

DOI: 10.7667/PSPC161961

电力电子器件故障对微电网运行可靠性的影响

刘爽, 牟龙华, 许旭锋, 郭文明

(同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 提出计及运行条件影响的电力电子器件短时故障率模型, 评估了器件故障对微电网运行可靠性的影响。首先阐述了 IGBT 和功率二极管两类重要电力电子器件的故障率与微电网运行条件紧密相关, 然后基于器件的功率损耗模型与热模型, 建立了器件短时停运率模型。结合场景分析法, 基于所建模型提出了一套完整的微电网运行可靠性评估方法, 评价器件故障对微电网运行可靠性指标的影响。将所提评估方法应用在改进的基准测试系统上, 算例结果表明, 器件故障对微电网的可靠性具有消极影响, 所建可靠性模型相比传统评估方法能够提供更加准确全面的可靠性信息。

关键词: 微电网; 运行条件; 电力电子器件; 短时故障率; 结温; 运行可靠性

Research on power electronic devices failures' effect on microgrid operational reliability

LIU Shuang, MU Longhua, XU Xufeng, GUO Wenming

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To evaluate the effect of power electronic devices failure on microgrid's operational reliability, a short-time outage model of power electronic devices considering operation condition influence is proposed. Firstly, it is pointed that the failure rates of IGBT and power diode are tightly connected with microgrid's operation conditions. According to the power dissipation model and thermal model of devices, the short-time outage model is built. Using scene analysis method, a complete set of reliability evaluation method for microgrid operation based on the established model is proposed to evaluate the impacts of devices failure on microgrid operational reliability index. And the proposed evaluation method is used on the improved benchmark test system. The simulation results show that devices' failure has negative effect on the microgrid reliability, and the new reliability model can provide more accurate and comprehensive information than traditional evaluation methods.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407128).

Key words: microgrid; operation condition; power electronic device; short-time failure rate; junction temperature; operational reliability

0 引言

随着分布式电源在电网中的渗透率不断提高, 微电网技术成为电力领域研究的热点。在一些化石资源匮乏且交通闭塞的地区, 微电源的接入可以避免电力的远距离传输问题, 解决当地居民的用电难题, 提高区域负荷的用电可靠性; 当大电网发生故障时, 微电网可以离网运行, 继续为网内负荷供电。因此, 微电网技术对提高电力系统供电可靠性具有显著的影响。

可靠性研究是微电网研究中的关键点之一。目前人们对于微电网的可靠性研究主要集中在微电源

出力波动对供电充裕度影响的问题上, 鲜有学者对微电源自身的可靠性模型展开研究。文献[1]中指出, 变流器是微电网可靠性的薄弱环节之一, 其中超过50%的变流器故障是由功率器件失效造成的, 并且功率器件的故障率受运行条件影响显著, 可见电力电子器件故障对微电网可靠性具有不可忽略的影响。文献[2-3]从微电源出力波动性角度出发, 对微电网供电可靠性进行了研究, 但忽略了电力电子器件故障对运行可靠性的影响; 文献[4-5]采用两态或多态故障率模型模拟元件故障, 研究了微电网内各类元件故障对负荷供电可靠性的影响, 但多态模型不能反映运行条件对元件故障率的影响; 文献[6-7]指出微电网试验点中风机的主要故障原因是变流器故障, 研究了风速变化及风机属性参数对变流

器故障率的影响,但研究仅局限于风机层面,未深入到微电网系统层面分析器件故障对系统供电可靠性的影响。

本文着重研究微电网中电力电子器件故障对微电网运行可靠性的影响。基于场景分析技术,由器件损耗功率模型和热模型出发,为电力电子器件建立基于结温的短时故障率模型,并通过算例仿真,评估所建器件短时故障率模型对微电网供电可靠性指标的影响。

1 基于场景分析的微电源出力模型

1.1 微电源出力场景的选取

多场景技术是描述随机过程的一种方法。微电网中,风机与光伏的出力都由气象因素决定,具有随机性特点。风速 V 、光照强度 S 和温度 E 是决定微电源出力的关键因素,一组气象数据 $(V(t), S(t), E(t))$ 可以被视为微电网的一个场景。在微电网的运行可靠性评估中,数据的采样间隔通常是小时级甚至分钟级,繁多的场景大大增加了计算所占用的资源,延长了仿真时间。为最大程度保留微电源出力的随机性特点,同时提高计算效率,本文采用网格法^[8]对原始气象数据进行处理,筛选场景。网格法的原理简述如下:

1) 如图1(a)所示,二维空间中横轴为时间变量,纵轴为温度数据采样值,以 Δt 为时间间隔对横轴进行划分(Δt 应大于原始数据采样间隔),相应的纵坐标波动区间为 $(E, E+\Delta E)$ 。

2) 如图1(a)所示,以横纵轴波动范围为边界做矩形,选取矩形几何中心点记为 $E(t)$,矩形区域内温度数据的采样值均记为 $E(t)$ 。同理亦可以获得 $S(t)$ 、 $V(t)$ 值。

3) 如图1(b)所示,三维空间中,对应时间间隔 Δt ,气象数据的波动范围构成立方体,立方体的几何中心点对应的数据即为场景采样值 $(V(t), S(t), E(t))$ 。每个立方体对应削减后的一个采样场景 σ 。

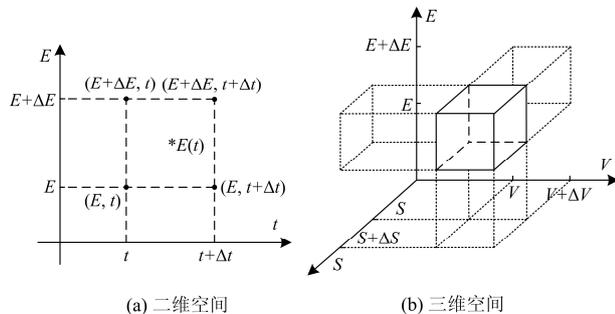


图1 网格法削减原理

Fig. 1 Cutting principle of grid method

削减后,气象数据的年度采样场景构成集合 Ω ,集合中共有场景数目 N_σ ,设场景 σ_k 在立方体采样值中出现次数为 $n(\sigma_k)$,则场景 σ_k 出现概率 $\Pr\{\sigma_k\}$ 的计算式为

$$\Pr\{\sigma_k\} = \frac{n(\sigma_k)}{8760} \cdot \Delta t, \quad (k=1, 2, \dots, N_\sigma) \quad (1)$$

1.2 微电源出力模型

微电网运行在孤岛模式时,微电源的出力决定了系统的负荷投切,是影响微电网运行可靠性的关键因素。常见的微电源种类包括储能装置、风机与光伏。储能装置在微电网中起到平抑能量波动的作用,孤岛模式下通常作为主控单元,为微电网提供电压、频率支撑。储能装置的充放电方式灵活,出力模型较为复杂,本文将储能电池视为一个恒定的功率源,以简化可靠性评估过程。风机与光伏发电的出力由气象因素决定,根据1.1节中削减获得的气象场景,其在不同场景下的出力值可由下述模型计算出。

在一定风速范围内,风速与输出功率 P_w 的关系式^[9]为

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_i, v \geq v_{co} \\ P_{WG} (v - v_{ci} / v_r - v_{ci}) & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_{WG} & v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_{ci} 、 v_r 、 v_{co} 分别表示风电机组的切入风速、额定风速、切出风速,本文中分别取为2.5 m/s, 10 m/s, 18 m/s; P_{WG} 为风机额定功率。

太阳能电池板输出功率与光照强度的关系式^[10]为

$$P_{PV} = \frac{S}{S_r} \times \eta(E) \times P_{PVG} \quad (3)$$

$$\eta(E) = 1 - 0.0045(E - E_{rate}) \quad (4)$$

式中: S_r 为标准太阳辐射强度,本文取为1000 W/m²; S 为太阳辐射强度; E 代表环境温度; E_{rate} 通常取为25 °C; $\eta(E)$ 代表电池板光电转换率; P_{PVG} 为光伏发电系统的额定接入容量。

2 温度相依的变流器短时故障率模型

依据MILHDBK-217F^[11]手册,电力电子器件的故障率与结温紧密相关,即与微电网的运行条件相关联。传统的器件故障率计算中,通常假设器件工作在恒定功率状态下,忽略其实际工作状态的改变。微电网中变流器的工作状态具有间歇性与波动性特点,本节在场景分析的基础上,从单个电力电子器件出发,建立温度相依的变流器短时故障率模型。

2.1 单个电力电子器件短时故障率模型

λ_i 为器件在场景 i 下的短时故障率,计算式为

$$\lambda_i = \lambda_b \pi_T(i) c \quad (5)$$

式中: λ_b 为器件的基本故障率, 不同器件类型可以通过手册查得; c 为其他与器件属性相关的影响因子, 这些因子与出力场景关联较小, 取为常数; $\pi_T(i)$ 表示器件的温度影响因子。

$$\pi_T(i) = \exp\left(1925\left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T_j(i) + 273}\right)\right) \quad (6)$$

式中, $T_j(i)$ 代表场景 i 下器件的结温, 是决定器件故障率的关键参数。元件结温 T_j 取决于环境温度和设备的损耗功率。

已知削减后总场景数为 N_σ , 则单个电力电子器件的等效年平均故障率 λ 可以表示为

$$\begin{cases} \lambda = \sum_{i=1}^{N_\sigma} \Pr(\sigma_i) \lambda_i \\ \sum_{i=1}^{N_\sigma} \Pr(\sigma_i) = 1 \end{cases} \quad (7)$$

结温是影响电力电子器件故障率的重要因素, 不同运行场景下, 器件结温可以通过损耗功率模型和热模型求取。开关管的损耗功率是通态损耗功率和开关损耗功率之和。

通态损耗是指开关器件导通过程中因导通压降而产生的损耗, 单个 IGBT 的通态损耗功率为^[12]

$$P_{IGBT_con} = I_C V_{CE0} \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{M \cos \theta}{8}\right) + I_C^2 r_{CE} \left(\frac{1}{8} + \frac{M}{3\pi} \cos \theta\right) \quad (8)$$

式中: I_C 为 IGBT 的平均电流; V_{CE0} 为 IGBT 的门槛电压; r_{CE} 为 IGBT 的通态等效电阻; M 为调制比; θ 为交流输出电流与电压的相位差。

同样地, 反并联二极管的通态损耗功率计算式可以表示为

$$P_{D_con} = I_C V_{F0} \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{M \cos \theta}{8}\right) + I_C^2 r_F \left(\frac{1}{8} - \frac{M}{3\pi} \cos \theta\right) \quad (9)$$

式中: V_{F0} 为二极管的门槛电压; r_F 为二极管通态等效电阻。

开关损耗是由开关器件通断转换过程中产生的损耗^[13]。本文采用 EUPEC 公司的 FS300R12KE3 模块^[14]作为研究对象, 根据厂家提供的技术资料, 可得电流为 I_C 时 IGBT 的开关损耗功率。

$$P_{IGBT_sw} = \frac{1}{\pi} f_{sw} (E_{on_p} + E_{off_p}) \cdot \frac{I_C}{I_{CN}} \cdot \frac{V_{DC}}{V_{CEN}} \quad (10)$$

式中: E_{on_p} 、 E_{off_p} 分别为在额定电流 I_{CN} 和额定电压 V_{CEN} 条件下 IGBT 开通或关断一次损失的能量; V_{DC} 为中间直流电压; f_{sw} 为开关频率。

电流为 I_C 时, 功率二极管的开关损耗功率可以表示为

$$P_{D_sw} = \frac{1}{\pi} f_{sw} E_{rec_p} (0.45 \frac{I_C}{I_{CN}} + 0.55) \frac{V_{DC}}{V_{CEN}} \quad (11)$$

式中: E_{rec_p} 为额定电流 I_{CN} 和额定电压 V_{CEN} 时二极管关断一次损失的能量。

已知电力电子器件的功率损耗, 器件的热特性可以使用等效热路模型来描述。本文选取连续网络热路模型, 也称作 Cauer 模型^[15], 求取电力电子器件的结温。由此, IGBT 结温 T_{j_IGBT} 可以表示为

$$T_{j_IGBT} = T_C + P_{loss_IGBT} \cdot R_{ja_IGBT} \quad (12)$$

$$R_{ja_IGBT} = R_{jc_IGBT} + R_{cs_IGBT} + R_{sa_IGBT} \quad (13)$$

式中: T_C 为环境温度; R_{ja_IGBT} 为 IGBT 的结—环境热阻抗; P_{loss_IGBT} 是 IGBT 的瞬时损耗功率, 由式(8)、式(10)得出; R_{jc_IGBT} 是结—壳热阻抗; R_{cs_IGBT} 是壳—散热器热阻抗; R_{sa_IGBT} 是散热器—环境热阻抗。

同理功率二极管的结温 T_{j_D} 可表示为

$$T_{j_D} = T_C + P_{loss_D} \cdot R_{ja_D} \quad (14)$$

$$R_{ja_D} = R_{jc_D} + R_{cs_D} + R_{sa_D} \quad (15)$$

式中: P_{loss_D} 是功率二极管的瞬时损耗功率; R_{jc_D} 、 R_{cs_D} 、 R_{sa_D} 、 R_{ja_D} 分别是结—壳、壳—散热器、散热器—环境、功率二极管结—环境的热阻抗。

根据以上分析, 单个电力电子器件的损耗与流过器件的电流 I_C 、线路中间电压 V_{DC} 直接相关。 I_C 与 V_{DC} 取决于微电网的运行场景与变流器电路的结构^[16], 采用场景分析法进行分析。

2.2 风机变流器短时故障率模型

图2是一种典型的风力发电系统, 其中风机采用永磁同步发电机(PMSG)。

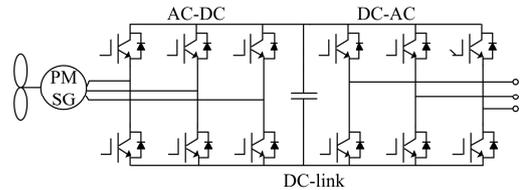


图2 典型风机并网变流器拓扑图

Fig. 2 A typical grid converter topology of wind turbine

风机变流器的故障率由构成变流器的电力电子器件共同决定。由式(8)一式(15)可知, 指定场景下单个器件的结温由该场景下变流器电路的输入输出电流与直流环节电压决定, 其中直流环节电压 V_{dc} 为设定值, 场景 i 下输入输出电流的计算式为

$$I(i) \approx \frac{\sqrt{2}P(i)}{\sqrt{3}U_1(i)} \quad (16)$$

式中: $I(i)$ 为场景 i 下相电流峰值; $P(i)$ 为场景 i 下, 微电源实际输出功率; $U_1(i)$ 为场景 i 下发电机侧或网侧

线电压幅值，网侧电压与线路电压分布一致由潮流计算结果获得。根据同步发电机电势方程，发电机端电压的幅值为

$$U_{\text{gen}}(i) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v_i \leq v_{ci} \\ K_{Uf} K_{fv} v_i & v_{ci} \leq v_i \leq v_r \\ K_{Uf} K_{fv} v_r & v_r \leq v_i \leq v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v_i \end{cases} \quad (17)$$

式中： v_i 为场景*i*下的风速； $K_{Uf} = \sqrt{2\pi N K_N \phi}$ ； $K_{fv} = p \lambda_{op} / 2\pi R$ ； N 为发电机绕组匝数； K_N 为绕组系数； ϕ 为发电机磁极间磁通量； p 为极对数； λ_{op} 是风机的最佳叶尖速； R 为风机浆叶半径。

不考虑变流器设计冗余，单个器件间逻辑上为串联系统。指定场景*i*下风机变流器故障率 $\lambda_{\text{wind}}(i)$ 为

$$\lambda_{\text{wind}}(i) = 6 \times (\lambda_{\text{IGBT,gen}}(i) + \lambda_{\text{Diode,gen}}(i)) + 6 \times (\lambda_{\text{IGBT,grid}}(i) + \lambda_{\text{Diode,grid}}(i)) \quad (18)$$

式中， $\lambda_{\text{IGBT,gen}}(i)$ 、 $\lambda_{\text{Diode,gen}}(i)$ 、 $\lambda_{\text{IGBT,grid}}(i)$ 、 $\lambda_{\text{Diode,grid}}(i)$ 分别对应风机侧与网侧二极管、IGBT器件在场景*i*的短时故障率，可由式(5)、式(6)求得。

2.3 光伏系统变流器短时故障率模型

图3是一种典型的光伏系统变流器拓扑结构，包括Boost电路和三相桥式逆变器。

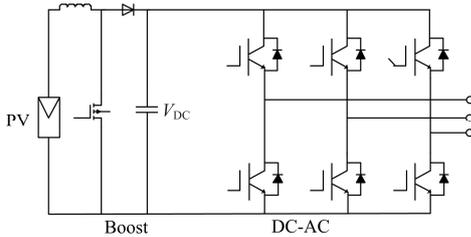


图3 典型光伏并网变流器拓扑图

Fig. 3 A typical grid converter topology of PV system

光伏变流器的故障率模型由Boost电路与逆变电路共同决定。同样，电力电子器件的故障率由电路的输入输出电流及直流环节电压 V_{DC} 决定。光伏电池通常采用最大功率追踪控制^[17]，输出电压近似恒定，指定场景下光伏电池板输出功率确定，输出电流计算与式(16)一致。

指定场景*i*下，光伏变流器故障率 $\lambda_{\text{PV}}(i)$ 为

$$\lambda_{\text{PV}}(i) = \lambda_{\text{IGBT,boost}}(i) + \lambda_{\text{Diode,boost}}(i) + 6 \times (\lambda_{\text{IGBT,inv}}(i) + \lambda_{\text{Diode,inv}}(i)) \quad (19)$$

式中， $\lambda_{\text{IGBT,boost}}(i)$ 、 $\lambda_{\text{Diode,boost}}(i)$ 、 $\lambda_{\text{IGBT,inv}}(i)$ 、 $\lambda_{\text{Diode,inv}}(i)$ 分别为场景*i*下，Boost电路与逆变电路中IGBT器件与二极管器件的短时故障率。

3 计及器件故障影响的微电网运行可靠性评估流程

电力电子器件故障对微电网的供电可靠性具有消极影响。第二部分基于场景分析技术，为风机和光伏电池的变流器电路建立了计及运行条件影响的短时故障率模型，为进一步量化器件故障对微电网运行可靠性指标的影响，本文采用枚举法枚举各个微电源的故障状态，评价其对微电网运行可靠性指标的影响。

3.1 切负荷策略

微电网运行时，当电力电子器件故障引起功率不平衡时，需要对微电网进行切负荷操作以保证系统的稳定运行。为减少电能传输线路上的损失，以保证微电网运行的经济性最优，按照微电源为电气距离小的负荷优先供电的原则来进行切负荷。负荷点*a*与微电源*b*之间的电气距离定义为

$$Z_{ab} = \sum_{l \in A} R_l + jX_l \quad (20)$$

式中： R_l 、 X_l 分别代表第*l*条馈线的电阻与电抗； A 表示负荷点*a*与微电源*b*之间馈线的集合。切负荷问题的数学表述为

$$\begin{cases} \min \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^M x_{ab}^i Z_{ab} \\ \text{s.t. } P_s \geq \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^M x_{ab}^i P_{lda} \\ x_{ab}^i \in [0, 1] \end{cases} \quad (21)$$

式中： M 表示微电源个数； n 为负荷点个数； x_{ab}^i 表示在微电网运行场景*i*下，微电源*b*对负荷点*a*的功率供应占后者功率需求的比例，当 $x_{ab}^i = 0$ 时表示两者不存在供求关系； P_i 表示微电源在场景*i*下的出力之和； P_{lda} 表示负荷点*a*的功率峰值。

3.2 运行可靠性指标

孤岛运行条件下，若负荷点与网内所有微电源均不存在供应联系，则表示该负荷被切除。指定场景*i*下负荷点的短时停运率 ξ ，短时停运时间 ω 计算式为

$$\begin{bmatrix} \omega_{i1} \\ \omega_{i2} \\ \vdots \\ \omega_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1M} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{i1} \\ \lambda_{i2} \\ \vdots \\ \lambda_{iM} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\xi_{ia} = \sum_{b=1}^M \lambda_{ib} \cdot x_{ab}^i \quad (23)$$

式中： λ_{ib} 表示场景*i*下微电源*b*的变流器短时故障率； r_{nM} 表示微电源*M*的变流器故障时负荷点*n*处的停运时间，由器件故障的修复时间决定。

为全面准确地评价器件故障对微电网供电可靠性的影响, 微电网层面选取系统年平均停电频率(System Average Interruption Frequency Index, SAIFI)、系统年平均停电持续时间(System Average Interruption Duration Index, SAIDI), 作为微电网运行可靠性的评价指标; 微电源层面选取微电源因电力电子器件故障导致的年平均故障次数(Micro-Source Failure Times, MSFT), 体现运行条件变化对器件故障率的影响。

$$SAIFI = \sum_{i=1}^{N_{\sigma}} \left(\Pr(\sigma_i) \cdot \frac{\sum_{a=1}^n \xi_{ia} \cdot m_a}{\sum_{a=1}^n m_a} \right) \quad (24)$$

$$SAIDI = \sum_{i=1}^{N_{\sigma}} \left(\Pr(\sigma_i) \cdot \frac{\sum_{a=1}^n \omega_{ia} \cdot m_a}{\sum_{a=1}^n m_a} \right) \quad (25)$$

$$MSFT = 8760 \sum_{i=1}^{N_{\sigma}} \sum_{b=1}^M \Pr(\sigma_i) \cdot \lambda_{ib} \quad (26)$$

式中, m_a 代表负荷点 a 处的负荷数目。

3.3 评估流程

为评估电力电子器件故障对微电网运行可靠性的影响, 评估采用故障枚举法分析各个场景下器件故障对可靠性指标的影响。电力电子器件故障对微电网运行可靠性影响的评估步骤概括如下:

1) 依据1.1节, 对原始气象数据进行场景削减处理, 获得削减后气象场景集合 Ω 及每个场景出现的概率。

2) 依据式(2)一式(4), 计算每个场景下各微电源的出力值; 并网模式不会出现功率不足, 但孤岛模式下需判断微电网内功率是否充裕, 功率不充裕则进行切负荷计算, 随后对微电网进行潮流计算。

3) 选取场景 i , 依据潮流计算结果, 根据式(5)一式(19)计算各变流器的短时故障率。

4) 枚举故障事件, 分析对负荷供电的影响, 根据式(21)进行切负荷操作, 依式(22)、式(23)计算负荷可靠性指标。

5) 遍历微电源全部出力场景, 重复步骤3)、4), 计算运行可靠性指标。

评估流程如图4所示。

4 算例分析

4.1 测试系统参数

一种改进的测试系统^[8]结构如图5所示。测试系统包括11个节点, 12条主馈线, 10个负荷点。微电网中包含三种类型的微电源, 总容量为34 kW, 参数设置与接入位置如表1所示; 负荷节点额定功率需求如表2所示, 时序负荷曲线如图6所示; 电力电子器件故障修复时间取为8 h。

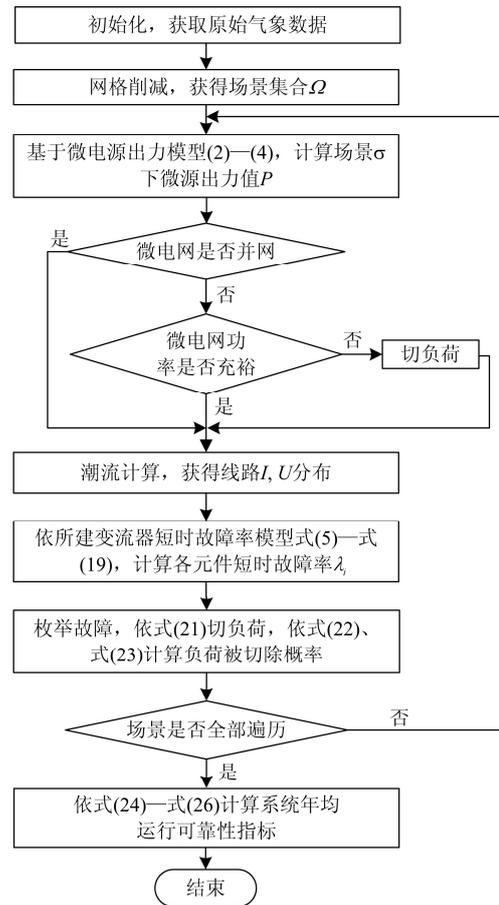


图4 评估算法流程图

Fig. 4 Flowchart of the evaluation procedure

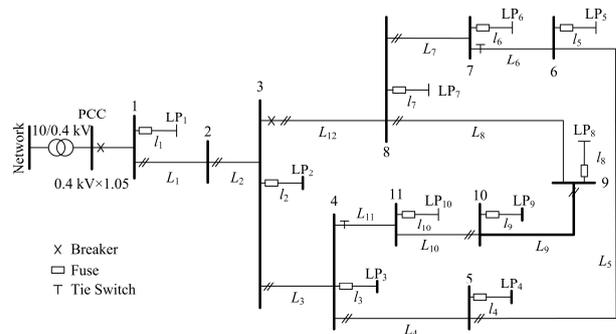


图5 改进的0.4 kV基准测试系统

Fig. 5 Improved benchmark 0.4 kV test system

表1 微电源安装位置与容量

Table 1 Locations and capacities of microsources

接入节点	微电源类型	额定容量/kW
3	光伏电池板	4
5	光伏电池板	5
6	风机	9
8	储能电池	10
10	光伏电池板	6

表 2 负荷参数表

Table 2 Load parameters

负荷编号	接入节点	负荷需求/kVA	用户数目
LP ₁	1	10.00+j2.05	52
LP ₂	3	5.00+j2.08	52
LP ₃	4	4.32+j1.08	50
LP ₄	5	7.25+j1.82	50
LP ₅	6	5.50+j1.38	50
LP ₆	7	0.77+j0.48	2
LP ₇	8	5.88+j1.47	50
LP ₈	9	5.74+j3.56	2
LP ₉	10	5.45+j1.62	52
LP ₁₀	11	3.31+j0.83	50

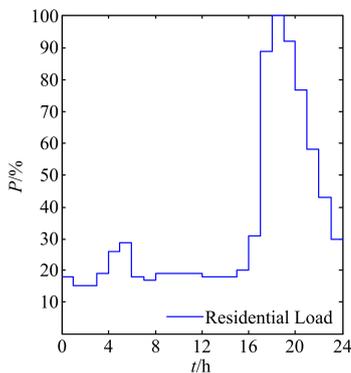
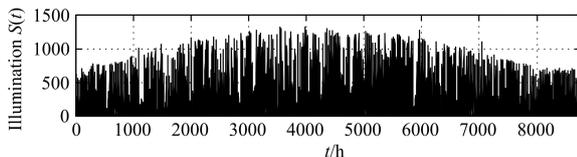


图 6 典型时序负荷曲线

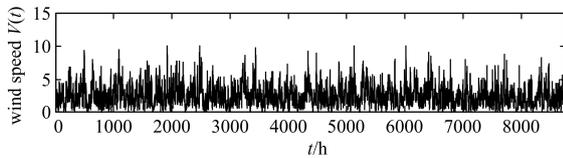
Fig. 6 Typical time-sequence load profiles

4.2 原始气象数据

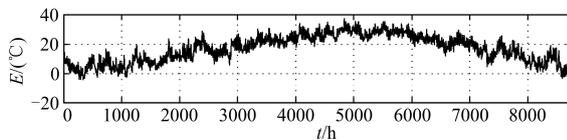
本文仿真所采用的气象数据，来自中国东南沿海某市一年的量测值，采样间隔为1h，共有8760组量测数据。光照强度，原始风速与环境温度数据如图7所示。



(a) 光照强度采样数据



(b) 风速采样数据



(c) 温度采样数据

图 7 原始气象数据

Fig. 7 Original meteorological data

4.3 运行可靠性指标分析

为评估电力电子器件故障对微电网运行可靠性指标的影响，本文设计了三种算例。各个算例定义见表3。

表 3 算例情形

Table 3 Three cases under different conditions

	电力电子器件停运模型	运行条件	微电源出力
算例1	是	是	是
算例2	是	否	是
算例3	否	是	是

算例1考虑微电网运行条件对电力电子器件故障率的影响，依照本文所建短时停运率模型进行评估；算例2不考虑微电网运行条件影响，电力电子器件导致的微电源年故障次数采用固定值0.02/年^[8]；算例3忽略由器件故障为微电网可靠性带来的影响。仿真中，储能装置遵循容量限制，以保持功率平衡为运行目标，不做深入分析。仿真结果如表4所示。

表 4 仿真结果

Table 4 Simulation results

	算例1	算例2	算例3
SAIFI	0.4128	0.3896	0.3752
SAIDI	2.1768	1.9912	1.8760
MSFT	0.0684	0.0200	0

比较算例1、3，算例3中忽略了电力电子器件故障对系统可靠性指标的影响，仅考虑了运行条件导致的微电源出力值波动对系统可靠性指标的影响，所得可靠性指标SAIFI与SAIDI值分别是算例1的90%与86%，即不考虑器件故障影响，所得可靠性指标偏于乐观。从这一结果可以看出电力电子器件的大量应用也为微电网系统的可靠性带来了新的隐患，提高大功率变流器电路的可靠性，是微电网技术中急需解决的一环。

比较算例1、2，算例1的MSFT值是算例2的3.42倍，系统可靠性指标SAIFI与SAIDI值也都高于算例2，即实际微电网的可靠性相对传统方法计算出来的可靠性结果更差。可见传统评估方法中，忽略运行条件对器件故障率的影响，器件故障率采用经验值的做法有失准确性。微电网运行条件复杂多变将影响电力电子器件的故障率，而元件故障率等参数的修正，将直接影响负荷点可靠性和系统可靠性的计算值。证实了本文所建电力电子器件短时停运率模型的准确性。

本文所建电力电子器件故障率模型与微电网的运行条件紧密相关，下面对微电网不同时段的可

可靠性指标进行仿真比较, 比较一年中不同月份微电网的可靠性高低, 仿真结果图8所示。

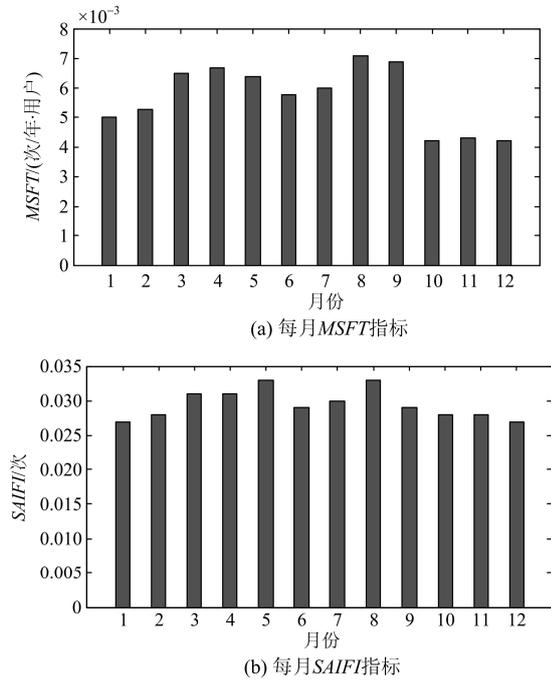


图8 每月可靠性指标

Fig. 8 Monthly index of reliability

从图8(a)中可以看出, 8、9月份微电网中电力电子器件的故障率是最高的, 这是因为夏季是用电高峰期, 且环境温度高器件故障率高于其他月份。从图8(b)中, 5、8两个月份微电网的供电可靠性指标最高, 这表明微电网的供电可靠性指标取决于微电源出力 and 器件故障率的共同影响。夏季是故障高发期, 需要加强微电网线路的巡检。

图9中给出了三种算例下10个负荷的年平均停运时间曲线。

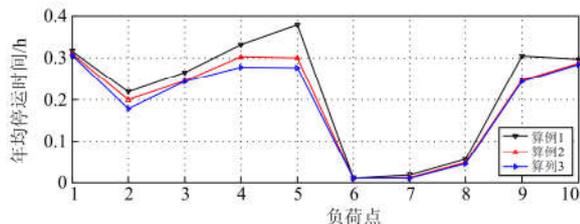


图9 负荷年平均停运时间

Fig. 9 Annual average outage time of load point

可以看出, 算例1中各个节点的平均停运时间均高于算例2、算例3, 这与表4中可靠性指标的计算结果相一致; 同一算例下, 不同负荷的可靠性指标存在较为明显的差异, 这与微电源接入位置与节点的负荷需求有关, 距离微电源近且功率需求小的负荷可靠性最高; 微电网中不同负荷的可靠性受电力

电子器件故障的影响存在差异, 三种情形下LP₆、LP₇的停运时间基本不改变, 可见器件故障率对二者的可靠性影响甚微, 这是因为有容量可观的储能装置被接入在节点8, 按照经济性最优的切负荷原则, 储能装置优先为两者供电, 其他微电源的器件故障不能对这两点的可靠性指标造成显著影响, 而LP₂、LP₄、LP₅、LP₉的停运时间指标在算例1、3中存在较为明显的区别, 四者所在节点3、5、6、10均为微电源的接入节点, 可见电力电子器件故障对微电源接入点的负荷可靠性指标影响最为显著。

5 结论

本文采用场景分析法, 探究了微电网中电力电子器件的故障机理, 基于电力电子器件的损耗功率模型和热模型, 建立了 IGBT 和功率二极管的基于结温的短时停运率模型, 并将运行条件对器件故障率的影响考虑在内。将所建模型应用于微电网可靠性评估中, 并在测试系统上进行了仿真计算, 仿真结果表明电力电子故障对微电网的可靠性指标具有不可忽略的消极影响; 相较于传统评估方法, 采用本文所建的电力电子器件短时停运率模型能够为微电网运行提供更加全面准确的可靠性信息。

参考文献

- [1] 杨珍贵, 周维维, 杜雄, 等. 基于器件的结温变化评估风机中参数差异对网侧变流器可靠性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(30): 41-49.
YANG Zhengui, ZHOU Luwei, DU Xiong, et al. Effects of different parameters on reliability of grid-side converters based on varied junction temperature of devices in wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(30): 41-49.
- [2] 曹智平, 周力行, 张艳萍, 等. 基于供电可靠性的微电网规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 10-15.
CAO Zhiping, ZHOU Lixing, ZHANG Yanping, et al. Micro-grid planning based on supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 10-15.
- [3] 彭寒梅, 曹一家, 黄小庆, 等. 基于时变通用生成函数的孤岛运行模式下微电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 28-35.
PENG Hanmei, CAO Yijia, HUANG Xiaoqing, et al. Reliability evaluation of microgrid in islanded operation mode based on TVUGF[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 28-35.
- [4] 谢林, 谢开贵, 何坚, 等. 计及控制策略的并网型微电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 102-109.

- XIE Lin, XIE Kaigui, HE Jian, et al. Reliability evaluation of grid-connected micro-grid considering control strategies[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 102-109.
- [5] 别朝红, 李更丰, 谢海鹏. 计及负荷与储能装置协调优化的微网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 64-73.
- BIE Chaohong, LI Gengfeng, XIE Haipeng. Reliability evaluation of microgrids considering coordinative optimization of loads and storage devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 64-73.
- [6] XIE Kaigui, JIANG Zefu, LI Wenyuan. Effect of wind speed on wind turbine power converter reliability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(1): 96-104.
- [7] 李学生, 张新闻, 常玉峰, 等. 基于半导体功率损耗的小型风电变换器可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 15-21.
- LI Xuesheng, ZHANG Xinwen, CHANG Yufeng, et al. Small wind power converter reliability research based on semiconductor power loss[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 15-21.
- [8] XU Xufeng, MITRA J, WANG Tingting, et al. Evaluation of operational reliability of a microgrid using a short-term outage model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2238-2247.
- [9] YU H, CHUNG C Y, WONG K P, et al. A chance constrained transmission network expansion planning method with consideration of load and wind farm uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1568-1576.
- [10] 王秀丽, 武泽辰, 曲翀. 光伏发电系统可靠性分析及其置信容量计算[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 15-21.
- WANG Xiuli, WU Zechen, QU Chong. Reliability and capacity value evaluation of photovoltaic generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 15-21.
- [11] US Dept. Defense. MIL-HDBK-217F reliability prediction of electronic equipment[S]. Washington, DC: 1991.
- [12] 胡建辉, 李锦庚, 邹继斌, 等. 变频器中的 IGBT 模块损耗计算及散热系统设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 159-163.
- HU Jianhui, LI Jingeng, ZOU Jibin, et al. Losses calculation of IGBT module and heat dissipation system design of inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 159-163.
- [13] 杜雄, 李高显, 吴军科, 等. 一种用于风电变流器可靠性评估的结温数值计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2813-2821.
- DU Xiong, LI Gaoxian, WU Junke, et al. A junction temperature numerical calculation method for reliability evaluation in wind power converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2813-2821.
- [14] Infineon FS300R12KE3[EB/OL]. [2016-11-24]. http://infineon.com/dgdl/Infineon-FS300R12KE3-DS-v03_01-en_cn.pdf?fileId=db3a30433dd58def013dd9a0af01182f.
- [15] 陈明, 胡安, 唐勇, 等. 绝缘栅双极型晶体管传热模型建模分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 453-459.
- CHEN Ming, HU An, TANG Yong, et al. Modeling analysis of IGBT thermal model[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 453-459.
- [16] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp. DOI 10.1186/s41601-016-0019-8
- [17] 陈丽丽, 牟龙华, 刘仲. 光储柴微电网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 86-91.
- CHEN Lili, MU Longhua, LIU Zhong. Analysis of the operating characteristics of a PV-Diesel-BESS microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 86-91.

收稿日期: 2016-11-24; 修回日期: 2017-02-03

作者简介:

刘爽(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网可靠性评估; E-mail: 102596@tongji.edu.cn

牟龙华(1963—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护、分布式发电与微电网、电能质量; E-mail: lhmu@tongji.edu.cn

许旭锋(1981—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为微电网可靠性评估。E-mail: xfxu@tongji.edu.cn

(编辑 张爱琴)