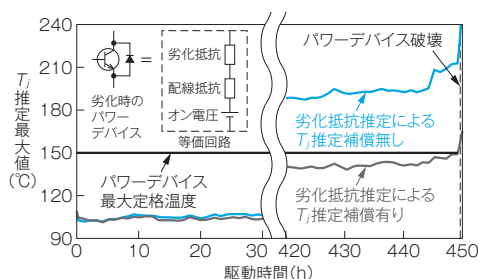


# 劣化を考慮したインバータ駆動中におけるパワーデバイスのジャンクション温度推定法

比嘉 隼 Hayato Higa  
林 孝則 Takanori Hayashi  
滝口昌司 Masashi Takiguchi

キーワード 電力変換器, 温度推定, 劣化, パワーデバイス

## 概要



パワーデバイスのジャンクション温度  $T_j$  推定最大値の長期トレンド

電力変換器（インバータ）は、産業機器やインフラ設備などあらゆる分野で活用され、更なる信頼性の向上が求められている。インバータの信頼性を向上させる手法の一つとして、温度による保護があるが、インバータを構成するパワーデバイスのジャンクション温度  $T_j$  は、直接計測することが困難である。 $T_j$  を推定する技術は、パワーデバイスの電流に対する電圧- $T_j$  特性を事前に取得し、インバータ駆動中における電圧・電流の計測値と比較することで  $T_j$  を推定する方法がある。しかし、この方法は、長期間の駆動によってパワーデバイスが劣化すると事前に取得した特性から変化してしまい、温度推定誤差が生じる。

そこで、パワーデバイスの劣化を電気抵抗値として推定することで特性変化を補償する方式を開発し、温度推定精度の向上を確認した。

## 1 まえがき

電力変換器（インバータ）に用いるパワーデバイスは、電気自動車だけではなく電動航空機への適用が盛んに検討され、更なる信頼性が求められている。インバータの信頼性向上の手段として、インバータの駆動中におけるパワーデバイスのジャンクション温度  $T_j$  推定がある。駆動中に  $T_j$  を推定することで、定格温度の超過によるパワーデバイスの故障を防ぐことができる。 $T_j$  推定手法には、パワーデバイスの損失を計算し、熱等価回路から推定する手法がある<sup>(1)</sup>。しかし、高精度な熱等価回路が必要になる。

一方、計測したオン電圧  $V_{ce}$ 、オン電流  $I_c$  を事前に取得した  $I_c$  に対する  $V_{ce}$ - $T_j$  特性と照合することで、 $T_j$  を推定する  $V_{ce}$  計測法がある<sup>(2)</sup>。一般的に、パワーデバイスを構成する部品は線膨張係数が異なるため、パワーデバイスの利用で  $T_j$  が変化すると接合部の半田が摩耗劣化する<sup>(3)</sup>。この劣化によって、 $I_c$  に対する  $V_{ce}$ - $T_j$  特性が事前に取得した特性から変化する。したがって、インバータ駆動中における  $V_{ce}$  計測法では、 $T_j$  推定に誤差が発生する。本稿では、パワーデバイスの摩耗劣化による  $I_c$  に対する  $V_{ce}$ - $T_j$  特性の変化を電気抵抗値として推定し、 $V_{ce}$  計測値を補正することで、 $T_j$  の推定精度を向上する方法を紹介する。

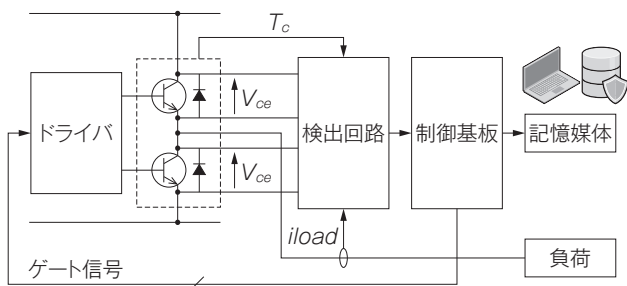
## 2 $V_{ce}$ を用いた $T_j$ 推定法

### 2.1 システム構成

第1図に  $V_{ce}$ を用いた  $T_j$ 推定法のシステム構成を示す。本システムでは、 $V_{ce}$ 、負荷電流  $i_{load}$ 、パッケージ温度  $T_c$ を検出回路で計測し、アナログデジタル(AD)コンバータでデジタル信号に変換後、制御基板を通じて記憶媒体に保存する。なお、本システムでは、インバータ駆動中に  $T_j$ を推定するために、数十  $\mu s$ の周期で  $V_{ce}$ 、 $I_c$ 、 $T_c$ を計測する。 $I_c$ は負荷電流の絶対値と同じとし、 $i_{load}$ の方向、パワーデバイスのオン期間から導出している。さらに計測データを記憶媒体に保存することで、パワーデバイスの長期モニタリングもできる。

### 2.2 $V_{ce}$ 計測法による $T_j$ 推定法

第2図に  $I_c$ に対する  $V_{ce}-T_j$ 特性を示す。各線は  $I_c$ 値ごとの  $V_{ce}-T_j$ 特性である。なお、本試験に使用するパワーデバイスは、電圧定格1200V・連続電流定格75Aの2in1モジュールを使用した。 $I_c$ に対する  $V_{ce}-T_j$ 特性は、 $T_j$ にかかわらず  $V_{ce}$ が一定となる  $I_c$ 条件(以下、クロスポイント電流  $I_{c,cp}$ )がある。また、 $I_{c,cp}$ 付近の電流  $I_{d,min}$ 、 $I_{d,max}$ を境界に、 $T_j$ に対する  $V_{ce}$ の変化傾向が異なる。一方、 $V_{ce}$ 計測法では、 $I_c$ に対する  $V_{ce}-T_j$ 特性を、複数の  $I_c$ 条件で事前に取得し、インバータ駆動中の  $I_c \cdot V_{ce}$ 計測値と照合することで  $T_j$ を推定する。したがって、 $I_c$ が  $I_{d,max}$ 以上では  $V_{ce}-T_j$ 特性が非線形になるため、計



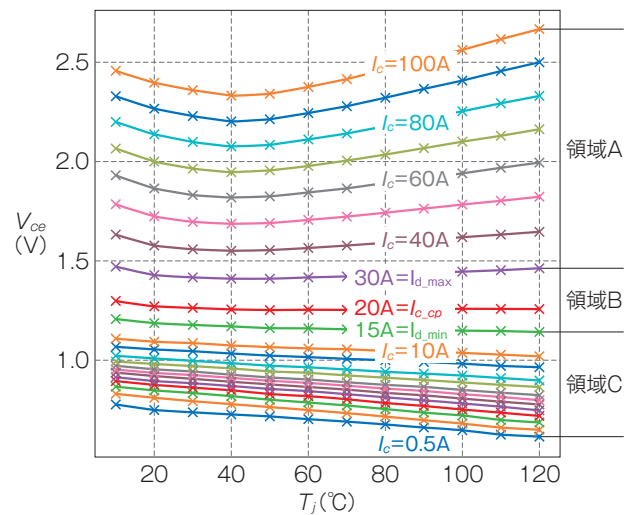
第1図  $T_j$ 推定法のシステム構成

パワーデバイスごとに検出回路が接続され、オン電圧  $V_{ce}$ ・負荷電流  $i_{load}$ ・パッケージ温度  $T_c$ を計測している。各計測データは記憶媒体に保存し、長期モニタリングも実現する。

測した  $V_{ce} \cdot I_c$ から一意に  $T_j$ が推定できない。

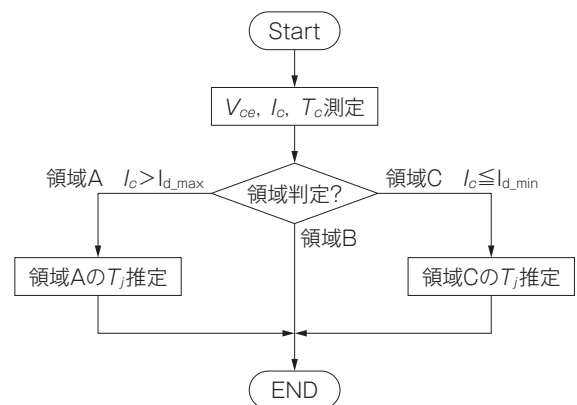
そこで、第2図を三つの領域(A~C)に分割し、領域ごとに異なるアルゴリズムで  $T_j$ を推定する。第3図に  $V_{ce}$ 計測法による  $T_j$ 推定のフローチャートを示す。まず、第1図のシステムで、 $V_{ce}$ 、 $I_c$ 、 $T_c$ を計測する。次に  $I_c$ 計測値によって第2図に示した領域を判定する。各領域の  $T_j$ 推定のアルゴリズムは、以下のとおりである。

(1) 領域A 条件： $I_c > I_{d,max}$  本領域は、 $I_{c,cp}$ より大きな電流条件の領域で、 $T_j$ に対して  $V_{ce}$ の変化が非線形となる領域である。そのため、 $V_{ce}$ 、 $I_c$ 計測値



第2図  $I_c$ に対する  $V_{ce}-T_j$ 特性

本特性の各線は、 $I_c$ ごとの  $V_{ce}-T_j$ 特性を示す。本特性は  $I_c$ によって  $V_{ce}-T_j$ 特性が異なる。 $I_c$ によって  $V_{ce}-T_j$ 特性を領域A・B・Cに分割し、領域ごとに異なるアルゴリズムで  $T_j$ を推定する。



第3図  $V_{ce}$ 計測法による  $T_j$ 推定のフローチャート

このフローチャートでは、 $V_{ce}$ 、 $I_c$ 計測値から領域を判定し、 $V_{ce}$ 、 $I_c$ 計測値を事前取得した  $I_c$ に対する  $V_{ce}-T_j$ 特性と照合して、 $T_j$ を推定する。

を事前取得した  $I_c$  に対する  $V_{ce} - T_j$  特性と照合し  $T_j$  を推定する。

(2) 領域B 条件:  $I_{d\_min} < I_c \leq I_{d\_max}$  本領域は、 $I_{c\_cp}$  付近の  $T_j$  の変化に対して  $V_{ce}$  がほぼ一定となる領域  $I_{d\_max} \cdot I_{d\_min}$  である。温度依存性が低く温度推定の精度が悪いため、 $T_j$  を推定せず推定値は計測1周期前の  $V_{ce} \cdot I_c$  計測値で推定した  $T_j$  を用いる。

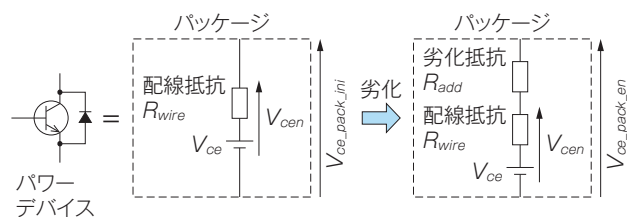
(3) 領域C 条件:  $I_c \leq I_{d\_min}$  本領域は、領域Bより低い  $I_c$  計測値で、 $T_j$  に対して  $V_{ce}$  が単調減少となる領域である。そのため、 $V_{ce} \cdot I_c$  計測値を事前取得した  $I_c$  に対する  $V_{ce} - T_j$  特性と照合すると  $T_j$  が一意に求まる。

### 3 パワーデバイスの劣化抵抗推定による $T_j$ 推定補償法

第4図にパワーデバイスパッケージ内の等価回路を示す。事前取得した  $I_c$  に対する  $V_{ce} - T_j$  特性は図の左に示す劣化前の等価回路で表せる。パワーデバイス利用による  $T_j$  の変化によって、パワーデバイスを構成するワイヤボンディングとチップ間の接合部が摩耗劣化する。この劣化による抵抗の電圧降下を考慮したオン電圧  $V_{ce\_pack\_en}$  は、劣化前の特性データ（テーブルデータ）取得時のオン電圧  $V_{cen}$ 、劣化抵抗  $R_{add}$  及び  $I_c$  を用いて式(1)で表される。ただし、劣化前におけるワイヤボンディングの配線抵抗  $R_{wire}$  による電圧降下分は  $V_{cen}$  に含まれる。

$$V_{ce\_pack\_en} = V_{cen}(T_j, I_c) + R_{add} I_c \dots\dots\dots(1)$$

式(1)から劣化によって増加した抵抗によって電圧降



第4図 パワーデバイスパッケージ内の等価回路

パワーデバイスの等価回路は、配線抵抗・ $V_{ce}$  から構成される。インバータの長期駆動によって劣化すると抵抗が増加する。増加した抵抗分を劣化抵抗としている。

下が発生し、 $V_{ce}$  計測値  $V_{ce\_pack\_en}$  が増加する。これは  $I_c$  に対する  $V_{ce} - T_j$  特性と計測データの関係が変化するため、 $T_j$  の推定値に誤差が発生する。したがって、この誤差を低減するために増加した抵抗値  $R_{add}$  を推定する必要がある。しかし、 $V_{cen}$  は  $T_j$  及び  $I_c$  によって変化するため、劣化を考慮した  $V_{ce\_pack\_en}$  の上昇が  $T_j$  の上昇か劣化による  $R_{add}$  の増加かを判断できない。そこで、 $T_j$  によって  $V_{ce}$  が変化しない  $I_{c\_cp}$  の  $V_{ce}$  計測値を用いて  $R_{add}$  を推定する。 $I_{c\_cp}$  におけるワイヤボンディング劣化前の  $V_{ce}$  計測値  $V_{ce\_pack\_ini}$  及び劣化後の  $V_{ce}$  計測値  $V_{ce\_pack\_en}$  は式(2)及び式(3)で表すことができる。

$$V_{ce\_pack\_ini} = V_{cen}(I_{c\_cp}) \dots\dots\dots(2)$$

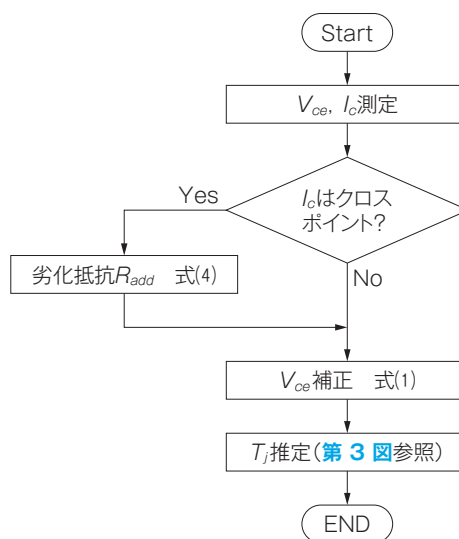
$$V_{ce\_pack\_en} = V_{cen}(I_{c\_cp}) + R_{add} I_{c\_cp} \dots\dots\dots(3)$$

式(3)を式(2)に代入し  $R_{add}$  について解くと式(4)となり、 $R_{add}$  を推定できる。

$$R_{add} = \frac{V_{ce\_pack\_en} - V_{ce\_pack\_ini}}{I_{c\_cp}} \dots\dots\dots(4)$$

推定した抵抗値を用いて式(1)内の  $V_{cen}$  を導出することで劣化による  $T_j$  の推定誤差を補償できる。

第5図に劣化抵抗推定のフローチャートを示す。なお、劣化による抵抗値  $R_{add}$  は  $I_c$  が  $I_{c\_cp}$  となるタイミングで推定する。



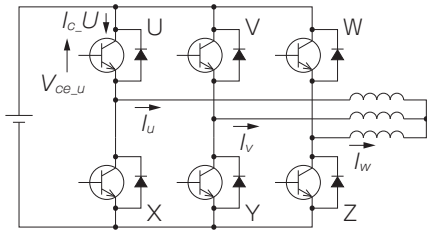
第5図 提案する劣化抵抗推定のフローチャート

劣化抵抗は、 $T_j$  によって  $V_{ce}$  が変化しない電流値（クロスポイント電流）で推定する。

## 4 実験結果及び解析結果

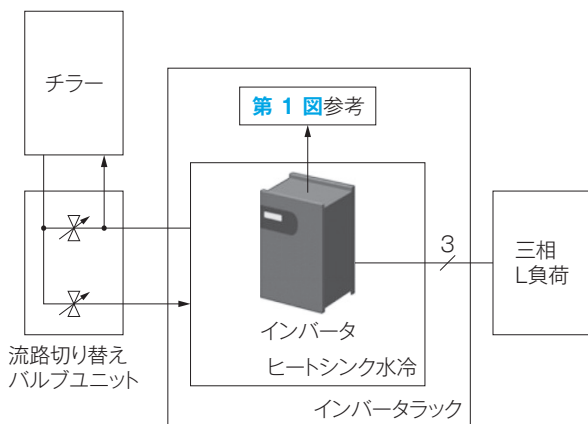
### 4.1 試験条件

提案法の妥当性を確認するために、三相インバータを用いた試験を行った。第6図に試験回路の構成を、第7図に実験システムを示す。負荷にはインダクタを使用する。また、三相インバータは、電流制御によって出力周波数0.8Hz・負荷電流70Armsを出力する。ヒートシンクの冷却には水冷を採用し、チラーで冷却水の温度を10℃に制御している。インバータの駆動パターンは、20秒間駆動、その後5秒停止を1サイクルとしている。また、流路切替器を用いて、インバータの停止期間にはヒートシンクの冷却水を循環させ、駆動期間にはヒートシンクへの冷却水の循環を停止させる。これにより、 $T_j$ の最大値を大きくし、パワーデバイスの劣化を加速させている。



第6図 試験回路の構成

第1図のレグが三つで構成される三相インバータである。負荷にはインダクタを用いている。

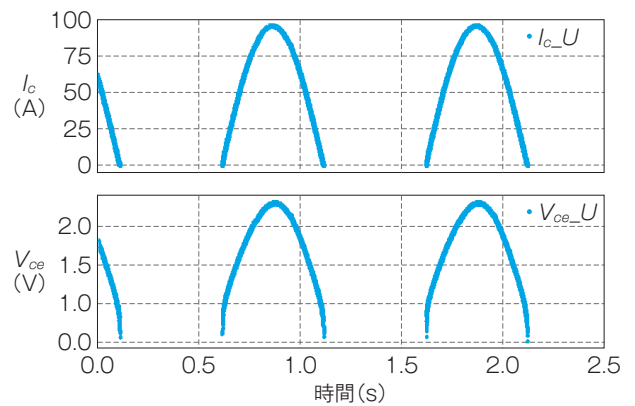


第7図 実験システム

パワーデバイスの冷却には水冷を採用している。チラーによって水温を10℃に制御する。また、流路切替バルブユニットによって冷却水の経路を変更することで、 $T_j$ 最大値を増加させる。

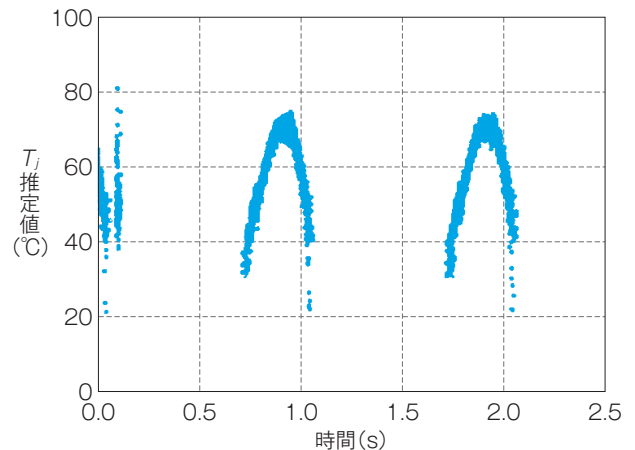
### 4.2 $T_j$ 推定結果

第8図にインバータ駆動中の $V_{ce}$ 、 $I_c$ 計測結果を示す。パワーデバイスは、決まった方向にのみ電流が流れるため、パワーデバイスがオン期間かつ負荷電流 $I_u$ が正の場合にのみ電流 $I_c$ が流れている。インバータが出力している電流波形に合わせて、テーブルデータと同様に $I_c$ に従って $V_{ce}$ 計測値が変化しており、 $V_{ce}$ 計測が妥当であることが分かる。第9図に $V_{ce}$ 、 $I_c$ 計測値から $T_j$ を推定した結果を示す。パワーデバイスのオン期間は、クロスポイント付近を除いて $T_j$ を推定できている。ただし、 $I_c$ がゼロ付近で、 $T_j$ 推定値が大きく変化している。これは $I_c$ 計測値が領域Bに近いため、温度推定の精度が悪く、 $V_{ce}$ 計測値の誤差に対して $T_j$ 推定値の感



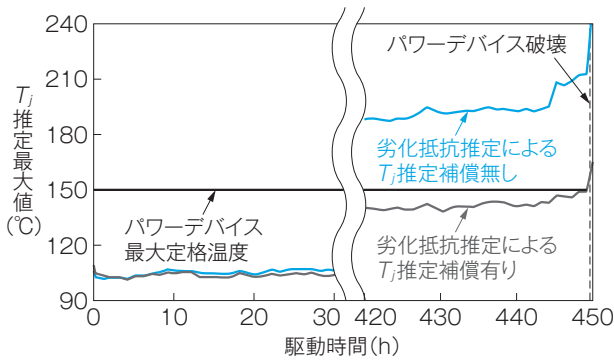
第8図 インバータ駆動中の $V_{ce}$ 、 $I_c$ 計測結果

インバータが出力している交流波形に合わせて $V_{ce}$ 、 $I_c$ 計測値が変化しており、 $V_{ce}$ 計測が妥当であることを示している。



第9図 インバータ駆動中の $T_j$ 推定結果

$V_{ce}$ 、 $I_c$ 計測値から $T_j$ が推定できている。



第10図 駆動パターン1サイクルにおける $T_j$ 推定最大値の長期トレンド

劣化抵抗推定による $T_j$ 推定補償を適用することで、パワーデバイス破壊時の $T_j$ が最大定格温度と一致している。

度が大きいことが原因である。なお、領域Bの範囲を調整することで $T_j$ 推定値の急峻な変化を抑制できる。

### 4.3 モジュールの劣化を考慮した $T_j$ 推定補償の結果

第10図に駆動パターン1サイクルにおける $T_j$ 推定最大値の長期トレンドを示す。駆動時間が長くなるにつれて、同じ駆動条件でも $T_j$ 推定値は上昇しており、最終的に450h程度の駆動時間でパワーデバイスが破壊に至っている。この駆動時間の経過に伴う $T_j$ 推定値の上昇はパッケージ内のチップとワイヤボンディング接合部の摩耗劣化による熱抵抗の増加が原因であると考えられる。駆動開始直後は、劣化抵抗推定補償有り・無しの結果とも同じ $T_j$ 推定値となっている。しかし、劣化が進むにつれて補償無しの結果は、補償有りに比べて高い $T_j$ 推定値となっている。補償無しの場合では、パワーデバイス破壊直前の $T_j$ 推定値が240°C付近となり、使用したパワーデバイスの最大定格温度である150°Cを超過している。一方、補償有りの場合では、パワーデバイス破壊時の推定温度が150°C付近となっている。

これらの結果から、定格温度超過がパワーデバイス破壊の原因であり、提案法で推定した $T_j$ が妥当であると考察した。

## 5 むすび

パワーデバイスの摩耗劣化による電気抵抗の変化を電気抵抗値として推定し、 $V_{ce}$ 計測値を補正することで、 $T_j$ 推定精度を向上する手法を提案した。また、三相インバータを用いた実験で、 $T_j$ 推定精度の向上効果を確認した。

今後は、製品適用に向けて更なる評価を行っていく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

### 《参考文献》

- (1) 猪俣・バローチュ・ゼイ・中道・森本：「モータドライブシステム低コスト化のためのパワーデバイスジャンクション温度推定法の高精度化」, 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会 SPC-21-119, MD-21-106, pp.73-78, 2021
- (2) F. Stella・G. Pellegrino・E. Armando・D. Daprà：「Online Junction Temperature Estimation of SiC Power MOSFETs Through On-State Voltage Mapping」, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.54, pp.3453-3462, 2018/No.4
- (3) 福田典子：「高耐圧・大電流パワー半導体モジュールの総合的な劣化評価」, 鉄道総研報告書, Vol.27, 2013/No.12

### 《執筆者紹介》



比嘉 隼  
Hayato Higa  
先進技術研究所  
パワーエレクトロニクスに関する研究開発に従事



林 孝則  
Takanori Hayashi  
先進技術研究所  
診断データに関する研究開発に従事



滝口昌司  
Masashi Takiguchi  
先進技術研究所  
パワーエレクトロニクスに関する研究開発に従事