1711 パワー半導体モジュールの劣化評価

正[電] 福田 典子 ((公財)鉄道総研)

Degradation of Power Semiconductor Modules for Trains.

Tenko FUKUDA, Railway Technical Research Institute.

2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City

Railway vehicles are equipped with various electronic equipment including traction inverters. It is important to improve the reliability of each element constituting the equipment. To obtain the data required for the maintenance and renewal work of traction inverters mounted on EMUs nowadays, we developed a new method to estimate the degradation of power semiconductor modules, which are one of the parts of the inverters. In this paper, we report on the method of a thermal resistance test for degradation of IGBT modules (3300 Volts/1200 Amperes) by quantitative examination.

Keywords : IGBT, thermal resistance, PN junction, power semiconductor, electrical characteristics, inverter

1. はじめに

駆動用インバータ装置等に使用されているパワー半導体 モジュールの不具合は,車両の運行に影響する場合がある。 そのため,装置の保守や更新工事の基礎データとしての活 用を目指し,開発段階では予測が難しい経年による特性劣 化を定量的に評価する研究に取り組んでいる。

GTO(Gate Turn-off Thyristor)については、半導体の電気的 特性から劣化評価を行った。IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールのように複数材料から構成される素 子の劣化を評価する場合は(Fig.1)、熱抵抗特性も重要な 評価項目の1つである。しかし、精度よく熱抵抗を算出す ることが困難であるため、規格値との比較ができず、劣化 評価を行えないことが課題であった。

ここでは、高耐圧・大電流 IGBT モジュールに対応した 熱抵抗測定とその検証結果、及び劣化評価の取り組みにつ いて報告する。



Fig.1 Example of IGBT module

2. 熱抵抗測定の概要

シリコン NPN 形半導体チップは、100℃程度まで温度が 上昇すると 25℃の時と比較して、故障率が 5 倍近く上がる と言われ、更に 150℃を超えるような高温では正常に動作 しなくなる。この半導体チップの温度上昇は冷却性能に左 右される。

Fig.1 に示すように、半導体チップの主な放熱経路は、冷却器方向である。そのため、②~⑦の材料や境界面の特性が変化すると、熱が伝わりにくくなることも考えられ、半導体チップ温度の上昇につながる。

IGBT モジュールの半導体チップからケースまでの熱構

造関数(熱抵抗 R_{th}対熱容量 C_{th})を精度よく算出すること は、半導体チップ温度の上昇値を推定できるとともに、経 年による放熱特性の劣化の定量的評価を行うことができる と考えられる。

熱構造関数は、以下に示す方法で求める。Fig.2 に示すような熱インピーダンス等価回路で表される試料に、パルス 電力 P[W]を与えたとすると、以下の式(1)(2)が成り立つ。

 $(P - P_c(t))R_{th} = T(t)$ (2)

ここで, R_{th} : 熱抵抗[K/W], C_{th} : 熱容量[J/K], $P_{C}(t)$: 容量 への電力[W], T(t): 温度[K]である。

(1)を(2)へ代入し、微分方程式を解くと、境界条件は *t*→0 の時 *P*_C(*t*)=*P* より、

$$T(t) = R_{th} P(1 - e^{-\frac{1}{R_{th}C_{th}}}) \dots (3)$$

となる。よって, 1→∞の時

となる。式(4)より,安定した時の温度 T(t)を測定すれば, 熱抵抗 R_{th} がわかる。また, $t=R_{th}C_{th}$ の時,

となり,温度T(t)が 63.2%まで変化する時間を測定すれば, 熱容量 $C_{th} = t/R_{th}$ より,熱容量がわかる。



[No. 12-79] 日本機械学会 第 19 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 [2012-12.5~7.東京]

実際の IGBT モジュールでは、温度 T(t)を直接測定する ことは難しい。ここでは、温度に対して比例する PN ジャ ンクション部の順方向電圧 VFを用いて温度を求め,熱構造 関数を算出する。

3. 熱抵抗測定の検証と劣化評価

検証に用いた試料は、最大定格がコレクタ・エミッタ間 電圧 V_{CES}=3300V, コレクタ電流 I_C=1200A の IGBT モジ ュールである。

主な試験条件は以下の通りである。また, Fig.3 にダイオ - ド部の温度 T 対順電圧 V_F特性のグラフを示す。

- ・半導体の加熱電流と時間: 300A, 4800s
- ・加熱後の順電圧測定時の電流と時間:100mA, 4800s
- ・温度パラメータ: -2.365mV/K (ダイオード部)

-2.374mV/K (IGBT 部)



Fig.4 に, ダイオード部の熱構造関数と微分関数算出結果 を示す。その結果、ダイオード部の接合(Fig.1①)-ケー ス(Fig.1⑦)間熱抵抗 R_{th(j-c)FWDi}は,0.0145K/W と求まった。 ここでは、放熱シート有り無しの測定を実施し、ケース (Fig.1⑦) と冷却器 (Fig.1⑧) の境界判断を行った。

Fig.4 の①~⑦は、モジュール内部の材料毎の熱抵抗を推 定した結果である。熱飽和状態から冷却器温度まで,連続 で電圧測定を行い,熱構造関数を算出することにより,材 料毎の熱抵抗を算出できる可能性がある。

また, IGBT 部の R_{th(j-c)IGBT}は, 0.0084K/W と求まった。 Table 1 に, この方法を適用し, 検証に用いた試料 IGBT モジュールの劣化評価を行った結果をまとめる。接合ーケ ース間熱抵抗も規格値との比較による、定量的な劣化評価 の見通しを得た。なお,特性項目,評価基準は, IEC60747-9 の耐久性試験後の劣化判定基準に準拠した。

今後は,加速試験を実施し,引き続き熱抵抗測定の精度 の検証を行うとともに、モジュール内の材料毎の熱抵抗の 変化まで解析できるかどうかを検討する予定である。

記号	項目	規格值		判定
		最小	最大	測定値
R _{th(j-c)IGBT}	接合 - ケー ス間熱抵抗	-	0.0085K/W	Pass
				0.0084K/W
R _{th(j-c)FWDi}		-	0.017K/W	Pass
				0.0145K/W
I _{CES}	C-E 間遮断	-	15mA	Pass
	電流			0.015mA
I _{GES}	G-E 間漏れ		0.5.1	Pass
	電流	-	0.5 μ Α	0.0 μ Α
$V_{\rm GE(th)}$	G-E 間しき	5.017	V 7.0V	Pass
	い値電圧	5.00		5.84V
V _{CEsat}	C-E 間飽和 電圧	-	4.2V	Pass
				2.9V

Table 1 Degradation of IGBT Module

4. まとめ

高耐圧・大電流 IGBT モジュールの定量的な劣化評価を 行うための課題である熱抵抗を実験的に求めた。熱抵抗は, 複数材料から構成されるモジュール形の素子の場合,重要 な劣化評価項目の1つである。

最大定格 3300V・1200A の IGBT モジュールを用いて熱 抵抗測定を行った結果,例えばダイオード部の接合-ケー ス間で 0.0145K/W の値が得られた。これにより、規格値の 最大 0.017K/W との比較が可能なレベルに達し、定量的に 劣化評価を行える見通しが得られた。

今後は、加速試験を実施し、測定精度の検証を行うとと もに、モジュール内の材料毎の熱抵抗の経時変化まで解析 できるかどうかを検討する予定である。



Fig.4 Structure Functions of Junction-Case Thermal Resistance (FWDi)