使用仿真器推算 IGBT 模块产生的损耗、温度、寿命

Estimation of Power Losses, Temperatures and Power Cycle Lifetime for IGBT Modules by Using IGBT Simulator

高久　拓 TAKAKU, Taku　　汤川　文夫 YUKAWA, Fumio　　池之内　俊 IKENOUCHI, Shun

富士电机针对变频器等电力电子系统，在网络上免费公布了对使用富士电机的 IGBT 产品时产生的损耗和半导体元件接合部（结点）温度进行仿真的 IGBT 仿真器。此次公布了增添了新功能的版本。除了支持三电平电路或广泛使用的众多 PWM 方式之外，还加入了对损耗的结温依赖性进行计算的功能，使仿真能够更符合实际情况。通过了解 IGBT 模块产生的损耗、温度上升的变化，能够有助于设计初期阶段的模块选型或寿命推测。

Fuji Electric has released its IGBT simulator free of charge on the website. It simulates the power loss and the junction temperature of Fuji Electric IGBT modules that are incorporated into power electronics systems, such as inverters. It supports 3-level circuits and many of the widely used pulse width modulation methods and provides the calculation of the dependence of the power loss on the junction temperature, allowing users to run more realistic simulations. Providing the power loss and the temperature rise transitions of IGBT modules helps users select modules and estimate their lifetime at the initial stages of design.

1　引言

近年来，在电力电子设备的小型化、高密度化发展越来越快的背景下，在因为电动汽车等的加减速而造成负载变化频繁重复的应用中，越来越多地使用了 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）。半导体元件接合部温度（结温）T_{vj} 反复变化而产生的热疲劳是一个关系到装置寿命及可靠性的问题。因此，要求在设计中充分考虑复杂的运行模式中产生的损耗和温度上升情况。富士电机免费公布了对 IGBT 模块产生的损耗及温度进行计算的 IGBT 仿真器[1]。本次开发并在 Web 站点〈注 1〉公布的版本（Ver.6），可进行损耗的温度依赖性的计算等，实现更接近实际情况的计算。

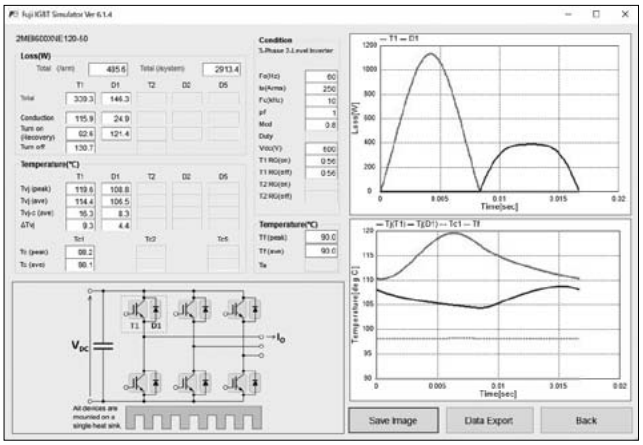

图 1　IGBT 仿真器 Ver.6 的运行画面

2　IGBT 仿真器 Ver.6 的概要

图 1 是 IGBT 仿真器 Ver.6 的运行画面。该仿真器可在 Windows 7〈注 2〉以上的环境下运行。Ver.6 与以往的版本（Ver.5）相比，增加了以下功能。

(a)　对三电平电路的支持
(b)　三相变频器 PWM 方式的增加
(c)　损耗的 T_{vj} 依赖性计算

3　IGBT 模块产生的损耗的计算

3.1　对三电平电路的支持

IGBT 仿真器和传统产品同样，支持三相 2 电平变频器电路以及升压、降压斩波电路。此外，还支持近几年不断增加的太阳能发电或风力发电、及 UPS 中使用的 2 种三电平电路（**图 2**）。

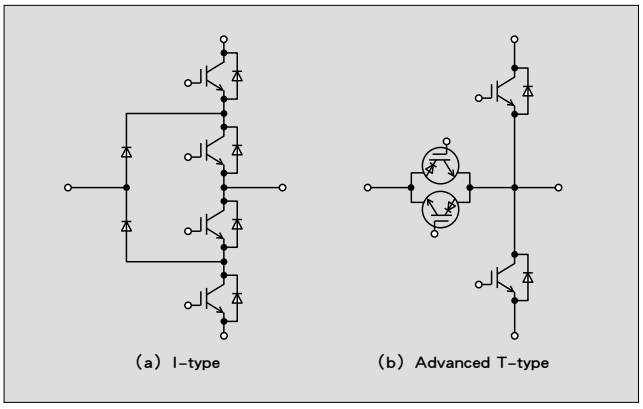

图 2　新支持的三电平电路

〈注 1〉http://www.fujielectric.com.cn/simulation.html

〈注 2〉Windows 7：Microsoft Corporation 的商标或注册商标

3.2 三相变频器 PWM 方式的增加

对于变频器电路的调制方式，除一直支持的正弦波 PWM（Sinusoidal PWM）与二相调制方式（Discontinuous PWM1）外，还支持广泛使用的以下三种调制方式。

(a) 空间矢量 PWM（Space Vector PWM）

(b) 3 次谐波注入 PWM（Third Harmonic Injection PWM）

(c) 二相调制 PWM（Discontinuous PWMMIN）

各调制方式的控制信号与三角波载波信号波形如**图 3** 所示。Ver.6 中可改变控制率（调制率）m 进行仿真。另外，如图所示，m 的定义是三角波载波信号的振幅 A 与控制信号的振幅 B 的比率 B/A。

3.3 产生的损耗、温度计算流程图

图 4 是 IGBT 仿真器的计算流程图。构成变频器的 IGBT 与 FWD（Free Wheeling Diode）的损耗，分为各自在通电时产生的导通损耗（恒定损耗）和开关时产生的开关损耗。导通损耗是利用 IGBT 及 FWD 的输出特性进行计算，开关损耗则根据电流特性及栅极电阻特性进行计算。另外，产生损耗的详细计算方法，请参阅参考文献[1]。IGBT 仿真器将各温度下的特性曲线按照模块保存为数据库，用于计算这些值。

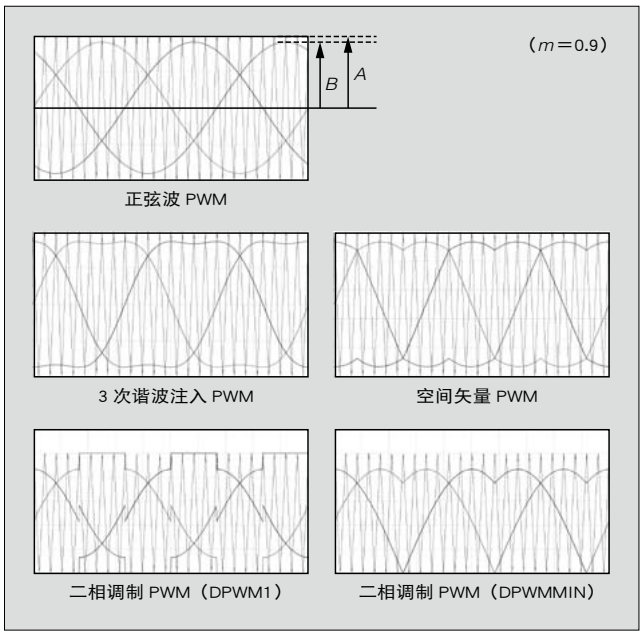

图 3 各调制方式的控制信号与三角波载波信号波形

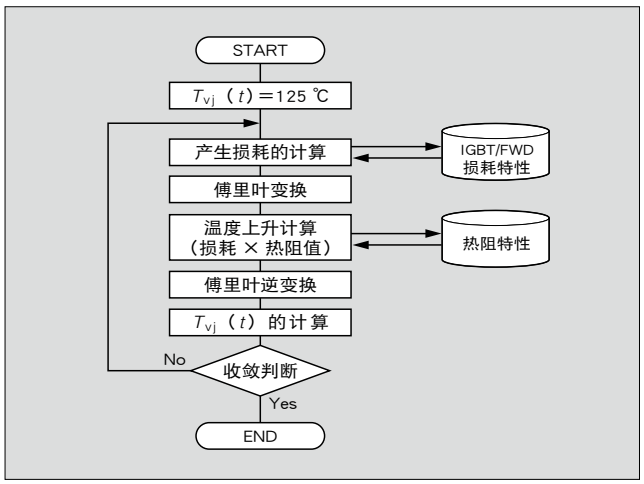

图 4 计算流程图

4 IGBT 模块的温度计算

4.1 热阻模型

图 5 是热计算工具中三相变频器的一元热电路模型。由结点 – 塑壳间的热阻 $Z_{th(j-c)}$、塑壳 – 散热片间热阻 $Z_{th(c-s)}$ 以及散热器 – 环境间热阻 $Z_{th(s-a)}$ 所构成。此时，塑壳温度 T_c，散热器温度 T_s 被定义为各自芯片正下方的温度。另外，环境温度 T_a 假定为固定值。

为了计算过渡性温度上升，将四个 R 与 C 的并联电路串联(1)形成四元的 Foster Network 电路，以此来表现各自的热阻曲线。该电路中的 r_n 和 c_n，是根据数据表的过渡热阻的特性曲线，采用最小二乘法计算的值。如**图 4** 所示，仿真器中这些值按照模块被记录为数据库。

$$Z_{th}(t)=\sum_{n=1}^{4} r_n\left\{1-\exp\left(-\frac{t}{r_n c_n}\right)\right\} \cdots\cdots (1)$$

Z_{th}：热阻

r_n：Foster Network 中的阻抗成分

c_n：Foster Network 中的容量成分

t：时间

4.2 温度上升的计算

对 IGBT 中产生的损耗波形 $P_{loss}(t)$ 进行傅里叶变换求得傅里叶系数，然后计算与过渡热阻值的乘积，再将这些值进行傅里叶逆变换，求得 IGBT 及 FWD 的结点 – 塑壳间的

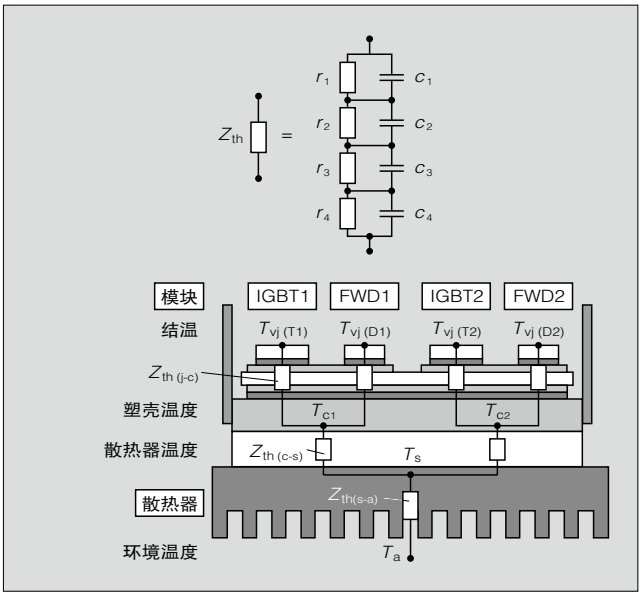

图 5 变频器的热电路模型

上升温度 $T_{(vj-c)}$。

首先，对 $P_{loss}(t)$ 进行傅里叶级数展开，求得公式(1)中的各频率成分的傅里叶级数 a_0、a_m、b_m。

$$P_{loss}(t)=a_0+\sum_{m=1}^{g}\{a_m\cos(m\omega t)+b_m\sin(m\omega t)\} \quad \cdots\cdots(2)$$

$P_{loss}(t)$：损耗波形
ω　　：变频器的输出角频率
g　　：任意整数

然后，将求得的傅里叶系数与结点 – 塑壳间热阻 $Z_{th(j-c)}$ 相乘，根据乘积求得温度上升波形的傅里叶级数 c_m、d_m。

$$c_m=\sum_{n=1}^{4}\frac{(a_m-m\omega\tau_n b_m)}{1+(m\omega\tau_n)^2}r_n \quad \cdots\cdots(3)$$

$$d_m=\sum_{n=1}^{4}\frac{(m\omega\tau_n a_m+b_m)}{1+(m\omega\tau_n)^2}r_n \quad \cdots\cdots(4)$$

对这些级数进行傅里叶逆变换，得到 $T_{(vj-c)}(t)$ 波形。

$$T_{(vj-c)}(t)=T_0+\sum_{m=0}^{g}\{c_m\cos(m\omega\tau)+d_m\sin(m\omega\tau)\}$$
$$=P_{loss(ave)}\sum_{n=1}^{4}r_n+\sum_{m=0}^{g}\{c_m\cos(m\omega\tau)+d_m\sin(m\omega\tau)\} \quad \cdots\cdots(5)$$

$T_{(vj-c)}(t)$：结点 – 塑壳间温度
T_0　　：温度上升的平均值

采用与计算结点 – 塑壳间温度 $T_{(vj-c)}(t)$ 相同的方法，求得塑壳 – 散热器间温度 $T_{(c-s)}$、散热器 – 环境间温度 $T_{(s-a)}$，以此为基础，根据公式(6)分别计算散热器温度 T_s、塑壳温度 T_c、结温 T_{vj} 的波形。

$$T_s(t)=T_a+T_{(s-a)}(t)$$
$$T_c(t)=T_s(t)+T_{(c-s)}(t)$$
$$T_{vj(IGBT)}(t)=T_c(t)+T_{(vj-c)(IGBT)}(t)$$
$$T_{vj(FWD)}(t)=T_c(t)+T_{(vj-c)(FWD)}(t) \quad \cdots\cdots(6)$$

$T_{(c-s)}$　：塑壳 – 散热器间温度
$T_{(s-a)}$　：散热器 – 环境间温度
T_s　　：散热器温度
T_c　　：塑壳温度
$T_{vj(IGBT)}$：IGBT 芯片的结温
$T_{vj(FWD)}$：FWD 芯片的结温

4.3　考虑了损耗的 T_{vj} 依赖性的计算

Ver.5 之前的 IGBT 仿真器在计算损耗时将结温 T_{vj} 假定为固定的 125℃。但是，为了实现更接近实际情况的计算，Ver.6 中新增加了考虑了损耗的 T_{vj} 依赖性的计算功能。

如**图 4** 所示，IGBT 仿真器是在计算了所有计算期间内的产生损耗之后再计算温度的，因此无法同时计算损耗和温度。于是，按照以下方式计算损耗的 T_{vj} 依赖性。

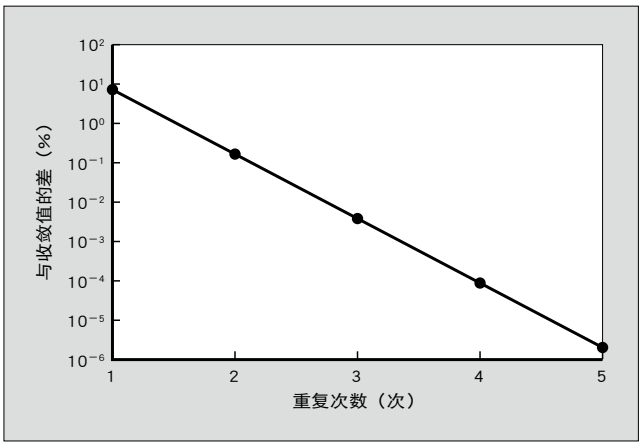

图 6　重复计算次数与收敛值的差

假定所有计算目标期间内的结温 $T_{vj}(t)$ =125℃并作为初始值计算损耗，根据各部分的热阻计算结温 $T_{vj}(t)$。以通过该方法求得的 $T_{vj}(t)$ 为基础，再次计算产生损耗。这样通过反复计算损耗和温度，求得收敛值。

图 6 是损耗、温度的反复计算次数和收敛值的差。反复次数为 1 次时（假定 T_{vj}=125℃进行计算）的 IGBT 损耗的计算值和收敛值相比，存在 7% 的误差。而当反复次数为 3 次时，和收敛值的差不到 0.01%，该结果在实用性上已不存在问题。

5　和市售仿真器的比较

对于使用 IGBT 仿真器 Ver.6 能否正确进行考虑了 T_{vj} 依赖性的计算，此次通过将其与市售的电路仿真器 PLECS〈注 3〉比较进行了验证。

PLECS 是一款电力电子系统用的电气电路仿真软件。作为理想化开关，开关元件进行了模型化。而且，PLECS 能够通过输入开关元件的损耗特性来计算电路中开关元件产生的损耗。另外，通过嵌入一元热阻模型，也可以进行温度仿真。

表 1 是仿真条件，**表 2** 和**图 7** 是仿真结果的比较。每种

表 1　仿真条件

项目	条件
IGBT 模块	2MBI600XNE120-50
电路、控制方式	三相变频器 正弦波调制 PWM
AC 输出频率	50 Hz
AC 输出电流值	300 A
DC 母线电压	600 V
开关频率	8 kHz
功率因数	0.9
控制率	0.9
栅极电阻	0.56 Ω
塑壳温度	90 ℃

〈注 3〉PLECS：Plexim GmbH 的商标或注册商标

表 2　仿真结果的比较

项目	IGBT 仿真器 Ver.6（富士电机产品）	PLECS Ver.4.1
IGBT 导通损耗	147.6	147.5
IGBT 开关损耗（W）	103	103.1
FWD 导通损耗（W）	30.9	30.9
FWD 开关损耗（W）	49.9	49.5
IGBT 结温（℃）	106.5	106.6
FWD 结温（℃）	96.3	96.6

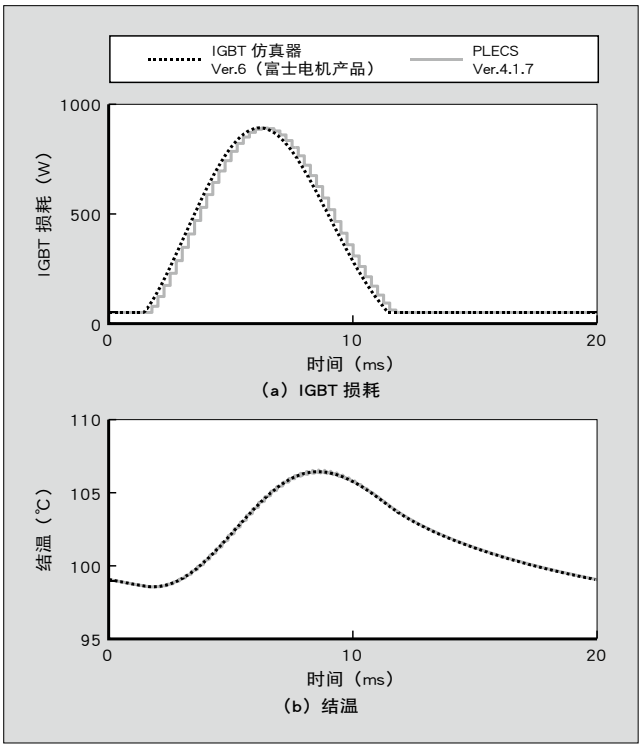

图 7　IGBT 损耗、温度计算结果的比较

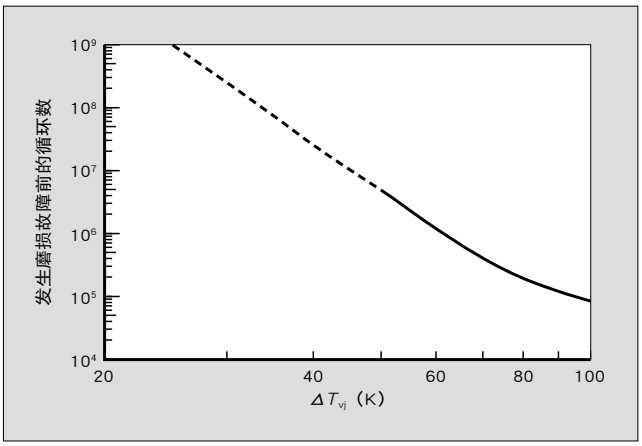

图 8　IGBT 模块的 ΔT_{vj} 功率循环曲线的示例

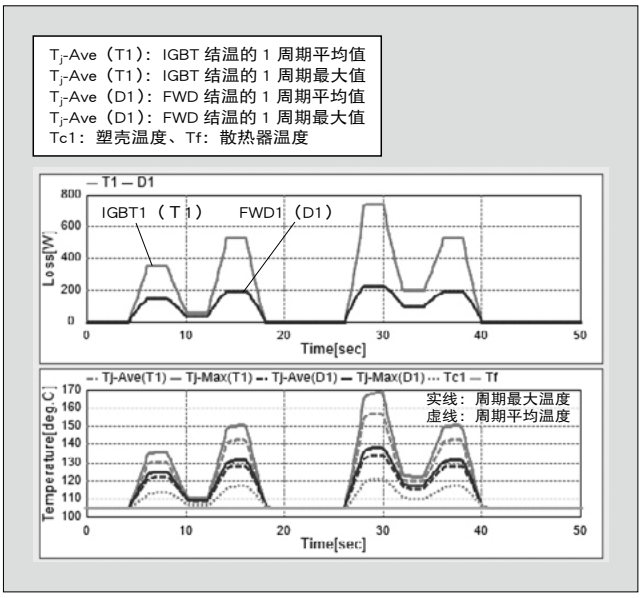

图 9　使用 IGBT 仿真器计算负载循环的示例

结果都非常一致，能够验证计算的妥当性。

6　功率循环寿命的推算

6.1　IGBT 模块的功率循环寿命

在搭载了使用 IGBT 模块的电力转换装置的电梯、电动汽车等应用或伺服驱动装置中，当频繁地反复进行加速、减速时，加减速时、低频运行时及停止时的结温变化是造成 IGBT 模块的故障的原因[3]。**图 8** 是 IGBT 模块的 ΔT_{vj} 功率循环曲线的示例，**图 9** 是使用 IGBT 仿真器计算负载循环的示例。温度波形的实线是根据变频器输出周期里的最大温度绘制的波形，虚线是输出周期里的平均温度。详细内容请参考 IGBT 仿真器的操作手册[4]。

图 8 是使 IGBT 模块反复进行固定温度变化 ΔT_{vj} 直到出现故障的循环数（寿命）。但是，如**图 9** 所示，由于实际的负载在一定期间的 1 个运行循环内会发生变化，因此无法使用 ΔT_{vj} 功率循环曲线简单地推算 IGBT 模块寿命。

一般来说，ΔT_{vj} 功率循环对模块造成的破坏，相当于磨损故障[注 4]。当 1 次运行循环中存在多次温度变动时，遵照线性疲劳累积损伤规律（Miner 法则），可推算功率循环寿命。

假定 1 个运行循环里发生的多次温度变动为 ΔT_{vj1}、ΔT_{vj2}、ΔT_{vj3}、…、ΔT_{vji}。然后从**图 8** 中读取各温度变动中直到破坏为止的反复的次数，将其假定为 N_1、N_2、N_3、…、N_i。在 1 次运行循环里，ΔT_{vj1}、ΔT_{vj2}、ΔT_{vj3}、…、ΔT_{vji} 发生的次数假定为 n_1、n_2、n_3、…、n_i，则公式(7)表示 1 次运行循环的疲劳损伤系数 D。

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \cdots + \frac{n_i}{N_i} \quad \cdots\cdots(7)$$

n_i ：1 次运行循环中的 ΔT_{vji} 的发生次数
N_i ：ΔT_{vji} 的疲劳破坏前的功率循环数
D ：1 次运行循环对应的疲劳损伤系数

运行循环反复达到 N_{cycle} 次时的累积疲劳损伤系数 $N_{cycle} \times D$ 如超过 1，则会发生疲劳破坏。破坏之前的运行

〈注 4〉磨损故障：故障率曲线分为初期故障、偶发性故障、磨损故障这三个区间。对于磨损故障，磨损或疲劳随着时间的增加会导致故障率增加。

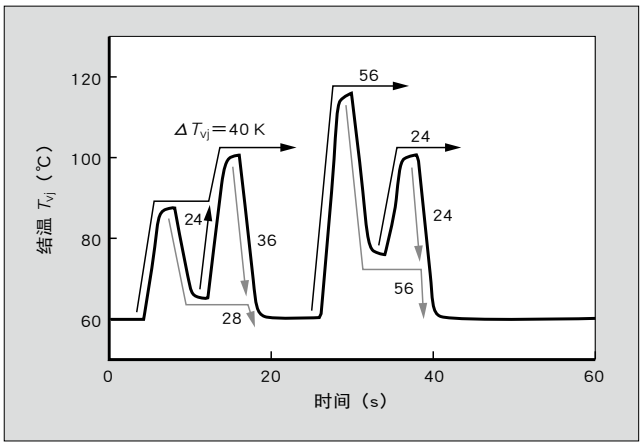

图 10　使用雨流计数法进行功率循环计数

表 3　使用雨流计数法求得的功率循环数

ΔT_{vj}（K）	发生数 n_i	N_i	n_i/N_i
23 ～ 25	1.5	1.27×10^{9}	1.2×10^{-9}
27 ～ 29	0.5	4.19×10^{8}	1.2×10^{-9}
35 ～ 37	0.5	5.90×10^{7}	8.5×10^{-9}
39 ～ 41	0.5	2.56×10^{7}	2.0×10^{-8}
55 ～ 57	1.0	2.02×10^{6}	5.0×10^{-7}

循环数，通过公式(8)计算。

$$N_{cycle} = 1/D \quad \cdots\cdots(8)$$

N_{cycle}：破坏前的运行循环数

6.2　通过雨流计数法计算功率循环数

作为预测磨损故障中疲劳寿命的方法，有峰值计数法、程对计数法等。其中具有代表性的是雨流计数法[5]。

图 10 是使用本仿真器求得的以 60 秒为周期反复的运行循环中 T_{vj} 的变化。另外，**表 3** 是根据该 T_{vj} 模式采用雨流计数法求得的针对多个 ΔT_{vj} 的发生数 n_i。

N_i 是根据**图 8** 求得的各 ΔT_{vj} 下的功率循环寿命。以这些值为基础，根据公式(8)计算 60 秒周期的 1 个循环在运行到破坏前的循环数，则 $N_{cycle}=1.9\times10^{6}$cycle，IGBT 模块的寿命为 $N_{cycle}\times60$ 秒 $=1.1\times10^{8}$ 秒，1 天驱动 8 小时则为 10.9 年。

7　后记

以上对使用仿真器推算 IGBT 模块的损耗、温度、寿命进行了介绍。除了支持三电平电路及广泛使用的众多 PWM 调制方式之外，还实现了损耗与结温的依赖关系的计算，使仿真能够更接近实际情况。另外，对在电动汽车等输出变化复杂的应用中根据仿真结果推算功率循环寿命的方法进行了说明。

使用本仿真器虽然简单，但能把握 IGBT 模块损耗、温度上升的变化。希望广大用户将其用于设计初期阶段的模块选型或寿命推算。

参考文献

(1)　高久拓ほか. IGBT モジュールの損失・温度シミュレータ. 富士時報. 2008, vol.81, no.6, p.438-442.

(2)　Plexim. https://www.plexim.com/, (accessed 2018-09-20)

(3)　Morozumi, A. et al. Reliability of Power Cycling for IGBT Power Semiconductor Modules. IEEE Transactions On Industry Applications. 2003, vol.39, no.3, p.665-671.

(4)　Fuji IGBT シミュレータ. https://www.fujielectric.co.jp/products/semiconductor/model/igbt/simulation/, (accessed 2018-09-20).

(5)　遠藤達雄ほか.「Rain Flow Method」の提案とその応用. 九州工業大学研究報告（工学）. 1974, vol.28, p.33-62.

高久　　拓

从事功率半导体的现场应用工程师的工作。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部营业统括部应用技术部。
博士（工学）。电气学会会员。

汤川　文夫

从事功率半导体的现场应用工程师的工作。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部营业统括部应用技术部。

池之内　俊

从事功率半导体的现场应用工程师的工作。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部营业统括部应用技术部。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。