

## 考虑基频/低频结温影响的光伏逆变器寿命评估方法

张波<sup>1†</sup>, 杨恩泽<sup>1</sup>, 李铁成<sup>2</sup>, 颜湘武<sup>1</sup>

[1. 河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学), 河北保定 071003;  
2. 国网河北省电力有限公司 电力科学研究院, 河北石家庄 050021]

**摘要:** 结温波动是光伏逆变器 IGBT 寿命评估精度的重要影响因素之一。提出了考虑基频/低频结温影响的光伏逆变器寿命评估方法, 首先, 将结温剖面按不同时间尺度进行划分, 对比分析了基频结温和低频结温的物理特性。其次, 扩大 IGBT 寿命评估过程中结温波动频率计算范围, 建立了相应的光伏逆变器 IGBT 电热模型、寿命模型, 定量分析了基频结温、低频结温对光伏逆变器寿命评估的影响。最后, 以不同纬度地区为例, 评估了不同任务剖面 and 不同采样周期下光伏逆变器的寿命损伤。结果表明, 综合考虑基频结温、低频结温对光伏逆变器寿命评估的影响, 可有效提高光伏逆变器寿命评估的精度, 有助于指导光伏逆变器的运行维护, 降低非计划停机造成的经济损失。

**关键词:** 光伏发电; 任务剖面; 基频结温; 低频结温; 寿命评估

**中图分类号:** TM464

**文献标志码:** A

## Lifetime Evaluation Method of PV Inverter Considering the Influence of Fundamental Frequency/Low Frequency Junction Temperature

ZHANG Bo<sup>1†</sup>, YANG Enze<sup>1</sup>, LI Tiecheng<sup>2</sup>, YAN Xiangwu<sup>1</sup>

[1. Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-grid of Hebei Province  
(North China Electric Power University), Baoding 071003, China;  
2. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China]

**Abstract:** IGBT junction temperature fluctuation is one of the important factors affecting the accuracy of IGBT life evaluation of photovoltaic inverters. This paper proposes a lifetime evaluation method for photovoltaic inverters that considers the influence of fundamental frequency/low frequency junction temperature. Firstly, the junction temperature profile is divided into different time scales. The physical characteristics of the fundamental frequency junction temperature and the low frequency junction temperature were compared and analyzed. Secondly, the calculation range of the junction temperature fluctuation frequency in the IGBT lifetime evaluation process was expanded, and the corresponding photovoltaic inverter IGBT electro-thermal model and lifetime model were established to quantitatively analyze the influence of fundamental frequency/low frequency junction temperature on the lifetime evaluation

\* 收稿日期:2021-11-30

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2022502059), Natural Science Foundation of Hebei Province (E2022502059)

作者简介:张波(1981—),男,河北保定人,华北电力大学副教授,硕士生导师

† 通信联系人, E-mail: zhangbo@ncepu.edu.cn

of photovoltaic inverters. Finally, taking different latitude regions as examples, the life damage of photovoltaic inverters under different mission profiles and different sampling periods is evaluated. The results show that the method comprehensively considering the influence of fundamental frequency/low frequency junction temperature can effectively improve the accuracy of lifetime evaluation of photovoltaic inverters, which is helpful to guide the operation and maintenance of photovoltaic inverters, and reduce economic losses caused by unplanned shutdowns.

**Key words:** solar power generation; mission profile; fundamental frequency junction temperature; low frequency junction temperature; lifetime estimation

随着能源产业形势的改变和可再生能源的高速发展,预计到 2025 年,可再生能源发电量将超过煤电成为世界第一大电力来源,占世界发电量的三分之一,其中,太阳能发电占可再生能源新增装机容量的 60%,风能占 30%<sup>[1]</sup>. 光伏逆变器作为可再生能源光伏并网的关键环节<sup>[2]</sup>,其寿命和可靠性受到广泛关注,而功率半导体器件和电容器是影响光伏逆变器寿命的主要因素,二者导致光伏逆变器故障的比例分别高达 34% 与 13.8%<sup>[3]</sup>,因此,对 IGBT 和电容器的寿命评估就显得尤为重要.

已有研究表明,寿命评估是提高光伏逆变器可靠性的关键技术之一. 光伏逆变器的寿命评估与传统电力系统可靠性评估具有明显区别,光伏发电系统中任务剖面和应用场合的不同会导致其寿命评估结果存在较大差异<sup>[4]</sup>,基于泊松分布原理的分析方法不再适用. 因此,在典型工况下准确评估光伏逆变器的预期使用寿命对光伏发电系统的定期计划维护具有重要指导意义.

光伏逆变器的寿命主要受工作环境的影响,目前对 IGBT 结温和电容器热点温度的测量和计算已有一定的研究成果. 文献[5]提出了一种基于电热耦合模型的 IGBT 器件功率损耗与瞬态结温的计算方法,但并未考虑结温变化对功率损耗的影响. 文献[6]提出了一种能够快速计算不同工况、不同调制及均压策略的 IGBT 瞬时功率损耗模型,但并未利用该模型进行相关寿命分析. 文献[7]提出了一种改进的 IGBT 电热模型,指出开关瞬态过程的温度特性主要受内部过剩载流子寿命影响,但此模型仅适用于单一温度的计算,应用场景受限. 文献[8]提出了一种基于查表法的功率器件损耗快速计算方法,考虑了温度耦合、母线电压、栅极电阻等对功率器件损耗的

影响,计算精度高且快速. 文献[9]对光伏逆变器中直流电容器的热模型进行了详细的介绍,并对几种主要类型进行了对比分析. 文献[10]结合任务剖面研究了 3 种逆变器拓扑对功率器件结温的影响,并比较了开关器件的功率损耗,但并未对器件的寿命进行具体评估.

国内外学者针对光伏逆变器的寿命和可靠性已经开展了一系列研究,基于可靠性评估手册的方法一度被广泛应用,但该类方法并未考虑光伏逆变器理论工况与实际工况的差异性,寿命评估结果误差较大<sup>[11]</sup>. 为解决该问题,有学者提出了功率器件的解析寿命模型,基于该类模型的寿命评估方法逐渐成为研究热点<sup>[12]</sup>. 文献[13]评估了风电变流器中 IGBT 和二极管在机侧和网侧的寿命消耗情况,并对 IGBT 模块结温的迭代方法做了介绍,但并未阐明不同时间尺度结温在具体定义和提取方法方面的差异. 文献[14]和[15]提出了一种基于任务剖面的光伏逆变器限功率控制策略,考虑了不同地点太阳辐照度和环境温度差异对光伏逆变器寿命的影响,但其寿命评估模型仅考虑了低频结温的影响,预测结果存在较大误差. 文献[16]对 2 MW 风机变流器进行了寿命评估,但仅考虑了短时间任务剖面,未计及复杂长时间任务剖面的影响,其评估方法有一定局限性.

针对当前光伏逆变器寿命评估中存在的问题,本文分析长时间任务剖面下基频/低频结温的波动特性,揭示基频/低频结温对光伏逆变器寿命评估的影响机理,建立 IGBT 和电容器的电热模型和寿命模型,提出考虑基频/低频结温影响的光伏逆变器寿命评估方法,分析基频结温在寿命评估中的重要性,并以不同纬度地区为例,比较不同任务剖面 and 不同采样周期对光伏逆变器寿命评估的影响,并验证所提出方法的有效性.

# 1 常规寿命评估方法

## 1.1 光伏逆变器寿命评估流程

典型单相光伏发电系统一般为两级拓扑结构,如图1所示.前级为DC-DC升压变换器,实现光伏发电(Photovoltaic,PV)输出电压的抬升和光伏的最大功率跟踪;后级为DC-AC全桥逆变器,实现功率输出和并网控制.

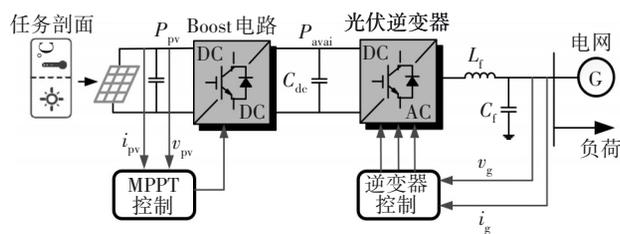


图1 光伏系统配置和控制结构

Fig.1 System configuration and control structure of PV system

光伏逆变器作为光伏发电系统的关键部件,其故障可能导致整个光伏发电系统的崩溃.制造商提供的光伏逆变器寿命一般设计为20年,但研究发现,由于安装地点和使用环境的差异性,光伏逆变器的使用寿命可能大大缩减,光伏发电系统整体可靠性严重下降.此外,在光伏电站建设中,光伏逆变器的初始成本仅占总投资的10%~20%,而故障维护相关的成本占比可高达总成本的59%<sup>[17]</sup>,可见由光伏逆变器核心器件可靠性降低造成的更换和维护成本远远高于其初始成本.因此,实现对光伏逆变器寿命的精确评估对光伏发电系统的可靠性、经济运行至关重要.

光伏逆变器寿命评估流程如图2所示,主要涉及三个方面:

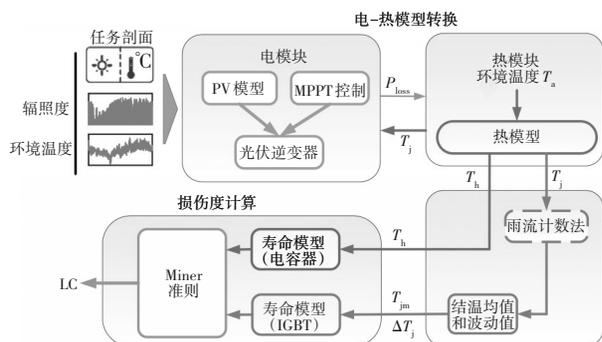


图2 光伏逆变器寿命评估流程

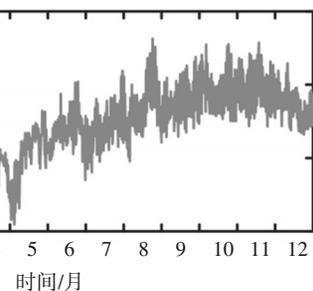
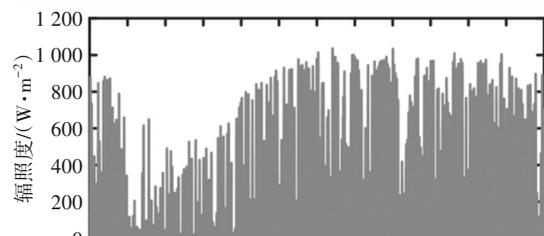
Fig.2 Lifetime evaluation process of PV inverter

- 1)提取太阳辐照度和环境温度的任务剖面;
- 2)分别建立关于IGBT和电容器的损耗模型和热模型,将所提取的任务剖面转化为器件的热载荷剖面;
- 3)建立寿命模型,基于热载荷剖面对IGBT和电容器进行损伤度计算和寿命评估.

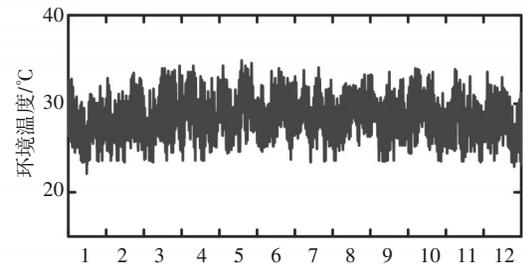
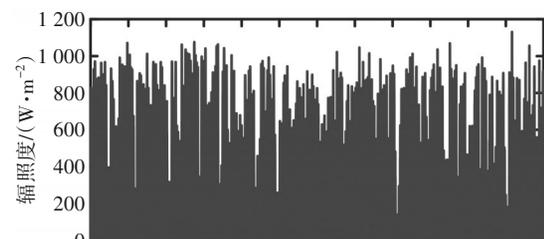
## 1.2 任务剖面的提取

任务剖面是系统运行状态的重要表征因素,作为影响光伏发电系统出力的核心因素,太阳辐照度和环境温度被视为光伏发电系统的任务剖面.

分别提取高纬度地区(丹麦)和低纬度地区(马来西亚)的年度任务剖面,每个样本采样周期为1 min,如图3所示.



(a)丹麦



(b)马来西亚

图3 年度任务剖面

Fig.3 Location yearly mission profile

由提取的任务剖面可知,马来西亚全年平均太阳辐照度水平较高,且全年温度高、温差小,基本保持在 25 °C 左右波动.与马来西亚情况不同,丹麦 2 月份到 4 月份的平均太阳辐照度水平相对较低,全年太阳辐照度并不均衡;就环境温度而言,丹麦一年中夏季温度高达 32.5 °C,冬季温度低至 -18 °C,全年温差十分明显.考虑上述地区任务剖面差异性,本文对该地区内同型号光伏逆变器进行寿命评估对比,分析任务剖面对光伏逆变器寿命的影响.

### 1.3 电热模型的转换

任务剖面是光伏逆变器寿命预测和可靠性评估的重要组成部分,将任务剖面(即太阳辐照度和环境温度)导入光伏发电系统的仿真模型,得到光伏逆变器的输出电流剖面,将其应用于 IGBT 的功率损耗模型,最终得到 IGBT 的功率损耗  $P_{\text{loss},s}$ .由于结温与 IGBT 的功率损耗有关,利用 IGBT 的电热模型将器件功率损耗剖面进行转换,得到 IGBT 的结温剖面  $T_j^{[18]}$ .

同理,由光伏逆变器直流母线纹波电流和电容器等效串联电阻,可确定电容器的功率损耗  $P_{\text{loss},c}$ ,进而利用  $P_{\text{loss},c}$  计算出电容器的热点温度  $T_h^{[19]}$ .

鉴于 IGBT 和电容器的功率损耗模型、热模型相关建模方法研究<sup>[18-19]</sup>较为成熟,此处不再赘述.

### 1.4 寿命模型

#### 1.4.1 IGBT 寿命模型

解析寿命模型描述了失效循环次数  $N_f$  对温度循环参数的依赖关系,由比较常见的解析寿命模型可知, Coffin-Manson 模型、Lesit 模型只考虑单一变量(结温)对 IGBT 寿命的影响,预测精度较低; Bayerer 模型是通过对 Infineon 第四代不同功率等级的 IGBT 模块进行大量功率循环实验得到的,其包含变量多,考虑参数全面,计算精度更高<sup>[20-21]</sup>.因此,本文选取 Bayerer 模型进行寿命评估,该模型可表示为:

$$N_f = A (\Delta T_j)^{\beta_1} e^{\beta_2 / (T_{j\min} + 273K)} t_{\text{on}}^{\beta_3} I^{\beta_4} V^{\beta_5} D^{\beta_6} \quad (1)$$

式中:  $\Delta T_j$  为结温波动;  $T_{j\min}$  为最小结温;  $t_{\text{on}}$  为功率循环的加热时间;  $I$  为键合线通过的电流;  $D$  为键合线直径;  $V$  为阻塞电压;  $A, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$  为 Bayerer 模型参数.详细参数取值如表 1 所示.

通常,寿命损伤度(Lifetime Consumption, LC)用来表示描述功率器件的寿命损耗情况, Miner 线性累积损伤准则认为每个温度循环均会对器件造成损伤,且损伤呈线性累积,当 LC 累积损伤超过 1 时,认为元件失效<sup>[22]</sup>.

功率器件的累积损伤度表达式为:

$$LC = \sum_i \frac{n_i}{(N_f)_i} \quad (2)$$

式中:  $n_i$  为热载荷作用下的温度循环次数;  $(N_f)_i$  为寿命模型计算得到的失效循环次数.

表 1 Bayerer 模型参数

Tab.1 Bayerer's model parameters

参数	数值
技术因子 $A$	$9.34 \times 10^{14}$
加热时间 $t_{\text{on}}/s$	$1 \leq t_{\text{on}} \leq 15$
每个键合线电流 $I/A$	3 ~ 23
阻塞电压 $V/V$	6 ~ 33
键合线直径 $D/\mu\text{m}$	75 ~ 500
参数 $\beta_1 \sim \beta_3$	{-4.416, 1285, -0.463}
参数 $\beta_4 \sim \beta_6$	{-0.716, -0.761, -0.5}

#### 1.4.2 电容器寿命模型

解析寿命模型在电容器寿命预测、在线状态监测等方面具有重要意义.式(3)为目前广泛应用的电容器寿命模型,计及热载荷和电压的影响<sup>[23]</sup>.

$$L = L_0 \times \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-n} \times \exp\left[\left(\frac{E_a}{K_B}\right)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (3)$$

式中:  $L$  和  $L_0$  分别为实际工况和试验条件下电容器的寿命;  $V$  和  $V_0$  分别为实际工况和试验条件下的电压;  $T$  和  $T_0$  分别为实际工况和试验条件下的温度;  $E_a$  为电容器的活化能;  $K_B$  为玻尔兹曼常数;  $n$  为电压应力指数.

工程中,电容器的寿命模型可简化为:

$$L = L_0 \times \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-n} \times 2^{\frac{T_0 - T}{10}} \quad (4)$$

电容器的寿命累积损伤度计算与 IGBT 相同,均采用 Miner 线性累积损伤准则,则电容器的寿命损耗 LC 可表示为:

$$LC = \sum_i \frac{l_i}{l_{fi}} \quad (5)$$

式中:  $l_i$  为不同电压  $V$  和热点温度  $T$  下电容器的运行时间;  $l_{fi}$  为热载荷对应的失效时间.

## 2 基频/低频结温影响下的 IGBT 寿命评估

### 2.1 基频/低频结温

在传统的光伏逆变器寿命评估过程中,仅考虑了功率器件低频结温均值和结温波动值,而忽略了其中频率较高的基频结温的影响,造成寿命评估结

果存在理论误差.因此,本文综合考虑功率器件基频和低频结温对光伏逆变器寿命的影响,以提高光伏逆变器寿命的评估精度.

图4为IGBT基频/低频结温示意图,IGBT的热载荷剖面按时间尺度划分,可分为低频、基频和开关频率3种情况.不同频率下结温对光伏逆变器评估寿命的影响机理并不相同.低频结温主要受任务剖面的影响,当太阳辐照度和环境温度发生变化时,器件结温呈一个缓慢上升然后趋于稳定的过程,若变化前稳态结温为 $T_{jm1}$ ,变化后稳态结温为 $T_{jm2}$ ,则低频结温为变化前后稳态结温的平均值 $T_{jm}$ ,此时忽略了结温变化过程中结温的波动,其中 $t_{on}$ 为一个低频结温周期,一般为几十秒到几百秒.而基频结温主要受系统运行频率影响, $t'_{on}$ 为一个基频结温周期,一般为几十毫秒到几百毫秒,且频率越高其波动值越小, $\Delta T_{j1}$ 、 $\Delta T_{j2}$ 为基频结温的波动值.可见,基频结温相对于低频结温波动幅度较小,但波动频率较高,循环次数较多,其对应的累积损伤度会对光伏逆变器的寿命评估结果产生一定的影响.IGBT开关频率相较于低频和基频而言其频率更高,波动幅度极小,故可忽略不计.

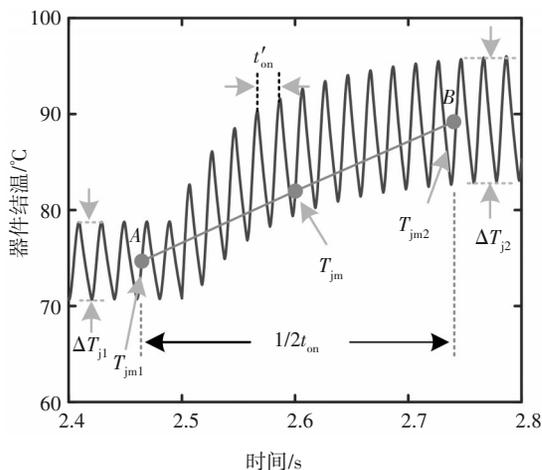


图4 IGBT基频/低频结温示意图

Fig.4 Schematic diagram of IGBT fundamental / low frequency junction temperature

## 2.2 IGBT 寿命评估方法

同时考虑IGBT基频/低频结温的影响,对传统的光伏逆变器寿命评估方法进行改进,将由IGBT电热模型得到的结温剖面进行时间尺度上的划分,进而实现IGBT寿命精准评估,其寿命评估原理图如图5所示.IGBT的低频结温利用雨流计数法<sup>[24]</sup>进行提

取,得到寿命模型所需的结温均值、波动值和循环次数,而基频结温的均值、波动值以及循环次数可直接从结温剖面上获取,然后分别计算二者对IGBT寿命评估的影响.光伏逆变器中IGBT的总损伤度为低频累计损伤度和基频累计损伤度之和.

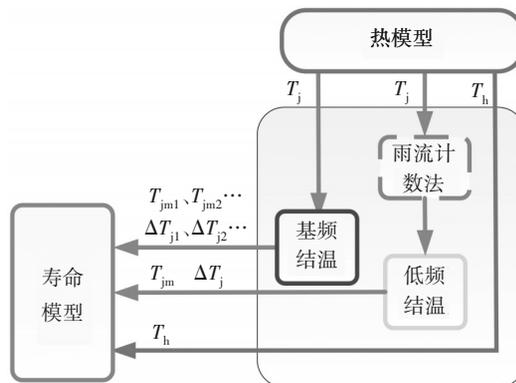


图5 考虑基频/低频结温影响的寿命评估原理图

Fig.5 Schematic diagram of life evaluation considering fundamental / low frequency junction temperature

IGBT基频累积损伤度:基频结温的累积损伤受采样周期的影响,假设太阳辐照度和环境温度的采样周期为 $m$ (单位:min/采样点),则每 $m$ 分钟的使用寿命损伤度为年寿命损伤度的一个累计单元,对Miner线性累积损伤准则进行改进如下:

$$LC = \sum_i \frac{50 \times 60m}{(N_f)_i} \quad (6)$$

Bayerer模型中功率循环的加热时间为1~15 s,而基频结温的周期为0.02 s,因此加热时间需要设为0.01 s(即 $t'_{on}/2$ ),为了将加热时间的适用范围扩大至0.01~60 s,引入变换式

$$\frac{N_f(t_{on})}{N_f(1.5s)} = \left( \frac{t_{on}}{1.5s} \right)^{-0.3} \quad (7)$$

式中: $N_f(t_{on})$ 为实际加热时间下的失效循环次数; $N_f(1.5s)$ 为加热时间1.5 s的失效循环次数.

在进行基频累计损伤度计算时,首先计算功率循环加热时间为1.5 s时IGBT的寿命损伤度,并以此为基准,利用式(7)对不同功率循环的加热时间进行求解,然后利用式(6)将结温剖面所有的基频损伤度累加,得到基频结温累计损伤度.

IGBT低频累积损伤度:结温剖面中结温均值与时间的关系是随机的,不易直接应用于寿命模型,需将不规则的结温波动转换为一系列有规律的热循环,利用雨流计数法获得低频结温均值、结温波动值

与循环次数的关系,将该结果代入式(1)得到失效循环次数,然后利用式(2)计算低频结温对应的累积损伤度.

由于 Bayerer 模型未包含基板间焊点的寿命,仅考虑键合线损伤,因此最大加热时间  $t_{on}$  被限制为 60 s. 基于黏塑性变形饱和假设,若加热时间大于 60 s,则仍按 60 s 计算<sup>[25]</sup>.

### 3 光伏逆变器寿命评估方法的应用

#### 3.1 长时间任务剖面转换及热循环提取

以高纬度地区(丹麦)和低纬度地区(马来西亚)两地的任务剖面为例,综合考虑 IGBT 基频/低频结温的影响,对光伏逆变器寿命进行综合评估.

光伏逆变器中功率器件选用 Infineon 公司的 IGBT 模块 FF100R12RT4, 直流电容器选用 EPCOS 公司的 B43630A5827. 具体参数见文献[26-27]中附录 A 表 A1~表 A4.

将提取到的太阳辐照度和环境温度数据导入光伏发电系统仿真模型,得到光伏逆变器的输出电流  $i_c$ , 然后利用 IGBT 和电容器的电热模型并结合给定的器件参数得到相应的热载荷剖面. IGBT 结温和电容器热点温度分别如图 6 和图 7 所示.

由图 6 和图 7 可见,在高纬度地区,光伏逆变器运行于高结温状态的时间较短,有利于系统长寿命可靠运行;相反,在低纬度地区,光伏逆变器将长时间运行于高结温状态,对光伏逆变器的寿命损伤明显.

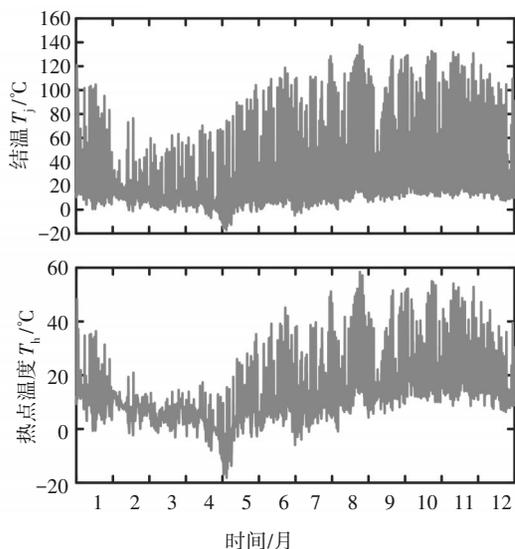


图 6 IGBT 结温和电容器热点温度(丹麦)

Fig.6 IGBT junction temperature and capacitor hot spot temperature(Denmark)

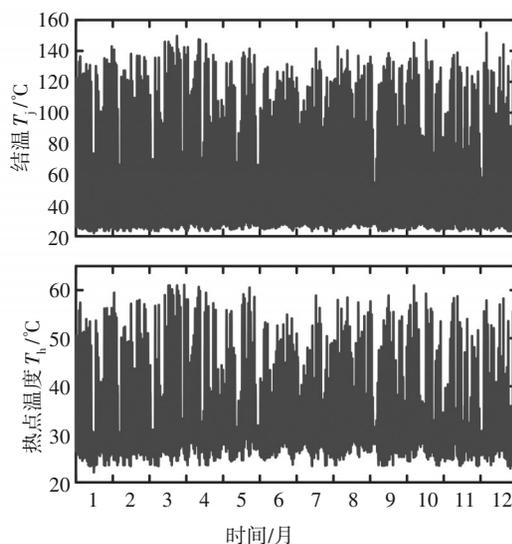


图 7 IGBT 结温和电容器热点温度(马来西亚)

Fig.7 IGBT junction temperature and capacitor hot spot temperature (Malaysia)

由功率器件失效机理可知,IGBT 寿命与热循环均值、次数、波动幅值紧密相关,因此,需对结温剖面进行热循环提取,利用雨流计数法将结温剖面转化为寿命模型需要的结温均值  $T_{jm}$ 、结温波动值  $\Delta T_j$  和循环次数  $n_i$ , 如图 8 所示. 由雨流计数法原理可知,其忽略了较多高频结温波动,直接利用雨流计数法提取的热循环属于低频结温范畴,无法体现功率器件基频结温对功率器件寿命的影响.

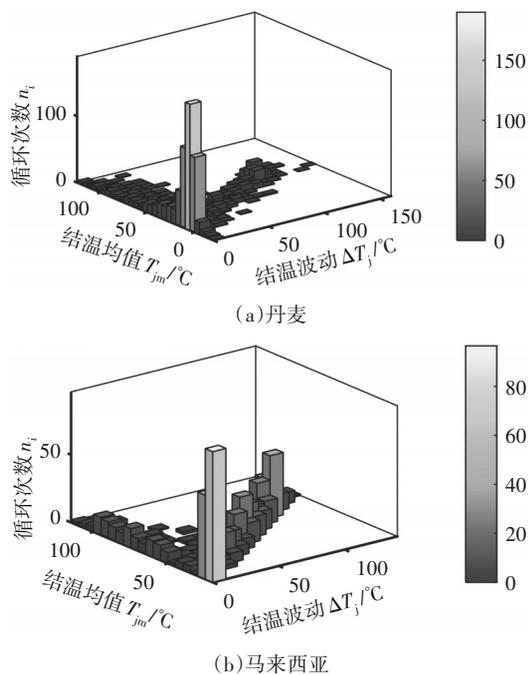


图 8 不同纬度地区雨流计数结果

Fig.8 Rain flow counting results in different latitudes

IGBT的基频结温可直接从结温剖面中提取,其提取示意图如图9所示.在IGBT结温剖面中,每个工频周期(0.02 s)提取一组热循环参数,包括结温均值 $T_{jm}$ 和波动值 $\Delta T_j$ .若采样周期为1 min,则一个采样周期内提取到3 000组结温均值和波动值,近似认为每个采样周期内太阳辐照度和环境温度保持不变,则每个工频周期内各组结温均值和波动值基本相同,由式(1)可得该采样周期对应的失效循环次数,进而结合式(6)计算出该采样周期内的寿命损伤度.

图10为一整年的基频结温提取结果,共525 600个工况,根据基频累计损伤模型对每个采样周期的寿命损伤进行累加,可得基频结温对应的年寿命损伤度.

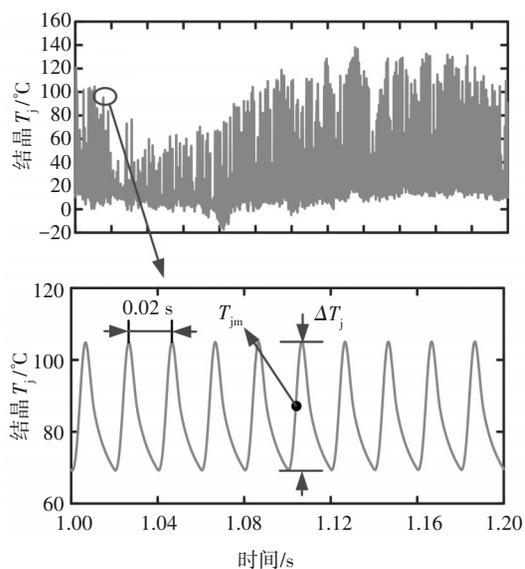
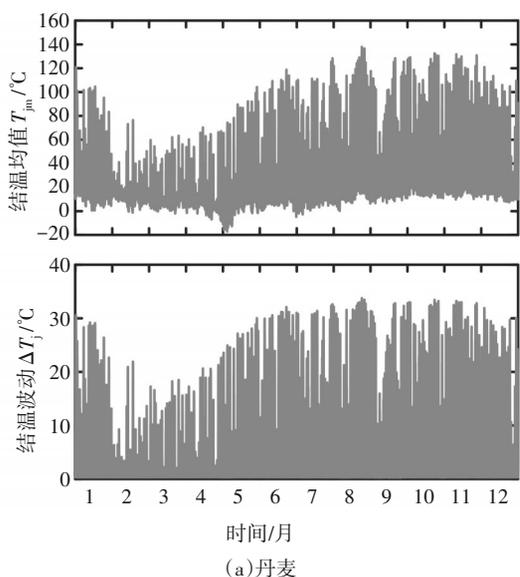
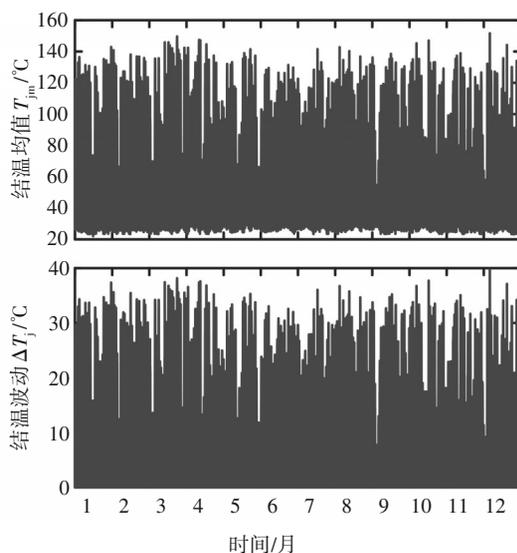


图9 基频结温提取示意图

Fig.9 Schematic diagram of fundamental frequency junction temperature extraction



(a)丹麦



(b)马来西亚

图10 基频结温的提取

Fig.10 Extraction of fundamental frequency junction temperature

### 3.2 寿命评估影响因素分析

根据3.1节所述方法计算得到基频/低频结温对应的IGBT寿命损伤度 $LC_{IGBT}$ ,由式(4)、式(5)计算电容器寿命损伤度 $LC_{CAP}$ .由于系统的寿命取决于内部最薄弱的环节(即损伤度最大),因此光伏逆变器的寿命损伤度可表示为:

$$LC = \max \{LC_{IGBT}, LC_{CAP}\} \quad (8)$$

对光伏逆变器中IGBT和电容器的年损伤度进行比较,如表2所示.可见,器件的使用寿命可能高于商家给定的参考值,这是由于在实际光伏发电系统中,受温度、电压以及使用时间等因素的影响,器件的寿命可能会存在一定差异,但也在合理范围内<sup>[15]</sup>.此外,在纬度相同情况下,IGBT的损伤度较电容器更高,因此把IGBT的寿命损伤度用于光伏逆变器的寿命评估.

表2 不同地区任务剖面下的寿命评估对比

Tab.2 Comparison of life assessment under mission profiles in different regions

地区	IGBT			电容 寿命/年	寿命/年
	基频 损伤度	低频 损伤度	总损 伤度		
丹麦	0.021 0	0.013 5	0.034 5	29	47
马来西亚	0.037 5	0.021 3	0.058 8	17	21

由表2可知,相同的光伏逆变器在高纬度地区寿命评估值为29年,但在低纬度地区其寿命评估值

仅为 17 年,表明任务剖面对光伏逆变器的评估寿命有很大的影响,随着纬度的升高,光伏逆变器的寿命评估值下降明显。

在丹麦 IGBT 基频结温损伤度为 0.021 0, 占总损伤度 60.87%; 在马来西亚 IGBT 基频结温损伤度为 0.037 5, 占总损伤度的 63.78%。可见,基频结温对 IGBT 的寿命损伤十分明显,甚至高于低频结温的影响,为使寿命评估结果更加精确,应考虑基频结温影响。

为了分析采样周期对光伏逆变器寿命评估的影响,以丹麦为例,利用相同的 Bayerer 解析寿命模型,分别选取 1 min、30 min 和 60 min 的采样周期对应的任务剖面进行分析,结果如表 3 所示,寿命评估结果与文献[13]在同一数量级,证明了光伏逆变器寿命评估的有效性。可见,基频结温和低频结温均对 IGBT 的寿命有较大的影响,随着采样周期的增加,IGBT 的损伤度呈明显下降趋势。究其原因,主要是长时间采样周期对应的任务剖面忽略了较多高频率的温度波动,导致对 IGBT 年损伤度的低估,造成过于乐观的可靠性估计,不利于光伏逆变器寿命的精确评估。

表 3 不同采样周期下的寿命评估对比

Tab.3 Comparison of lifetime evaluation under different sampling periods

算法	$t/\text{min}$	基频 损伤度	低频 损伤度	总损 伤度	寿命/年
	1	0.028 2	0.020 7	0.048 9	20.45
Bayerer	30	0.026 1	0.017 6	0.043 7	22.88
	60	0.021 0	0.013 5	0.034 5	28.99

综上所述,功率器件基频结温对光伏逆变器的寿命评估影响较大,甚至高于低频结温的影响,在光伏逆变器寿命评估中应予以考虑。此外,光伏逆变器工作纬度的不同以及采样周期的差异都会对光伏逆变器的寿命评估结果造成影响,且太阳辐照度和环境温度越高,采样周期越小,所得到的寿命损伤度越大,对应的寿命评估值越小。

## 4 结 语

为了给光伏逆变器可靠运行提供有效的理论依据,本文提出了一种考虑基频/低频结温影响的光伏逆变器寿命评估方法,建立了光伏逆变器中 IGBT 和电容器的电热模型和寿命模型,揭示了基频/低频结

温对光伏逆变器寿命评估的影响机理,通过案例分析表明考虑基频/低频结温影响有助于提高光伏逆变器寿命评估准确性。主要结论如下:

1) 基频/低频结温均会对光伏逆变器的寿命评估产生重要影响,基频结温的影响更大,为使光伏逆变器的寿命评估结果更加准确,基频结温的影响不可忽略。

2) 光伏逆变器寿命受其工作地区纬度的影响,随着工作地区纬度的升高,光伏逆变器的寿命评估值下降明显。

3) 采样周期的不同会对光伏逆变器的寿命评估产生一定影响,随着采样周期增大,所得到的寿命损伤度相应降低,寿命评估值随之增大。

## 参考文献

- [1] International Energy Agency. Renewable capacity statistics 2020 [R], Abu Dhabi: IEA, 2020: 1-11.
- [2] 吴文韬. 改进型 Y 源逆变器关键器件的寿命预测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 33-38.  
WU W T. Research on lifetime prediction of critical components in modified Y-source inverter[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 33-38. (In Chinese)
- [3] BOSE B K. Global warming: energy, environmental pollution, and the impact of power electronics [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2010, 4(1): 6-17.
- [4] 张军, 张犁, 成渝. IGBT 模块寿命评估研究综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2560-2575.  
ZHANG J, ZHANG L, CHENG Y. Review of the lifetime evaluation for the IGBT module[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2560-2575. (In Chinese)
- [5] 王希平, 李志刚, 姚芳. 模块化多电平换流阀 IGBT 器件功率损耗计算与结温探测[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1636-1646.  
WANG X P, LI Z G, YAO F. Power loss calculation and junction temperature detection of IGBT devices for modular multilevel valve [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1636-1646. (In Chinese)
- [6] 李探, 尹诗媛, 姚志, 等. 构建虚拟桥臂数学模型的 MMC 阀损耗快速计算方法研究[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4509-4516.  
LI T, YIN S Y, YAO Z, et al. Power loss calculation for MMC valves on virtual arm mathematical model[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4509-4516. (In Chinese)
- [7] 唐勇, 汪波, 陈明. IGBT 开关瞬态的温度特性与电热仿真模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 146-153.  
TANG Y, WANG B, CHEN M. Temperature characteristics and electric-thermal model of IGBT switching transient [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 146-153. (In Chinese)

- [8] 姚芳,王少杰,李志刚. 逆变器中 IGBT 功率模块的电热联合仿真模型[J]. 半导体技术, 2016, 41(6): 440-445.  
YAO F, WANG S J, LI Z G. Dynamic electro-thermal simulation model of inverter IGBT power module[J]. *Semiconductor Technology*, 2016, 41(6): 440-445. (In Chinese)
- [9] WANG H, BLAABJERG F. Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters—an overview [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, 50(5): 3569-3578.
- [10] YANG Y H, WANG H, BLAABJERG F, *et al.* Mission profile based multi-disciplinary analysis of power modules in single-phase transformerless photovoltaic inverters [C]//2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). Lille, France: IEEE, 2013: 1-10.
- [11] HIRSCHMANN D, TISSEN D, SCHRODER S, *et al.* Reliability prediction for inverters in hybrid electrical vehicles [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(6): 2511-2517.
- [12] 祝勇俊, 孙权, 朱其新, 等. 基于维纳过程的光伏逆变器寿命评估方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(20): 115-119.  
ZHU Y J, SUN Q, ZHU Q X, *et al.* A lifetime evaluation method based on Wiener process for PV inverter [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(20): 115-119. (In Chinese)
- [13] 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 X, LI G X, LI T F, *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)
- [14] D'ARCO S, UNDELAND T M, BOHLLÄNDER M, *et al.* A simplified algorithm for predicting power cycling lifetime in Direct Drive wind power systems [C]//International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices. Chemnitz, Germany: IEEE, 2012: 1-6.
- [15] SANGWONGWANICH A, YANG Y H, SERA D, *et al.* Mission profile-oriented control for reliability and lifetime of photovoltaic inverters [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(1): 601-610.
- [16] FUCHS F, MERTENS A. Steady state lifetime estimation of the power semiconductors in the rotor side converter of a 2 MW DFIG wind turbine via power cycling capability analysis [C]//Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications. Birmingham, UK: IEEE, 2011: 1-8.
- [17] SANGWONGWANICH A, YANG Y H, SERA D, *et al.* On the impacts of PV array sizing on the inverter reliability and lifetime [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(4): 3656-3667.
- [18] REIGOSA P D, WANG H, YANG Y H, *et al.* Prediction of bond wire fatigue of IGBTs in a PV inverter under a long-term operation [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(10): 7171-7182.
- [19] YANG Y H, MA K, WANG H, *et al.* Mission profile translation to capacitor stresses in grid-connected photovoltaic systems [C]//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2014: 5479-5486.
- [20] ZHANG Y, WANG H, WANG Z X, *et al.* Mission profile-based system-level reliability prediction method for modular multilevel converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(7): 6916-6930.
- [21] BAYERER R, HERRMANN T, LICHT T, *et al.* Model for Power Cycling lifetime of IGBT Modules – various factors influencing lifetime [C]//5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. Nuremberg, Germany: VDE, 2008: 1-6.
- [22] 刘悦遐, 黄萌, 刘懿, 等. 基于任务剖面的光伏逆变器综合寿命预测[J]. 太阳能学报, 2019, 40(10): 2789-2796.  
LIU Y X, HUANG M, LIU Y, *et al.* Integrated lifetime prediction of pv inverters based on mission profile [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2019, 40(10): 2789-2796. (In Chinese)
- [23] ZHOU D, SONG Y P, LIU Y, *et al.* Mission profile based reliability evaluation of capacitor banks in wind power converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(5): 4665-4677.
- [24] MUSALLAM M, JOHNSON C M. An efficient implementation of the rainflow counting algorithm for life consumption estimation [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2012, 61(4): 978-986.
- [25] HE J K, SANGWONGWANICH A, YANG Y H, *et al.* Lifetime evaluation of three-level inverters for 1500-V photovoltaic systems [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(4): 4285-4298.
- [26] Infineon. Datasheet F100R12RT4[EB/OL]. (2013-11-05). [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF100R12RT4-DS-v02\\_01-EN.pdf?fileId=db3a304327b8975001280601349b615b](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF100R12RT4-DS-v02_01-EN.pdf?fileId=db3a304327b8975001280601349b615b).
- [27] Epcos. Datasheet B43630A5827M060[EB/OL]. (2015-10-15). <https://www.findic.com/jiage/b43630a5827m060-MLNpGJK0z.html>.