风电场雷击理赔系列 · 之一

200 kA 不是理赔线

—— 风机叶片雷击损失的原理、标准与举证

北京中科九章软件有限公司 | 2026 年 11 月 | 供风电场业主、运维及整机单位参考

征求意见稿 V1.1

核心观点

1. 200 kA 是 IEC 62305-1 / IEC 61400-24 中雷电防护等级 LPL I 的一项设计与试验参数，不是判断雷击损失是否属于保险责任的标准。

2. 叶片损伤程度主要取决于接闪是否成功，以及比能量、电荷量和持续时间。危害最大的拦截失败与长连续电流，恰恰多见于峰值电流较小的雷击。

3. 财产一切险条款对“雷击”没有任何电流强度限定。合理的处理方式是：被保险人证明雷击事故，保险人就除外事由举证；举证可依托雷电定位数据与风机运行数据的联合分析。

一、问题的提出

近年来，在与风电场业主和运维单位的交流中，我们多次听到类似情况：巡检发现叶片雷击损伤，修复或更换费用从数十万元到数百万元不等；向保险公司报案后，对方提出须证明该次雷电的峰值电流超过 200 kA，否则不予赔付。理由是：风机防雷系统按 200 kA 设计，低于这一数值仍然受损，说明是设计或产品本身的问题，不属于意外事故。

这种做法并非行业通例，但已在部分案件中出现。它看上去有标准依据，又便于操作，因而容易被各方接受。本文从标准来源、雷电实测数据、叶片损伤机理和保险条款四个方面说明：以峰值电流 200 kA 作为叶片雷击损失的理赔门槛，在技术上和条款上都站不住。同时，本文也讨论保险方关切中合理的部分，并提出我们建议的判定框架与举证方法。

本文是风电场雷击理赔系列的第一篇。文中引用的标准与文献均列于文末；凡属推断或尚待核实的内容，文中单独注明。

二、200 kA 从哪里来

200 kA 出自雷电防护等级（Lightning Protection Level, LPL）体系。该体系由 IEC 62305-1《雷电防护 第 1 部分：总则》建立。风电机组防雷标准 IEC 61400-24 引用了这套参数，2019 年第二版第 8.1.1 条把最高等级 LPL I 作为默认要求；经详细、成文的风险评估，特定机组和场址也可以采用较低等级。我国 GB/T 33629—2024《风能发电系统 雷电防护》等同采用 IEC 61400-24:2019，已于 2025 年 4 月 1

日实施；下文引用的附录 L 来自 IEC 2024 年修正案，国标暂未纳入。理解 200 kA，需要把握以下三点。

第一，它是一组参数中的一个。LPL I 对应的不是一条电流线，而是一个参数包络：首次回击峰值电流 200 kA、比能量 10 MJ/Ω、短时回击电荷 100 C、长时回击电荷 200 C、闪击总电荷 300 C、后续回击平均陡度 200 kA/μs，以及用于确定拦截能力的最小峰值电流 3 kA（图 1）。不同参数对应不同的损伤效应：峰值电流主要关联电磁力与冲击，比能量关联导体发热，电荷量关联熔蚀与烧蚀，陡度关联感应电压与闪络。

第二，它是统计意义上的设计值。在 IEC 62305-1 中，200 kA 是 LPL I 首次正极性短时雷击的峰值电流参数。按标准采用的统计模型，LPL I 的最大参数“不被超过的概率为 99%”；用于拦截设计的最小电流参数 3 kA，被超过的概率同样为 99%。这些是设计参考值，说明设计模型本身并不覆盖全部雷击，但不能直接换算成实际风机的拦截失败率。

第三，它回答的是“防护系统应按什么规格设计和试验”，而不是“某次损失是否属于意外”。前者是工程规格，后者是保险事故的认定。二者之间必须经过“是否存在缺陷、缺陷是否为损失近因”这一环节才能联系起来，不能直接划等号。

值得注意的是，IEC 61400-24 在 2024 年发布的修正案（附录 L）中已经提到这一问题。该附录在讨论雷电实测数据的用途时写道：“An additional perception is that strikes outside the range of the LPL are disregarded”（另一种看法是，超出 LPL 范围的雷击被忽略），并主张用实测雷电数据支撑关于保险责任的讨论。也就是说，在标准制定者看来，“是否超出 LPL”是需要用数据讨论的问题，而不是一条现成的赔付界线。



图 1　LPL I 是一组参数包络，200 kA 只是其中一项

三、实际落到风机上的雷电有多大

如果以 200 kA 作为门槛，首先要问：超过 200 kA 的雷击究竟有多少？

丹麦 Polytech 公司 Madsen 等人 2023 年发表的研究，分析了风机叶片雷电测量系统记录的 2603 次实测雷击。结果显示：下行雷的峰值电流中位数为 20～30 kA，只有约 1% 超过 100 kA，超过 200 kA 的仅有 1 次（论文第 3.1 节表述为“不足 1%”，第 4.2 节为“2603 次中仅 1 次”）。这意味着，如果把“峰值大于 200 kA”作为赔付前提，几乎所有雷击事故都会被排除在保险责任之外，雷击条款实际上失去了意义。需要说明，这是实测雷击中的比例，并不等于造成损失的雷击或索赔案件中的比例；但它足以说明，200 kA 远远偏离风机实际遭受雷击的常见范围。

同一研究还给出了另一组数据：约 5% 的正极性和双极性向上闪电，转移电荷超过 LPL I 规定的 300 C，个别事件超过 1000 C，比能量超过 30 MJ/Ω。这类雷击的峰值电流并不大，但在电荷和能量两个维度上明显超出设计包络。按峰值门槛，它们属于“未超标”；按 LPL I 的完整定义，它们恰恰“超标”。

国内公开的一则在建风电项目叶片雷击案例，也反映出这种用法上的错位。报道称，雷击记录卡显示该叶片遭受的最大雷击电流达“231±28 KVA”（原文如此，电流单位有误，应为 kA），并据此认为“已超过……IEC61400-24 中要求的 200kVA 的范围”，按保险责任处理。即便实测电流确实超出设计参数，是否排除整机商责任，仍需核查防雷系统是否按约设计、制造和安装；而把“超过 200 kA”反过来当作赔付的必要条件，在逻辑上更不成立。

四、叶片是怎样被雷击损坏的

雷电接近旋转中的叶片时，大体有两种结果（图 2）。

情形 A：接闪器拦截成功。雷电附着在叶尖接闪器（receptor）上，电流经引下线（down conductor）、轮毂和塔筒泄放入地。这是防雷系统的预期路径，多数情况下叶片只出现接闪器弧根部位的熔蚀等局部损伤。但接闪成功并不等于不会损坏：比能量很高时，引下线或连接件可能过热熔断；电流陡度大时，含碳纤维（CFRP）主梁的叶片可能在碳纤维部件与防雷导体之间发生闪络。

情形 B：拦截失败。雷电没有附着在接闪器上，而是从叶片表面其他位置击穿层合板，在叶片内腔与内部导体之间形成电弧。电弧使内腔空气和水汽在极短时间内急剧受热膨胀，形成压力冲击，可导致壳体开裂、分层、前后缘粘接线开裂，严重时叶尖脱落。这类损伤通常是结构性的，修复代价远高于情形 A。

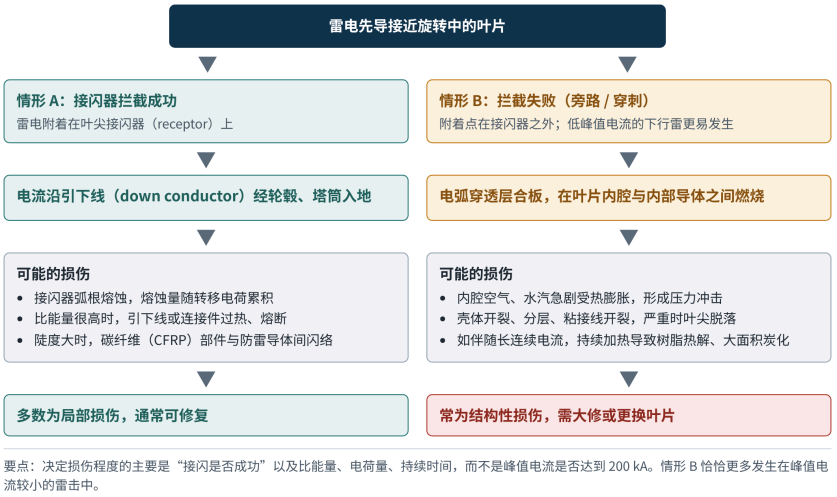

图 2　叶片雷击的两种情形及其典型后果

关于情形 B，有两点需要特别说明。

其一，拦截失败本身是标准承认的现象。IEC 61400-24 用“拦截效率”（interception efficiency）评价叶片防雷设计，其含义是被接闪器正确拦截的雷击次数占全部雷击次数的比例。这一指标本身就预设了并非所有雷击都会被拦截。Candela Garolera 等人对美国风电场 304 起叶片表面雷击损伤的统计显示，约 90% 位于距叶尖 4 m 以内，其余主要分布在 5～10 m 处，个别远至距叶尖 22 m。可见，部分损伤发生在叶尖接闪器以外的部位。不过，损伤位置的分布可以指导优先检查哪些区域，本身并不足以估计拦截失败率。

其二，拦截失败更多发生在峰值较小的雷击中。Madsen 等人指出，峰值电流小的下行雷对接闪过程构成挑战；一旦拦截失败，叶片层合板被击穿，损伤程度取决于该次闪电的比能量。国内基于电气几何模型的研究也表明，叶片防雷失效率随雷电流幅值减小而上升。

因此，“雷电不大却损伤严重”并不必然说明防雷系统不合格。IEC 61400-24 第 8.2.2 条要求叶片防雷系统按暴露评估正确接闪和导流，并把损伤限制在下次计划维护前可以容忍的程度；这是设计应达到的性能。一次拦截失败，应当成为调查防雷性能的理由：它可能是设计范围内的剩余风险，也可能与缺陷有关，需要结合叶片型号、损伤分区、接闪验证、现场暴露以及实际安装和维护状态逐案判断（见第七、八节）。表 1 归纳了各雷电参数与叶片损伤的对应关系。

表 1　雷电参数与叶片损伤的对应关系

雷电参数	主要物理效应	典型叶片后果
峰值电流	电磁力、电弧冲击、感应过电压	与陡度共同决定内部电位差，可引发导体间闪络
比能量（∫ i²dt）	导体与连接件焦耳发热；内腔电弧能量释放	引下线、连接件熔断；拦截失败时穿刺损伤的严重程度
电荷量（∫ i dt）	弧根处金属熔蚀，与转移电荷近似成正比	接闪器烧蚀、熔孔；累积后降低接闪能力
陡度（di/dt）	感应电压；导电部件之间的电位差	碳纤维主梁与防雷系统之间闪络、等电位连接破坏
长连续电流	电荷大、作用时间长，持续加热	蒙皮炭化、树脂热解、大面积烧蚀
接闪失败	层合板被击穿，内腔电弧与压力冲击	穿孔、开裂、分层、粘接线开裂、叶尖脱落

五、小峰值、长连续电流：被门槛漏掉的危险雷击

一次闪电除了持续时间很短的回击脉冲外，还可能在回击之后伴随一段持续数十至数百毫秒、幅值通常仅为数十至数百安培的连续电流（continuing current）。持续时间超过约 40 ms 的，称为长连续电流（long continuing current, LCC）。

连续电流的幅值远低于回击峰值，但持续时间长，转移的电荷量大，热效应显著。对接闪成功的叶片而言，它主要造成接闪器及其周边的熔蚀和烧灼；对拦截失败的叶片而言，电流沿穿刺通道和内腔持续加热，使树脂热解、产生气体，加重分层与炭化。需要说明的是，复合材料叶片在长连续电流作用下的公开定量试验数据目前仍然较少，上述后果主要依据材料热效应机理推断。

关键问题在于长连续电流与回击峰值之间的关系。巴西学者 Saba 等人在巴西用高速摄像观测了 454 次伴随连续电流的负极性回击（连续电流持续 4～542 ms），得出两点结论：第一，平均而言，连续电流持续越长，其前导回击的峰值电流越低；第二，峰值超过 20 kA 且连续电流超过 40 ms 的负极性回击“极不可能”出现。换言之，在占地闪大多数的负极性闪电中，长连续电流几乎只出现在峰值较小的回击之后。

这一规律与雷击引燃森林火灾的研究相互印证。美国林务局 Fuquay 等人 20 世纪六七十年代的野外观测发现，引燃森林的闪电均带有长连续电流；Latham 与 Schlieter 1989 年的实验室研究进一步表明，点燃概率取决于电弧持续时间，峰值电流的影响不明显。森林引燃与叶片烧蚀同属热效应主导的损伤，机理相通。九章此前在雷击森林火灾方面的研究中，也观察到低峰值电流与长连续电流相伴的现象。

上述规律有两点边界需要说明。一是它针对负极性闪电。正极性闪电可以同时具有高峰值和长连续电流，约 75% 的正极性地闪至少含一次 40 ms 以上的长连续电流，而负极性闪电约为 30%。二是风机作为高耸结构，还会引发自下而上的向上闪电。向上闪电以初始连续电流开始，峰值往往只有几千安甚至不足 1 kA，却可转移数百库仑电荷。日本北陆等冬季雷地区的风机观测中，电荷超过 300 C 的事件时有发生。

更值得关注的是，这些危险雷击恰恰是雷电定位系统最难看清的。常规雷电定位系统通过接收回击的电磁辐射定位并反演峰值电流，无法测量连续电流和电荷量。伴随长连续电流的回击，探测效率也会下降：Saba 等人报告巴西 RINDAT 定位网对这类回击的探测效率由 62% 降至 36%。对于向上闪电，奥地利 Gaisberg 塔等地面实测表明，定位系统能探测到的不足一半，仅含初始连续电流的向上闪电基本无法被探测。

2026 年日本秋田县男鹿风电场的叶片断裂事故，提供了一个直观的实例。据行业媒体对事故调查最终报告（2026 年 9 月 25 日公布）的报道，主要致损事件是 3 月 20 日的一次雷击：电流 18.3 kA，电荷量 129 C，雷电附着在接闪器以外的部位（日文原文为“異常着雷”），电流很可能穿透了叶片壳体。由于这次雷击低于当时设定的自动停机阈值（±100 kA 或 300 C），风机没有停机，也没有进行详细检查；4 月 12 日，叶片在设计范围内的风况下断裂。事故后，业主把自动停机阈值下调至 ±1 kA 或 1 C。这次雷击的峰值不到 200 kA 的十分之一，造成的却是叶片断裂。

因此，以“定位系统显示峰值超过 200 kA”为前提，会把热效应突出、而定位系统又最难测到的那一类雷击系统性地排除在外。

六、保险条款怎么规定

国内风电场运营期通常投保财产一切险。以中国保险行业协会网站收录的财产一切险条款为例，其保险责任为“由于自然灾害或意外事故造成保险标的直接物质损坏或灭失”，“雷击”列在自然灾害之中。条款对雷击的释义是：

> “雷击指由雷电造成的灾害……雷击的破坏形式分直接雷击与感应雷击两种。1．直接雷击：由于雷电直接击中保险标的造成损失，属直接雷击责任。2．感应雷击：……”

可以看到，条款只区分直接雷击与感应雷击，没有任何关于电流强度、能量或“超出设计值”的限定。雷电直接击中叶片并造成损坏，符合该条款对直接雷击的定义；具体理赔中，还需核对保险标的、保险期间、直接物质损失和适用的批单。

保险人可能援引的，是“设计错误、原材料缺陷或工艺不善造成保险标的本身的损失”，以及“保险标的的内在或潜在缺陷、自然磨损……或其他渐变原因”等责任免除条款。对此应注意三点。

（一）**除外事由应由保险人举证**。被保险人证明雷击事故发生并造成损失后，保险人如认为损失实为设计或制造缺陷所致，需要提出具体的技术证据，而不能仅以“峰值未达 200 kA”推定缺陷存在。

（二）**核心是近因判断**。除外条款针对的是“缺陷造成的损失”。若雷击是造成损失的直接、有效原因，即使防雷系统存在某些不足，也不当然排除保险责任。雷击与缺陷共同作用时，二者可能分别影响损伤的发生和扩大，宜按具体损失项目分析。

（三）**“200 kA”若未写入保单，即属合同之外附加的条件**。若写入保单，其效力要看条款的性质和订立过程：属于保险人提供的、免除或减轻其责任的格式条款的，依《保险法》第十七条，保险人负有提示和明确说明义务，未作提示或明确说明的，该条款不产生效力；经双方真实协商形成的约定，或属于

对承保范围的界定，则需按其性质个别分析。（此点为基于法条的一般性分析，未见针对叶片雷损的判例直接确认。）

此外，保险产品的结构本身也说明，雷击与设计缺陷是两类不同的风险（表 2）。保险人若以“低于 200 kA 即属设计缺陷”拒赔一切险项下的雷击损失，实际上是把雷击事故改归为缺陷事故，这需要证据，而不是一个数字。

表 2　两类险种对雷击与设计缺陷的处理（据多家公司备案条款比对）

	财产一切险	机器损坏险
雷击等自然灾害	属保险责任	列为责任免除
设计、制造、原材料缺陷	除外（限于保险标的本身的损失）	属保险责任

注：机器损坏险通常同时除外依法或依约应由供货方、制造人等负责的损失；不同险种、不同保单的承保范围差异较大，具体以保单和批单为准，详见本系列第四篇。

就公开渠道检索结果而言，我们未发现法院以“峰值低于 200 kA”为由支持拒赔的判决。由于中国裁判文书网未能系统检索，这一结论仅反映检索结果，并不代表此类判决不存在。

七、保险方的合理关切

指出 200 kA 门槛的问题，并不意味着保险方的担心没有道理。实践中，至少有以下几类情况值得认真对待。

防雷系统确实可能存在缺陷。国际保险经纪机构 Lockton 指出，防雷系统的设计或施工缺陷，可能使处于设计参数之内的较弱雷击也造成灾难性损坏。国内行业媒体也曾报道部分标称耐受 200 kA 的接闪器在较小电流下即出现严重烧蚀（该报道来源带有商业背景，未经核实）。

标准中确有可被引用的表述。IEC 61400-24 修正案附录 L 指出，经认证的叶片在 LPL 范围内遭受雷击后，“should be able to continue operation without the need of repair until next scheduled maintenance”（应能无需维修地运行至下次计划维护）。这是保险方最有力的技术依据。

维护状况会影响损伤。接闪器累积烧蚀未及时更换、引下线断开、接地电阻超标、既往雷损未彻底修复，都会削弱防雷系统的实际效能，并可能落入“渐变原因”“自然磨损”等除外范围。

同型叶片反复受损。保险人可能在续保时调整免赔额、限额或增加除外条款。这属于续保定价问题，可以协商，但不宜在保险期间内以单一电流门槛追溯拒赔。

对这些关切，我们认为合理的回应方式是：第一，附录 L 的上述表述（附录 L 为资料性附录，其表 L.3 讨论保险时回指第 8.2.2 条）描述的是防雷设计应达到的性能，而不是对每一次雷击结果的保证。引用它的前提是该次雷击的参数确在 LPL 范围内，没有叶片雷电测量数据，这一点本身就无法确认。若属拦截失败，应作为调查防雷性能的理由，结合叶片型号、损伤分区、接闪验证、实际安装和维护状态，判断它是设计的剩余风险，还是存在与该项损失有因果关系的缺陷；也不宜把这一设计性能表述直接当作

受击后继续运行的依据。第二，即使最终查明存在产品问题，也应通过技术鉴定逐案认定：雷击为近因的，保险人赔付后可依法向责任方代位追偿；缺陷经鉴定确认为近因的，适用除外条款，业主再依据质保合同或其他险种主张权利。（2022）最高法民终 74 号案虽非雷击案件，但法院正是依据司法鉴定认定叶片断裂源于制造质量控制缺陷。“超出设计工况”与“产品缺陷”之争，靠的是鉴定，而不是门槛。

八、建议的判定框架与举证方法

（一）判定框架

我们建议采用“近因 + 除外举证”框架（图 3）。第一步，被保险人证明保险事故：雷击确实发生，时间与空间吻合，损伤形态符合雷击机理，且损失发生在保险期间内。第二步，保险人如主张除外，就防雷系统存在设计、制造、安装或维护缺陷，以及该缺陷是损失近因承担举证责任。第三步，必要时委托第三方技术鉴定，逐项比对接闪是否成功、已知和未知的雷电参数、防雷系统定检状态和既往损伤。

在这一框架下，峰值电流的证据作用需要区分数据来源。经叶片雷电测量系统实测、确认超出 LPL I 参数包络（包括峰值超过 200 kA）的雷击，是判断该次雷击超出设计条件的有力证据；但是否排除整机商责任，仍需核查防雷系统是否按约设计、制造、安装和维护。例如，事故前已经断开的引下线，会改变电流路径和损伤范围。仅凭雷电定位系统反演的峰值超过 200 kA，则不足以单独得出这一结论——不同定位网对同一地区雷电峰值的估计可能相差数倍，个别极端数值还可能是定位解算异常。反过来，“峰值未超过 200 kA”无论来自哪类数据，都不能作为拒赔理由，也不能据此推定防雷系统存在缺陷；缺陷是否存在，应以现场勘查和检测结论为准。



图 3　两种判定思路对比

（二）联合举证方法

单一数据源难以形成完整的证据链。我们建议把以下五类数据放在统一的时间基准上联合分析（图 4）。

1. 雷电定位数据。在两次巡检之间的时间窗内，检索机位周边（如 5 km 范围）的全部回击，列出每次回击的时间（至少精确到毫秒）、位置（能提供定位误差估计的一并给出）、峰值电流（反演估计值）、极

性、云闪/地闪类型和参与定位站数，并将回击合成为闪电、识别地面接地点。其中，时间吻合与空间吻合是强相关证据；峰值与极性只能作为弱相关的辅助信息。

2. 风机运行数据。调取 SCADA、状态监测系统（CMS）和故障录波记录，查找与雷击时刻对应的告警、停机以及转速、功率、振动、变桨等参数的异常跳变。雷电定位采用卫星授时，可与风机日志精确对时，但须同时记录风机各系统的时钟偏差。部分风场只保存 1 分钟或 10 分钟平均数据，会限制对时精度，应在报告中说明。部分风场的高分辨率运行数据留存周期较短，事后往往无法补调，因此建议在雷暴过后、收到雷电告警时，及时导出并封存相关时段的数据。

3. 叶片雷电测量数据。如风机装有符合 IEC 61400-24 附录 L 要求的雷电测量系统，可补全电荷、比能量、电流波形和持续时间等定位系统无法提供的参数。仅有峰值卡或机械计数器的，应说明其局限。

4. 损伤勘查。记录损伤距叶尖的距离、与接闪器的相对位置、迎风面或背风面、前缘或后缘，以及穿孔、炭化、熔蚀和内腔状况，据此判断属于拦截成功、拦截失败、高比能量传导失效还是电位差闪络。

5. 防雷系统定检与维修记录。包括接闪器烧蚀量、引下线导通电阻、接地电阻和既往雷损记录，用于回应“维护不当”的抗辩。



图 4　雷击损失联合举证的数据构成

在此基础上形成《雷击损失技术说明》，给出雷击发生的证据等级（确定、高度可能、可能）和因果分析，并明确声明数据局限，例如定位系统不测量连续电流和电荷、向上闪电可能漏测。主动说明局限，有助于提高报告在争议中的可信度。

九、结语

围绕“200 kA”的分歧，表面上是数值之争，实质上是两个问题被混在了一起：防护系统应按什么规格设计，以及某次损失是否属于保险事故。前者由标准回答，后者应当通过近因分析和除外举证来回答。

对各方而言，更有建设性的做法是：业主在雷暴高发、冬季雷或高海拔场址加装叶片雷电测量系统，并建立完整的防雷系统定检档案；整机商公开叶片防雷分区、各区设计等级和验证试验结果，避免“标称

200 kA”被误读为“200 kA 以下的雷击都不会造成损伤”；保险方把风险管理前移到承保和定价环节，在理赔环节采用多参数、可举证的技术鉴定，而不是单一阈值。

把讨论从“阈值之争”拉回到“近因之辩”，才能让雷击这一真实存在的自然风险，得到与之相称的保障。

关于本系列

风电场雷击理赔系列共四篇，各篇可独立阅读，合起来回答一个问题：风机遭受雷击后，损失怎样得到公正的认定。

之一　《200 kA 不是理赔线》：峰值电流为什么不能作为理赔门槛　◀ 本篇

之二　《雷击损失怎么举证：国际上的通行做法》：第三方雷电数据的角色与公信力来源

之三　《雷击之后的 72 小时：把同期记录变成制度》：雷击发生后的证据保全

之四　《把雷击写进合同：质保、运维与保单的条款建议》：在签约时解决雷击争议

主要参考资料

〔1〕IEC 62305-1:2010. Protection against lightning – Part 1: General principles.

〔2〕IEC 61400-24:2019. Wind energy generation systems – Part 24: Lightning protection；及 IEC 61400-24:2019/AMD1:2024（附录 L）。

〔3〕GB/T 33629-2024《风能发电系统 雷电防护》（等同采用 IEC 61400-24:2019）。

〔4〕Madsen S F, et al. Machines, 2023, 11(5): 541. doi:10.3390/machines11050541.

〔5〕Candela Garolera A, Madsen S F, Nissim M, Myers J D, Holbøll J. Lightning Damage to Wind Turbine Blades From Wind Farms in the U.S. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1043–1049.

〔6〕Saba M M F, Pinto O Jr, Ballarotti M G. Relation between lightning return stroke peak current and following continuing current. Geophysical Research Letters, 2006, 33: L23807.

〔7〕Saba M M F, et al. High-speed video observations of positive lightning flashes to ground. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: D24201.

〔8〕Fuquay D M, et al. Lightning discharges that caused forest fires. Journal of Geophysical Research, 1972, 77: 2156–2158.

〔9〕Latham D J, Schlieter J A. Ignition probabilities of wildland fuels based on simulated lightning discharges. USDA Forest Service, Research Paper INT-411, 1989.

〔10〕Stucke I, et al. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2024（向上闪电与雷电定位系统探测能力）。

〔11〕中国电机工程学报，2017 年关于风电机组叶片雷击动态击距与电气几何模型的研究。

〔12〕中国保险行业协会网站收录：《财产保险一切险（2009 版）条款》；多家保险公司《机器损坏保险条款》。

〔13〕Lockton. Managing the lightning risk of wind turbines, 2022-03-22.

〔14〕FH Aachen. BLUES 项目终期报告（受德国保险业总会 GDV 委托），2007-02-28，第 24 页（不同雷电定位网峰值电流估计的比较）。

〔15〕ウインドジャーナル. 男鹿風力発電所ブレード破損事故の最終報告に関する報道, 2026 年 9 月（事故调查最终报告于 2026-09-25 公布）。

〔16〕《在建风机叶片雷击事故案例分析》, 搜狐, 2021-08-18。

说明

本文依据截至 2026 年 11 月可获取的公开资料撰写。IEC 61400-24 正文部分条款依据公开预览本及相关文献转述，未取得标准全文；保险条款以中国保险行业协会网站收录的会员公司备案条款及多家公司条款比对为依据，未直接取得协会示范条款原文；国际保险实务材料多来自保险经纪、公估及律所，带有一定商业立场。文中关于条款效力与举证责任的分析为一般性技术与法理讨论，不构成法律意见，具体争议应以保单全文、特别约定及专业律师意见为准。