

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209422

基于 Markov 链的光电转换系统可靠性评估与应用

周海涛 缪书唯

(三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002)

摘要: 光电转换系统可靠性评估可为光伏电站规划提供有价值参考。为此,本文提出基于 Markov 链的光电转换系统可靠性评估模型,该模型应用经验准则划分温度-辐照状态并构建其 Markov 链,再使用应力分析法计算光电转换系统故障率,而后形成光电转换系统故障率 Markov 链。据此,计算光电转换系统平均故障率等可靠性指标,定义光电转换系统平均故障率的温度和辐照弹性系数,用于量化光电转换系统平均故障率对两类气象因素的灵敏度关系。收集美国 North Dakota 州多处观测站的实测温度和辐照数据,评估某光电转换系统在不同观测站的可靠性指标,结果表明,低纬度观测站的光电转换系统平均故障率较高,且光电转换系统平均故障率的辐照弹性系数高于温度弹性系数,光电转换系统平均故障率对辐照更敏感。

关键词: Markov 链;故障率;光电转换系统;可靠性评估;弹性系数

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4047

Reliability assessment and application of photoelectric conversion system based on Markov chain

Zhou Haitao Miao Shuwei

(College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Reliability assessment of photoelectric conversion system can provide valuable reference for photovoltaic power station planning. Hence, this paper proposes a reliability assessment model of photoelectric conversion system based on Markov chain, which applies empirical criteria to classify temperature-irradiation state and construct its Markov chain, and then uses stress analysis method to calculate the failure rate of photoelectric conversion system, and then forms the Markov chain of photoelectric conversion system failure rate. Accordingly, the reliability indexes such as average failure rate of photoelectric conversion system are calculated, and the elastic coefficients of temperature and irradiation on the average failure rate of photoelectric conversion system are defined, which to quantify the sensitivity relationship between two meteorological factors on average the failure rate of photoelectric conversion system. Collecting the measured temperature and irradiation data of several observation stations in North Dakota, and evaluating the reliability index of a photoelectric conversion system at different observation stations. The results show that the average failure rate of the photoelectric conversion system at low latitude observation stations is higher, and irradiation elasticity coefficient for the average failure rate of the photoelectric conversion system is higher than temperature elasticity coefficient, the average failure rate of the photoelectric conversion system is more sensitive to irradiation than temperature.

Keywords: Markov chain; failure rate; photovoltaic conversion system; reliability assessment; elastic coefficients

0 引言

全球各国正积极开发各类可再生能源,用于应对化石能源危机、温室效应等环境问题。在众多可再生能源中,太阳能具有可再生、分布广和低碳等优点,加之各国出台相关

鼓励政策,使得光伏行业迅猛发展。截止 2020 年底全球光伏累计装机容量达到 707 GW^[1],其中,中国光伏累计装机容量 253 GW,占比 35.8%^[2]。

光电转换系统是将太阳能转换为清洁电能的重要装置,典型光电转换系统主要由光伏阵列、Boost 转换器、DC-

AC 逆变器和滤波器组成^[3],其中光伏逆变器的运行可靠性是影响整个光伏系统性能最关键因素之一^[4]。光电转换系统常布置在太阳能富集地区,该地区的温度和辐照度随机变化会影响系统内部电力电子元件的可靠工作,进而影响系统整体故障率,因而计及气象因素对光电转换系统的影响,评估光电转换系统可靠性尤为重要。

现有文献采用 Monte Carlo 模拟和 Markov 链等方法计及气象随机性,进而评估气象因素对光电转换系统可靠性的影响。例如,文献[5]提出计及气候变化的光伏发电系统可靠性评估模型,应用 Monte Carlo 模拟和 Markov 链方法对两个气候模型进行研究,表明光伏发电系统可靠性随着气候变化而显著下降。文献[6]计及气象因素对光伏逆变器寿命影响,应用寿命模型评估某地区温度和辐照对光伏逆变器寿命的影响,表明辐照增加会缩减逆变器的寿命。文献[7]和[8]计及任务剖面尺度和采集频率对评估光伏逆变器寿命的影响,表明任务剖面尺度和采集频率越大逆变器寿命评估越准确。文献[9]提出计及气象和光伏系统结构的光伏系统时变故障率模型,表明月故障率与传统年故障率有显著差异。文献[10]提出光伏并网发电系统可靠性评估方法,并定义多组可靠性指标来量化光伏系统的可靠性性能。文献[11]基于故障树理论建立光伏电站的可靠性评估模型,分析逆变器关键部件的热特性对光伏电站可靠性的影响。文献[12]基于连续时间 Markov 链的光伏组件可靠性模型,用于计算各故障率故障模式发生的概率,据此估计平均故障间隔时间、组件故障间隔时间的概率密度函数、风险函数和组件的生存函数。文献[13]提出计及太阳辐射的光伏电站可靠性模型,应用 IEEE-RBTS 测试系统分析光伏电站可靠性模型对发电系统运行可靠性的影响,表明当光伏电站容量上升后,期望缺电频率表现为先增大后减小的规律。文献[14]提出计及太阳能资源特性和组件故障的 Markov 链模型,从能量、时间和频率的角度定义并评估太阳能发电的 3 个发电性能指标。

上述文献分析多类气象因素对光伏发电系统可靠性的影响,为光电转换系统可靠性研究提供宝贵经验,但鲜有研究建立光电转换系统故障率 Markov 链,描述温度-辐照随机性对光电转换系统可靠性的影响。为此,本文提出基于 Markov 链的光电转换系统可靠性评估方法,其主要步骤为:1)应用经验准则划分多组温度-辐照状态,建立温度-辐照 Markov 链;2)计算各温度-辐照状态下光电转换系统内部元件的功率损耗及其温升,结合应力分析法和可靠性串并联关系,得出光电转换系统内部各元件及系统的故障率;3)将步骤 2)中光电转换系统故障率模型嵌入步骤 1)中温度-辐照 Markov 链,形成光电转换系统故障率 Markov 链,据此定义并计算系统平均故障率及其对温度和辐照弹性系数等可靠性指标,量化温度和辐照对光电转换系统可靠性的影响,分析地理位置、温度和辐照对光电转换系统可靠性指标的影响。

1 温度-辐照 Markov 链模型

记 $(t_1, r_1), (t_2, r_2), \dots, (t_s, r_s), \dots, (t_N, r_N)$ 为 N 组实测温度-辐照数据,其中 (t_s, r_s) 为第 s ($s=1, 2, \dots, N$) 组实测温度-辐照数据。基于文献[15]和[16]中通用热气候指数的温度划分准则,可将 N 组温度数据划分为 10 组温度状态,各温度状态的区间和描述如表 1 所示,其中以符号 T_i 表示温度状态 i 的代表值,即为该温度状态下所有实测温度数据的平均值,其中 $i=1, 2, \dots, 10$ 为温度状态编号, T_i 随着温度状态的增大而增大。

表 1 温度状态划分标准^[15-16]

温度区间/°C	温度状态	描述	温度区间/°C	温度状态	描述
$(-\infty, -40]$	1	极强冷应力	$(9, 26]$	6	无热应力
$(-40, -27]$	2	很强冷应力	$(26, 32]$	7	较强热应力
$(-27, -13]$	3	强冷应力	$(32, 38]$	8	强热应力
$(-13, 0]$	4	较强冷应力	$(38, 46]$	9	很强热应力
$(0, 9]$	5	轻微冷应力	$(46, +\infty]$	10	极强热应力

类似地,应用文献[17]中室内场所照度等级的划分准则和文献[18]中照度与辐照的转换关系,可得出表 2 辐照状态划分标准,据此可将 N 组辐照数据划分为 13 组辐照状态,各辐照状态的区间和描述如表 2 所示,其中以符号 R_j 表示辐照状态 j 的代表值,即为该辐照状态下所有实测辐照数据的平均值,其中 $j=1, 2, \dots, 13$ 为辐照状态编号, R_j 随着辐照状态的增大而增大。

表 2 辐照状态划分标准

辐照区间/ (W/m ²)	辐照状态	描述	辐照区间/ (W/m ²)	辐照状态	描述
$[0, 17)$	1	辐照 1 级	$[172, 259)$	8	辐照 8 级
$[17, 26)$	2	辐照 2 级	$[259, 431)$	9	辐照 9 级
$[26, 43)$	3	辐照 3 级	$[431, 647)$	10	辐照 10 级
$[43, 65)$	4	辐照 4 级	$[647, 862)$	11	辐照 11 级
$[65, 86)$	5	辐照 5 级	$[862, 1\ 293)$	12	辐照 12 级
$[86, 129)$	6	辐照 6 级	$[1\ 293, +\infty)$	13	辐照 13 级
$[129, 172)$	7	辐照 7 级	—	—	—

至此,根据表 1 和 2,可将实测温度-辐照数据划分为至多 $10 \times 13 = 130$ 组温度-辐照状态,这些状态记为 $(1, 1), \dots, (i, j), \dots, (10, 13)$,其中 (i, j) 为温度和辐照分别属于第 i 组温度状态和第 j 组辐照状态。根据实测数据的温度-辐照状态划分结果,可计算各组状态间的转移率,计算式如下^[14]:

$$\mu_{[(i,j),(m,n)]} = \frac{N_{[(i,j),(m,n)]}}{D_{(m,n)}} \quad (1)$$

式中: $\mu_{[(i,j),(m,n)]}$ 和 $N_{[(i,j),(m,n)]}$ 分别为温度-辐照状态 (i,j) 向温度-辐照状态 (m,n) 的转移率和转移频次, $D_{(m,n)}$ 为温度-辐照状态 (m,n) 的持续时间。在计算得到各组温度-辐照状态间的转移率后,可得出温度-辐照状态转移率矩阵 G 如下:

$$G = \begin{bmatrix} \mu_{[(1,1),(1,1)]} & \cdots & \mu_{[(1,1),(10,13)]} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{[(10,13),(1,1)]} & \cdots & \mu_{[(10,13),(10,13)]} \end{bmatrix} \quad (2)$$

值得注意的是, G 的最大维数为 130×130 ,但实际上,极端温度或辐照的发生概率较小,所以 G 的维数通常低于 130×130 ,因此将实际存在的温度状态数和辐照状态数分别记为 $N_i (N_i \leq 10)$ 和 $N_r (N_r \leq 13)$ 。

2 基于功率损耗的光电转换系统故障率计算

本节通过计算单温度-辐照状态 (i,j) 下光电转换系统中元件的功率损耗,结合稳态热阻计算元件结温,最后应用应力分析法和可靠性串并联关系得到光电转换系统及内部元件的故障率。本节以图 1 所示典型光电转换系统电路拓扑结构为例,介绍其内部元件的故障率计算过程。

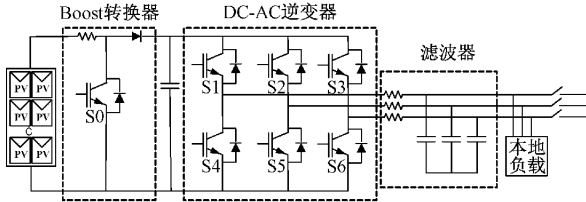


图 1 典型光电转换系统电路拓扑结构

2.1 元件的功率损耗及其温升计算

在温度 T_i 和辐照 R_j 及光伏电池参数已知的情形下,根据光伏电池工程实用模型^[19]可得图 1 中光伏阵列的输出电压 V_{dc1} 和电流 I_{dc1} ,进而计算 Boost 转换器和逆变器工作时产生的功率损耗,该功率损耗主要由二极管和绝缘栅型双极晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 的功率损耗组成,具体计算公式如下:

1) Boost 转换器功率损耗计算

Boost 转换器功率损耗 P_{total}^{BC} 计算式如下^[20]:

$$P_{total}^{BC} = (P_{(cd,Diode)}^{BC} + P_{(cd,IGBT)}^{BC}) + (P_{(sw,Diode)}^{BC} + P_{(sw,IGBT)}^{BC}) \quad (3)$$

式中: $P_{(cd,Diode)}^{BC}$ 和 $P_{(cd,IGBT)}^{BC}$ 分别为二极管和 IGBT 的导通损耗; $P_{(sw,Diode)}^{BC}$ 和 $P_{(sw,IGBT)}^{BC}$ 分别为二极管和 IGBT 的开关损耗。

二极管和 IGBT 导通损耗计算如下^[20]:

$$P_{(cd,Diode)}^{BC} = I_{dc1} (V_{FO}^{BC} + r_F^{BC} I_{dc1}) (1 - D) \quad (4)$$

$$P_{(cd,IGBT)}^{BC} = I_{dc1} (V_{CEO}^{BC} + r_{CE}^{BC} I_{dc1}) D \quad (5)$$

式中: I_{dc1} 为光伏阵列输出电流; V_{FO}^{BC} 为二极管导通阈值电压; r_F^{BC} 为二极管导通电阻; D 为转换器的占空比。 V_{CEO}^{BC} 为 IGBT 的导通阈值电压; r_{CE}^{BC} 为 IGBT 导通电阻。

二极管和 IGBT 开关损耗计算如下^[20]:

$$P_{(sw,Diode)}^{BC} = f_{sw}^{BC} E_{rec}^{BC} \frac{V_{dc2} I_{dc1}}{V_{(ref,Diode)}^{BC} I_{(ref,Diode)}^{BC}} \quad (6)$$

$$P_{(sw,IGBT)}^{BC} = f_{sw}^{BC} (E_{on}^{BC} + E_{off}^{BC}) \frac{V_{dc2} I_{dc1}}{V_{(ref,IGBT)}^{BC} I_{(ref,IGBT)}^{BC}} \quad (7)$$

式中: f_{sw}^{BC} 为转换器开关频率; E_{rec}^{BC} 为二极管每次断开的耗能; V_{dc2} 为转换器输出电压; $V_{(ref,Diode)}^{BC}$ 和 $I_{(ref,Diode)}^{BC}$ 分别为二极管额定电压和电流值; E_{on}^{BC} 和 E_{off}^{BC} 分别为 IGBT 每次导通和断开的耗能; $V_{(ref,IGBT)}^{BC}$ 和 $I_{(ref,IGBT)}^{BC}$ 分别为 IGBT 额定电压和电流值。

2) 逆变器功率损耗计算

逆变器功率损耗 P_{total}^{INV} 计算式如下^[20]:

$$P_{total}^{INV} = 6(P_{(cd,Diode)}^{INV} + P_{(cd,IGBT)}^{INV}) + P_{(sw,Diode)}^{INV} + P_{(sw,IGBT)}^{INV} \quad (8)$$

式中: $P_{(cd,Diode)}^{INV}$ 和 $P_{(cd,IGBT)}^{INV}$ 分别为二极管和 IGBT 的导通损耗; $P_{(sw,Diode)}^{INV}$ 和 $P_{(sw,IGBT)}^{INV}$ 分别为二极管和 IGBT 的开关损耗。

二极管和 IGBT 导通损耗计算如下^[21]:

$$P_{(cd,Diode)}^{INV} = \left(\frac{1}{8} - \frac{M}{3\pi} \cos\theta\right) r_F^{INV} I_{om}^2 + \left(\frac{1}{2} - \frac{M}{8} \cos\theta\right) V_{FO}^{INV} I_{om} \quad (9)$$

$$P_{(cd,IGBT)}^{INV} = \left(\frac{1}{8} + \frac{M}{3\pi} \cos\theta\right) r_{CE}^{INV} I_{om}^2 + \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{M}{8} \cos\theta\right) V_{CEO}^{INV} I_{om} \quad (10)$$

式中: M 为逆变器调制系数,本文将其设置为 0.9; θ 为逆变器输出电压和电流夹角,本文将其设置为 0.95; r_F^{INV} 为二极管导通电阻; I_{om} 为逆变器峰值电流; V_{FO}^{INV} 为二极管导通阈值电压。 r_{CE}^{INV} 为 IGBT 导通电阻; V_{CEO}^{INV} 为 IGBT 的导通阈值电压。

二极管和 IGBT 开关损耗计算如下^[20]:

$$P_{(sw,Diode)}^{INV} = \frac{1}{\pi} f_{sw}^{INV} E_{rec}^{INV} \frac{V_{dc2} I_o}{V_{(ref,Diode)}^{INV} I_{(ref,Diode)}^{INV}} \quad (11)$$

$$P_{(sw,IGBT)}^{INV} = \frac{1}{\pi} f_{sw}^{INV} (E_{on}^{INV} + E_{off}^{INV}) \frac{V_{dc2} I_o}{V_{(ref,IGBT)}^{INV} I_{(ref,IGBT)}^{INV}} \quad (12)$$

式中: f_{sw}^{INV} 为逆变器开关频率; E_{rec}^{INV} 为二极管每次断开的耗能; I_o 为逆变器输出电流; $V_{(ref,Diode)}^{INV}$ 和 $I_{(ref,Diode)}^{INV}$ 分别为二极管的额定电压和电流值。 E_{on}^{INV} 和 E_{off}^{INV} 分别为 IGBT 每次导通和断开的耗能, $V_{(ref,IGBT)}^{INV}$ 和 $I_{(ref,IGBT)}^{INV}$ 分别为 IGBT 额定电压和电流值。

根据稳态热阻计算方法^[22],计算 IGBT 和二极管结温,以 Boost 转换器中 IGBT 为例,其结温 T_{IGBT}^{BC} 计算如下^[22]:

$$T_{IGBT}^{BC} = (P_{(cd,IGBT)}^{BC} + P_{(sw,IGBT)}^{BC})(R_{jc} + R_{ch}) + P_{total}^{BC} R_{ha} + T_i \quad (13)$$

式中: R_{jc} 为 IGBT 结-壳热阻, R_{ch} 和 R_{ha} 分别为壳到散热器和散热器到环境的热阻,可从厂家提供参数中获得; T_i 为温度-辐照状态 (i,j) 的环境温度;类似地,将式(13)中的 $P_{(cd,IGBT)}^{BC}$ 和 $P_{(sw,IGBT)}^{BC}$ 替换为 $P_{(cd,Diode)}^{BC}$ 和 $P_{(sw,Diode)}^{BC}$ 可得到 Boost 转换器二极管结温 T_{Diode}^{BC} ,类似替换可得逆变器

IGBT 和二极管结温 T_{IGBT}^{INV} 和 T_{Diode}^{INV} 。

2.2 基于应力分析法的元件和系统故障率计算

根据 2.1 节得出的 IGBT 和二极管结温,结合应力分析法,采用美国军标-电子设备可靠性预计手册^[23],可计算 IGBT、二极管及系统故障率,以 Boost 转换器中 IGBT 为例,其故障率 λ_{IGBT}^{BC} 计算如下^[5]:

$$\lambda_{IGBT}^{BC} = \lambda_{(b,IGBT)} \pi_Q \pi_A \pi_E \pi_{(T,IGBT)}^{BC} \quad (14)$$

式中: $\lambda_{(b,IGBT)}$ 为 IGBT 的基础故障率, π_Q 是元件的品质因数, π_A 是应用因子, π_E 是量化的环境因素,上述参数取值参照文献^[24]; $\pi_{(T,IGBT)}^{BC}$ 为 Boost 转换器中 IGBT 的热因子,计算如下^[24]:

$$\pi_{(T,IGBT)}^{BC} = \exp(-1.925(\frac{1}{T_{IGBT}^{BC}} - \frac{1}{298})) \quad (15)$$

类似地,将 T_{IGBT}^{BC} 和替换为 T_{IGBT}^{INV} ,可得到逆变器 IGBT 故障率 λ_{IGBT}^{INV} ,同理,应用二极管故障率及热因子计算式可得到 Boost 转换器和逆变器二极管故障率 λ_{Diode}^{BC} 和 λ_{Diode}^{INV} 。

根据图 1 所示的 Boost 转换器和逆变器结构图,可知 Boost 转换器中二极管和 IGBT 为可靠性串联关系,则 Boost 转换器故障率 $\lambda_{(i,j)}^{BC}$ 为二极管和 IGBT 故障率相加^[21],计算如下:

$$\lambda_{(i,j)}^{BC} = \lambda_{Diode}^{BC} + \lambda_{IGBT}^{BC} \quad (16)$$

类似地,逆变器中二极管和 IGBT 也是可靠性串联关

系,因此逆变器故障率 $\lambda_{(i,j)}^{INV}$ 计算如下^[21]:

$$\lambda_{(i,j)}^{INV} = 6(\lambda_{Diode}^{INV} + \lambda_{IGBT}^{INV}) \quad (17)$$

本文光电转换系统主要考虑 Boost 转换器和逆变器故障率,整体是可靠性串联关系,即可得到光电转换系统故障率 $\lambda_{(i,j)}^{SYS}$ 为:

$$\lambda_{(i,j)}^{SYS} = \lambda_{(i,j)}^{INV} + \lambda_{(i,j)}^{BC} \quad (18)$$

至此,根据式(3)~(18)可得到各温度-辐照状态下的故障率。

3 光电转换系统可靠性评估

3.1 光电转换系统故障率 Markov 链

将第 2 节计算得到各温度-辐照状态下光电转换系统故障率嵌入第 1 节中温度-辐照 Markov 链,可得到光电转换系统故障率 Markov 链,如图 2 所示,其中 $\mu_{[(i,j),(m,n)]}^{SYS}$ 表示光电转换系统故障率状态 $\lambda_{(i,j)}^{SYS}$ 向故障率状态 $\lambda_{(m,n)}^{SYS}$ 的转移率。图 2(a)中沿着箭头辐照状态依次增加,沿着虚线箭头温度状态依次增加。图 2(a)中仅给出相邻光电转换系统故障率状态间的转移关系,事实上,不相邻故障率状态间也可能存在转移关系,但未给出。根据 Markov 链求解方法^[25],由图 2(a) Markov 链转移率矩阵求得光电转换系统故障率状态发生概率向量 $p = [p_{(1,1)}, p_{(1,2)}, \dots, p_{(N_t, N_r)}]$,其中 $p_{(i,j)}$ 为光电转换系统故障率状态 $\lambda_{(i,j)}^{SYS}$ 发生的概率。

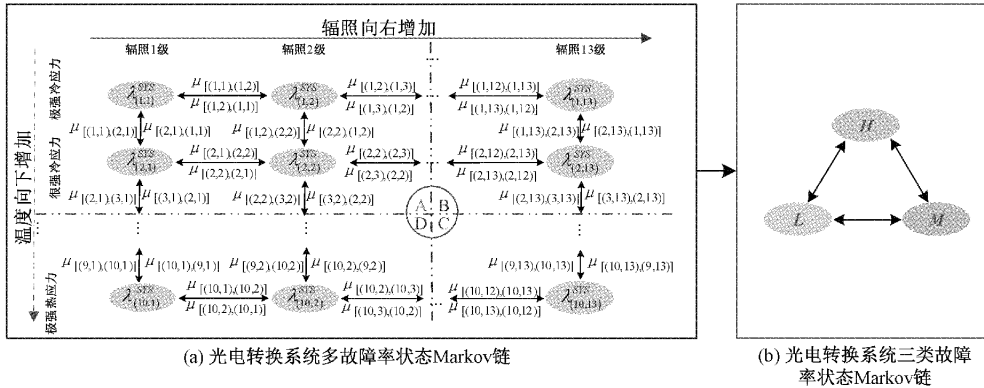


图 2 光电转换系统故障率 Markov 链

为简化光电转换系统多故障率间的转移关系,结合实际工况下,高温、高辐照引发光电转换系统的高故障率现象,为此本文将温度-辐照按照状态高低划分为四部分,划分边界如图 2(a)中虚线所示,横向分界线以上为表 1 左侧温度状态,以下为表 1 右侧温度状态;纵向分界线左侧为表 2 左侧辐照状态,右侧为表 2 右侧辐照状态。其中 A 部分代表低故障率集合 $L = \{\lambda_{(1,1)}^{SYS}, \dots, \lambda_{(3,7)}^{SYS}\}$; B、D 部分代表中故障率集合 $M = \{\lambda_{(1,8)}^{SYS}, \dots, \lambda_{(5,13)}^{SYS}, \lambda_{(6,1)}^{SYS}, \dots, \lambda_{(10,7)}^{SYS}\}$; C 部分代表高故障率集合 $H = \{\lambda_{(6,8)}^{SYS}, \dots, \lambda_{(10,13)}^{SYS}\}$,由此将图 2(a)简化为图 2(b),三类故障率水平的发生概率 $p^* = [p_L, p_M, p_H]$,计算公式如本文 3.2 节所示,通过计算高中低故障率状态发生的概率和频率指标可评估光电转换系统可靠性。

3.2 光电转换系统可靠性指标

1) 平均故障率

上述过程已经求解出各状态下光电转换系统故障率及其概率,则可计算光电转换系统平均故障率指标:

$$\lambda_{SYS} = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_r} p_{(i,j)} \lambda_{(i,j)}^{SYS} \quad (19)$$

式中: N_t 为温度状态数; N_r 为辐照状态数; $p_{(i,j)}$ 为光电转换系统故障率状态 $\lambda_{(i,j)}^{SYS}$ 发生的概率。类似地,将 $\lambda_{(i,j)}^{SYS}$ 替换为 $\lambda_{(i,j)}^{INV}$ 和 $\lambda_{(i,j)}^{BC}$ 可计算逆变器和 Boost 转换器平均故障率 $\bar{\lambda}_{INV}$ 和 $\bar{\lambda}_{BC}$ 。

2) 三类光电转换系统故障率状态发生概率

光电转换系统低故障率状态发生的概率由属于其集

合中所有状态概率之和表示,低故障率发生的概率如下示^[24]:

$$p_L = \sum_{(s,m) \in L} p_{(s,m)} \quad (20)$$

式中:下标 L 为低故障率集合, $p_{(s,m)}$ 为属于低故障率集合里故障率状态 (s, m) 的概率;类似计算高故障率概率 p_H 和中故障率概率 p_M 。

3) 三类光电转换系统故障率状态出现频率

通过合并光电转换系统故障率频率可得高中低故障率发生频率,低故障率发生频率 f_L 如下^[24]:

$$f_L = \sum_{(u,k) \in L} p_{(u,k)} \sum_{(x,y) \in \neg H \cup M} \mu_{[(u,k),(x,y)]} - \sum_{i,j,m,n \in L} p_{(i,j)} \mu_{[(i,j),(m,n)]} \quad (21)$$

式中: $p_{(u,k)}$ 为低故障率集合 L 中状态 (u, k) 的概率; $H \cup M$ 是高和中故障率集合; $\mu_{[(u,k),(x,y)]}$ 是状态 (u, k) 向状态 (x, y) 的转移率; $\mu_{[(i,j),(m,n)]}$ 为集合 L 内状态 (i, j) 到状态 (m, n) 的转移率; $p_{(i,j)}$ 是状态 (i, j) 的概率;同样方法可计算光电转换系统高故障率频率 f_H 和中故障率频率 f_M 。

4) 光电转换系统平均故障率的温度弹性系数

为准确评估温度对光电转换系统可靠性的影响,参考经济学领域对弹性系数的应用^[26],本文定义温度缩放系数 β_T, β_T 取值在 $[0, 1, 2]$,应用 β_T 乘上所有实测温度数据,例如,实测温度-辐照数据 $(t_1, r_1), (t_2, r_2), \dots, (t_N, r_N)$ 乘上缩放系数 β_T 后,得到新的温度-辐照数据 $(\beta_T t_1, r_1), (\beta_T t_2, r_2), \dots, (\beta_T t_N, r_N)$,然后应用光电转换系统故障率 Markov 链模型重新评估该地区系统平均故障率,将缩放前后光电转换系统平均故障率的变化率与温度变化率的比值定义为光电转换系统平均故障率的温度弹性系数 η_T ,如下:

$$\eta_T = \frac{\bar{\lambda}_{(SYS, \beta_T)} - \bar{\lambda}_{SYS}}{\bar{\lambda}_{SYS} (\beta_T - 1)} \quad (22)$$

式中: $\bar{\lambda}_{(SYS, \beta_T)}$ 为实际温度数据整体变化 β_T 后光电转换系统平均故障率。

5) 光电转换系统平均故障率的辐照弹性系数

类似地,将缩放前后光电转换系统平均故障率的变化率与辐照变化率的比值定义为光电转换系统平均故障率的辐照弹性系数 η_R ,如下^[26]:

$$\eta_R = \frac{\bar{\lambda}_{(SYS, \beta_R)} - \bar{\lambda}_{SYS}}{\bar{\lambda}_{SYS} (\beta_R - 1)} \quad (23)$$

式中: $\bar{\lambda}_{(SYS, \beta_R)}$ 为实际辐照数据整体变化 β_R 后光电转换系统平均故障率, β_R 为辐照缩放系数,取值在 $[0, 1, 2]$ 。

3.3 光电转换系统可靠性评估流程

根据前述分析,给出计及温度-辐照影响的光电转换系统的可靠性评估流程,如图 3 所示。在此过程中,大多数文献采用聚类算法对光伏输出功率进行状态划分,而后求解平均故障率,应用 Monte Carlo 模拟评估可靠性,而本文采用 Markov 链方法,应用经验准则对温度-辐照数据进行

状态划分建立温度-辐照 Markov 链,并将其与光电转换系统故障率模型结合,形成光电转换系统故障率 Markov 链,体现气象对系统可靠性的影响,而后合并故障率状态,建立频率和概率指标,最后定义光电转换系统平均故障率的温度和辐照弹性系数。本文建立的光电转换系统可靠性评估模型只需给定实测温度-辐照数据、光伏面板型号、逆变器和 Boost 转换器型号等数据即可计算得到可靠性指标。

图 4 表示光电转换系统可靠性模型与温度-辐照数据

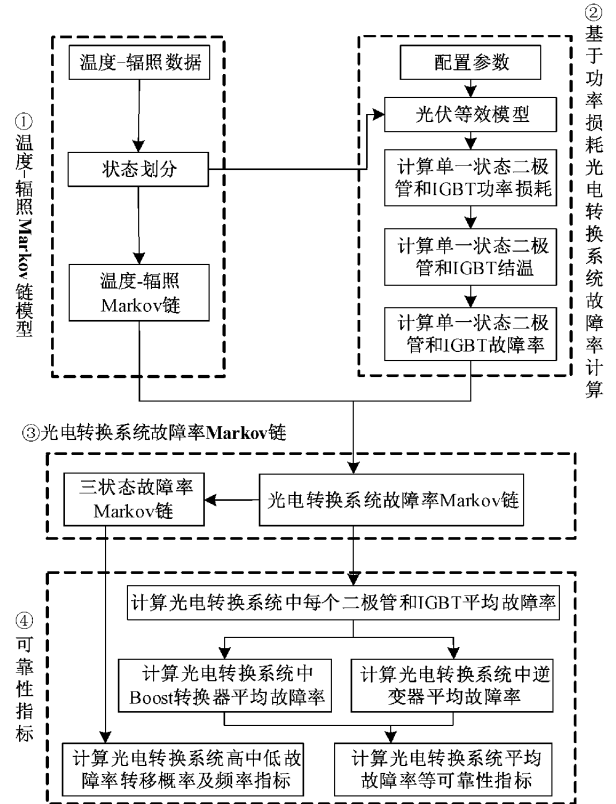


图 3 计及温度-辐照影响的光电转换系统可靠性计算流程

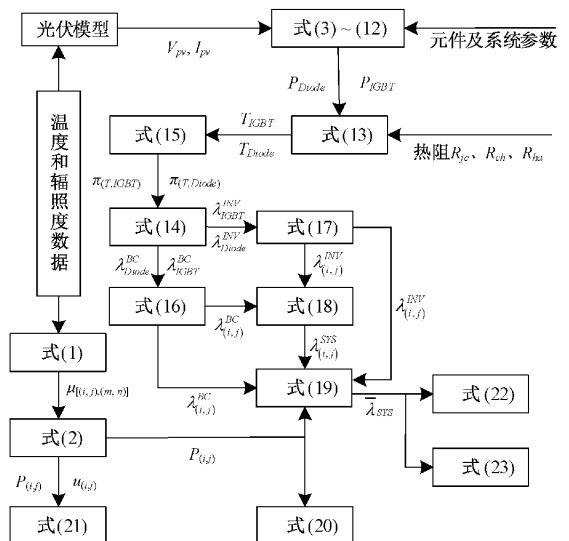


图 4 可靠性模型与温度-辐照数据的计算关系

的计算关系,可以更好地体现温度-辐照与光电转换系统可靠性的计算关系,作为图 3 的补充。

4 算例分析

4.1 光电转换系统数据简介

本文选取图 1 所示光电转换系统,其中光伏阵列由 18 块太阳能电池板组成光伏串,3 组光伏串并联组成 1 个光伏阵列,额定功率为 17.8 kW 的光电转换系统,光伏电池板型号为 CS1H330MS^[27]。光电转换系统参数如表 3 所示,Boost 转换器和逆变器中 IGBT 分别选择型号为 F50R12RT4^[28]和 FS25R12W1T4_B11^[29]的模块。

访问开放气象数据库(North Dakota agricultural weather network, NDAWN),收集北达科他州六处观测站 2010~2019 年间每小时的实测温度-辐照样本^[30],表 4 所示为各站点名称、位置及温度-辐照的特征,可以看到,纬度

表 3 光电转换系统参数

指标	参数
光伏阵列输入电压/V	666
逆变器输入电压/V	800
逆变器输出线电压/V	380
输出频率/Hz	50
额定功率/kW	10
Boost 级开关频率/kHz	10
逆变级开关频率/kHz	5

越低辐照均值越高,表明太阳能资源丰富,如 Wishek 观测站,反义亦然,如 Mavie 观测站太阳能资源较匮乏。这表明太阳能资源随着观测站位置不同而不同,因而,不同观测站的同类光电转换系统的可靠性会存在差别,该差别将在下一节详细分析。

表 4 北达科他州站点基本数据

观测站	纬度/ (°)	经度/ (°)	辐照度/(W·m ⁻²)			温度/°C		
			最大值	平均值	标准差	最大值	平均值	标准差
Crosby	48.807 2	-103.311 7	974.580 9	157.410 7	236.872 3	39.480 0	4.438 7	13.582 4
Watford City	47.810 4	-103.232 2	1 028.502 4	158.555 2	236.414 8	40.570 0	5.911 1	13.318 9
Rugby	48.354 0	-100.063 0	969.588 2	155.667 9	229.847 4	38.390 0	4.232 6	14.091 0
Harvey	47.730 5	-99.919 4	1 000.543 1	158.503 7	234.761 9	38.410 0	4.772 4	13.831 9
Wishek	46.260 0	-99.666 0	1 001.541 6	161.151 2	239.283 0	38.350 0	5.071 7	13.499 2
Mavie	48.121 0	-95.971 0	1 008.531 5	153.479 3	230.354 0	34.910 0	4.142 1	14.119 0

4.2 Crosby 观测站光电转换系统可靠性评估

假设图 1 所示的光电转换系统安装在 Crosby 观测站,应用第 3 节光电转换系统故障率 Markov 链模型评估该处观测站光电转换系统可靠性,Crosby 观测站 Boost 转换器、逆变器和光电转换系统的故障率与温度、辐照状态间的三维关系如图 5 所示,可以看到以下现象:1)随着温度和辐照增大,Boost 转换器、逆变器和光电转换系统故障率均随之增加;2)对比图 5(a)~(c)可看出各状态下 Boost 转换器的故障率均低于逆变器的故障率。以上现象表明,温度和辐照增大都会使光电转换系统故障率增加,其次光电转换系统故障率主要受逆变器故障率的影响,与逆变器运

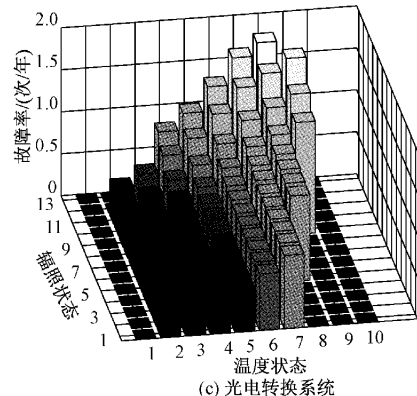
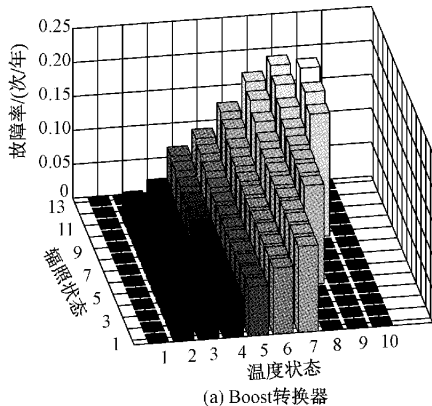
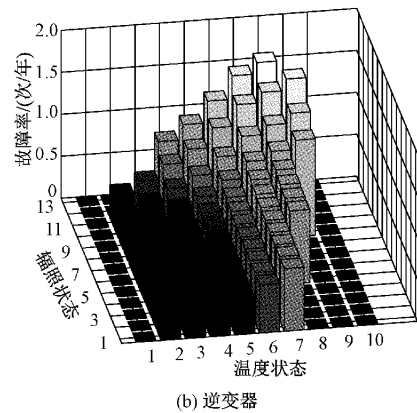


图 5 温度-辐照状态下的故障率

行可靠性为影响光电转换系统可靠性最关键因素的结论一致^[4]。

4.3 安装位置对光电转换系统可靠性的影响

假设图 1 所示的光电转换系统安装在表 4 中六处观测站,应用光电转换系统故障率 Markov 链模型评估系统及部件平均故障率,结果如表 5 所示。可以看到以下现象:1)North Dakota 地区随着纬度降低、经度增加(太阳能资源增加),转换器、逆变器和光电转换系统的平均故障率增加;2)各地区逆变器平均故障率均高于 Boost 转换器。以上现象表明, North Dakota 地区低纬度、高经度太阳能资源丰富的地区 Boost 转换器、逆变器和光电转换系统平均故障率更高, Mavie 观测站的光电转换系统平均故障率最低, Watford City 观测站最高。

表 6 为不同观测站光电转换系统处于高、中、低三类故障率水平的发生概率和出现频率。可以看到以下现象:1)同经度下,纬度越低的地区太阳能资源丰富,光电转换系统处在高故障率的发生概率和出现频率指标越大,处在

表 5 六处观测站平均故障率指标

观测站	$\bar{\lambda}_{BC}$ / (次/年)	$\bar{\lambda}_{INV}$ / (次/年)	$\bar{\lambda}_{SYS}$ / (次/年)
Crosby	0.082 4	0.532 7	0.615 2
Watford City	0.085 4	0.550 9	0.636 3
Rugby	0.082 1	0.529 0	0.611 1
Harvey	0.083 2	0.537 5	0.620 8
Wishek	0.083 8	0.542 0	0.625 8
Mavie	0.081 8	0.526 7	0.608 6

低故障率的发生概率和频率指标较低;2)同纬度下,经度越大地区的太阳能资源丰富,光电转换系统高故障率概率和频率指标越大,低故障率的概率和频率指标较低;以上现象表明,低纬度、高经度太阳能资源丰富的地区系统高故障率发生概率和出现频率高。结合平均故障率指标, Mavie 观测站可靠性更高,更适合建光伏电站, Watford City 观测站可靠性最低,不适合建光伏电站。

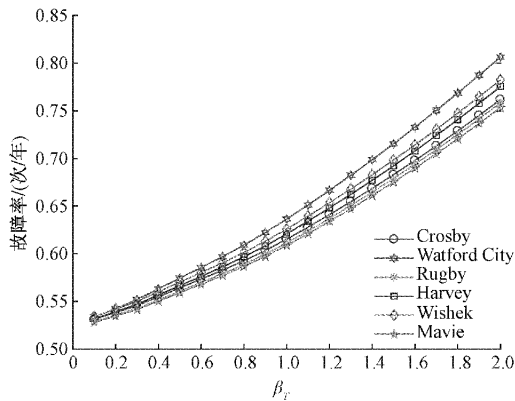
表 6 光电转换系统故障率概率及频率指标

观测站	故障率的发生概率			故障率的出现频率/(次/年)		
	P_L	P_M	P_H	f_L	f_M	f_H
Crosby	0.473 8	0.328 3	0.197 8	248.077 0	432.349 2	210.465 9
Watford City	0.454 1	0.338 3	0.207 6	245.710 5	438.461 3	220.041 4
Rugby	0.464 8	0.336 1	0.199 1	248.806 9	435.299 9	211.187 8
Harvey	0.463 5	0.334 5	0.202 0	254.605 3	437.396 0	209.983 6
Wishek	0.452 7	0.343 9	0.203 3	242.594 1	429.384 5	214.184 9
Mavie	0.466 3	0.340 1	0.193 6	245.476 0	429.297 1	209.416 8

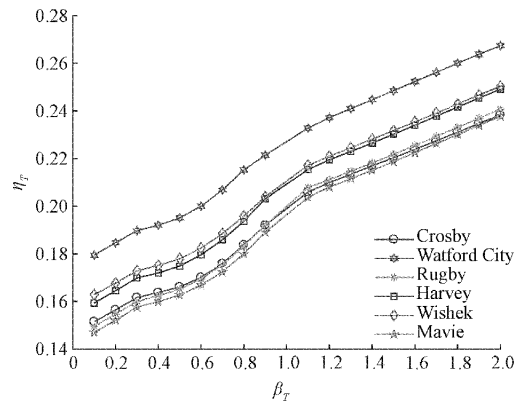
4.4 温度对光电转换系统平均故障率影响的灵敏度分析

图 6 所示为六处观测站光电转换系统平均故障率及其温度弹性指标随温度变化曲线,可以看到以下现象:1)随着温度增大,六处观测站光电转换系统平均故障率及其温度

弹性系数均随之增加,反之亦然;2)光电转换系统平均故障率的温度弹性系数在 Watford City 地区要高于其他地区。以上现象表明,光电转换系统平均故障率及其温度弹性系数随温度增加而增加,高温水平下,故障率对温度更敏感。



(a) 光电转换系统平均故障率关于温度缩放系数的变化曲线

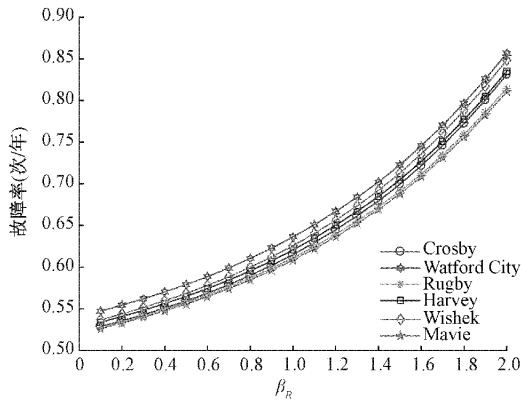


(b) 光电转换系统平均故障率的温度弹性系数关于温度缩放系数变化曲线

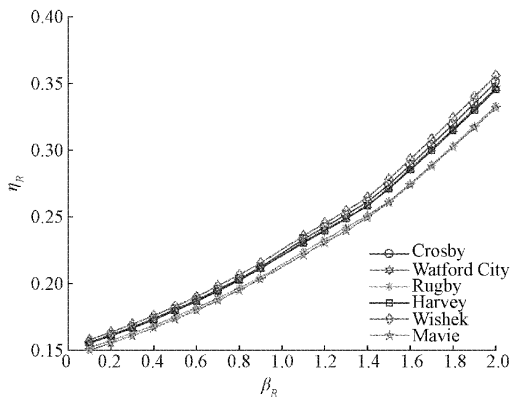
图 6 光电转换系统平均故障率及其温度弹性系数随温度变化曲线

4.5 辐照对光电转换系统平均故障率影响的灵敏度分析

图 7 所示为 6 处观测站光电转换系统平均故障率及其辐照弹性指标随辐照变化曲线,可以看到以下现象:1)随着辐照增大,六处观测站光电转换系统平均故障率及其辐照弹性系数随之增加,反之亦然;2)对比图 6(b) 光电转换系统平均故障率的温度弹性曲线,相同缩放系数下辐照弹性系数更大。以上现象表明,光电转换系统平均故障率及其辐照弹性系数随辐照增加而增加,这与文献[6]中辐照增加会缩减逆变器寿命结论相符合,且相较于温度,平均故障率对辐照更敏感。



(a) 光电转换系统平均故障率关于辐照缩放系数的变化曲线



(b) 光电转换系统平均故障率的辐照弹性系数关于辐照缩放系数变化曲线

图 7 光电转换系统平均故障率及其辐照弹性系数随辐照变化曲线

5 结 论

本文提出基于 Markov 链的光电转换系统可靠性评估模型,通过对温度-辐照状态进行划分,从而得到温度-辐照 Markov 链,再将计算得到的各温度-辐照状态下光电转换系统故障率嵌入温度-辐照 Markov 链,形成光电转换系统故障率 Markov 链,并定义光电转换系统平均故障率的温度弹性系数等可靠性指标。最后应用 North Dakota 6 处观测站的实测数据验证本文提出的模型,得出以下结论:1)North Dakota 州 6 处观测站纬度越低,经度越大,太阳

能资源越丰富,其光电转换系统平均故障率指标越高,可靠性越低;2)温度越高、辐照越强的地区,太阳能资源越丰富,其光电转换系统平均故障率指标越高,光电转换系统处在高故障率的发生概率和频率指标越大;3)对比温度对光电转换系统平均故障率的影响,辐照对光电转换系统平均故障率的影响更加的明显,光电转换系统平均故障率对辐照变化更敏感。

针对本文研究模型是否适用国内数据,做以下展望:本文建立基于 Markov 链的光电转换系统可靠性评估模型也可评估国内光伏站点光电转换系统可靠性情况,给定实测温度-辐照数据及相关元件型号参数,按照 3.3 节光电转换系统可靠性评估流程,即可求得给定站点可靠性。对多个站点进行评估时,通过比较可靠性指标的大小,从而判断各站点可靠性高低情况,从可靠性角度可为光伏电站选址提供一定的参考价值。

本文对光电转换系统的可靠性进行了评估,在未来拟将在在此基础上结合 Monte Carlo 模拟方法,对整个光伏电站的可靠性进行评估,基于可靠性与经济性建立综合性指标优选光伏电站拓扑结构。

参 考 文 献

- [1] Renewable Capacity Statistics 2021 [EB/OL]. (2021-10-26) [2021-10-26]. <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021>.
- [2] 电力统计基本数据一览表[N]. 中国电力企业联合会, 2020.
- [3] 姜家宝. 基于寿命约束控制策略的光伏逆变器可靠性研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2020, DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.001877.
- [4] CHAI Q M, ZHANG C, DONG Z Y, et al. Operational reliability assessment of photovoltaic inverters considering voltage/VAR control function [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 190, DOI: 10.1016/j.eprsr.2020.106706.
- [5] ALTAMIMI A, JAYAWEERA D. Reliability of power systems with climate change impacts on hierarchical levels of PV systems[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 190, DOI: 10.1016/j.eprsr.2020.106830.
- [6] BRITO E M S, CUPERTINO A F, REIGOSA P D, et al. Impact of meteorological variations on the lifetime of grid-connected PV inverters [J]. Microelectronics Reliability, 2018, 88: 1019-1024.
- [7] CUPERTINO A F, LENZ J M, BRITO E M S, et al. Impact of the mission profile length on lifetime prediction of PV inverters [J]. Microelectronics Reliability, 2019, 100, DOI: 10.1016/j.microrel.

- 2019.113427.
- [8] SANGWONGWANICH A, ZHOU D, LIIVIK E, et al. Mission profile resolution impacts on the thermal stress and reliability of power devices in PV inverters [J]. *Microelectronics Reliability*, 2018, 88: 1003-1007.
- [9] ABUNIMA H, TEH J. Reliability modeling of PV systems based on time-varying failure rates[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 14367-14376.
- [10] ZHANG P, WANG Y, XIAO W D, et al. Reliability evaluation of grid-connected photovoltaic power systems [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, 3(3): 379-389.
- [11] LI T Y, TAO S Y, ZHANG R X, et al. Reliability evaluation of photovoltaic system considering inverter thermal characteristics[J]. *Electronics*, 2021, 10(15), DOI: 10.3390/electronics10151763.
- [12] CRISTALDI L, KHALIL M, FAIFER M. Markov process reliability model for photovoltaic module failures[J]. *ACTA IMEKO*, 2017, 6(4): 121-130.
- [13] 胡牧,周洁,袁科. 基于太阳辐射的光伏电站可靠性模型及算例分析[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(20): 28-31.
- [14] MIAO S W, NING G T, GU Y Z, et al. Markov chain model for solar farm generation and its application to generation performance evaluation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186: 905-917.
- [15] ZARE S, HASHEMINEJAD N, SHIRVAN H E, et al. Comparing universal thermal climate index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year[J]. *Weather and Climate Extremes*, 2018, 19: 49-57.
- [16] 孔钦钦,葛全胜,郑景云. 中国极端通用热气候指数的时空变化[J]. *地理研究*, 2017, 36(6): 1171-1182.
- [17] 袁樵. 国际照明委员会照明标准一室内工作场所照明[J]. *照明工程学报*, 2002(4): 55-60.
- [18] MICHAEL P R, JOHNSTON D E, MORENO W. A conversion guide: Solar irradiance and lux illuminance [J]. *Journal of Measurements in Engineering*, 2020, 8(4): 153-166.
- [19] 彭湃,程汉湘,陈杏灿,等. 光伏电池工程用数学模型及其模型的应用研究[J]. *电源技术*, 2017, 41(5): 780-782.
- [20] ARIFUJJAMAN M, IQBAL M T, QUAICOE J E. Reliability analysis of grid connected small wind turbine power electronics[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(9): 1617-1623.
- [21] 刘爽,牟龙华,许旭锋,等. 电力电子器件故障对微电网运行可靠性的影响[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(24): 63-70.
- [22] 钱茜,张臻,黄国昆. 基于环境温度,负载率的光伏逆变器温升研究[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(12): 3519-3525.
- [23] US Dept. Defense. MIL-HDBK-217F reliability prediction of electronic equipment[S]. Washington, DC: 1991.
- [24] CHAN F, CALLEJA H. Reliability estimation of three single-phase topologies in grid-connected PV systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 58(7): 2683-2689.
- [25] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 周家启,卢继平,胡小正,等译,科学出版社,2006.
- [26] Elasticity_(economics)[EB/OL]. (2021-10-22)[2021-10-22]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Elasticity_\(economics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Elasticity_(economics)).
- [27] CS1H330MS[EB/OL]. (2022-03-14)[2022-03-14]. https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/sites/9/2019/12/Canadian_Solar-Datasheet-HiDM_CS1H-MS_CN.pdf.
- [28] F50R12RT4[EB/OL]. (2022-07-14)[2022-07-14]. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF50R12RT4-DS-v02_00-en_de.pdf?fileId=db3a304327b89750012805fb1a356147.
- [29] FS25R12W1T4_B11[EB/OL]. (2022-07-14)[2022-07-14]. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FS25R12W1T4_B11-DS-v02_00-en_de.pdf?fileId=db3a30432ad629a6012af0f40a895ded.
- [30] North Dakota agricultural weather network[EB/OL]. (2021-10-15)[2021-10-15]. <http://ndawn.ndsu.nodak.edu/hourly-table-form.html>.

作者简介

周海涛,硕士研究生,主要研究方向为含光伏发电系统可靠性评估与优化。

E-mail: 749805379@qq.com

缪书唯(通信作者),博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为风电场风况建模、风电场并网系统可靠性评估和优化。

E-mail: jabker@163.com