

大容量电力电子装备关键器件及系统可靠性综合分析 与评估方法综述

雷万钧, 刘进军, 吕高泰, 吕春林, 曹 瑞
(西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘 要: 大容量电力电子装备的可靠性综合分析及评估方法对装备的优化设计至关重要, 而其核心问题仍未被解决。通过对器件的物理失效机理分析, 可以获得不同关键器件的不同失效模式, 建立多物理场耦合下的可靠性研究的理论基础, 更为准确地针对具体器件、系统、物理场以及不同时间尺度展开可靠性量化评估。介绍了电力半导体器件、电容器和装备相关的可靠性研究现状, 分析了器件失效物理机理、可靠性分析方法, 总结了现有研究存在的问题, 提出了相应的解决方案, 展望了大容量电力电子装备可靠性的未来研究方向。

关键词: 电力电子可靠性; 大容量电力电子装备; 失效物理机理; 电力半导体器件; 电容器; 可靠性建模

Review of Reliability Comprehensive Analysis and Evaluation Methods for Key Components and System of Large Capacity Power Electronic Equipment

LEI Wanjun, LIU Jinjun, LÜ Gaotai, LÜ Chunlin, CAO Rui
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The comprehensive reliability analysis and evaluation method are vital to the optimal design of large capacity power electronic equipment, but its core problem has not been solved. Through the analysis of the physical failure mechanism of a device, different failure modes of various key devices can be obtained. In accordance with the theoretical basis of reliability research under the coupling of multi-physical fields, the reliability evaluation can be carried out more accurately for specific devices, systems, and physical fields under different time scales. We introduced the reliability research status of power semiconductor devices, capacitors and equipment, and analyzed the physical mechanism of device failure and reliability analysis methods. Summarizing the existing research problems, we proposed the corresponding solutions, and pointed out the future research direction of the reliability of large capacity power electronic equipment.

Key words: power electronics reliability; large capacity power electronic equipment; physics of failure; power device; capacitor; reliability model

0 引言

大容量电力电子装置是未来智能电网和新能源发电的核心装备。预计在 2017—2030 年期间, 我国全国发电装机将增长约 1 100 GW, 发电和电网侧电力电子装备将需要增长约 2 000 GW^[1]。随着电力电子装备应用越来越多, 容量越来越大, 其安全可靠运行对电网安全以及能源利用成本的影响也日益重大。电力电子装备的可靠性研究和其他传统电气

设备和微电子装备相比起步相对较晚, 目前现有的电力电子装备设计往往是靠高成本的过度裕量来换取装备的安全可靠运行, 造成了装备制造和运维成本不必要的浪费。目前中国电力电子装备市场容量为每年约 5 000 亿元^[2], 因过度裕量设计增加的制造和运维成本初步估计至少约 300 亿元。因此未来大容量电力电子装备必须在成本、效率和可靠性等方面实现综合平衡与优化。

在电力电子可靠性研究中, 功率器件最为脆弱, 其次为电容器, 两者薄弱程度远远超过其他器件^[3], 电力半导体器件和电容器的可靠性关系到系统整体的可靠性。栅极绝缘型双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)模块的失效主要包括键

基金资助项目: 国家重点研发计划(大容量电力电子装备多物理场综合分析及可靠性评估方法的研究)(2018YFB0905800)。
Project supported by National Key R&D Program of China (Research on Multiphysics Comprehensive Analysis and Reliability Evaluation Method of Large-capacity Power Electronic Equipment) (2018YFB0905800).

合引线脱落、焊料层疲劳、栅极氧化层降级^[4]、键合线根部断裂^[5]，铝金属化重构^[4,6]。其中铝键合线疲劳和焊料层疲劳是最主要的两种失效^[7]。对于高压大容量电力电子装备，除了有源器件外，大量无源器件，如电容，磁性元件，电阻与导体等也是不可缺少的组成部分。在实际工程条件下，金属化膜电容的失效时有发生，其使用寿命并没有制造商所宣称的那么长^[8]。针对这一现象，研究人员研究了金属化膜^[9-12]的老化失效机理，评估了电容器在具体应用时的使用寿命^[13-15]，分析其自愈参数^[16]以及绝缘失效机理^[17]。以可靠性评估手册^[18-19]为基础，提出了金属化膜电容器的可靠性评估方法^[20-24]。在大容量系统工况模拟的研究中，文献^[25]提出并验证了三相负载法、功率循环法两种全新模块化多电平变换器(modular multilevel converter, MMC)子模块工况模拟测试方法，可实现多子模块、多工况的控制行为和加载条件。

系统级可靠性的相关研究从研究目标上可分为建模分析和结构、冗余优化设计^[26-29]。其中，可靠性建模方式的发展较为成熟，可根据不同需求和应用场合对大容量电力电子设备进行建模，为评估以及优化提供理论基础^[30-31]。

本文重点关注在大容量电力电子装备可靠性综合分析评估方法的核心问题，分别对有源电力半导体和无源电容器的失效机理以及可靠性评估方法展开论述，同时总结装备级可靠性评估方法。在已有研究工作的基础上提出所面临的问题和挑战，提出相应的解决思路，展望未来电力电子可靠性研究的发展方向。

1 有源器件的可靠性研究现状

目前，有关电力半导体器件的可靠性研究主要集中于失效机理、寿命评估、状态检测等方面。其中失效机理的研究是电力半导体器件可靠性研究的基础。寿命评估有助于器件厂商设计出服役时间更长的新器件，同时可以帮助用户降低维修成本。状态检测用于变流器状态评估和故障预警，便于及时维护，防止意外停机事件发生。

1.1 电力半导体器件失效机理

通常，电力半导体器件的失效模式可概括分为两类，一是与芯片相关的失效，二是与封装相关的失效。与芯片相关的失效，如瞬态的过压和过流导致的芯片击穿。这类失效发生时间短暂，通常被归

入保护的范畴而未计入可靠性研究^[7]。为了得到多场耦合下装备的短时间失效特性，文献^[32]提出了一种基于小波分解与重构的复杂电力电子装备短时间尺度、多步长、多场建模及仿真计算方法。对于Si器件来说，可靠性研究关注更多的是与封装相关的失效。以IGBT为例，目前市场上主要存在两种不同形式的封装：普通塑封IGBT模块与压接式IGBT模块^[33]。

普通塑封的IGBT模块通常采用键合引线式结构，图1给出了一个典型的7层键合线封装的IGBT模块结构示意图，IGBT模块从上到下依次是铝键合引线、硅芯片、芯片焊料层、直接敷铜陶瓷基板(direct copper bonding, DCB)、底板焊料层和底板。研究表明，电力电子模块失效的根本原因是由于负载波动导致的热机械应变的发生^[34-36]。当电力电子变换器处理宽范围的波动功率时，电力半导体器件产生的大多数损耗垂直向下传递，于是模块内部各层产生温度梯度。由于不同材料之间热膨胀系数(coefficient of thermal expansion, CTE)的差异，导致不同材料的交界处存在着随温度变化而变化的热机械应力，最终导致键合引线脱落和断裂以及硅芯片与直接敷铜陶瓷基板及直接敷铜陶瓷基板与底板之间的焊料层疲劳而出现裂纹与裂纹生长甚至出现空洞与分层。

与普通塑封IGBT相比，通过压力焊接的压接式IGBT由于其独特的结构，避免了键合引线脱落、断裂或焊料层疲劳的失效模式。此外，良好的散热条件使得功率密度得以提高，相比于普通塑封IGBT，模块可靠性显著提高^[33]。压接式IGBT芯片的栅极通过装有弹簧的引线连接起来，弹簧在功率循环过程中，由于变化的温度而重复性的压缩与膨胀产生疲劳和应力损伤，长期累积将诱发弹簧失效；

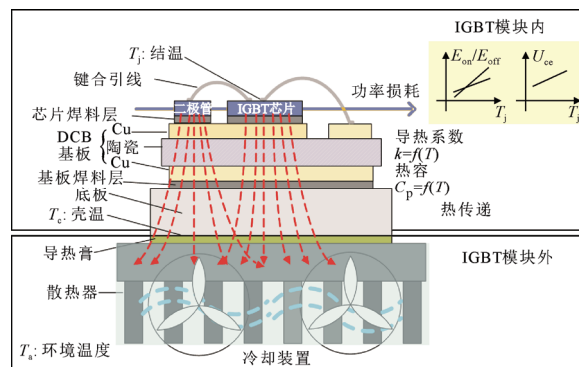


图1 典型键合线封装的IGBT模块结构示意图

Fig.1 Typical IGBT module with bonding wire package

同时, 机械振动也会使得弹簧引线与栅极焊点间发生相对移动, 导致栅极焊点磨损^[37]; 此外, 由于器件材料具有不同的 CTE, 在较高的温度和温度波动下, 不同材料会因膨胀和压缩程度不同而在接触面产生剪切力, 致使器件发生失效^[38]。

1.2 电力半导体器件可靠性评估方法

目前, 基于失效物理的寿命模型^[39]和基于加速老化试验数据的解析模型^[40-43]的可靠性评估方法已经得到广泛的认可。失效物理模型结合了材料的应变分析与老化数据, 能反映器件的失效机理, 可是参数难以获得。相比之下, 解析模型仅需对加速老化试验的数据进行拟合提取模型参数, 它不反映老化机理, 应用简单, 因此在寿命估计中被广泛使用。

1.2.1 电力半导体器件结温的获取方法

根据失效机理, 热应力是电力半导体器件失效的主要因素。因此准确获得电力半导体器件的结温是寿命评估的关键。

电力半导体器件结温的获取包括测量和评估两种方法。其中测量又分为直接测量和间接测量。直接测量包括光学法和物理接触法, 光学法是通过红外热成像仪对开封 IGBT 模块内的芯片直接进行温度测量, 该方法测量精度高, 能同时测量低频和高频的结温波动, 由于设备昂贵只用于实验研究。物理接触法需在芯片表面额外安装温度传感器如热电偶等, 由于操作便捷, 常用于工程实际测温。但是, 该方法响应时间长, 只能用于测量低频结温。此外温度传感器的引入干扰了芯片表面的温度分布, 测量的结温与实际结温有较大差距。热敏参数法(temperature sensitive electrical parameters, TSEP)是广泛采用的间接测量法, 其核心思想是找出与温度有关的电气参数, 标定出电气参数与温度的关系曲线用于在线的结温测量, 常见的 TESP^[44-47]包括饱和电压降、栅极电压、阈值电压、短路电流、饱和电流、米勒平台电压, 开通/关断延时时间等^[48-51]。文献[52]详细地对比和列举了不同 TESP 的优缺点。为了解决现有方法在瞬态仿真中无法兼顾流体场、温度场及半导体器件模型的问题, 大幅度提升仿真精度, 文献[53]提出了考虑流体冷却、器件电热特性等多物理场耦合效应的电力半导体短时间尺度应力计算方法, 应用神经网络表征半导体器件开关过程中能量损耗及电压电流应力, 大幅度提升仿真效率。

热网络是广泛使用的在线结温评估方法, 通过两步实现, 首先根据变换器实际运行工况计算出电

力半导体器件的损耗, 然后根据壳温和热网络计算结温。因此, 准确的结温评估依赖于电力半导体器件的损耗模型和热模型。准确的损耗模型可通过对特定的电力半导体器件进行双脉冲测试提取^[54]。热模型通常用一系列热阻和热容的集总参数模型表示^[55-57]。根据热阻和热容的连接方式可分为 Cauer 模型和 Foster 模型两类。Cauer 模型每一层反映器件内部真实的物理结构, 被公认为是相对准确的热模型, 然而, 每层参数难以获取。因此, Foster 模型常在工程中替代 Cauer 模型。接触面导热硅脂老化^[58]对器件老化有较大影响, 西安交通大学李建英教授团队建立了散热器导热硅脂劣化的三维热网络模型, 可反映导热硅脂劣化对 IGBT 结温的影响, 研究发现导热硅脂劣化会严重影响芯片的散热。

1.2.2 电力半导体器件的寿命模型

广泛使用的 IGBT 解析模型主要有: Coffin-Manson Model^[40], Modified Coffin-Manson Model^[41], Norris-Landzerg Model^[42]和 Bayerer's Model^[43]等。不同的寿命模型具有不同的适用条件, 采用不同的寿命模型评估寿命存在较大的差异, 文献[59]对应用于 MMC 中的 IGBT 模块使用不同的寿命模型进行寿命预测, 指出寿命模型的挑选对于 IGBT 模块的寿命评估具有较大影响。

1.2.3 电力半导体器件的疲劳失效描述方法

电力半导体器件的疲劳失效是长期交变的热应力产生的损伤累计的结果。长期任务剖面下, 功率器件的寿命预测常用 Miner 线性累计损伤理论分析^[60]。线性累计损伤理论认为每个温度循环都会对器件造成损伤, 并且损伤的累计是线性的, 当累计损伤 $D=1$ 时, 认为器件失效。第 i 个温度循环下的累计损伤可通过下式计算

$$D_i = \frac{1}{N_{f,i}} \quad (1)$$

其中: D_i 代表第 i 个温度循环下电力半导体器件产生的损伤; $N_{f,i}$ 代表在第 i 个温度循环条件下电力半导体器件的失效前循环次数, 可通过寿命模型^[40-43]计算。因此, 一段时间内器件的总累积损伤 D 可表示如下

$$D = \sum_{i=1}^n D_i \quad (2)$$

值得注意的是 Miner 线性累计损伤理论未考虑应力载荷的顺序对电力半导体器件寿命的影响。此外, 使用过程中未考虑材料老化对电力半导体器件

寿命评估的影响。

随着结温波动的增大, 电力半导体器件的失效前循环次数 N_f 将减少^[61-63]。因此旨在降低电力半导体器件热应力的主动热控制已成为近年来的热门研究课题。主动热控制本质是对电力半导体器件的损耗进行操纵, 大体分为两类, 一类是损耗补偿型热控制, 另一类是损耗降低型热控制^[7]。尽管主动热控制大大缓解了电力半导体器件的热应力, 提高了模块可靠性, 但是或多或少的牺牲了变换器的效率和电能质量, 因此需要在可靠性、效率和电能质量之间进行权衡。

1.3 电力半导体器件状态监测技术

状态监测是通过监测电力半导体器件电热参数的微小变化来评估模块健康状态。失效发生会导致模块内部结构的变化, 进而影响端部特性的变化。近年来, 国内外学者基于器件端部特性以及系统输出波形等方面对器件状态监测技术展开了研究。

器件的端部特性如集电极-发射级饱和压降、稳态结壳热阻、门极电压信号、阈值电压、关断时间、短路电流、集电极漏电流等状态监测参量^[64-67]均能表征功率器件健康状态^[68-70]。文献[71]通过监测谐波电流的变化监测焊料层老化, 该方法能准确监测键合线脱落及焊料层疲劳所引起的失效, 但不能辨识出具体失效芯片及芯片个数。

基于器件端部特性的状态监测方法能直观反映器件的失效过程, 但各方法均存在局限性。基于系统输出波形的状态监测法具有经济、实用以及非破坏性的特点, 有着良好的应用前景。但是, 该方法只能对已发生的故障进行监测, 无法实现故障预诊断^[33]。

多芯片并联模块老化状态监测的基本问题是对其中单个芯片焊料层老化的状态进行监测, 而其他并联芯片的焊料层几乎没有出现老化。在文献[72]的研究中, 热阻增加 20%~30%后, 老化过程明显加速, 因此这是状态监测的临界点; 此时对应的芯片温差最大为 10 °C 左右, 电流分配差异小于 0.5%, 导通压降变化小于 0.2% 工程中无法识别; 老化芯片导致总开关损耗增大 10%~20%, 有可能从关断过程波形识别出焊料层老化的芯片。此外, 单个热阻的变化能直接导致外部温度分布的变化。

2 关键无源器件的可靠性研究现状

电容器作为储能器件广泛应用于电力变流器

中, 在吸收高幅值纹波电流、平衡输入源与输出负载的瞬时功率差、维持直流侧电压稳定等方面起着重要作用。一项针对电子元器件制造商以及航空航天、自动化、电机驱动、公用电力等行业的电力用户的调查中^[3], 将近 20% 的受访者认为电容是电力电子系统中最脆弱的器件, 如图 2 所示^[1]。与铝电解电容相比, 金属化膜电容具有耐压高、寿命长、可靠性高等优点, 成为高压大容量电力电子系统^[8]的首选。

2.1 金属化膜电容的失效机理

金属化膜电容会在电应力, 热应力, 湿度应力和谐波应力等多种应力的共同作用下失效。一般来说, 金属化膜电容的失效模式可分为单次过应力引起的突发失效和电容器长期劣化导致的老化失效, 其中, 老化失效是主要失效模式^[8-9]。现有的研究表明, 当金属化膜电容的容值下降到初始容值的 95% 时, 发生老化失效^[9,14], 其失效机理总结如下。

2.1.1 自愈击穿

金属化膜的自愈特性使其能在介质薄膜击穿场强附近工作而不会击穿失效^[8,14,16]。然而, 当自愈发生时, 电容器将失去一定的电容。随着击穿点的增加, 电容会逐渐减少, 直至电容器失效。

2.1.2 电化学反应

金属化铝膜与聚丙烯膜之间存在气隙, 铝膜被氧化形成氧化铝^[8,11]。同时, 气隙中不可避免的存在水蒸气, 铝和水会发生氧化还原反应, 产生 H^+ 和 OH^- , 腐蚀电极。此时, 腐蚀区域的介质薄膜并没有破坏, 但该区域不再受电场影响也不产生电容, 相当于电容损耗^[15-16]。

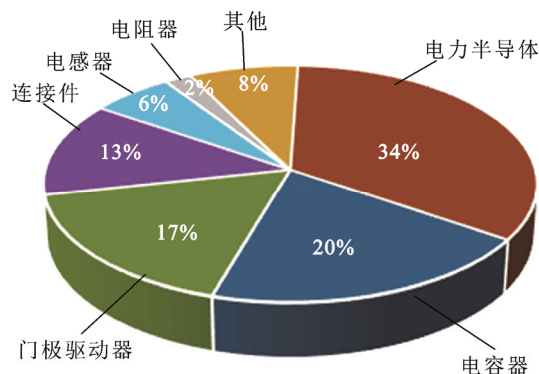


图2 关于电力电子系统中最脆弱的器件的调查反馈
Fig.2 Research feedback on the most vulnerable devices in power electronic systems

2.1.3 局部放电

聚合物薄膜在制作加工的工程中会随机地出现缺陷, 通常也称之为电弱点。当工作环境达到局部放电的条件时, 不可避免地会在这些电弱点处产生连续的局部放电, 导致材料表面的变质和侵蚀。局部放电的积累和发展会导致绝缘的破坏^[17]。

2.2 金属化膜电容的可靠性评估方法

传统的金属化膜电容器可靠性评估方法是利用中国军用标准(GBJ/Z 299C—2006)或美军军用手册(MIL-HDBK-217F), 将基础失效率和一系列工况因素相乘, 得到一个恒定的失效率^[18-19]。这种方法没有考虑器件的失效机理, 也没有考虑老化对可靠性的影响, 而且对工况因素的描述过于简略, 因此预测的寿命与实际寿命相差过大, 目前已少有使用。当前广泛研究的是基于失效物理的寿命模型和基于性能退化数据的可靠性评估方法。

2.2.1 基于失效物理的寿命模型

通过分析各种失效机理对金属化膜电容寿命的影响, 文献[8-9,12-13,20]提出了基于电热应力的经验寿命模型, 如式(3)所示。该模型引入逆幂律模型来描述电压对介质材料劣化的影响, 并引入阿伦尼乌斯公式来模拟温度对电化学反应的影响。

$$L=L_N\left(\frac{U}{U_N}\right)^{-n_1} \times 2^{\frac{T_N-T_{hs}}{\alpha}} \quad (3)$$

其中, L 、 L_N 、 U 、 U_N 、 T_{hs} 和 T_N 分别是电容预期寿命、电容额定寿命、实际运行电压、额定运行电压、实际核心热点温度和额定温度。 n_1 和 α 分别为电压因数和温度因数。

在恒应力经验模型的基础上, 奥尔堡大学 H. Wang, D. Zhou, F. Blaabjerg 等人^[13,20]和重庆大学的赖伟, 李辉等人^[21]在金属化膜电容寿命预测中引入任务剖面, 分析了变应力工况对寿命的影响。

2.2.2 基于性能退化数据的可靠性评估方法

针对金属化膜电容器可靠性高, 失效实验数据少的问题, 国防科技大学的赵建印, 刘学敏和孙权等人提出了基于性能退化数据的可靠性评估方法^[22-24], 根据不同的失效模式, 可采用更新过程, Wiener 过程和 Gamma 过程模拟退化过程, 进行寿命预测。文献[73]建立了实际工况下的可靠性评估模型, 并获得了金属化膜电容随时间退化的特性。

2.3 电容状态变量甄选与在线监测技术

电容器的在线监测在保障大容量电力电子装备可靠性方面较为重要, 针对电容器关键状态参量,

通过多源数据接入与融合, 可以保证电力电子设备的全景监视与全态感知。文献[74]提出了一种使用时频分析的铝电解电容器等效串联电阻(equivalent series resistance, ESR)在线监测方法, 相较于传统监测方法计算更为简单, 在 DC-DC 和 AC-DC 转换中易于实现。

在老化特征量甄选与监测标准方面, 对于 MMC 子模块的情形, 主要特点是开关频率低, 电容电压波动大, 容值减小之后, 电压波动更大, 加强了老化作用因子, 电容器会处于加速老化的过程; 所以采用 IEC 标准 60384-16, 即金属化膜电容器容值下降 5%就必须检测到并予以更换。对于 DC-DC 固态变压器的情形, 主要特点是开关频率高, 电容电压波动小, 容值开始减小对电压波动影响不大, 而电容器温升受自身损耗影响也不大^[74], 主要受环境影响; 参照 IEC 标准 60384-4, 即电解电容容值可以下降 20%, ESR 可以增加 100%。

3 装备可靠性分析与设计

过去几十年间, 电力电子装备(系统)可靠性的相关研究集中在对可靠性需求很高的领域, 如航空航天, 核工程以及军用设备等。近年来, 随着新能源分布式发电和高压直流输电工程的不断发展, 用于交直流变换的大容量电力电子设备面临着更高的可靠性需求。

常用的系统级可靠性建模分析方法有可靠性框图、故障树分析和马尔科夫动态分析等。

3.1 可靠性框图

系统级可靠性计算通常建立元件、子模块和系统的可靠性框图(reliability block diagram, RBD), 可靠性框图来源于系统或器件中每个部分的必要性, 从而达到计算总体可靠性、对系统中的零部件进行可靠性分析设计的目的^[75]。如图 3 所示, 对于大型系统, 可靠性框图自上而下导出, 在每一层面, 所需要达到的功能来源于更高层。

常见的典型系统可靠性模型包括串联系统、并联系统、混联系统和 $k/n(G)$ 系统模型^[76]等。基于 $k/n(G)$ 模型对 MMC 子模块进行可靠性建模^[77-80], 借助 Copula 函数理论, 可以分析考虑子模块相关性前提下不同的子模块冗余配置方案对 MMC 可靠性的影响^[81]。

3.2 故障树分析

故障树分析法(fault tree analysis, FTA)是一种

使用图形演绎逻辑推理方法,用图说明系统的失效原因,把系统的故障与组成系统的部件故障有机地联系在一起,可以找出系统全部可能的失效状态,也就是故障树的全部最小割集,或者称它们是系统的故障谱^[82],最后利用故障树分析计算系统可靠性指标,其分析过程如图4所示。

运用故障树分析方法,结合典型的MMC换流阀拓扑结构,建立MMC换流阀故障树模型,既可以将换流阀系统故障与所有主要组成元件的故障有机的联系在一起,较为全面地分析不同结构、不同元件可靠性水平,也能基于所建可靠性模型,通过计算各元件的灵敏度指标,对MMC换流阀进行薄弱环节分析^[82-83]。

3.3 马尔科夫动态分析

当系统行为具有无记忆性特点(即系统将来状态只与前一个状态有关,与过去其他状态无关),且系统状态可识别时,可通过马尔可夫动态分析来实现系统的可靠性评估。一般一个随机过程的变量 $X(t)$ 在某个时刻 t 的取值与以前组成此过程的所有随机变量的取值有关,但是有一类重要的随机过程却具有如下特殊的性质:如果集合 $(t_1, t_2, \dots, t_m)$ 中的时刻按次序 $t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_m$ 排列,在条件 $X(t_i) = x_i, i=1, 2, \dots, m-1$ 下 $X(t_m) = i_m$ 的分布函数恰好等于在 $X(t_{m-1}) = i_{m-1}$ 条件下 $X(t_m) = i_m$ 的分布函数,即

$$\begin{aligned} P\{X(t_m) = i_m | X(t_1) = i_1, \dots, X(t_{m-1}) = i_{m-1}\} = \\ P\{X(t_m) = i_m | X(t_{m-1}) = i_{m-1}\} \end{aligned} \quad (4)$$

则称具有这种性质的过程为马尔科夫过程^[84](Markov process)。

利用Markov过程的推广Semi-Markov过程可以对MMC进行可靠性建模,并结合频率和持续时间法对存在不同冗余度的系统进行可靠性指标的定量分析^[85]。另外,采用等值元件组模型建立不计和计及备用换流变时的换流变子系统的马尔可夫状态空间图,可以分析不同运行模式下备用换流变对系统可靠性的影响^[86]。

4 研究前景展望

电力电子装备涉及从亚微秒到年度范围的多时间尺度物理过程,电磁应力、温度应力、机械应力等多物理场之间的耦合作用明显,特别是关键部件的制造厂商还无法有效提供中、高频开关复杂工况下的安全运行与可靠性数据,这一系列的因素都使得装备整体可靠性评估问题的解决变得极其困

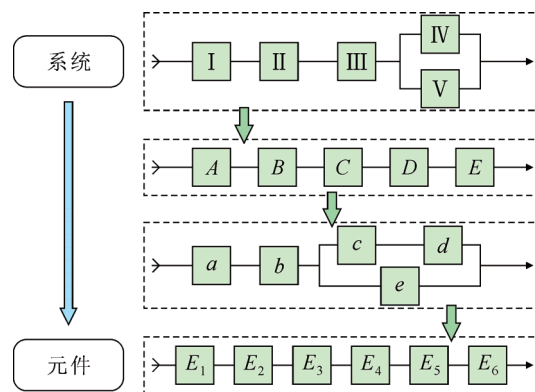


图3 可靠性框图

Fig.3 Reliability block diagram

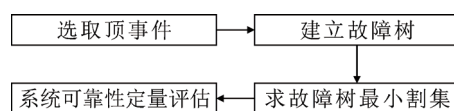


图4 故障树分析流程图

Fig.4 Flow chart of fault tree analysis

难。国内外众多研究机构为解决这一问题开展了多年的相关研究,但都只解决了问题的局部或片段,核心问题上一一直未取得突破性进展。经过深入分析,发现已有研究工作本身存在以下问题:

- 1) 物理过程的时间尺度划分方法不明确、划分界限不清晰,阻碍了对多时间尺度物理过程的正确认识。
- 2) 现有研究主要集中在电力半导体器件,对电力电子装备的其他关键部件涉及不足。
- 3) 现有研究缺少有效的思路来综合处理多物理场之间的耦合难题和多时间尺度的交互影响。
- 4) 对故障率、预期寿命等可靠性指标缺乏准确而量化的评估方法,更少涉及对老化或健康状态的监测。

因此,针对现有研究的不足提出以下相应的研究思路:

- 1) 按照失效时部件与装备是否经历了性能逐渐劣化的过程将失效机理划分为老化致失效和短时间尺度失效两类,将短时间尺度失效划分为安全性问题,而老化致失效划分为可靠性问题。
- 2) 不仅研究电力半导体器件,而且研究磁件、电容器等无源器件,以及导体、连接件和散热件等重要部件。
- 3) 分别在短时间尺度和老化过程下研究电磁场、温度场、机械应力场以及电路层面之间多物理

场耦合,进而考虑这两种时间尺度过程的交互影响。将短时间尺度过程作为老化过程的重复工况,将劣化参数作为短时间尺度过程参数渐变的依据。

4) 根据对可靠性的量化评估进行装备的综合优化设计,并与老化状态的在线监测相结合。

5 结论

本文简要叙述了大容量电力电子装备的失效机理,总结了可靠性相关的研究现状:

1) 在失效机理部分,电力半导体器件失效模式随封装形式的不同而变化。

2) 考虑失效物理机理时,金属化膜电容器表现为多种应力共同作用失效。

3) 在可靠性分析与评估中,分别综述了 IGBT 器件结温、寿命模型、状态监测技术,金属化膜电容器以及装备级(系统级)可靠性建模方法。

最后分析电力电子可靠性现有研究的不足,展望了基于多时间尺度多物理场可靠性研究的进一步发展方向。

参考文献 References

- [1] 吴敬儒. 2015—2030 年中国电力工业发展展望[N]. 中国电力报, 2015-05-28(2).
WU Jingru. Development prospect of China's electric power industry in 2015—2030[N]. China Electric Power, 2015-05-28(2).
- [2] 中国宽禁带功率半导体及应用产业联盟. 2016—2020 年电力电子器件产业发展蓝皮书[M]. 北京: 中国宽禁带功率半导体及应用产业联盟, 2017.
China Wide Band Gap Power Semiconductor and Application Industry Alliance. 2016—2020 power electronic device industry development blue book[M]. Beijing, China: China Wide Band Gap Power Semiconductor and Application Industry Alliance, 2017.
- [3] YANG S, BRYANT A, MAWBY P, et al. An industry-based survey of reliability in power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1441-1451.
- [4] CIAPPA M. Selected failure mechanisms of modern power modules[J]. Microelectronics & Reliability, 2002, 42(4/5): 653-667.
- [5] MALVESTAM D. Implementation of an in-situ non-contact temperature controller for active thermal fatigue tests of power electronics[D]. Norrköping, Sweden: Linköping University, 2006.
- [6] LUTZ J. IGBT-modules: design for reliability[C]// European Conference on Power Electronics & Applications. [S.l.]: IEEE, 2009.
- [7] WANG B, CAI J, DU X, et al. Review of power semiconductor device reliability for power converters[J]. CPSS Transactions on Power Electronics & Applications, 2017, 2(2): 101-117.
- [8] 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.
- [9] WANG H, LISERRE M, BLAABJERG F, et al. Transitioning to Physics-of-Failure as a reliability driver in power electronics[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(1): 97-114.
- [10] BELKO V, GLIVENKO D, EMEL'YANOV O, et al. Current pulse polarity effect on metallized film capacitors failure[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(6): 1020-1025.
- [11] BROWN R W. Linking corrosion and catastrophic failure in low-power metallized polypropylene capacitors[J]. IEEE Transactions on Device & Materials Reliability, 2006, 6(2): 326-333.
- [12] MAKDESSI M, SARI A, VENET P. Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(9/10): 1823-1827.
- [13] WANG H, DAVARI P, WANG H, et al. Lifetime estimation of DC-Link capacitors in adjustable speed drives under grid voltage unbalances[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(5): 4064-4078.
- [14] LI Z, LI H, LIN F, et al. Lifetime prediction of metallized film capacitors based on capacitance loss[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1313-1318.
- [15] 吴宇. 三相变流器中直流母线电容的状态监测技术研究[D]. 重庆大学, 2016.
WU Yu. Study on condition monitoring technique of DC-Link capacitors in three-phase AC/DC/AC PWM power converters[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2016.
- [16] 彭波. 金属化膜电容器自愈关键参数研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
PENG Bo. Study on key parameters of self-healing of metallized film capacitor[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [17] 张雪琴. 高压储能电容器绝缘失效机理及测试技术的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
ZHANG Xueqin. Study on insulation failure mechanism and testing technology of high voltage energy storage capacitor[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [18] Military handbook-reliability prediction of electronic equipment: MIL-HDBK-217F notice 2[S]. 1995.
- [19] 电子设备可靠性预计手册: GJB/Z-299C—2006[S], 2006.
Electronic equipment reliability prediction manual: GJB/Z-299C—2006[S], 2006.
- [20] ZHOU D, SONG Y, LIU Y, et al. Mission profile based reliability evaluation of capacitor banks in wind power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(5): 4665-4677.
- [21] YAO R, ZHENG M, LI H, et al. Reliability modeling and analysis on metallized film capacitors for MMC[C]// 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia). Busan, Korea (South): IEEE, 2019: 1854-1860.
- [22] 赵建印. 基于性能退化数据的可靠性建模和应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
ZHAO Jianyin. Reliability modeling and application research based on performance degradation data[D]. Changsha, China: National University of Defence Technology, 2005.
- [23] 刘学敏, 厉海, 张威, 等. 金属化膜电容器 Gamma 过程性能退化建模的自助法[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 198-202.
LIU Xuemin, LI Haitao, ZHANG Wei, et al. Bootstrap method of metallized film capacitor Gamma process degradation modeling[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 198-202.
- [24] 孙权, 汤衍真, 冯静. 利用 T 型性能退化试验的金属化膜电容器可靠性评估[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2261-2265.
SUN Quan, TANG Yanzhen, FENG Jing. Reliability assessment of metallized film capacitors using T performance degradation test[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2261-2265.
- [25] JIANG S, MA K, CAI X. Self-circulating testing method for both rectifying and inverting submodules of modular multilevel converter with low DC supply voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 7795-7803.
- [26] KIM C, LEE S. Redundancy determination of HVDC MMC modules[J]. Electronics, 2015(4): 526-537.
- [27] 郭焕, 温家良, 汤广福, 等. 直流输电换流阀主电路的可靠性分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊 1): 39-43.

- GUO Huan, WEN Jialiang, TANG Guangfu, et al. Reliability analysis and optimal design of main circuit within HVDC thyristor valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(Supplement1): 39-43.
- [28] 王朝亮, 赵成勇, 许建中. 模块化多电平换流器的子模块冗余配置计算方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 103-107.
- WANG Zhaoliang, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong. A method for calculating sub-module redundancy configurations in modular multi-level converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 103-107.
- [29] WANG B, WANG X, BIE Z, et al. Reliability model of MMC considering periodic preventive maintenance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1535-1544.
- [30] CHUNG H S H, WANG H, BLAABJERG F, et al. Reliability of power electronic converter systems[M]. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2015.
- [31] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 27-57.
- XU Zheng. Flexible direct current transmission system[M]. Beijing, China: Mechanical Industry Press, 2012: 27-57.
- [32] GUO S S, ZHANG B, XIE F, et al. Applying wavelet decomposition and reconstruction to solve conflict between macro- and micro-scale simulation step of buck converter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9120006>. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3003297.
- [33] 周维维, 吴军科, 杜雄, 等. 功率变换器的可靠性研究现状及展望[J]. 电源学报, 2013(1): 7-21.
- ZHOU Luwei, WU Junke, DU Xiong, et al. Status and outlook of power converter's reliability research[J]. Journal of Power Supply, 2013(1): 7-21.
- [34] AVERY S M, LORENZ R D. In situ measurement of wire-bond strain in electrically active power semiconductors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(2): 973-981.
- [35] PEDERSEN K B, PEDERSEN K. Dynamic modeling method of electro-thermo-mechanical degradation in IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 975-986.
- [36] MA K, WANG H, BLAABJERG F. New approaches to reliability assessment: using physics-of-failure for prediction and design in power electronics systems[J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2016, 3(4): 28-41.
- [37] BUSCA C. Modeling lifetime of high power IGBTs in wind power applications - an overview[C]//2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. [S.l.]: IEEE, 2011.
- [38] COVA P, NICOLETTO G, PIRONDI A. Power cycling on press-pack IGBTs: measurements and thermomechanical simulation[J]. Microelectronics & Reliability, 1999, 39(6/7): 1165-1170.
- [39] PECHT M, GU J. Physics-of-failure-based prognostics for electronic products[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2009, 31(3): 309-322.
- [40] MANSON S S, DOLAN T J. Thermal stress and low cycle fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics, 1966, 33(4): 957.
- [41] WINTRICH A, ULRICH N, WERNER T, et al. Application manual power semiconductors[M]. Nuremberg, Germany: Semikron, 2015.
- [42] NORRIS K C, LANDZBERG A H. Reliability of controlled collapse interconnections[J]. Ibm Journal of Research & Development, 1969, 13(3): 266-271.
- [43] BAYERER R, HERRMANN T, LICHT T, et al. Model for power cycling lifetime of IGBT modules - various factors influencing lifetime[C]//International Conference on Integrated Power Systems. Nuremberg, Germany: IEEE, 2008.
- [44] SMET V. Aging and failure modes of IGBT power modules undergoing power cycling in high temperature environments[D]. Montpellier, France: Université de Montpellier 2, 2010.
- [45] KIM Y S, SUL S K. On-line estimation of IGBT junction temperature using on-state voltage drop[C]//IAS Meeting the IEEE. [S.l.]: IEEE, 1998.
- [46] HOEER M, MEISSNER M, FILSECKER F, et al. Online temperature estimation of a high-power 4.5 kV IGBT module based on the gate-emitter threshold voltage[C]//European Conference on Power Electronics & Applications. [S.l.]: IEEE, 2015.
- [47] XU Z, XU F, WANG F. Junction temperature measurement of IGBTs using short-circuit current as a temperature-sensitive electrical parameter for converter prototype evaluation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3419-3429.
- [48] SUNDARAMOORTHY V, BIANDA E, BLOCH R, et al. Online estimation of IGBT junction temperature (T_j) using gate-emitter voltage (V_{ge}) at turn-off[C]//2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). [S.l.]: IEEE, 2013.
- [49] AYADI M, FAKHFAKH M, GHARIANI M, et al. Electro-thermal simulation of a three phase inverter with cooling system[J]. Journal of Modelling and Simulation of Systems, 2010, 1(3): 163-170.
- [50] LUO H, CHEN Y, SUN P, et al. Junction temperature extraction approach with turn-off delay time for high-voltage high-power IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 5122-5132.
- [51] LI L, NING P, WEN X, et al. A turn-off delay time measurement and junction temperature estimation method for IGBT[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition. [S.l.]: IEEE, 2017.
- [52] SATHIK M H M, POU J, PRASANTH S, et al. Comparison of IGBT junction temperature measurement and estimation methods-a review[C]//2017 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT). [S.l.]: IEEE, 2017.
- [53] WANG J, XU M, ZHANG J, et al. A data-based IGBT model for accurate and efficient electro-thermal analysis[C]//ECCE. [S.l.]: [s. n.], 2020.
- [54] BROECK C H V D, RUPPERT L A, LORENZ R D, et al. Methodology for active thermal cycle reduction of power electronic modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 8213-8229.
- [55] SCHUTZE T. Infineon application note AN2008-03 thermal equivalent circuit models[M]. Wavstein, Germany: Infineon, 2008.
- [56] SCHNELL R, BAYER M, GEISSMANN S. ABB application note 5SYA 2093-00 thermal design and temperature ratings of IGBT modules[M]. Lenzburg, Switzerland: ABB, 2013.
- [57] MA K, HE N, LISERRE M, et al. Frequency-Domain thermal modeling and characterization of power semiconductor devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 7183-7193.
- [58] ZHENG S, DU X, ZHANG J, et al. Monitoring the thermal grease degradation based on the IGBT junction temperature cooling curves[C]//2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). Shenzhen, China: IEEE, 2018: 1-4.
- [59] ZHANG Y, WANG H, WANG Z, et al. Impact of lifetime model selections on the reliability prediction of IGBT modules in modular multilevel converters[C]//2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). [S.l.]: IEEE, 2017.
- [60] MINER M A. Cumulative damage in fatigue Jour[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12(3): 159-164.
- [61] WU J, ZHOU L, SUN P, et al. Smooth control of insulated gate bipolar transistors junction temperature in a small-scale wind power converter[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(3): 393-400.
- [62] FALCK J, ANDRESEN M, LISERRE M. Active thermal control of IGBT power electronic converters[C]//IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S.l.]: IEEE, 2015.
- [63] ANDRESEN M, BUTICCHI G, FALCK J, et al. Active thermal management for a single-phase H-bridge inverter employing switching frequency control[C]//Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg, Germany: [s. n.], 2015: 1-8.

- [64] XIONG Y, CHENG X, SHEN Z J, et al. Prognostic and warning system for power-electronic modules in electric, hybrid electric, and fuel-cell vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2268-2276.
- [65] XIANG D, RAN L, TAVNER P, et al. Monitoring solder fatigue in a power module using the rise of case-above-ambient temperature[C]// IEEE Energy Conversion Congress & Exposition. [S.l.]: IEEE, 2010.
- [66] WEI K, DU M, XIE L, et al. Study of bonding wire failure effects on external measurable signals of IGBT module[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2014, 14(1): 83-89.
- [67] DU M, WEI K, LI J, et al. Condition monitoring IGBT module bond wire lift-off using measurable signals[C]// 2012 7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2012). [S.l.]: IEEE, 2012.
- [68] FAROKHZAD B. Method for early failure recognition in power semiconductor modules: US 6145107[P]. 2000-11-7.
- [69] 王海波. 基于短路电流的 IGBT 模块状态评估方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
WANG Haibo. Research on condition assessment method of IGBT module based on short circuit current[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2018.
- [70] 刘宾礼, 肖飞, 罗毅飞, 等. 基于集电极漏电流的 IGBT 健康状态监测方法研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 183-193.
LIU Binli, XIAO Fei, LUO Yifei, et al. Investigation into the health condition monitoring method of IGBT based on collector leakage current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 183-193.
- [71] XIANG D, RAN L, TAVNER P, et al. Condition monitoring power module solder fatigue using inverter harmonic identification[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 235-247.
- [72] HU B, KONAKLIEVA S, KOURRA N, et al. Long term reliability evaluation of power modules with low amplitude thermomechanical stresses and initial defects[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8930555>. DOI: 10.1109/JESTPE.2019.2958737.
- [73] LÜ C L, LIU J J, ZHANG Y, et al. Reliability modeling for metallized film capacitors based on time-varying stress mission profile and aging of ESR[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9115000>. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3001604.
- [74] LU W G. Online estimation of ESR for DC-link capacitor of boost PFC converter using wavelet transform based time-frequency analysis method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 7755-7764.
- [75] BIROLINI A. Reliability engineering[M]. Berlin, Germany: Springer, 2014.
- [76] TU P, YANG S, WANG P. Reliability- and cost-based redundancy design for modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2333-2342.
- [77] 丁明, 王京景, 宋倩. 基于 k/n(G)模型的柔性直流输电系统换流阀可靠性建模与冗余性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 33-36.
DING Ming, WANG Jingjing, SONG Qian. Reliability modeling and redundancy analysis of converter valves for VSC-HVDC power transmission system based-on k-out-of-n: G model[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 33-36.
- [78] 王秀丽, 郭静丽, 庞辉, 等. 模块化多电平换流器的结构可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1908-1914.
WANG Xiuli, GUO Jingli, PANG Hui, et al. Structural reliability analysis of modular multi-level converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1908-1914.
- [79] XU J, ZHAO P, ZHAO C. Reliability analysis and redundancy configuration of MMC with hybrid sub-module topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 2720-2729.
- [80] GUO J, WANG X, BIE Z, et al. Reliability modeling and evaluation of VSC-HVDC transmission systems[C]// Proceedings of IEEE PES General Meeting. Washington, USA: IEEE PES, 2014: 1-5.
- [81] 井皓, 许建中, 徐莹, 等. 考虑子模块相关性的 MMC 可靠性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3835-3842.
JING Hao, XU Jianzhong, XU Ying, et al. Reliability analysis of MMC considering the submodule correlations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3835-3842.
- [82] 周家启, 陈炜骏, 谢开贵, 等. 高压直流输电系统可靠性灵敏度分析模型[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 18-23.
ZHOU Jiaqi, CHEN Weijun, XIE Kaigui, et al. Reliability sensitivity analysis model of HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 18-23.
- [83] 李辉, 邓吉利, 姚然, 等. 计及运行工况的 MMC 换流阀可靠性建模与分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 108-114.
LI Hui, DENG Jili, YAO Ran, et al. Reliability modeling and analysis of MMC converter valve considering operation conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 108-114.
- [84] 马河涛, 黄守道, 饶宏, 等. 基于马尔可夫过程的柔性直流输电系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 10-16.
MA Hetao, HUANG Shoudao, RAO Hong, et al. Reliability analysis of VSC-HVDC system based on Markov process[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 10-16.
- [85] 黄守道, 付雪婷, 饶宏, 等. 基于 Semi-Markov 的模块化多电平换流器的可靠性分析及其冗余配置策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 128-133.
HUANG Shoudao, FU Xueting, RAO Hong, et al. Reliability analysis and redundant configuration strategy of MMC based on Semi-Markov[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 128-133.
- [86] 谢开贵, 马怀冬, 胡博, 等. 基于马尔可夫状态空间图法的换流变系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2001, 35(9): 71-78.
XIE Kaigui, MA Huaidong, HU Bo, et al. Reliability evaluation of converter transformer system in HVDC transmission system based on Markov state space graph algorithm[J]. Power System Technology, 2001, 35(9): 71-78.



LEI Wanjuan

Ph.D.

Associate professor
Corresponding author

LIU Jinjun

Ph.D., Professor

雷万钧(通信作者)

1978—, 男, 博士, 副教授, 博导

研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用, 可再生能源接入与电能质量控制技术, 定制电源技术

E-mail: leiwanjun@mail.xjtu.edu.cn

刘进军

1970—, 男, 博士, 教授, 博导

研究方向为电力电子技术在电能质量控制及输配电系统中的应用, 含新能源和分布式发电的电网及未来电网电力电子变流器及控制, 电力电子电路和系统的建模、仿真、分析和控制, 大功率电力电子系统优化设计与可靠性评估

E-mail: jjliu@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期 2020-08-07 修回日期 2020-08-24 编辑 陈蔓