

# 随机对流条件下全密封变换器负载能力的动态评估方法

熊城<sup>1</sup>, 应展烽<sup>1\*</sup>, 姚凯<sup>2</sup>, 李德明<sup>1</sup>, 谢佳伟<sup>1</sup>, 祖玮<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏省南京市 210094;  
2. 南京理工大学自动化学院, 江苏省南京市 210094)

## Load Capacity Dynamic Assessment Method for Fully-sealed Converter Under Random Convection

XIONG Cheng<sup>1</sup>, YING Zhanfeng<sup>1\*</sup>, YAO Kai<sup>2</sup>, LI Deming<sup>1</sup>, XIE Jiawei<sup>1</sup>, ZU Wei<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu province, China; 2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu province, China)

**ABSTRACT:** It is difficult to accurately assess the thermal safety of power devices in fully-sealed converter due to the random convection, which seriously affects the validity of the load capacity evaluation of the converter. Therefore, this paper proposed a load capacity dynamic assessment method of power devices for fully-sealed converters under random convection. Firstly, the random sample of convective thermal resistance of a converter shell was extracted, based on historical operation data and thermal network model. Next, the random simulation of the convective thermal resistance of the shell was realized by using wavelet packet transform and Markov chain principle. Then, the junction temperature fluctuation of the power device was simulated, based on the sequence of convective thermal resistance and load current levels. Finally, the optimal load current limit of the converter was determined by the over-temperature risk of the power devices and growth function. An experimental platform for H-bridge converter with controllable environmental convection was designed. The relevant experimental results show that the proposed method can effectively improve the reliability and economy of the fully-sealed converter.

**KEY WORDS:** power converter; random convection; load capacity; wavelet packet transform; growth function

**摘要:** 在环境随机对流作用下, 全密封变换器的功率器件热安全性难以准确判断, 影响了变换器负载能力评估的有效性。为此, 文中提出一种随机对流条件下的全密封变换器负

载能力动态评估方法。该方法首先基于历史运行数据和热网络模型, 提取变换器外壳对流热阻的随机样本; 再通过小波包变换和马尔科夫链原理, 对外壳对流热阻的变化进行随机模拟; 接着基于对流热阻模拟序列和不同负载电流等级, 模拟功率器件的结温波动情况; 最后基于皮尔生长函数, 计算功率器件过温风险, 实现变换器最大负载电流动态评估。以全密封 H 桥变换器为对象, 设计一个环境对流可控的实验平台。实验结果表明, 所提方法能够有效提升全密封变换器运行的可靠性与经济性。

**关键词:** 功率变换器; 随机对流; 负载能力; 小波包变换; 生长函数

## 0 引言

负载能力是功率变换器的重要性能指标。当负载能力被高估时, 变换器内部功率器件易发生热击穿故障, 变换器运行可靠性下降。而当负载能力被低估时, 功率器件热容量无法得到充分发挥, 变换器运行经济性下降。在不少工程场合中, 变换器经常被要求在满载, 甚至过载工况下运行。因此, 有效确定负载能力对于提升变换器的可靠性和经济性而言具有重要意义。

当变换器中各元件满足电应力安全约束时, 功率器件热应力便成为限制变换器负载能力的主要因素。因此, 变换器负载能力评估的关键问题是如何在不同工况条件下准确分析功率器件的热安全性。目前常用的器件热分析方法主要包括有限元方法和热网络模型方法两类<sup>[1]</sup>。其中, 有限元方法利

基金项目: 国家自然科学基金项目(51677091)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51677091).

用特定网格对计算区域进行划分，从而获得变换器外壳及功率器件的三维温度场仿真结果<sup>[2-4]</sup>；热网络模型方法则将热分析问题简化为电学问题，通过热电类比思想估计器件结温<sup>[5-6]</sup>。由于有限元计算量巨大，故一般用于离线热分析，而热网络模型方法原理简单，计算方便，被广泛用于在线热分析。

上述两类方法已被广泛应用于各类功率器件和变换器的热分析中。文献[7-8]采用有限元方法分析总结了器件在焊料层空洞、焊料层剥离、键合点脱落等情况下温度、热阻等物理量特性，完成功率变换器健康状态评估。文献[9]利用有限元方法建立了器件芯片之间以及关键层之间的热耦合热网络模型，可快速准确地评估变换器在实际任务剖面和工作条件下的可靠性。文献[10]对绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)的功率损耗进行解析计算，然后将损耗信息输入到 IGBT 的有限元模型中进行精确的热模拟，指导变换器散热装置的优化设计。文献[11]建立了一种考虑封装材料热老化效应的热网络模型，解决了功率 MOSFET 持续退化进程中结温难以准确估计的问题，有效提高了变换器的热安全性。文献[12-13]基于热网络模型和温度闭环控制策略，提出了一种功率器件的主动热管理策略，提升了变换器的短时过载能力。文献[14]在器件热网络模型和寿命模型的基础上，对风电变流器长时间任务剖面进行尺度划分，提高了变流器寿命评估的准确性。

然而，上述研究大多假设功率变换器处于稳定或确定的散热条件下工作。事实上，随着新能源发电、交通运输和国防装备等技术领域的高速发展，大量全密封型变换器，如便携式电源、可移动逆变器、户外变频器和电机驱动器等，已经广泛在各类非室内环境场合下应用，产生了巨大经济价值和社会效益。为了满足防水和散热性能要求，全密封变换器通常采用全封闭式金属外壳结构，并将外壳作为内部功率器件的散热器。由于户外环境风速变化会导致外壳对流散热能力的改变，故全密封变换器的功率器件结温会发生随机波动。随机变化的结温不仅会大幅增大器件热安全性判定的难度，也会干扰各类热管理策略的有效性，影响变换器负载能力评估和提升的准确性。

为了提升全密封变换器的可靠性与经济性，本文以变换器外壳对流热阻样本的提取和随机模拟为基础，结合用于描述器件过温风险的皮尔函数，

提出一种随机对流条件下全密封变换器负载能力的动态评估方法。以全密封 H 桥变换器为对象，设计一个环境对流可控的实验平台，并开展实验验证。相关结果表明，所提方法能够有效评估全密封变换器在随机对流环境下的器件过温风险，并给出最大负载电流的动态评估结果。

## 1 随机对流条件对全密封变换器的负载能力影响

### 1.1 全密封变换器的功率器件热网络模型

全密封变换器的外壳通常由铝和铜等金属材料制成，且功率器件通常被紧贴在外壳的内侧壁面上，如图 1 所示。这种结构下，功率器件主要经由变换器外壳向周围环境空间散热。环境对流成为影响器件热安全性和变换器负载能力的重要参数。为对此开展分析，首先给出全密封变换器功率器件结温估计的热网络模型。

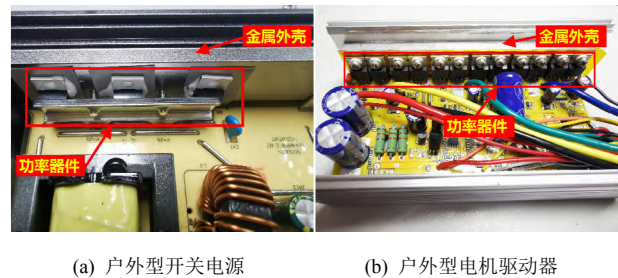


图 1 常见全密封变换器外壳与功率器件的布局结构

Fig. 1 Common fully-sealed converter housing and power device layout

当全密封变换器由功率 MOSFET 构成时，相应热网络结构如图 2 所示。图中：参数  $P_{1,m}$ 、 $T_{j,m}$

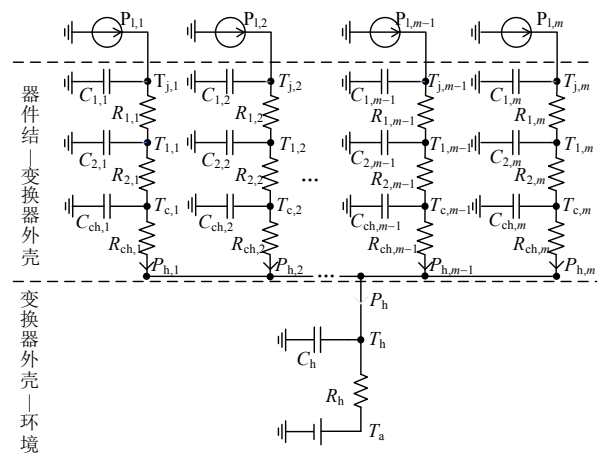


图 2 变换器内部功率器件的热网络模型

Fig. 2 Thermal network model of power device in the converter

和  $T_{c,m}$  分别为第  $m$  个器件的损耗、结温和壳温;  $C_{n,m}$ 、 $R_{n,m}$  和  $T_{n,m}$  分别为第  $m$  个器件内部  $n$  节点的热容、热阻和温度;  $C_{ch,m}$  和  $R_{ch,m}$  分别为第  $m$  个器件与变换器外壳之间导热材料的热容和热阻;  $T_h$  和  $T_a$  分别为变换器外壳温度和外部环境温度;  $C_h$  和  $R_h$  分别为变换器外壳的热容和对流热阻。

由图 2 可知, 功率器件热网络模型由两部分结构组成, 即器件结-变换器外壳热网络结构和变换器外壳-环境热路结构。显然, 该模型结构将变换器外壳视为一个整体进行热分析。这也是工程上对于多器件共享同一散热器时的常用简化分析方法<sup>[15-17]</sup>。另外, 功率 MOSFET 内部布局紧密, 故其体二极管与器件本体的散热路径基本相同, 结温差异也较小, 无需在热网络结构上进行区分。

在器件结-变换器外壳热网络结构中, 各结点温度可表达为如下微分方程组的一般形式:

$$\begin{cases} C_{1,m} \frac{dT_{j,m}}{dt} = P_{1,m} - \left( \frac{T_{j,m} - T_{1,m}}{R_{1,m}} \right) \\ C_{2,m} \frac{dT_{1,m}}{dt} = \left( \frac{T_{j,m} - T_{1,m}}{R_{1,m}} \right) - \left( \frac{T_{1,m} - T_{c,m}}{R_{2,m}} \right) \\ C_{ch,m} \frac{dT_{c,m}}{dt} = \left( \frac{T_{1,m} - T_{c,m}}{R_{2,m}} \right) - P_{h,m} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{1,m}$  为器件  $m$  的热损耗, 包括体二极管损耗;  $P_{h,m}$  为器件  $m$  向变换器外壳传递的热功率, 且有:

$$P_{h,m} = \frac{T_{c,m} - T_h}{R_{ch,m}} \quad (2)$$

变换器外壳-环境热路结构可表达为微分方程:

$$C_h \frac{dT_h}{dt} = P_h - \frac{T_h - T_a}{R_h} \quad (3)$$

式中  $P_h$  为器件向变换器外壳传递的全部热功率, 且有:

$$P_h = \sum_{m=1} P_{h,m} \quad (4)$$

在上述热网络模型中, 损耗  $P_{1,m}$  可通过器件数据手册计算或实验数据拟合等方式得到, 具体方法可详见文献<sup>[18-20]</sup>; 而模型中所需的热容和热阻参数基本可以通过器件、导热材料和变换器外壳数据手册得到。这些数据手册给出的参数能够满足大多数工程所需的精度要求<sup>[11-12]</sup>。当已获得变换器外壳温度  $T_h$  的测量结果时, 仅通过式(1)便可求取各器件结温。当测量结果为环境温度  $T_a$  时, 需联立式(1)和(3)估计器件结温。

需要说明的是, 对于封装体积较大的 IGBT 模块而言, 其续流二极管与器件本体存在一定间距, 热网络结构和结温均存在明显差异。故当变换器由 IGBT 模块构成时, 还需在图 2 所示热网络模型中增加续流二极管的热网络结构<sup>[21-22]</sup>。

## 1.2 实验平台设计

为分析随机对流条件下的全密封变换器负载能力, 设计了一个随机对流实验平台, 如图 3 所示。该平台主要由全密封变换器、模拟负载、直流电源、控制器、PC 机、直流风扇和风管构成。

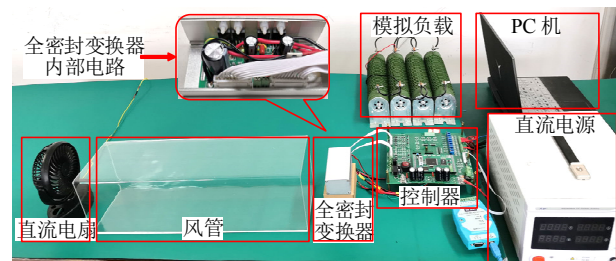


图 3 全密封变换器随机对流实验平台

Fig. 3 An experimental platform for full-sealed converter with controllable environmental convection

全密封变换器具有金属铝外壳, 并采用如图 4 所示的 H 桥电路作为功率拓扑。H 桥电路有 4 个型号为 IRFB4410PbF 的功率 MOSFET, 分别编号为  $Q_1$ — $Q_4$ 。表 1 给出了功率器件热网络模型参数。变换器输出端接有  $0.5\Omega$  电阻和  $0.1\text{mH}$  电感作为模拟负载。直流电源为变换器中的拓扑电路提供  $18\text{V}$  直流电压。

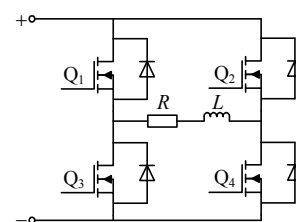


图 4 变换器主电路拓扑

Fig. 4 Converter main circuit topology

表 1 功率器件热网络模型参数  
Table 1 Thermal network model parameters of power devices

参数	数值	参数	数值
$R_{1,m}/(^{\circ}\text{C}/\text{W})$	0.2736	$C_{1,m}/(\text{J}/^{\circ}\text{C})$	0.0014
$R_{2,m}/(^{\circ}\text{C}/\text{W})$	0.3376	$C_{2,m}/(\text{J}/^{\circ}\text{C})$	0.0123
$R_{ch}/(^{\circ}\text{C}/\text{W})$	1.0521	$C_h/(\text{J}/^{\circ}\text{C})$	12.2064

实验平台中, 控制器具有 3 个主要功能: 1) 为变换器功率器件提供  $10\text{kHz}$  的脉宽调制(pulse width modulation, PWM)信号, 并结合电流控制策

略, 使变换器在特定负载电流条件下运行; 2) 采集变换器壳温和电流等数据, 并以 1s 为周期, 将实验数据上传至 PC 机中, 用于存储与分析; 3) 带有直流风扇的电机驱动功能, 能够通过预设的驱动信号占空比时间序列, 调整风扇转速, 使实验平台风速与真实风速的变化规律一致。实验平台中的风管能够大幅降低室内气流对平台风速造成的扰动, 保障了实验的可重复性。

### 1.3 负载能力影响分析

为模拟全密封变换器运行的随机对流环境, 在户外以 1s 为周期采集了时长为 120min 的真实风速数据, 再利用直流风扇在实验平台中模拟产生相同的风速变化。图 5 给出了真实环境风速和实验平台风速的对比。可以发现, 与真实风速相比, 实验平台风速满量程误差在 6.3%F.S 之内, 能够反映实际风速变化。

操作实验平台使变换器在上述随机风速条件下运行, 并保持负载电流为 5.5A。图 6 以器件  $Q_1$  为对象, 展示了上述实验过程中器件结温变化情况。可以发现, 当变换器外壳受到随机对流影响时,

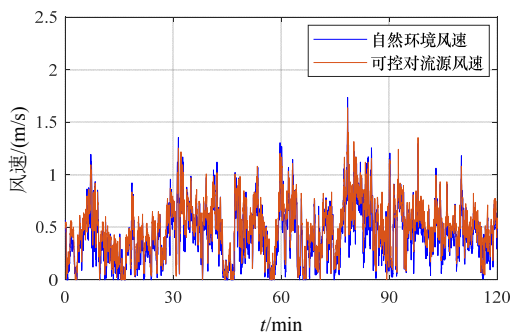


图 5 真实环境风速和实验平台风速的对比

Fig. 5 Comparison of real ambient wind speed and experimental platform wind speed

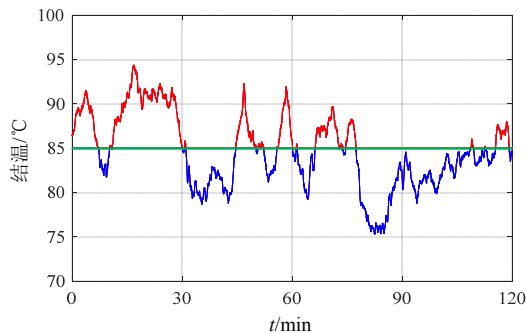


图 6 随机对流作用下变换器功率器件的结温波动

Fig. 6 The junction temperature fluctuation of power devices in the converter under random convection

器件结温发生了明显波动。其它器件也存在相似的结温变化情况, 不再特别说明。

虽然功率器件最高结温普遍可达到 150~175°C, 但为给实验过程中的器件提供温度安全裕量, 本文以工业级 IC 的最高耐温为标准, 将器件工作的最大允许结温限定在 85°C。再次观察图 6 可见, 器件结温在部分时段超过了最大允许值, 而其它时段未发生超温现象, 甚至远低于最大允许值。这意味着变换器在某些时段内已进入过载运行, 而在某些时段则仍有潜在负载能力。这也表明, 受随机对流导致的结温波动影响, 变换器最大负载能力也随时发生变化, 并非恒定值。为了提升变换器的可靠性和经济性, 有必要对随机对流条件下的负载能力进行评估。

## 2 外壳对流热阻的随机模拟方法

### 2.1 外壳对流热阻的样本提取

变换器负载能力评估的前提是能够准确估计功率器件热安全性。但器件结温在随机对流条件下存在不确定性波动, 这对变换器负载能力评估造成了难度。为此, 需要对变换器外壳对流热阻的随机变化特性开展分析。对流热阻是表征变换器外壳与环境之间对流传热作用的物理量, 也是引起器件结温变化的主要因素。依据传热学可知, 对流热阻与对流换热系数有关, 受环境风速、密度、动力粘度等诸多非线性因素影响, 具有复杂时变特性。因此, 对流热阻难以通过理论方法准确计算得到。为此, 本文通过热网络模型和变换器历史运行数据, 实现外壳对流热阻的样本提取。

将式(1)在  $k$  时刻进行离散, 得:

$$\begin{cases} T_{j,m}^{k+1} = T_{j,m}^k + \frac{\Delta t}{C_{1,m}} (P_{1,m}^k - \frac{T_{j,m}^k - T_{1,m}^k}{R_{1,m}}) \\ T_{1,m}^{k+1} = T_{1,m}^k + \frac{\Delta t}{C_{2,m}} (\frac{T_{j,m}^k - T_{1,m}^k}{R_{1,m}} - \frac{T_{1,m}^k - T_{c,m}^k}{R_{2,m}}) \\ T_{c,m}^{k+1} = T_{c,m}^k + \frac{\Delta t}{C_{ch,m}} (\frac{T_{1,m}^k - T_{c,m}^k}{R_{2,m}} - P_{h,m}^k) \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\Delta t$  为离散步长。

再将式(3)离散, 得:

$$R_h^k = (T_h^k - T_a^k) [P_h^k - \frac{C_h}{\Delta t} (T_h^{k+1} - T_h^k)]^{-1} \quad (6)$$

由式(5)可知, 当测量得到  $k$  时刻下的器件损耗  $P_{1,m}^k$  和变换器外壳温度  $T_h^k$  等历史数据后, 便可对

$k+1$ 时刻下的器件结温  $T_{j,m}^{k+1}$  进行估计。同时,还可由此得到器件  $m$  向变换器外壳传递的热功率  $P_{h,m}^k$ ,进而得到总传递热功率  $P_h^k$ 。之后再基于式(6),并结合环境温度  $T_a^k$  和外壳温度值  $T_h^{k+1}$  等历史测量数据,可计算  $k$ 时刻下对流热阻  $R_h^k$ 。将所有时间步下的对流热阻构成时间序列  $\{R_h^k\}$ ,便可完成对流热阻样本提取。

## 2.2 小波包变换原理

为了评估随机对流条件对器件结温及变换器负载能力造成的影响,需要对变换器外壳对流热阻变化情况进行随机模拟。由于自然环境风速变化具有明显的频域特征,因此对流热阻也是一个带有频率特性的特殊随机过程。为了提升随机模拟的准确性,应利用小波包变换得到对流热阻样本在不同频带下的分量。

小波包变换是一种时频域信号分析方法,能够将原始信号在全频域内进行多层次分解,从而精细地获取不同频带下的信号特征<sup>[23]</sup>。小波包分解过程可表达为

$$\begin{cases} d_{j+1}^{2n,l} = \sum_k h_{(k-2l)} d_j^{n,k} \\ d_{j+1}^{2n+1,l} = \sum_k g_{(k-2l)} d_j^{n,k} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $d_{j+1}^{2n,l}$ 、 $d_{j+1}^{2n+1,l}$  分别为第  $j+1$  层的偶数和奇数节点小波包系数,代表了该子频带下的信号特征;  $h_{(k-2l)}$ 、 $g_{(k-2l)}$  分别为对应的低通和高通滤波器系数,与所选取的小波基函数类型有关;  $k$ 、 $l$  为不同的时间参数。将上述小波包系数分别进行逐层重构,便可得到原始信号在各频带内的分量。小波包重构过程可表达为

$$d_j^{n,l} = \sum_k [\tilde{h}_{(l-2k)} d_{j+1}^{2n,k} + \tilde{g}_{(l-2k)} d_{j+1}^{2n+1,k}] \quad (8)$$

式中  $\tilde{h}_{(l-2k)}$ 、 $\tilde{g}_{(l-2k)}$  分别为小波重构的低通和高通滤波器滤波系数。

## 2.3 马尔科夫链原理

马尔科夫链是一个无记忆的随机过程模型,能够模拟随机序列的变化情况。由于环境风速变化通常可视为马尔科夫过程<sup>[24-25]</sup>,故马尔科夫链模型可用于描述外壳对流热阻的随机变化。

依据定义可知,马尔科夫过程  $\{X^k\}$  在  $k+1$  时刻下的状态  $X^{k+1}$  只与其  $k$  时刻状态  $X^k$  有关,与之前时刻状态无关。则状态  $X^k$  向状态  $X^{k+1}$  进行转移的概率即为一个条件概率  $P_{nm}$ :

$$P_{nm} = P(X^{k+1} = m | X^k = n) \quad (9)$$

式中  $n$ 、 $m$  分别为  $X^k$  和  $X^{k+1}$  的状态取值。

若马尔科夫过程  $\{X^k\}$  共有  $M$  个状态值,那么所有状态之间的转移概率可构成矩阵  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1M} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{M1} & P_{M2} & P_{M3} & P_{MM} \end{bmatrix} \quad (10)$$

矩阵  $\mathbf{P}$  被称为马尔科夫链模型的状态转移概率矩阵,描述了马尔科夫过程在不同状态间转移的统计特性。在给定相应初始状态后,便可基于矩阵  $\mathbf{P}$  中的各个元素值,生成与样本序列随机特性相似的模拟序列。

## 2.4 随机模拟方法

基于上述小波包变换和马尔科夫链原理,提出全密封变换器外壳对流热阻的随机模拟方法,其实现流程如图7所示。该方法的基本思想为:首先进行对流热阻样本  $\{R_h^k\}$  的小波包变换,得到不同频带  $w$  下对流热阻分量  $\{R_{h,w}^k\}$ ;再基于马尔科夫链将对流热阻的变化划分为  $M$  个状态,并计算得到各分量的状态转移概率矩阵  $\mathbf{P}_w$ ;接着利用矩阵  $\mathbf{P}_w$  生成与对流热阻分量随机特性相似的模拟序列  $\{\tilde{R}_{h,w}^k\}$ ;最后将各模拟序列进行叠加,得到对流热阻的模拟序列  $\{\tilde{R}_h^k\}$ 。

由上述原理可知,小波包变换能够得到不同频带内的对流热阻特征,而马尔科夫链能够反映各频带内对流热阻的随机变化情况,因此所提方法能够对变换器外壳对流热阻的随机变化进行有效模拟。

## 2.5 随机模拟结果评价

在完成外壳对流热阻的随机模拟后,还需采用其它随机过程分析手段,对模拟结果进行评价,以验证模拟的有效性。由于外壳对流热阻是具有频率特性的随机过程,因此采用功率谱密度及相似性分析方法进行模拟结果评价。

功率谱密度是一种被广泛使用的随机过程分析方法,能够利用信号在不同频带下的功率分布统计特征,反映信号随机变化特性<sup>[26]</sup>。设一个随机过程信号为  $Y(t)$ ,则其功率谱密度<sup>[27]</sup>可表达为

$$s_Y(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} E[|F_Y(\omega, T)|^2] \quad (11)$$

式中:  $s_Y(\omega)$  为功率谱密度;  $\omega$  为频率;  $T$  为随机信号所处时段;  $E[\cdot]$  代表统计平均算子;  $F_Y(\omega, T)$  为信

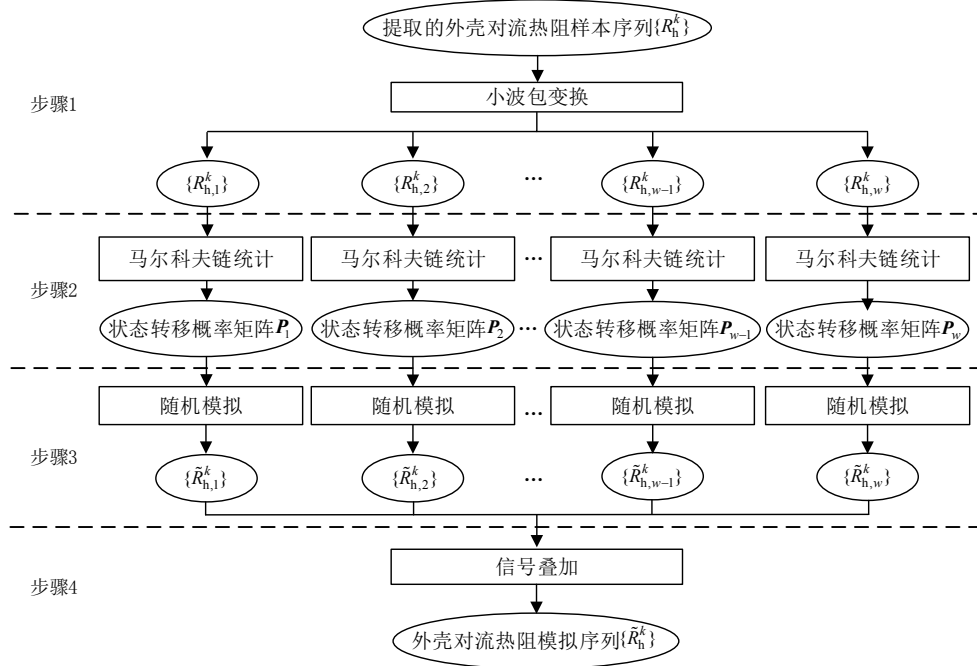


图 7 全密封变换器外壳对流热阻的随机模拟方法

Fig. 7 Random simulate method of convective thermal resistance of fully-sealed converter shell

号的傅里叶变换，即：

$$F_Y(\omega, T) = \int_{-T}^T Y(t) e^{-j\omega t} dt \quad (12)$$

功率谱密度的相似性可以用来比较不同随机过程特性之间的差异。相关系数法是一种已被广泛使用的相似性评价方法<sup>[28]</sup>。当相关系数为 1 时，表明比较对象完全相似。而相关系数为 0 时，表明比较对象完全不具备相似性。设存在两个变量  $a$  和  $b$ ，两者相关系数可定义为

$$\rho = \frac{\text{Cov}(a, b)}{\sqrt{\text{Var}(a)} \cdot \sqrt{\text{Var}(b)}} \quad (13)$$

式中： $\text{Cov}(a, b)$ 为变量  $a$  和  $b$  的协方差； $\text{Var}(a)$ 、 $\text{Var}(b)$ 分别为变量  $a$  和  $b$  的方差。

### 3 所提全密封变换器负载能力动态评估方法

#### 3.1 方法原理

基于前文所述方法，提出全密封变换器负载能力动态评估方法。设变换器运行过程可分为若干时段，每个时段长度为  $k$ 。在  $i$  时段下，所提方法实现流程如图 8 所示。

所提方法主要步骤说明如下：

1) 步骤 1：提取变换器外壳对流热阻样本。在此步骤中，根据当上一时段采集到的变换器历史运行数据，结合式(5)、(6)，获取对流热阻样本  $\{R_n^k\}$ 。

2) 步骤 2：生成对流热阻模拟序列。在此步骤

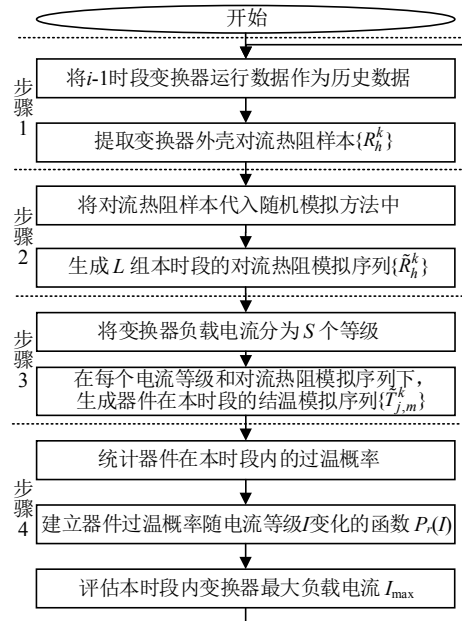


图 8 全密封变换器负载能力动态评估方法流程

Fig. 8 Dynamic evaluation method flow of full-sealed converter load capacity

中，通过图 7 所示方法对当前时段的对流热阻变化进行多次随机模拟，共得到  $L$  组模拟序列  $\{\tilde{R}_n^k\}$ 。

3) 步骤 3：模拟功率器件的结温变化。在此步骤中，将变换器负载电流  $I$  分为  $S$  个等级，并在遍历所有负载电流等级  $I$  和模拟序列  $\{\tilde{R}_n^k\}$  条件下，利用热网络模型，对器件结温在当前时段中的随机波动进行模拟，得到结温模拟序列  $\{\tilde{T}_j^k\}$ 。

4) 步骤 4：评估变换器最大负载能力。在此步

骤下,利用结温模拟序列 $\{\tilde{T}_j^k\}$ 统计器件在当前时段中的过温概率,并通过拟合方法建立过温概率随电流等级 $I$ 变化的函数 $P_r(I)$ 。随后,通过函数 $P_r(I)$ 评估当前时段内变换器最大负载电流 $I_{\max}$ 。最后,回到步骤1开始下一时段的最大负载能力评估。

由上述原理可知,所提方法可从上一个时段所得对流热阻样本出发,评估本时段下的变换器负载能力,因此时段长度 $k$ 主要取决于对流热阻在两个时段内变化的随机平稳性。通常在数十min内,环境气象的变化可视为平稳随机过程<sup>[29]</sup>。此外,对流热阻模拟序列组数 $L$ 和负载电流等级数 $S$ 等参数决定了器件结温模拟结果的数量。理论上,参数 $L$ 和 $S$ 的取值越大,器件过温概率统计越准确。但实际工程中,还应根据系统运算能力进行综合考虑。

### 3.2 器件过温概率函数

由图8所示的方法原理可知,建立描述器件过温风险的函数 $P_r(I)$ 是评估变换器负载能力的重要步骤。在相同的散热条件下,器件过温概率与变换器负载电流等级 $I$ 呈正比。当负载电流等级较小时,器件过温概率极低,接近于0%。但当负载电流达到一定等级后,器件过温概率迅速提高,最终达到并保持在100%。上述过温概率变化现象符合皮尔生长函数所描述的数据变化特性。

因此,依据皮尔生长函数定义<sup>[30]</sup>,器件过温概率 $P_r(I)$ 可表达:

$$P_r(I) = \frac{1}{1 + \alpha \cdot e^{-\beta(I-\gamma)}} \quad (14)$$

式中 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 均为生长函数系数,可以通过对过温概率统计值进行拟合得到。

在设定器件最大允许过温概率 $P_{r\max}$ 后,便可通过式(15)对变换器最大负载电流 $I_{\max}$ 进行评估:

$$I_{\max} = \gamma - \frac{1}{\beta} \cdot \ln\left(\frac{1 - P_{r\max}}{\alpha P_{r\max}}\right) \quad (15)$$

## 4 实验分析与验证

### 4.1 外壳对流热阻随机模拟的有效性验证

采用图3所示实验平台对所提方法进行验证与分析。为获得变换器外壳对流热阻样本,先令实验平台中的变换器在4A负载电流条件下运行。当器件结温稳定后,对变换器施加图5所示的随机风速。将实验过程分为0—III共4个时段,每个时段长度为30min。利用式(5)和(6)对各时段对流热阻样本进行提取,得到样本序列如图9所示。由图可知,在

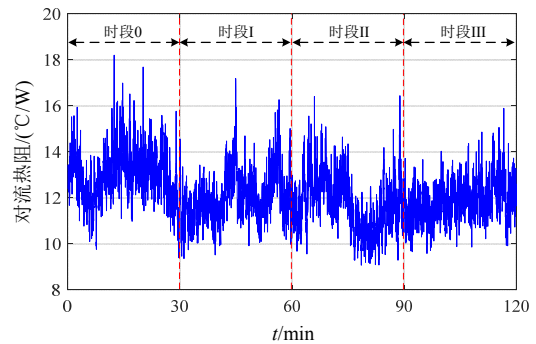


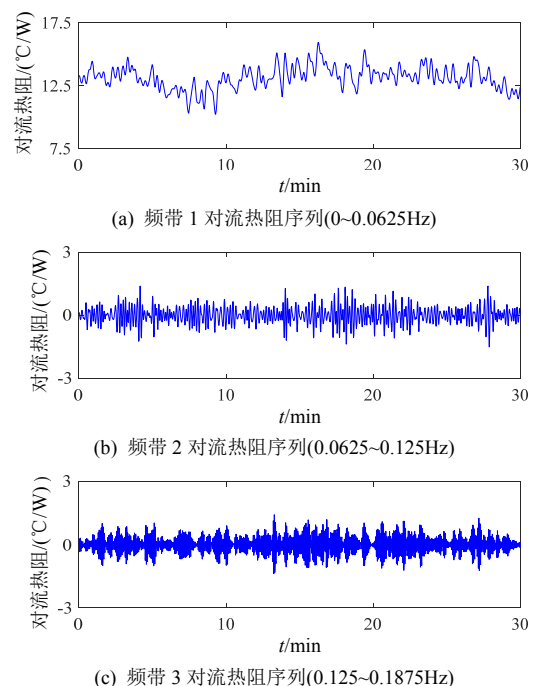
图9 对流热阻样本序列

Fig. 9 The sample sequence of convective thermal resistance

风速随机变化作用下,变换器外壳对流热阻均发生了不确定性波动。这是导致变换器外壳温度及器件结温随机变化的本质原因。

利用图7所示方法对时段0内的外壳对流热阻进行随机模拟。其中,小波包变换采用30dB小波,分解层数为3层,共得到8个频带。由于实验平台数据上传周期为1s,故小波包变换只能获得频率为0~0.5Hz范围内的信号分量。受金属材料比热容和质量影响,全密封变换器外壳的热时间常数一般可长达数分钟至数十分钟。这导致器件结温波动主要受到对流热阻的低频变化影响,因此只要获得低频带对流热阻分量即可满足研究需要。

图10为小波包变换所得各频带下的外壳对流热阻分量。容易发现,对流热阻在0~0.0625Hz频带中具有较大幅值变化。这说明该频带下的对流热阻波动较为剧烈,而其它频带内的幅值变化明显较小。



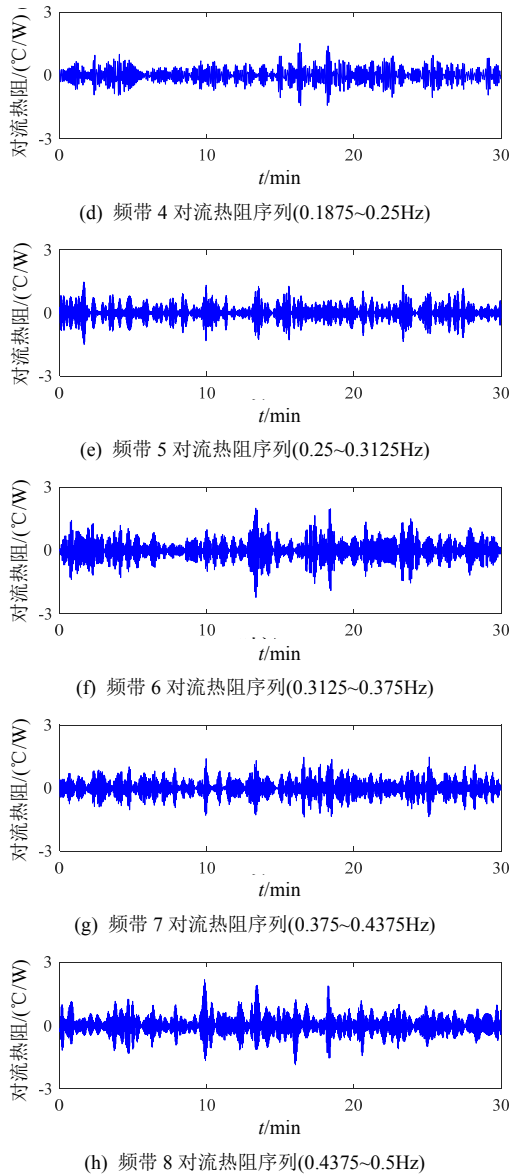


图 10 不同频带下的对流传热分量  
Fig. 10 Convective thermal resistance components at different frequency bands

下面将每个频带对流传热分量均划分为 20 个状态，并建立相应马尔科夫链模型。图 11 给出了各对流传热分量对应的状态转移概率矩阵。由图可知，各状态转移概率矩阵之间存在较大差异。这也表明了对流传热阻在不同频带下的随机特性并不一致，需要分开描述。

利用上述状态转移概率矩阵生成 500 组外壳对

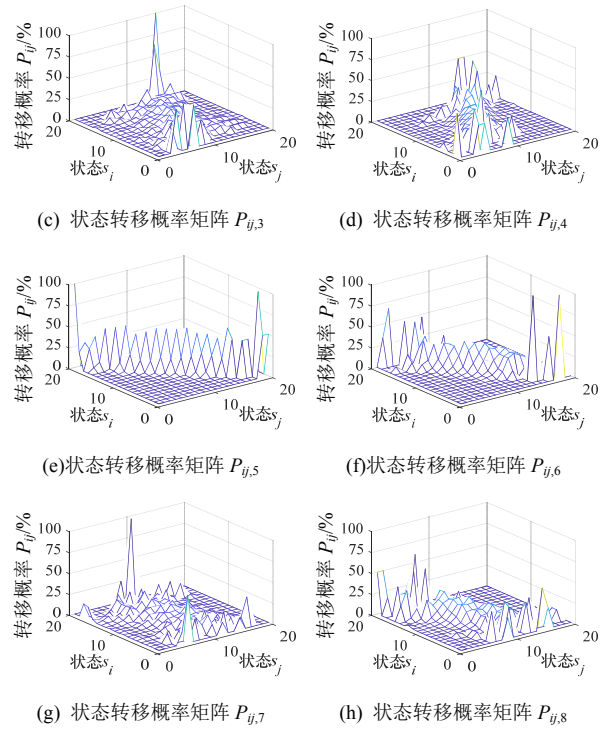
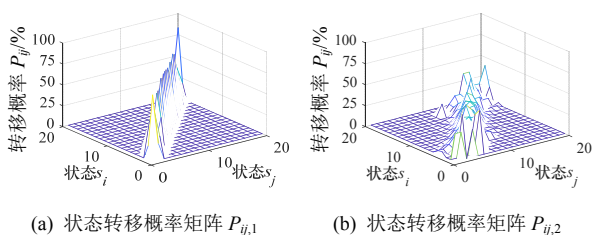


图 11 对流传热分量的状态转移概率矩阵  
Fig. 11 The state transition probability matrix of convective thermal resistance component

流热阻的模拟序列。图 12 给出了时段 0 模拟序列、时段 0 真实序列和时段 I 真实序列的功率谱密度对比，分别对应图中序列 1—3。可以发现，各功率谱密度均在 0.0625Hz 以下频带中具有较高幅值，这与前文小波包变换分析结果一致。再基于式(13)所示的相关性分析可知，时段 0 模拟序列与真实序列的功率谱密度相似性达 91.36%，而时段 0 模拟序列与时段 I 真实序列的功率谱密度相似性为 93.9%。这表明，所提方法得到的模拟序列与真实序列具有相似的随机特性。同时，由于风速变化短时间内的平稳性，上一时段的模拟序列有效地反映了外壳对流传热阻在下一时段内的随机变化。

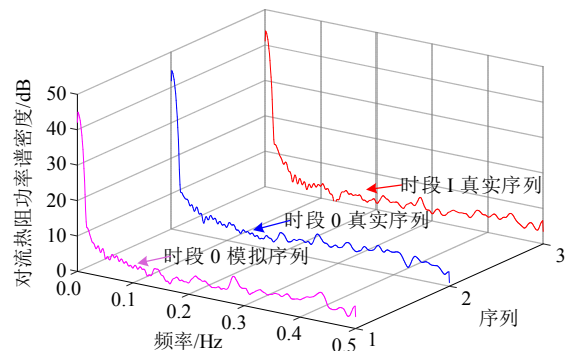


图 12 不同对流传热阻序列功率谱密度对比  
Fig. 12 Comparison of power spectral densities of different convective thermal resistance sequences



对时段 I、时段 II 和时段 III 的外壳对流热阻进行随机模拟，均可得到与上述结果类似的现象。这表明了本文对流热阻随机模拟方法的有效性。

#### 4.2 所提负载评估方法的有效性验证

将变换器负载电流在 0~9A 内等分为 45 个等级，并基于热网络模型和时段 0 的对流热阻模拟序列  $\{\tilde{R}_h^k\}_0$ ，可对各器件在时段 I 内的结温变化进行随机模拟。下面对模拟结温  $\{\tilde{T}_j^k\}$  进行统计，得到时段 I 内变换器负载电流等级与器件过温概率的关系，再通过拟合建立描述过温概率变化的皮尔生长函数  $P_r(I)$ 。

图 13 给出了过温概率统计值及对应的生长函数结果，表 2 给出了生长函数系数的拟合值。结果表明，随着电流的增大，器件过温概率变化符合生长函数变化特征，两者间的最大相对误差仅为 7.8%。故皮尔生长函数能够有效描述器件过温风险与负载电流之间的关系。

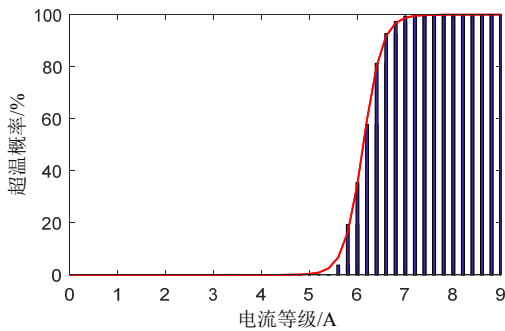


图 13 过温概率统计值和拟合的生长函数曲线

Fig. 13 Over-temperature probability and fitted growth function curve

表 2 皮尔生长函数拟合值

Table 2 The fitting value of the Peal growth function

系数	拟合值
$\alpha_1$	3.225
$\beta_1$	5.042
$\gamma_1$	5.84

再设器件发生过温的现象为小概率事件，即器件最大允许过温概率为 0.5%。那么，依据式(15)可得变换器在时段 I 内的最大负载电流应为 4.7A。

为对该电流评估结果进行验证，操作实验平台使时段 0 内的变换器负载电流保持 4A，而时段 I 内的负载电流分别跳变至不同等级。图 14 以器件  $Q_1$  为对象，展示了上述实验过程中的结温波动情况。

由图 14 可知，当时段 I 内负载电流小于 4.7A 时，器件结温远低于设定的最大允许值 85℃。这导

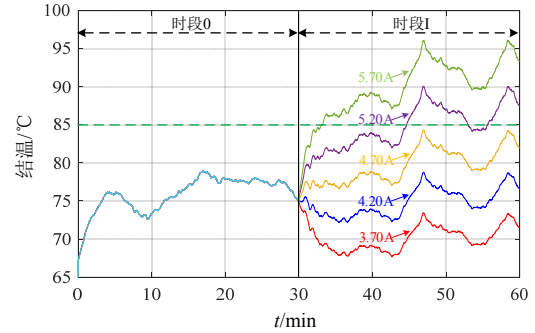


图 14 时段 I 内加载不同负载电流时的器件结温波动  
Fig. 14 The junction temperature fluctuates of power devices under different load currents during period I

致变换器负载能力无法得到充分发挥，影响了运行经济性；而当负载电流大于 4.7A 时，器件明显出现过温现象。这导致变换器过载严重，影响了运行可靠性。当负载电流设定为最大负载电流评估值 4.7A 时，器件最高结温较为接近但未超过 85℃。这不仅最大程度发挥了变换器的负载能力，也保障了其功率器件的热安全性。上述结果表明，本文所提方法能够有效评估变换器在时段 I 下的最大负载电流。

为进一步验证本文方法有效性，再分别对时段 II 和时段 III 内的最大负载电流进行评估，并使变换器在时段 I—时段 III 内按照各自最大负载电流评估值运行。图 15 给出了该实验过程下所得器件结温变化。

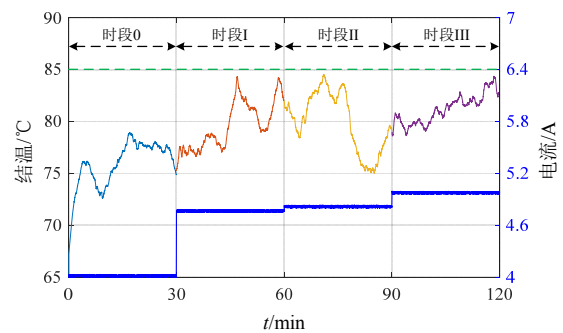


图 15 时段 I—III 中加载最大负载电流评估值时的器件结温波动

Fig. 15 The junction temperature fluctuates of power devices under the maximum load currents during period I—III

由图 15 可见，时段 I—时段 III 中的最大负载电流评估值存在少许差异，分别 4.7、4.81 和 4.9A。这是因为尽管外壳对流热阻在上述时段下的随机特性较为相似，但并不完全相同。按相应最大负载电流运行后，功率器件在全工作时段下的最高结温接近 85℃，但未出现过温现象。这表明，本文所提

方法能够在随机对流条件下,有效获取变换器在不同时段下的最大负载电流,从而实现变换器负载能力的动态评估。

## 5 结论

本文基于对流热阻样本提取和随机模拟,结合表征器件过温风险的皮尔生长函数,提出了全密封变换器在随机对流条件下的负载能力动态评估方法,并利用实验平台对方法进行了验证。实验结果表明:随机对流会导致变换器外壳对流热阻发生不确定性变化;小波包和马尔科夫链能够良好描述对流热阻的随机特性,并有效生成相应模拟序列;皮尔生长函数能够良好描述功率器件过温概率与变换器负载电流的变化关系;在此基础上,所提方法能够在随机对流环境下,实现变换器最大负载电流的动态评估。

本文仅考虑了功率器件温度对变换器负载能力的限制,但所提方法可推广至电感、电容和端子等其它元件对象上,从而综合评估各类发热元件对变换器负载能力的影响。此外,所提方法原理与变换器拓扑形式无关,可应用于各类全密封变换器中,为其运行经济性与可靠性的提升提供了一种有效手段。

## 参考文献

- [1] QIAN Cheng, GHEITAGHY A M, FAN Jiajie, et al. Thermal management on IGBT power electronic devices and modules[J]. IEEE Access, 2018, 6: 12868-12884.
- [2] 陈杰, 邓二平, 张一鸣, 等. 功率循环试验中开通时间对高压大功率 IGBT 模块失效模式的影响及机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7710-7720.  
CHEN Jie, DENG Erping, ZHANG Yiming, et al. Influence and mechanism analysis of load pulse duration on failure mode of high power IGBT module under power cycling condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7710-7720(in Chinese).
- [3] BAHMAN A S, MA Ke, BLAABJERG F. A lumped thermal model including thermal coupling and thermal boundary conditions for high-power IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2518-2530.
- [4] CHEN Hao, YANG Jian, XU Shuai. Electrothermal-based junction temperature estimation model for converter of switched reluctance motor drive system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 874-883.
- [5] 陈一高, 陈民铀, 高兵, 等. 基于瞬态热阻的 IGBT 焊料层失效分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 3059-3067.  
CHEN Yigao, CHEN Minyou, GAO Bing, et al. Evaluation of solder failure of an IGBT module based on transient thermal impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 3059-3067(in Chinese).
- [6] LUTZ J, SCHLANGENOTTO H, SCHEUERMANN U, et al. Semiconductor power devices[M]. Berlin: Springer, 2011: 360-368.
- [7] 王春雷, 郑利兵, 方化潮, 等. 键合线失效对于 IGBT 模块性能的影响分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 184-191.  
WANG Chunlei, ZHENG Libing, FANG Huachao, et al. Analysis of the performance effect with bonding wires lift-off in IGBT modules[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 184-191(in Chinese).
- [8] 肖飞, 罗毅飞, 刘宾礼, 等. 焊料层空洞对 IGBT 器件热稳定性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1499-1506.  
XIAO Fei, LUO Yifei, LIU Binli, et al. Influence of voids in solder layer on the temperature stability of IGBTs[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1499-1506(in Chinese).
- [9] BAHMAN A S, MA Ke, GHIMIRE P, et al. A 3-D-lumped thermal network model for long-term load profiles analysis in high-power IGBT modules[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(3): 1050-1063.
- [10] XU Shizhou, PENG Yufeng, LI Shaoyu. Application thermal research of forced-air cooling system in high-power NPC three-level inverter based on power module block[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2016, 8: 387-397.
- [11] CHEN Huifeng, JI Bing, PICKERT V, et al. Real-time temperature estimation for power MOSFETs considering thermal aging effects[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2014, 14(1): 220-228.
- [12] LEMMENS J, VANASSCHE P, DRIESEN J. Optimal control of traction motor drives under electrothermal constraints[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(2): 249-263.
- [13] 刘平, 张星, 黄守道, 等. 基于实时结温观测的电动汽车逆变器动态限流策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 11-15, 32.  
LIU Ping, ZHANG Xing, HUANG Shoudao, et al. Dynamic current limiting strategy of electric vehicle inverters based on real-time junction temperature observation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 11-15, 32(in Chinese).
- [14] 杜雄, 李高显, 李腾飞, 等. 风电变流器 IGBT 模块的多时间尺度寿命评估[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6152-6161.  
DU Xiong, LI Gaoxian, LI Tengfei, et al. Multi-time scale lifetime evaluation of IGBT modules in the wind power

- converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 6152-6161(in Chinese).
- [15] 郑帅, 杜雄, 张军, 等. 采用降温曲线的 SiC MOSFET 模块热参数的测量[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1759-1768.  
ZHENG Shuai, DU Xiong, ZHANG Jun, et al. Measurement of thermal parameters of SiC MOSFET modules with cooling curves[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1759-1768(in Chinese).
- [16] MA Ke, BAHMAN A S, BECZKOWSKI S, et al. Complete loss and thermal model of power semiconductors including device rating information[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2556-2569.
- [17] WANG Ze, TIAN Bo, QIAO Wei, et al. Real-time aging monitoring for IGBT modules using case temperature[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1168-1178.
- [18] 万萌, 应展烽, 张伟. 分立型功率 MOSFET 结温估计的非线性热网络模型和参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(12): 2477-2488.  
WAN Meng, YING Zhanfeng, ZHANG Wei. Nonlinear thermal network model and parameter identification method for junction temperature estimation of discrete power MOSFET[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(12): 2477-2488(in Chinese).
- [19] GRAOVAC D, PÜRSCHEL M, KIEP A. MOSFET power losses calculation using the data-sheet parameters[Z]. Munich: Infineon Technologies AG, 2006.
- [20] YU Xiaoyan, YEAMAN P. Temperature-related MOSFET power loss modeling and optimization for DC-DC converter[C]//2013 28th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach: IEEE, 2013: 2788-2792.
- [21] 张建文, 陈根, 蔡旭, 等. 基于热控制的海上风电变频器主动防凝露技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2748-2756.  
ZHANG Jianwen, CHEN Gen, CAI Xu, et al. Thermal control based active anti-condensation strategy for offshore wind power converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2748-2756(in Chinese).
- [22] 张晏铭, 周雒维, 刘洪纪, 等. 一种 IGBT 散热器动态响应性能优化数值算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3017-3026.  
ZHANG Yanming, ZHOU Luowei, LIU Hongji, et al. A numerical algorithm for optimizing dynamic response performance of IGBT heat sinks[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 3017-3026(in Chinese).
- [23] BURRUS C S, GOPINATH R A, GUO Haitao. Introduction to wavelets and wavelet transforms: a primer[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [24] 史可琴, 王方雨, 梁琛, 等. 基于随机过程自相关性的风速预测模型分析[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 529-535.  
SHI Keqin, WANG Fangyu, LIANG Chen, et al. A new wind speed prediction model based on random process considering autocorrelation[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 529-535(in Chinese).
- [25] 蒋平, 霍雨翀, 张龙, 等. 基于改进一阶马尔可夫链的风速时间序列模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 22-27.  
JIANG Ping, HUO Yuchong, ZHANG Long, et al. A wind speed time series model based on advanced first-order Markov chain approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 22-27(in Chinese).
- [26] 刘次华. 随机过程及其应用[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2004.  
LIU Cihua. Stochastic processes with its applications[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2004(in Chinese).
- [27] KIRLIN R L, BECH M M, TRZYNADLOWSKI A M. Analysis of power and power spectral density in PWM inverters with randomized switching frequency[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(2): 486-499.
- [28] 李湃, 刘纯, 黄越辉, 等. 基于隐马尔科夫模型的多风电场相关性出力时间序列建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5683-5691.  
LI Pai, LIU Chun, HUANG Yuehui, et al. Modeling correlated power time series of multiple wind farms based on hidden Markov model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5683-5691(in Chinese).
- [29] 应展烽, 徐捷, 张旭东, 等. 基于脉动参数热路模型的架空线路动态增容风险评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 89-95.  
YING Zhanfeng, XU Jie, ZHANG Xudong, et al. Risk assessment of dynamic overhead lines rating based on thermal circuit model considering pulsating characteristic of parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 89-95(in Chinese).
- [30] MORIGUCHI K. An approach for deriving growth equations for quantities exhibiting cumulative growth based on stochastic interpretation[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 490: 1150-1163.



熊城

在线出版日期: 2021-10-28。

收稿日期: 2021-06-23。

作者简介:

熊城(1995), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子器件可靠性评估, chengxiong\_809@163.com;

\*通信作者: 应展烽(1982), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电气设备可靠性分析与评估, 电力系统状态监测技术等, zhanfengying@njust.edu.cn。

(责任编辑 吕鲜艳)

# Load Capacity Dynamic Assessment Method for Fully-sealed Converter Under Random Convection

XIONG Cheng<sup>1</sup>, YING Zhanfeng<sup>1\*</sup>, YAO Kai<sup>2</sup>, LI Deming<sup>1</sup>, XIE Jiawei<sup>1</sup>, ZU Wei<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology;  
2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology)

**KEY WORDS:** power converter; random convection; load capacity; wavelet packet transform; growth function

With the continuous expansion of power conversion requirements, power converters with fully-sealed structure have been widely used in various outdoor occasions. Due to the random thermal convection caused by the uncertainty change of ambient wind speed, it is difficult to accurately assess the thermal safety of power devices in fully-sealed converter. This seriously affects the validity of the converter load capacity evaluation and then reduces the reliability and economy of power converter. To address this issue, a load capacity dynamic assessment method is proposed for the fully-sealed converter under random thermal convection in this paper.

In the proposed assessment method, a thermal network model of power devices, as shown in Fig. 1, is established to describe the relationship between devices junction temperature, converter case temperature and ambient temperature.

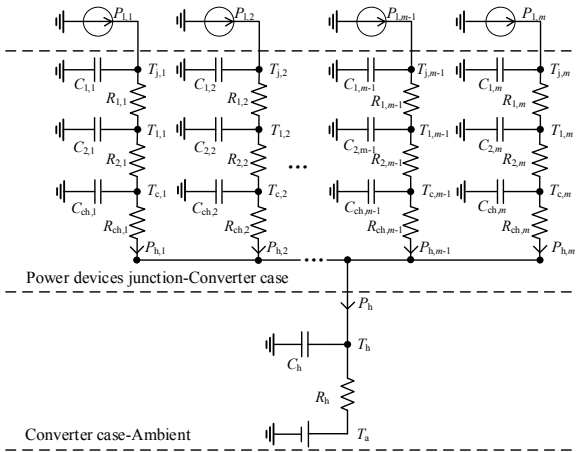


Fig. 1 Thermal network model of power devices

Then, the random sample of convective thermal resistance of converter shell is extracted based on the historical monitor data and above-mentioned thermal network model. The wavelet packet transform and Markov chain principle are employed to simulate the random variation of the convective thermal resistance of the converter shell, as shown in Fig. 2.

With the simulated convective thermal resistance, the random fluctuation of devices junction temperature can be obtained accurately. After that, the over-temperature risk of the power devices is estimated with different load current levels and is fitted by the Peel growth function, as shown in Fig. 3.

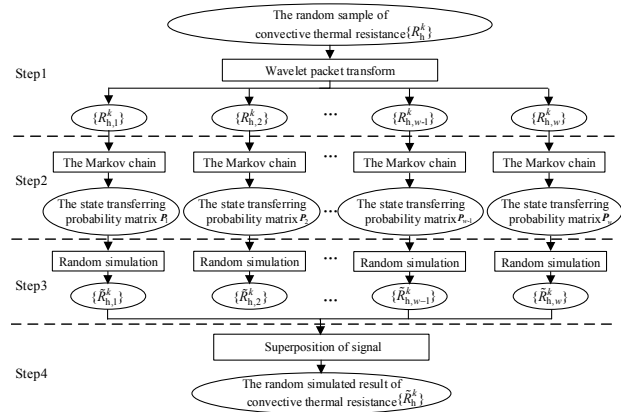


Fig. 2 Random simulation of convective thermal resistance

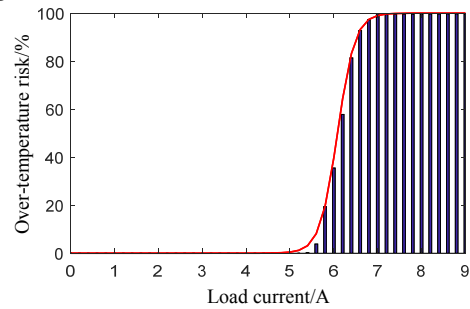


Fig. 3 Over-temperature probability and fitted growth function

Finally, the load capacity of fully-sealed converter is assessed effectively with the Peel growth function. Fig. 4 shows the experimental results for the validation of proposed assessment method. When the load current of converter is set to 4.7A (this is the load current estimated by the proposed method), the maximum junction temperature of the device is very close but less than 85°C. This indicates that the proposed method can effectively assess the maximum load capacity of converter and guarantees the thermal safety of power devices under random thermal convection.

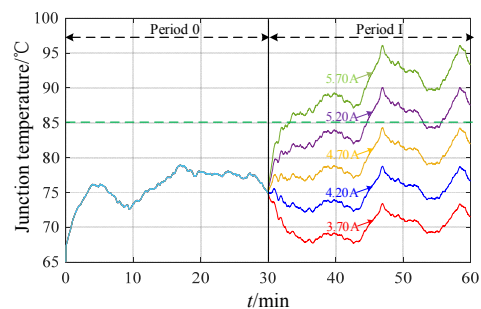


Fig. 4 The experimental results for validation