

パワー半導体素子の劣化を評価する

福田 典子

車両制御技術研究部(駆動制御 主任研究員)



ふくだ てんこ

家の中のパワー半導体素子

パワー半導体素子とは、「1W以上の電力を制御できる能力を持つデバイスのこと」と一般的に解釈されることが多いようです。半導体素子といえば、メモリやマイコンチップなどを思い浮かべる人が多いと思いますが、これらは、情報を記憶する、演算をすることなどが目的なので、電力の制御は行ないません。

では、パワー半導体素子はどこに使われているのでしょうか。家電製品のCMなどで、「省エネ」の言葉と一緒に、「インバータ」という言葉を耳にしたことがあると思います。この「インバータ」に欠かすことのできない半導体の1つが

パワー半導体素子です。エアコン、冷蔵庫、掃除機、洗濯機、炊飯器、蛍光灯などにインバータが使われているので、家の中にも多くのパワー半導体素子があります。

使用年数と故障の発生傾向

電車では、図1に示すように、電車を動かすためのモータの制御にインバータが使用されています。インバータ電車は、国内において、1982年に熊本市交通局の8200系で導入されてから、広く普及しています。そのため、現在は10年以上経過したインバータ電車がとて多くなっています。

一般に、電子部品の故障の発生率は使用年数に対して、図2に示すような変化をされると言われています。図2のグラフは、形状が浴槽に似ていることから、バスタブ曲線と呼ばれます。バスタブ曲線は、故障が発生する年数に応じて、初期故障期、偶発故障期、摩耗故障期の3つの領域に分類されます。電車で使用されているパワー半導体素子の故障の発生傾向を考えると、新製時には製造上の欠陥や材料不良などに起因した故障の発生率が高く(初期故障期)、その後、使用年数が経過するに従い減少して偶発的な故障のみとなり(偶発故障期)、さらに使用年数が経過すると「劣化」による故障が頻発するようになるということです(摩耗故障期)。

パワー半導体素子の劣化には、どんな現象が見られるのでしょうか。ここでは、パワー半導体素子の使用年数を加速させる定置試験(例えば、ある条件下で30日間試験を行ったら、実使用年数は5年に相当すると換算できる条件にした試験)を行って、劣化を評価しました。

試験に使用するパワー半導体素子

図3は試験に使用するパワー半導体素子(以下、試料)の外観です。営業電車で10年間使用されました。大きさは約200mm×約110mm×約80mm、電圧は2500V、電

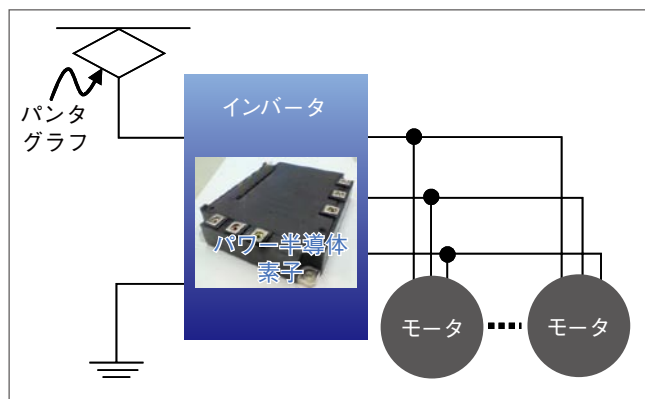


図1 インバータ電車の構成

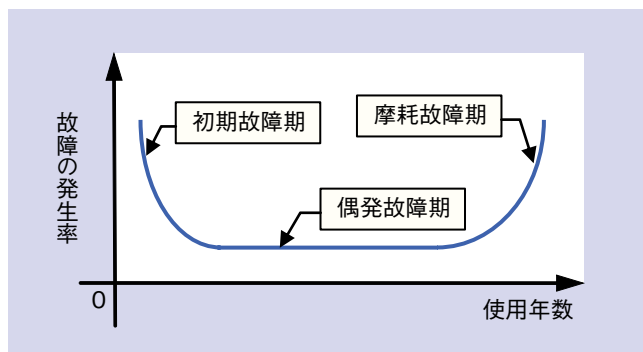


図2 バスタブ曲線



図3 試験に使用するパワー半導体素子

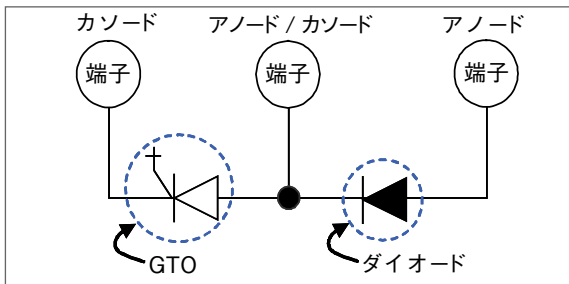


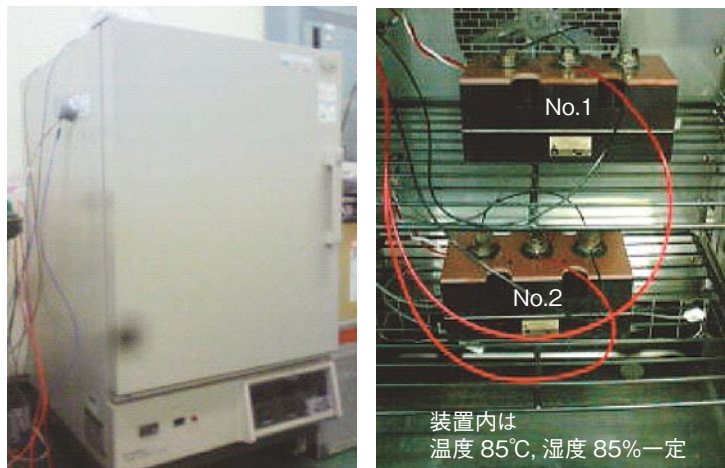
図4 試験に使用するパワー半導体素子の内部構成

流は2000Aです。また、試料は、図4に示すようにゲートターンオフサイリスタ（以下、GTO）とダイオードで構成されています。

試験方法

使用年数を加速させる試験方法は、試料の劣化モードに応じて決められます。今回は、GTOとダイオードの特性の劣化をターゲットに行いました。試料は全3台（No.1, No.2, No.3）で、そのうち2台（No.1, No.2）について試験を行いました。試料No.3は試験終了後に、試料No.1, 試料No.2との特性の比較に用いました。

図5に示す試験装置に2台の試料を入れ、装置内を温度85℃、相対湿度85%（試験温度・相対湿度は電子情報技



(a) 試験装置外観 (b) 試験装置内部

図5 試験装置外観と内部の様子

術産業協会規格に準拠)の一定値に設定します。試料には、現車で使用されている場合と同じくらいの電圧を加えます。試験時間は約2700時間です。この時間は、現車における試料の使用環境の測定データから、実使用年数に換算すると19年間相当になります。

試料の劣化は、7つの特性項目で評価されます。特性の測定は、試験開始前と試験終了後、及び中間で3回の計5回行います。特性項目については、ダイオードとGTOの構造と動作を整理して、次に説明します。

ダイオードの特性測定項目

図6に示すように、ダイオードはp形半導体（電荷を運ぶキャリアとして正孔が使われる半導体）とn形半導体（電荷を運ぶキャリアとして自由電子が使われる半導体）を接合したpn接合で構成されます。図6(a)のように、アノードが正になるように電圧を加えて（順方向）回路を構成す

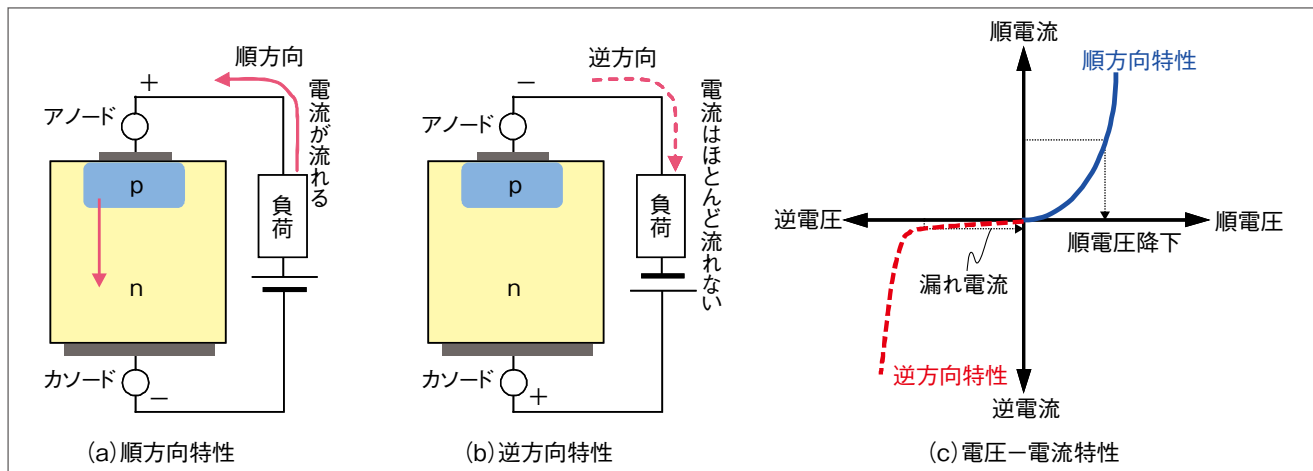


図6 ダイオードの構造と電圧－電流特性

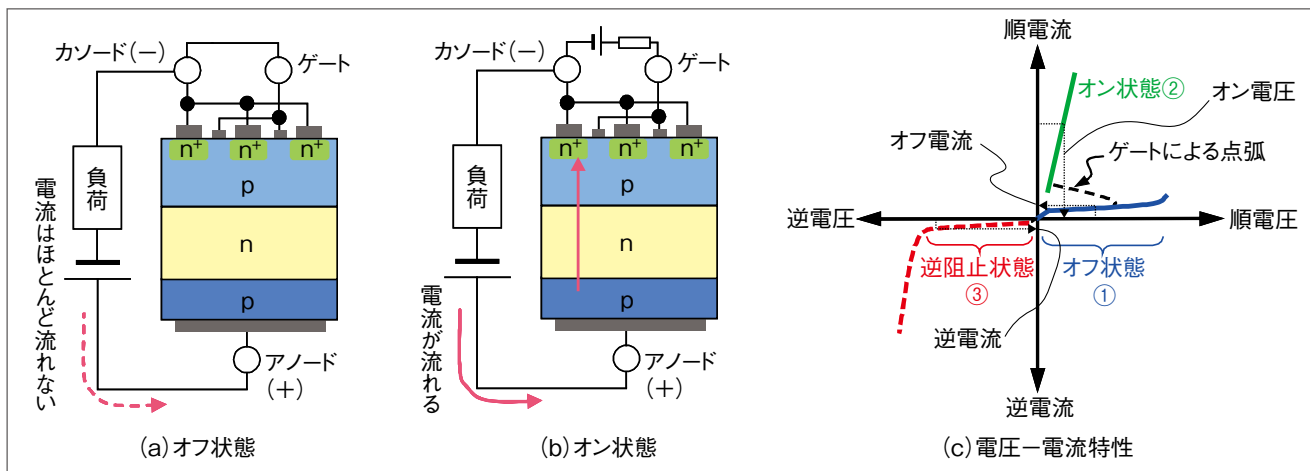


図7 GTOの構造と電圧-電流特性

ると、電流はアノードからカソードに向かって流れます。この時のアノード-カソード間の電圧は順電圧降下と呼ばれます。

一方、図6 (b) のように、カソードが正になるように電圧を加えて(逆方向)回路を構成すると、電流はほとんど流れず、逆方向の電圧を保持した状態になります。この時に流れるわずかな電流は漏れ電流と呼ばれます。図6 (a) (b) の電圧-電流特性を表すと、図6 (c) のようになります。

以上のことから、ダイオードの特性の劣化を評価するために、順電圧降下と漏れ電流の2項目を測定します。

GTOの特性測定項目

GTOの構造はpnpn構造で、3つの動作状態があります。図7 (a) のように、カソードを基準にしてアノードが正になるように電圧を加えて回路を構成し、ゲートをゼロ電位(カソードとゲートを短絡)とすると、電流はほとんど流れず、順方向電圧を阻止します(オフ状態)。この時に流れるわずかな電流はオフ電流と呼ばれます。これが1つめの動作状態です(図7 (c) ①)。

2つめの動作は、図7 (b) のように、アノードが正になるように電圧を加えて回路を構成し、ゲートに正の電圧のトリガ電流を流すと、アノードからカソードに向かって電流が流れます。このとき、アノードとカソード間はオン電圧と呼ばれるとても低い電圧になります。これがターンオンした状態です(図7 (c) ②)。ターンオフする場合は、ゲートに負の電圧のトリガを加えます。

3つめは、図には示していませんが、カソードに対してアノードが負になるように電圧を加えて回路を構成した場合の動作です。図7 (c) ③に示すように、電流はほとんど流れず、逆方向の電圧を阻止した状態となります(逆阻止状態)。この時にわずかに流れる電流は逆電流と呼ばれます。なお、ゲートはゼロ電位、オープン回路あるいは負の電圧です。

以上のことから、GTOの特性の劣化を評価するために、オフ電流、オン電圧、ゲートトリガ電流、ゲートトリガ電圧、逆電流の5項目を測定します。表1に試料の特性測定項目をまとめます。

表1 試料の特性測定項目

ダイオード		
No.	測定項目	内容
1	順電圧降下	順方向特性の電圧降下
2	漏れ電流	逆方向特性の電流
GTO		
No.	測定項目	内容
1	オフ電流	オフ状態の電流
2	オン電圧	オン状態の電圧
3	ゲートトリガ電流	オフ状態からオン状態へ移行するのに必要な最小ゲート電流
4	ゲートトリガ電圧	オフ状態からオン状態へ移行するのに必要な最小ゲート電圧
5	逆電流	逆阻止状態の電流

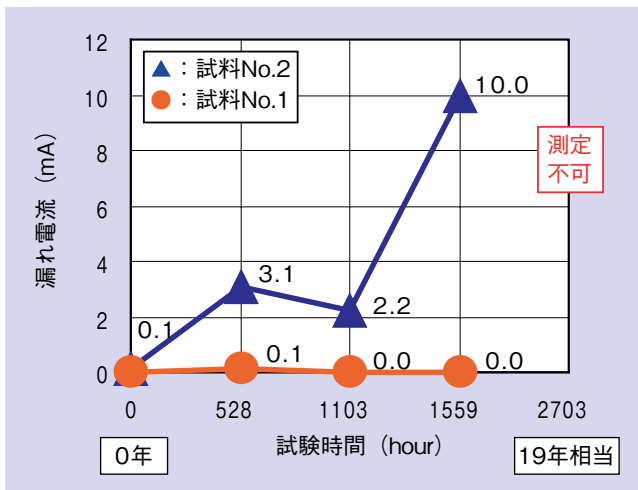


図8 試験時間に対する漏れ電流の変化 (逆電圧-2500Vを加えた時の漏れ電流測定値)

パワー半導体素子の劣化を評価する

試料の試験方法と特性測定項目を決めたら、劣化の評価を行います。試験開始から1559時間後の特性測定で、図8に示すように、試料No.2のダイオードの漏れ電流に増加傾向が見られました。そして、試験終了の2703時間後の測定では、試料No.1、No.2とも逆電圧-2500Vを加えることができず(逆電圧-2500Vを加えると漏れ電流が制限値を越えるため)、漏れ電流特性に劣化が見られました。その他、6項目の特性値には大きな変化は見られませんでした。

試験終了後、試料に徐々に逆電圧を加えて、ダイオードの漏れ電流の様子を測定しました。図9は試料No.1の逆電圧-漏れ電流特性です。試料No.1は、逆電圧を-600V(図9点A)まで加えると、漏れ電流が-170 μ Aまで増加しました。これ以上の逆電圧を加えると、測定値が安定せず、更なる劣化や破壊を引き起こす可能性が高いことがわかりました。

図10は、正常品(試験を行わなかった試料No.3)の逆電圧-漏れ電流特性を測定したグラフです。正常品は、逆電圧を-1000V(図10点B)まで加えても、漏れ電流は-6 μ A程度で、図9の試料No.1とは、明らかに特性が異なることがわかりました。

試料パワー半導体素子の定置試験による劣化の評価結果をまとめます。

(1) 2台の試料とも、実使用年数19年間相当で、ダイオードの漏れ電流特性に劣化が見られました。

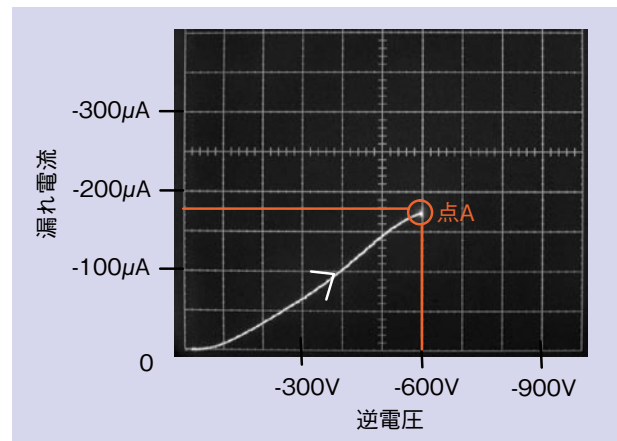


図9 試料No.1の逆電圧-漏れ電流特性(劣化品)

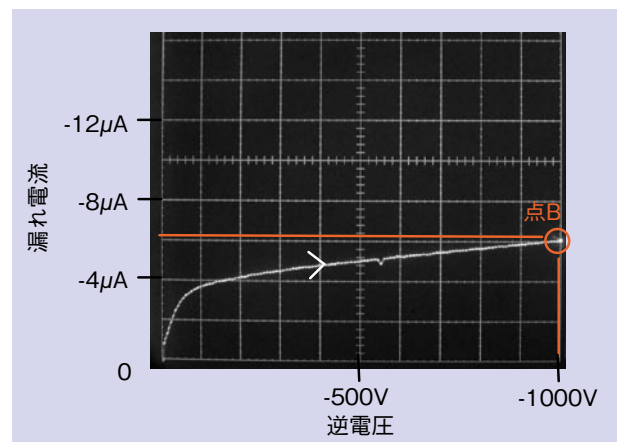


図10 試料No.3の逆電圧-漏れ電流特性(正常品)

(2) 漏れ電流特性の劣化は、測定電圧より低い逆電圧(測定電圧の1/5程度)において、評価できる可能性があります。ことがわかりました。

まとめ

今回は、営業電車で使用したパワー半導体素子の劣化を定置試験で評価しました。試験結果から、ダイオードの漏れ電流特性に劣化が見られました。また、この劣化は測定電圧より低い逆電圧(測定電圧の1/5程度)でも評価できる可能性があります。この方法が可能になると、試料へのストレスが少ない状態で、検査を行うことができます。

最後に、なぜ、ダイオードの漏れ電流は増加したのでしょうか。この要因を調べるためには、pn接合部の状態を解析する必要があります。この結果は、別の機会に報告したいと思います。RRR