

実使用環境にあわせたパワー半導体の設計手法

The Mission Profile-Based Design Technique of Power Semiconductor

島尾 敏 裕*
Toshihiro Shimao

概要 パワー半導体の寿命は素子内の温度変化に依存するため、電力変換器の負荷状況、周囲温度などの使用環境によって大きく変化する。したがって、従来の設計手法ではマージンを大きくとることで寿命を保証しており、小型化を妨げる傾向にあった。そこで、本稿では実際の温度変化を考慮したパワー半導体の寿命計算手法およびそれを応用した設計手法について提案する。一例として、太陽光発電用マイクロインバータのパワー半導体素子設計に適用した。マイクロインバータ特有の環境条件である平均温度 T_{jm} および温度変化幅 ΔT_j を考慮してシミュレーションにより寿命を推定し、その結果から期待寿命に対するパワー半導体と放熱器の最適化を行ったので報告する。

1. まえがき

社会インフラの根幹をなす電源設備を安定運用していくためには、定期的なメンテナンスが重要となる。これらのメンテナンスでは、部品の摩耗や耐用年数から定期的に部品を交換している。電源設備における寿命部品は、ファンや電解コンデンサなどがあげられるが、これらはすでに研究が盛んにおこなわれ、寿命を推定する技術が確立されている⁽¹⁾。一方で、IGBTやMOSFETのようなパワー半導体は、素子温度が定格を超えないように設計すれば上記の部品よりもはるかに長寿命であるという認識が一般的である。しかし永久に使えるわけではなく、素子の発熱・冷却による熱ストレスでワイヤーボンディングが金属疲労を起こし故障することが知られている⁽²⁾。そのため、電源設備を長期間運用するためには、パワー半導体の寿命の考慮も必要となるが、使用条件や環境要因によりパワー半導体の寿命が大きく変わってくるため、正確に寿命を推定することは難しく、パワー半導体や放熱器のマージンを大きく取ることで寿命設計していた。

そこで、本稿では実環境条件を考慮し、電源設備の運用に合わせたパワー半導体の設計手法を提案する。ここでは、太陽光発電向けパワーコンディショナの形態のひとつであるマイクロインバータに着目し、所望のパワー半導体素子の寿命を確保しつつ、パワー半導体や放熱器のマージンを最適化する設計を行ったので報告する。

2. 適用事例

表1に、本稿の設計対象とする太陽光発電向けパワーコンディショナの形態および性能比較を示す。

従来のパワーコンディショナは複数台の太陽光パネルを1台で制御する集中型システムである。この方式の場合、パネルとパワコンの間に直流約400Vの配線があるため災害時に漏電の危険があり、安全性の面で不安が残る。また、パネルを複数接続してパワコンに接続しているため、パネルの一部分に影ができると、そのパネルが直列につながった列全体の電力が大きく低下してしまう欠点がある。しかし、後述のマイクロインバータと比べると、変換器が1台で済むために低コストであり、効率も高い。

一方で、マイクロインバータは1台のパネルに対して1台のインバータが接続される分散型システムである。この方式はパネル1枚ごとの電力を独立して制御するため部分影に強く、直流ラインの配線が最短で済むため安

表1 パワーコンディショナの性能比較
Performance comparison of power conditioners

形 態	従来のパワコン	マイクロインバータ方式パワコン
容 量	数kVA～	200～300VA
安 全 性	×	○
部 分 影	×	○
効 率	○	△
コ ス ト	○	×

* パワーシステム本部 製品開発統括部 システム開発課

全性に優れる等の利点がある。しかし、パネル枚数と同数の変換器が必要なためシステム全体では高コストとなり、効率も従来のパソコンに比べ低い。

一般的に、太陽光パネルの寿命は20～25年程度であるがパワーコンディショナの期待寿命は10年～15年程度である。これは、電解コンデンサの寿命に起因する。

本稿では、パワーコンディショナの期待寿命を、PVパネルと同等の25年にするために、電解コンデンサを用いないアクティブバッファ方式⁽³⁾のマイクロインバータについて、所望のパワー半導体素子の寿命を確保しつつ、パワー半導体や放熱器のマージンを最適化した。以下に詳細を示す。

図1にマイクロインバータの回路構成を示す。アクティブバッファ回路ではDCリンク部の電圧を能動的に変化させることにより電力脈動を抑制する。したがって平滑用コンデンサとして積層セラミックコンデンサを使用し、従来のパワーコンディショナの構成部品の中で最も寿命が短い電解コンデンサを省略することが可能となる。また絶縁DC/DC部においては絶縁トランスの漏れインダクタンス L_s とキャパシタ C_1 、 C_2 の共振によりZCSを行っているため、スイッチング損失を低減できる。

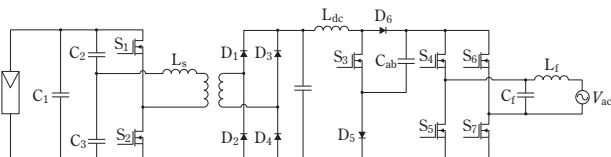


図1 マイクロインバータの回路構成
Circuit configurations of micro-inverter

3. パワー半導体の設計手法

3.1 パワー半導体の設計手法

従来のパワー半導体の設計手法では、電力変換器の最大定格動作時にパワー半導体のジャンクション温度が定格を超えないよう放熱器を選定していた。しかし、マイクロインバータは太陽光パネルの裏面に設置されるため周囲温度が変化し、なおかつ日射量も常に変化するので変換する電力も常に一定ではない。よって従来の設計手法では環境要因によるパワーサイクルの変化が考慮出来ないため、設計マージンを多く取る傾向にあり、小型化・低コスト化の妨げになっていた。本手法では実運用環境の実測データを使用して環境要因を考慮した寿命を計算することで、最小限のマージンを持った設計を行い、小型化・低コスト化と長寿命化を両立する。

図2に実使用環境上における寿命を考慮したパワー半導体設計のフローチャートを示す。図2では、実使用環

境データを入力として、素子選定と放熱設計を行い、その結果より寿命計算を行う。計算結果が期待寿命以下であれば、素子と放熱条件を変化させて再計算することでパワー半導体と放熱器の最適化を行う。

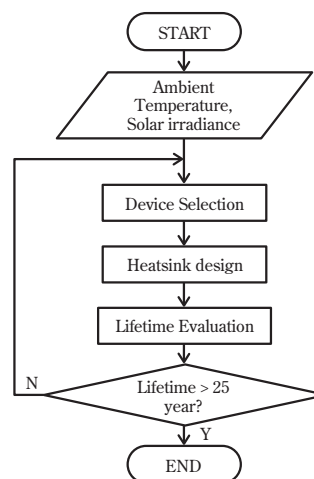


図2 パワー半導体の設計フローチャート
Flowchart of design of power semiconductor

3.2 パワー半導体の寿命計算手法

図3にパワー半導体の内部構造を、図4に寿命計算手法を示す。パワー半導体は素子中のワイヤボンドが熱伸縮により金属疲労を起こすことで故障する。したがって、まず周囲温度および動作時の損失から素子のジャンクション温度の変化を推定し、その温度変化サイクルと寿命モデルから故障までの温度サイクル数を算出する。そして温度サイクル数から1年あたりの寿命消費量を計算することで寿命を推定する。以下に詳細を示す。

温度サイクル数は、後述するようにジャンクション温度の温度サイクル振幅 ΔT_j 及び平均ジャンクション温度 T_{jm} に依存する。ジャンクション温度はマイクロインバータの周囲温度と日射量に比例するインバータ入力電力によって変化する。したがってシミュレーションソフトを用いてパワー半導体のジャンクション温度の熱シミュレーションを行い、周囲温度と日射量に対する ΔT_j 及び T_{jm} を算出する。

次に、実際の周囲温度と日射量のデータを用いてシミュレーションを行い、ジャンクション温度の温度サイクル数を算出する。シミュレーションには昼夜および季節の変化を含めた1年分のデータを使用する。これらのデータによって推定されるジャンクション温度のサイクルは不規則であるため、雨だれ法によりサイクルの振幅および周期ごとに温度サイクルを分割し、サイクル数を計算する。

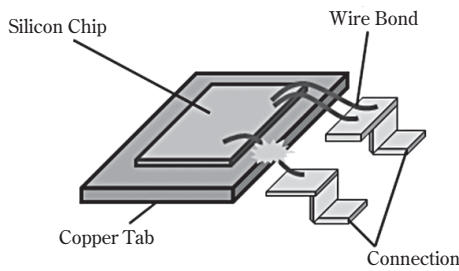


図3 パワー半導体の内部構造
Internal structure of power semiconductor

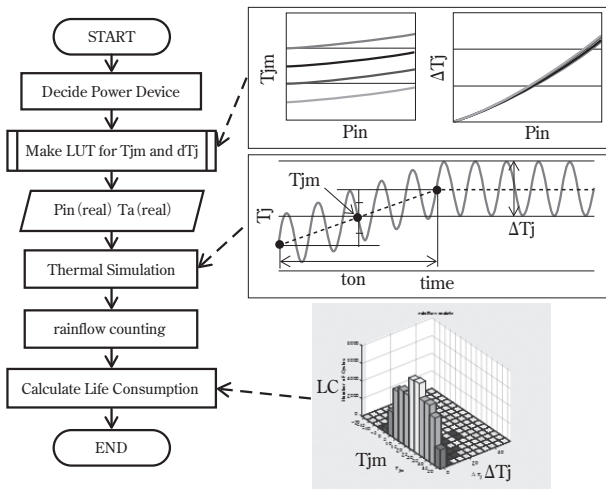


図4 パワー半導体の寿命計算フローチャート
Flowchart of the lifetime calculation for power semiconductor

次に、各温度サイクルに対して寿命モデルを用いた重みづけを行い、寿命消費量を算出する。寿命モデルを用いた故障までの温度サイクル数の算出式を(1)式に示す。(1)式はコフィンマンソン則およびパワー半導体のパワーサイクルテスト結果に基づき定義される。故障までの温度サイクル数は ΔT_j 及び T_{jm} の2つの変数から算出する。

$$N_f = A \Delta T_j^{-a} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k_B T_{jm}}\right) \cdot a r^{\beta_1 \Delta T_j + \beta_0} \cdot \left(\frac{C + (t_{on})^\gamma}{C}\right) \cdot f_d \quad (1)$$

各温度サイクルに対して(1)式を用いて寿命消費量を算出し積算することで、1年あたりの寿命消費量を算出する。マイナー則による寿命消費量の算出式を(2)式に示す。

$$LC = \sum_i \frac{n_i}{N_{fi}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

最後に、1年あたりの寿命消費量の逆数をとることで寿命を算出できる。

3.3 モンテカルロ法による統計的な寿命計算

前節で述べた寿命計算手法を用いることで、パワー半導体の平均的な寿命を算出することができる。しかし、実際の素子には個体差があり、寿命モデルに使用される各定数にばらつきが生じる。そこで、モンテカルロ法を用いることで素子の個体差を考慮した統計的な寿命計算を行う。本稿では(1)式の各定数に5%以内のばらつきをランダムに与え、繰り返し回数を1000回として寿命を算出した。算出した寿命の分布に対する近似式を(3)式に示す。寿命の確立分布関数(Probability Density Function: PDF)はワイブル分布に従う。

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta^\beta} x^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

次に、算出したPDFを積分することにより、累積分布関数(Cumulative Density Function: CDF)を求める。CDFの計算式を(4)式に示す。(4)式により、素子の動作年数 x 年に対する故障率 $F(x)$ %を算出する。

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx \quad \dots\dots\dots (4)$$

最後に、素子数に対する故障率を算出する。故障率の算出式を(5)式に示す。本設計手法の適用事例である図1の回路には7つのMOSFETを使用しており、素子数 n に応じ故障率が乗算される。

$$F_{total}(x) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i(x)) \quad \dots\dots\dots (5)$$

4. 寿命計算結果

4.1 寿命計算条件

変換器では各MOSFETから発生した熱は放熱シートとアルミ放熱器を通して筐体へと放出される。理論上の熱抵抗値として、アルミ放熱器に関してはアルミニウムの物性より、放熱シートに関してはデータシートより熱抵抗を計算する。各ジャンクション温度のシミュレーションに関しては、マイクロインバータに実装されているMOSFETの熱インピーダンスを使用し、シミュレーションソフトを用いて行った。

図5にマイクロインバータ中のMOSFETのジャンクション温度のシミュレーション結果を示す。シミュレーションの結果、 ΔT_j は気温 T_a の変化に対する変化はなく、入力電力にのみ比例して上昇した。一方で、 T_{jm} は気温と入力電力の両方に比例し上昇した。

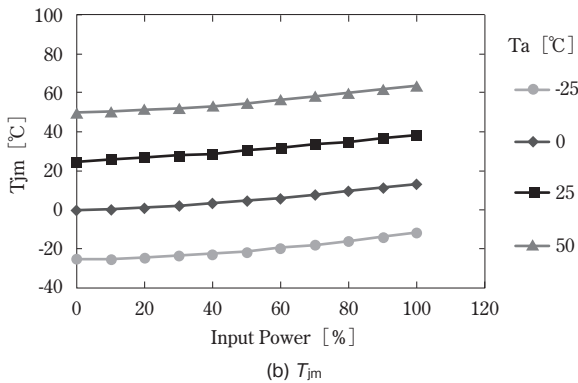
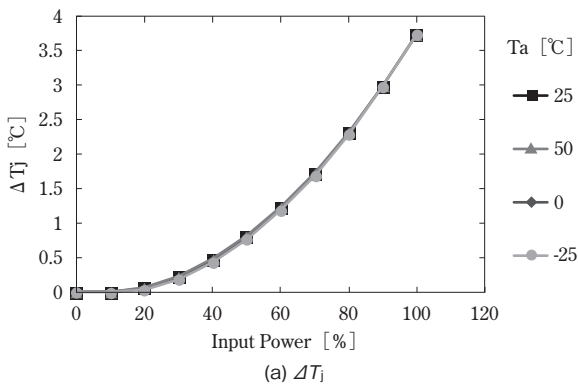


図5 MOSFETのジャンクション温度シミュレーション結果
The junction temperature simulation result of MOSFET

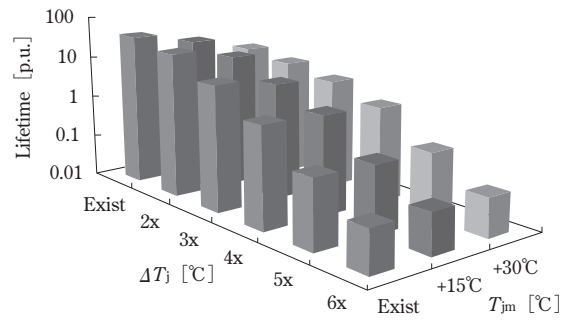


図6 MOSFET寿命計算結果
Lifetime calculation result of the MOSFET

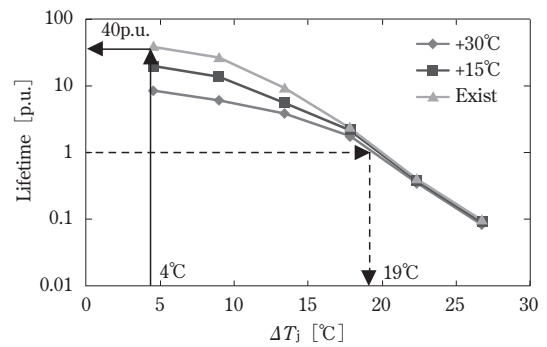


図7 提案設計手法による熱設計
The thermal design using proposed design technique

4.2 MOSFETの寿命計算

図6にMOSFETの寿命計算結果を示す。使用環境データとして、本稿ではアリゾナ州で実測されたサンプリング周期1分、1年分の気温・日射量データを使用した。寿命に関しては、期待寿命を1として規格化を行っている。図中の ΔT_j について、Existは従来設計手法で設計したパワー半導体に対する寿命計算結果、2xから6xについては放熱設計のマージンを減らし、 ΔT_j が2倍から6倍になった場合の寿命計算結果である。同様に、 T_{jm} においてExistは従来設計手法の寿命計算結果、+15°C、+30°Cは放熱設計により平均温度が上昇した場合の寿命計算結果である。ジャンクション温度ごとの寿命算出結果より、 T_{jm} および ΔT_j が増加した場合は寿命が指数関数的に減少している。特に ΔT_j が高い場合においては T_{jm} の違いによる寿命の差はほとんどなく、 ΔT_j の方が影響が大きいことがわかった。

図7に提案設計手法による放熱設計を示す。従来の設計手法では、期待寿命の40倍の寿命を持っており、大きくマージンを取って設計していた。これに対し、期待寿命に対応する ΔT_j を逆算したところ、従来設計の5倍であることを確認した。これは、従来設計に対して5倍の温度変化を許容できることを示しており、放熱器を小型化できることを意味する。

5. まとめ

本稿では、実運用環境を考慮したパワー半導体の設計手法について検討を行った。実測した使用環境データを使用しパワー半導体と放熱器を最適化した結果、従来設計法よりも、提案設計法を用いることで、所望の期待寿命を維持しつつ、放熱器を1/5まで小型化できる見込みを得た。

今後の方針として、本設計手法を既存の電力変換器の設計へと応用し、小型化および低コスト化を図る。

参考文献

- (1) H. Wang and F. Blaabjerg, "Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters—An Overview," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 50, no. 5, pp. 3569–3578, Sep. 2014.
- (2) H. Huang and P.A. Mawby, "A lifetime calculation technique for voltage source inverters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 8, pp. 4113–4119, Aug. 2013.
- (3) Y. Ohnuma, K. Orikawa, J. Itoh, "A Single-Phase Current-Source PV Inverter With Power Decoupling Capability Using an Active Buffer" IEEE Trans. Ind. Applications, vol. 51, pp. 531–538, no. 1, Jan. 2015