downsized. Moreover, the production of heat is minimized so that an inverter can be sufficiently cooled by only a small airflow.

An experimental inverter incorporating this technology was fabricated that attained the world's highest power density of 10 W/cm³. New inverters with this technology have been applied to air conditioners, because they are particularly effective in light load mode.

1 まえがき

電力変換装置のパワー密度(装置出力/装置体積)は、図1⁽¹⁾に示されるように、ここ30年間で2けた以上の改善がされている。

これらは、主としてパワー半導体(以下、素子と略記)の性能改善により成し遂げられた。このインバータ用素子として確固たる地位を占めたのがIGBTである。このIGBTは、数回の大きな世代変遷を経て、開発当初の1/3以下の電力損失まで大幅な改善を遂げ、現在も改善が続いている。

しかし、その原理として生じるPN接合電圧(しきい値電圧とも言う)以上の電圧降下が必ず生じてしまうため、特に低耐圧領域(耐圧600Vクラス)においては、損失低減に限界がある。このため、最近、図1の右肩に記された高橋モデル(長岡技術科学大学の故高橋教授が提唱)⁽²⁾にある、SiC(炭化ケイ素)半導体の実用化を見据えた素子開発が盛んになってきている。しかし、もっとも期待されているSiC-MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)が、品質と価格も十分安定して供給され、量産インバータに適用されるには、まだ時間がかかるものと考えられる。

そこで、東芝では、現用のSi(シリコン)半導体を用いて大幅な損失低減を目指した回路を開発してきた。

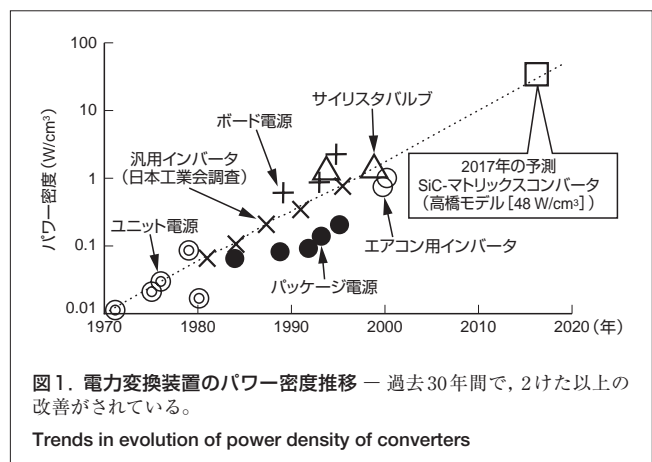


図1. 電力変換装置のパワー密度推移 — 過去30年間で、2けた以上の改善がされている。

Trends in evolution of power density of converters

2 新型素子とその課題

近年、Si半導体で、注目すべき低オン抵抗の新型素子であるSJ-MOSFET(Super Junction MOSFET)が開発され、損失低減が期待された(図2)。この良好な導通性能を持つSJ-MOSFETは、DC-DC(直流-直流)コンバータなどには適している。しかし、素子に内蔵している寄生ダイオードの逆阻止能力回復(以下、逆回復と略記)が遅いという課題があり、逆に損失が増大するため、インバータへの適用が見送られていた。

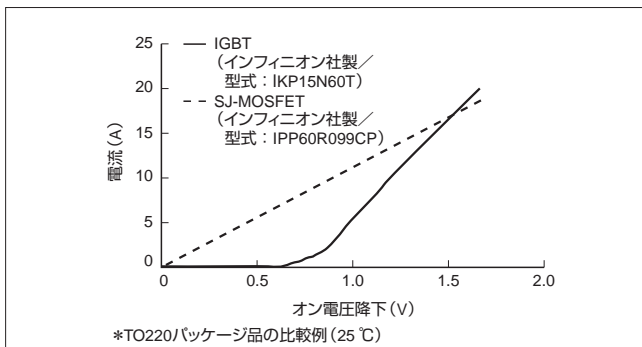


図2. 導通性能比較 — 電流17 A以下では、IGBTよりSJ-MOSFETの方が電圧降下が少なく、低損失となる。

Comparison of conduction characteristics

SJ-MOSFETの寄生ダイオードの逆回復時に発生する短絡電流の発生メカニズムについて図3に示す。例えば、同図のように上側主素子の寄生ダイオードに負荷電流が流れているとき①に、下側主素子をターンオンする②と寄生ダイオードがオフするまでの期間、主回路電圧を短絡する回路が形成される③。

図4は、実際に図3に示すように上側、下側主素子にSJ-MOSFETを使ってインバータ1相分を構成したときに、下側主素子に流れる短絡電流を観測した波形である。下側主素

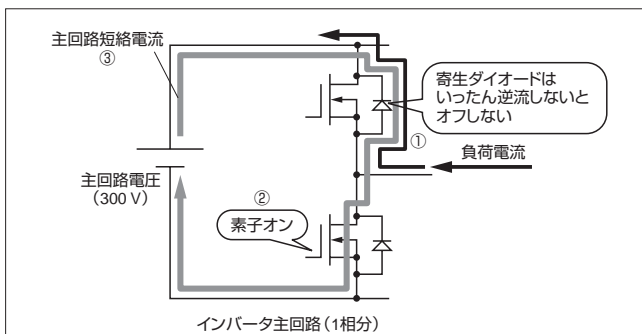


図3. 主回路短絡の様子 — 上側の寄生ダイオードがオフするまでの間、主回路電圧を短絡する回路が形成される。

Occurrence of short-circuit current in main circuit

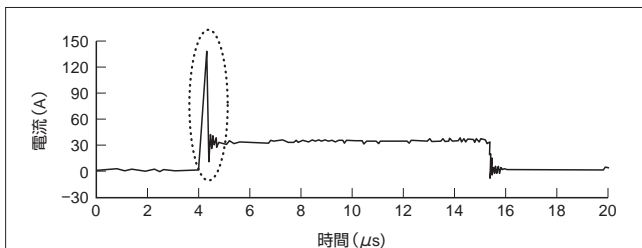


図4. 下側 MOSFET に流れる主回路短絡電流波形 — 下側主素子のSJ-MOSFETでターンオンの瞬間に短絡電流が観測される。

Waveform of short-circuit current observed at low-side MOSFET

子のターンオンの瞬間に、100 Aを超える過大な短絡電流が流れている。時間的には0.3 μs程の短時間であるが、逆回復完了時のdi/dt(電流変化率)が高く、電磁ノイズも多く発生し、最悪は主素子破壊のおそれもある。ダイオードを逆回復するには、逆回復電荷をダイオードに逆向きに注入する必要がある。このダイオード逆回復時に発生する概略の損失を見積もると、“主回路電圧×逆回復電荷”となり、大きな損失が発生する。

この逆回復の問題は、共振型インバータ方式を採用すれば改善されることは知られている。しかし、共振型インバータでは付加回路が大きくなってしまふ。

3 新回路方式

回路の単純化を追求した結果、新回路方式“リカバリアシスト(Recovery Assist)回路”を考案した。

3.1 動作原理

その具体的な回路を図5に示す。

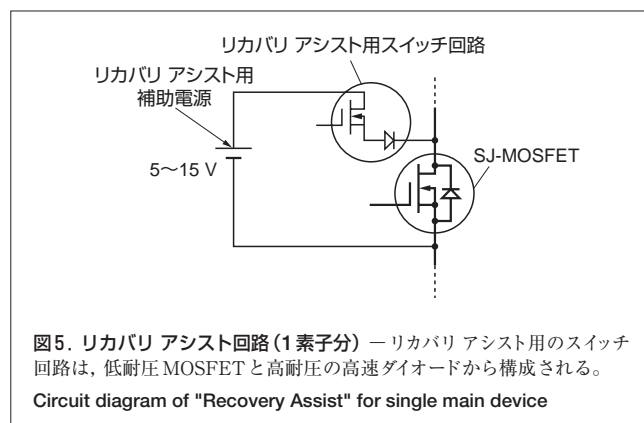


図5. リカバリアシスト回路(1素子分) — リカバリアシスト用のスイッチ回路は、低耐圧MOSFETと高耐圧の高速ダイオードから構成される。

Circuit diagram of "Recovery Assist" for single main device

リカバリアシスト用の補助電源電圧は、5~15Vと主回路電圧の約300Vに対して1/20以下である。このため、逆回復に伴う損失は概略“補助電源電圧×逆回復電荷”となり、1/20以下になる。また、リカバリアシスト用のスイッチ回路は、低耐圧MOSFETと高耐圧の高速ダイオードの直列回路から構成される。この高速ダイオードは、SJ-MOSFETのオフ時に印加される主回路電圧をブロックする役目がある。低耐圧のMOSFETは、オン抵抗が非常に小さいため小チップ面積のもので十分であるし、また、直列接続した高速ダイオードも、この回路が作動する時間がごく短時間なので小チップ面積のもので済む。このため、リカバリアシスト回路は低コストに構成できる。

次に、このリカバリアシスト回路の動作タイミングを、図3の場合で説明する。図3において、上側のSJ-MOSFETに“スイッチオン”が指令されていれば、負荷電流は低オン抵抗

のSJ-MOSFETを流れる。これは、一般に同期整流と呼ばれる現象で、負荷電流は、通常のIGBTでは逆並列接続されたダイオードを流れるところを、SJ-MOSFETでは低オン抵抗のSJ-MOSFETを通り、損失低減が図れる。

次に、下側主素子への転流の前段階としてのデッドタイム期間になると、上側主素子に“スイッチオフ”が指令されるため同期整流状態ではなくなり、負荷電流は上側SJ-MOSFETの寄生ダイオードを流れる。このときに、上側素子に付加したリカバリ アシスト回路のスイッチ回路をオンさせ、寄生ダイオードに逆回復電荷を注入する。リカバリ アシスト回路に流れる電流は、負荷電流と逆回復電荷注入電流が同時に流れるが、ごく短時間なので発生熱量も少ない。以上の動作を経て、下側主素子がターンオンする前に、上側主素子の寄生ダイオードの逆回復が完了する。リカバリ アシスト回路はデッドタイム中に作動するが、SJ-MOSFETのターンオフが十分速いため、実際には、IGBTインバータと同等、又はそれ以下のデッドタイムで済む。

3.2 効果

リカバリ アシスト技術適用時の下側主素子の電流波形を図6に示す。図4と同じ条件下での測定であるが、主回路短絡電流は抑制されていることがわかる。

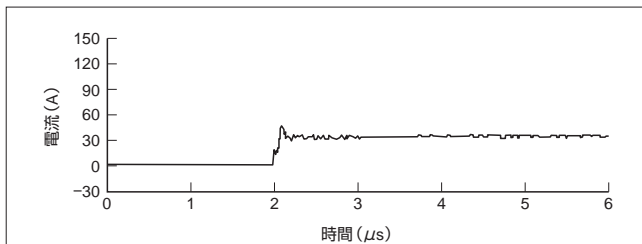


図6. リカバリ アシスト技術適用時の下側 MOSFET 電流波形 — 図4で観測されたような、寄生ダイオードの逆回復に伴う短絡電流は発生しない。

Waveform of short-circuit current observed at low-side MOSFET when "Recovery Assist" applied

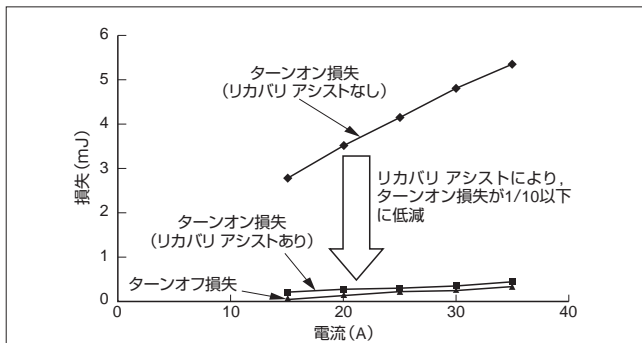


図7. SJ-MOSFETのスイッチング損失例 — リカバリ アシスト技術により、ターンオン損失が大幅に低減している。

Example of switching loss generated by super junction (SJ) -MOSFET

また、図7は、スイッチング損失を測定した結果である。これを見るとターンオン損失が大幅に低減していて、寄生ダイオードの逆回復電荷による損失が十分抑制されていることがわかる。実際には、リカバリ アシスト回路での損失が加算されるため、これより損失は増大するものの、ターンオンに伴うトータル損失はおおよそ1/10に低減する。

3.3 効率の検証

以上の基礎試験の結果を踏まえて、5 kWの三相パルス幅変調 (PWM) インバータを試作し、実際にモータを駆動して効率を測定した(図8)。PWMキャリア周波数は4.5 kHzで負荷として誘導電動機を駆動した。

この結果、損失は1/2以下と大幅に低減し、最高効率で98.8%と、従来のIGBTインバータに対し1.6ポイント改善している。特に、軽負荷域での効率改善が著しい。これは、リカバリ アシスト技術の効果に加えて、SJ-MOSFETのしきい値のない特性と、同期整流効果が効いているためである。

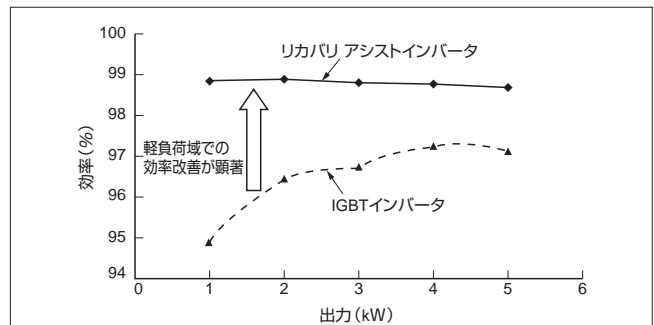


図8. インバータ効率の実測結果 — リカバリ アシストインバータの最高効率率は98.8%を示した。

Higher efficiency of "Recovery Assist" inverter compared with IGBT inverter

4 20 kW 試作機の開発と検証

次に、この高効率特性を生かし、高パワー密度化に向けた試作検証を行った。試作した20 kWの三相インバータの外観を図9に示す。この中には、リカバリ アシスト制御回路はもちろん、ゲート駆動回路、制御電源、主回路コンデンサ、冷却器(ファン、フィン)などインバータの全部品を含んで、2,000 cm³のアルミ製のケースに収まっている。このパワー密度は10 W/cm³となり、図1の破線で示された傾向を見ると2010年ころのレベルである。小型ファン1個で空冷していて、STM社製SJ-MOSFETであるSTY60NM60(600 V, 60 A 定格)を6並列して1主素子分を構成し、インバータ全体で計36個を用いている。

このインバータの負荷試験結果を図10、図11に示す。図10は、出力の電圧と電流波形で、図11は温度上昇特性である。

この試験では、PWMキャリア周波数を3 kHzに設定して

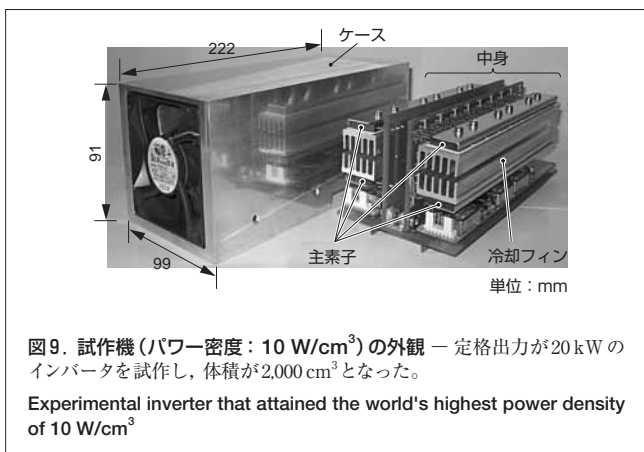


図9. 試作機 (パワー密度: 10 W/cm³) の外観 — 定格出力が20 kW のインバータを試作し, 体積が2,000 cm³となった。
Experimental inverter that attained the world's highest power density of 10 W/cm³

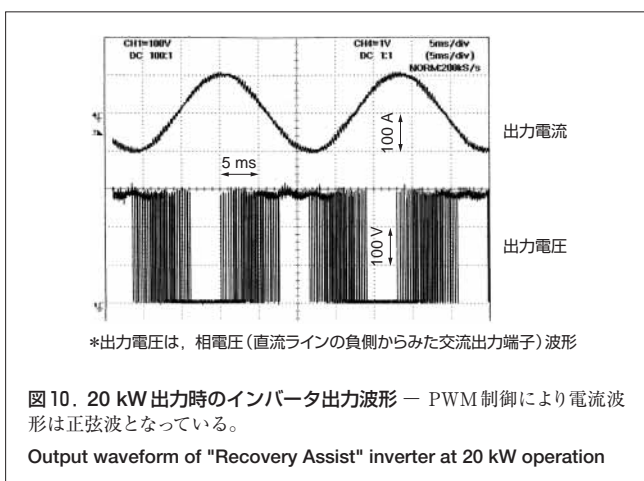


図10. 20 kW出力時のインバータ出力波形 — PWM制御により電流波形は正弦波となっている。
Output waveform of "Recovery Assist" inverter at 20 kW operation

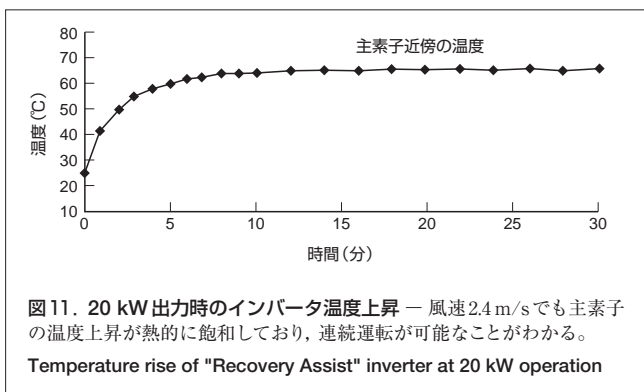


図11. 20 kW出力時のインバータ温度上昇 — 風速2.4 m/sでも主素子の温度上昇が熱的に飽和しており, 連続運転が可能ながわかる。
Temperature rise of "Recovery Assist" inverter at 20 kW operation

いる。内蔵ファンの出口風速が2.4 m/s, 周囲温度が24 °Cで出力20 kWの運転を継続しても, 主素子近傍の温度上昇は, 約40 degで熱的な飽和が見られ, 連続運転が可能であることを示している。

5 エアコン用インバータへの適用

このリカバリアシスト技術を, エアコンのコンプレッサ駆動インバータへ適用した。

エアコンでは, 軽負荷域での運転時間が非常に長く, 軽負荷域での効率改善が著しいリカバリアシスト技術が適している。東芝キャリア(株)では2006年2月から, “スマート・プレ・スイッチング™”の名称でこの技術をエアコン用インバータに適用している(図12)。このインバータは, 従来品に比べて, 運転時間の長い軽負荷域で2~4%の効率改善を達成している。

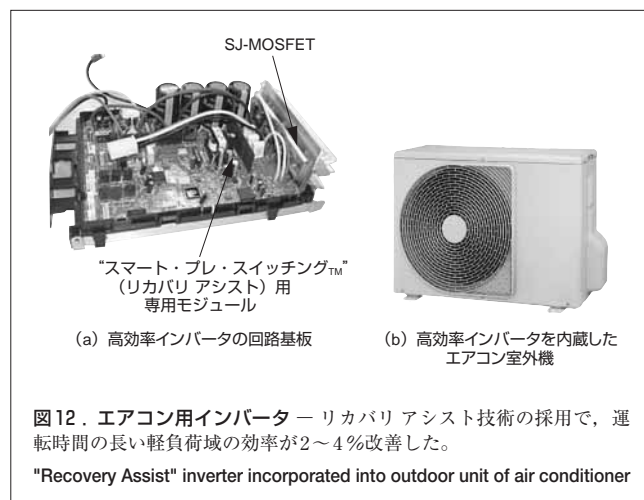


図12. エアコン用インバーターリカバリアシスト技術の採用で, 運転時間の長い軽負荷域の効率が2~4%改善した。
"Recovery Assist" inverter incorporated into outdoor unit of air conditioner

6 あとがき

逆回復特性に課題のあるSJ-MOSFETを, インバータへ適用可能にする新回路方式“リカバリアシスト”について述べた。SJ-MOSFETの低損失特性を發揮させることで, 5kW三相PWMインバータではおおよそ99%の効率を確認した。また, 現時点の世界最高レベルである10 W/cm³の高パワー密度化も可能であることを実証した。この技術は応用範囲が広いので, 今後, エアコンをはじめ, 多くのインバータ製品に適用していきたい。

文献

- (1) 大橋弘道. 最新のパワーデバイスの動向. 電気学会論文誌. 122巻, 3号 2002年, p.168-171.
- (2) 高橋勲. 近未来の電力変換器. 平成13年電気学会全国大会. 4-167, 2001年, p.1471-1472.



餅川 宏 MOCHIKAWA Hiroshi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター
産業・自動車技術開発部主査。パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。電気学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



小山 建夫 KOYAMA Tateo

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター
産業・自動車技術開発部。パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。電気学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center