

对电涌保护器测试波形进行标准化的呼吁

A call to standardize the waveforms used to test SPDs

Bruce Glushakow & Dion Neri

MCG Electronics, 12 Burt Drive, Deer Park, NY 11729, USA

本文已被法国电力电子学会 (the French Society of Electricity and Electronics--SEE) 接受并将在 2004 年 9 月法国 Avignon 召开的第 27 届国际雷电防护大会 (the 27th International Conference on Lightning Protection --ICLP 2004, Avignon, France) 发表。

摘要: 本文回顾了所采用的电涌保护器测试波形的历史。列举了每个主要波形的来源及使其得以采用的相关技术数据。世界范围内对雷电的测量进行了各种各样的努力, 发现典型的雷击参数, 考察研究的结果显示: 10/350 的波形在实验室中模拟实际雷电是不恰当的。

关键词: 等级 1 测试, 电涌保护器 (SPD) 测试波形, 8/20 μ s, 10/350 μ s, W/R

1. 简介

自从发现了电, 工程师们及研究者们就不得不迫使他们自以新的发现来完善或改正原有的理论。在 2004 年的电子环球中, 最新发表的科学论文之多, 使得工程师和研究者们难以每篇都读到。

我们有机会呈现这篇文章, 将可能减少今后不必要的阅读和撰写, 可以想象我们的喜悦。

在 8 年中, 大量的文章来回穿越大西洋, 主题是: 在测试交流电源线的电涌保护器时, 哪种波形最能代表雷电流的模拟波形。

IEC 61643-1 设立了等级 I 测试规则, 意图模拟部分雷电流的冲击。虽然在 IEC 61643-1 标准中没有提及到 10/350 μ s 波形, 但它却将 IEC 61312-1 标准作为模拟雷击的参数的模型, 并特别指明 IEC 61312-1 中的测试参数代表了“雷击的威胁”¹。在此之后, 在 61643-12 (2002) 标准中又再次重申了那些参数, 并具体提及到 10/350 μ s 波形。由于 IEC 61643-1 使用 61312-1 的测试参数作为它的测试方法的基础, IEC 61643-1 标准实际上使得 10/350 μ s 波形成为该标准中等级 I 测试的法定波形。

而相应地, IEEE C62.45TM 2002 标准中所使用的波形是 8/20 μ s 波形。

两种波形存在着差异。在同等峰值的情况下, 一个由实验室电涌发生器所产生的 10/350 μ s 波形的总能量是 8/20 μ s 波形的 17 倍。

无可否认, 雷击是最强大的自然力量之一。但在实验室中, 能最准确地重现这一自然力量的方法是什么? 10/350 μ s 波形的支持者认为 10/350 μ s 波形是模拟直击雷参数的最佳波形。反对者们却持相反的意见: 他们认为 8/20 μ s 测试波形足以代表雷电流波形, 并得到采用该波形测试的电涌保护器在实际应用中成功率充分证明。

自从 10/350 μ s 波形被引用以来的 8 年, 每年都会产生越来越激烈的、非科学性的争论。我们写这篇文章的初衷, 是要通过对这场永无休止的 10/350 μ s 波形的争论, 加入一些历史的透视, 从而结束这些争论。

2. 测试波形的历史

2.1 长时延波形

在众多曾被考虑过用作电涌保护器的测试波形当中, 10/350 μ s 波形不是最长的。曾被使用为电涌保护器的最长的测试波形为 1300 微秒波形。

2.1.1. 100/1300 μ s 波形: 在 1991 年, IEC 技术委员会 TC77 组开始考虑一项基于以下情况的电涌测试要求: 线缆终端的限流保险丝在系统发生故障时会烧断, 而保存在系统电感中的能量会在保险丝烧断而中断电流时产生一个很大的电涌²。这种现象由 Meissen³ 先生首先进行描述并确定, 并结合到德国标准 VDE 0160 中。⁴

在当时, 在高能量电涌测试中所建议使用的波形是 100/1300 微秒的波形。这种新的高能量波形的采用, 只会在如上一段中所提及的、与限流保险丝操作有关的高能量电涌的情况下才会被考虑。没有任何关于 1.2/50 μ s 及 8/20 μ s 波形不适合在测试中作为模拟雷电流的波形的推断或结论。

在 1991 年第九届苏黎世国际电磁兼容研讨会^{5,6}中，国家标准及技术学会提供了相关的研究及实验报告，证实了在德国标准中，一个限于特殊案例的情况被全面应用的矛盾，从而导致了 IEC TC77 在其 61000-4-1 版本的回顾中对此波形进行了舍弃。

2.1.2. 10/1000 μs 波形：1985 年 Odenberg 先生及 Braskich 先生的文章报告说：他们所记录的 250000 个记录中，90%的记录显示了电涌的 50%点（半峰值）在 900 微秒到 1000 微秒之间⁷。这项研究引起了人们对在交流电源线路的 10/1000 微秒测试波形（已被应用于电信元部件的测试）的谈论。IEEE C62.41.1-2002 指出 Odenberg 先生的报告是“所有报告中唯一提及此波形”的报告。而 IEEE 标准继续评论道：“在其它相关的研究报告中找到类似情况的尝试未能成功”⁸。由于这个原因，10/1000 微秒波形未被作为交流电源高峰值电流测试波形来使用。

2.2 8/20 μs 波形：

传统的用于电子机械设备电涌测试的波形是一个 1.2/50 微秒的单向波形。限于当时的条件，这是一个简单可行的方法，用于在实验室中产生一个模拟的、电源供电网络中的雷电流。测试的目的，是用于验证高阻抗的绝缘层抵抗高电压的能力。作为这些传统测试的补充，引用了 8/20 μs 波形，作为那些低阻抗元件，如电涌保护器，用于模拟雷电放电，以验证元器件的能力⁹。基于以上两种波形系统测试的应用成为了一个转折点，保证了电力系统的更可靠性，并得到了欧洲(IEC)及美国(ANSI/IEEE)广泛接受。

2.3 10/350 μs 波形：

1995 年 IEC 61643-1 在等级 I 测试中引用 10/350 μs 波形使该波形一举成名。

IEC 61312-1 标准中断言一个典型雷击的“半峰值时间”是 350 微秒¹⁰

但参数 350 μs 的技术数据基础是什么呢？

在 IEC 61312-1 标准中，TC 81 将波形的引用给出了唯一的依据：“CIGRE 公布于 *Electra Magazine* 杂志第 41 期（1975）及 69 期（1980）的结果。”¹¹

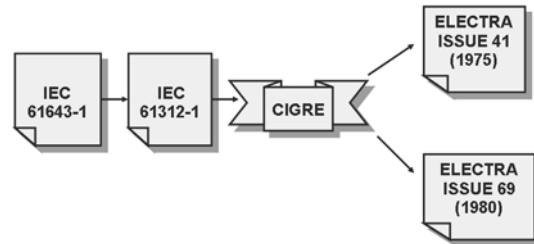


图 1 - 等级 I 测试“要求”的回顾追踪

那两份 *Electra* 杂志实际上说了些什么？问题的答案既意外更具启发性。

2.3.1 *Electra* 杂志第 69 期（1980）

出版在 1980 年的 *Electra* 杂志第 69 期，内含了一篇作者为 R.B. Anderson 及 A.J. Eriksson、题目为“工程应用中的雷电参数”的文章¹²。本文着重在以下两方面进行研究：(a) 雷击事故及 (b) 雷击头部特征。

关于脉冲的形状参数，Eriksson 相信他应该将注意力“主要集中在头部特征上，这对工程系统的性能推测研究具有特别重要的意义。”¹³ 关于尾部的形状，Eriksson 提示：“没有对雷电流脉冲的尾部形状作新的评估，同样，对后续冲击的时延也没有作新的评估。”¹⁴

换句话说，在 *Electra* 杂志第 69 期中，对雷电冲击的时延没有作任何的新的评论或结论。

2.3.2 *Electra* 杂志第 41 期（1975）

Electra 杂志第 41 期中刊登了一篇名为“雷闪参数”的文章，是位于瑞士卢干诺湖（Lake Lugano）上的圣沙佛多尔山（Mount San Salvatore）上的一个雷电观测站的记录结果。¹⁵ 瑞士籍的作者、K. Berger 先生，在此领域中进行了超过 15 年的相关研究，成为该领域的真正的先驱。他对雷电流脉冲形状特性的研究是第一个全面、完整的分析。他将雷电分类以及定义了 10 个雷电测量的必要参数。几乎所有显要的发现都与他有关系。

尤其与本文有关联的是一个 Berger 先生命名为“雷电脉冲持续时间”的参数，他将此参数定义为：“头部 2kA 点与尾部电流幅度下降到它的峰值的 50% 的点之间的时间间隔。”¹⁶

IEC 61312-1 特别注重于 Berger 先生为正极首次雷击而定义的参数。TC81 在 IEC 61312-1 标准之附录 A 中解释了其中的原因：“作为首次雷击，假设所有雷击中 10% 为正极的而其它的 90% 为负极。不考虑正极闪电与负极闪电的低比率，正极的雷击，只由单个长时延的首次冲击组成，它决定了雷击参数 I、Q

及 W/R 应考虑的最大值。如果根据保护等级 I 的定义, 雷击的覆盖率为大约 99%, 概率小于 10% 的正极雷击决定了峰值电流 I 、雷电电荷值 Q_f 、短周期冲击电荷值 Q_s 及能量值 W/R 的最大值。剩下的 1% 的最大值发生在负极雷击的概率远小于发生占 10% 雷击概率的正极雷击上, 因此, 可以忽略不计。”¹⁷

换句话说, IEC 61312-1 标准的编者认为, 如果使用 Berger 先生发现的、发生概率极小的但通常时延更长的正极首次雷击的参数, 将会“安全”。

这种做法, 使得 IEC 61312-1 标准引用了 Berger 先生研究中最有疑问的薄弱点。Berger 先生在 *Electra* 杂志第 41 期的第 35 页中评论道: “虽然正极冲击的特性显得比负极冲击的幅度要高、头部要慢, 但它们没有显示足够的共同特征来产生一个可接受的代表电流波形。这也可能是由于在此期间我们所得到的正极纪录太少。在图 11 中, 显示了所记录到的 21 个波形中最为典型的 4 个波形。”¹⁸

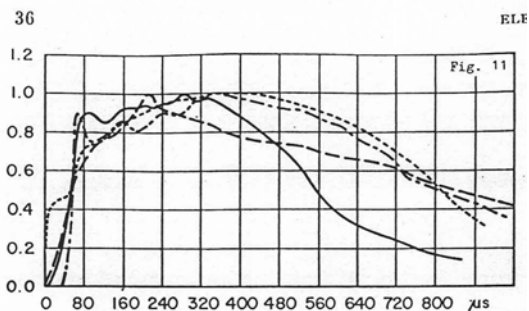


图 2 - 摘录自 *Electra* 杂志第 41 期, Berger et al.

由此可知, IEC 61312-1 采纳 10/350µs 波形作为雷电流代表波形的唯一依据是 Berger 先生纪录的四个正极雷击, 更无视了 Berger 先生本人对这样应用他的研究成果提出争议的事实。

Berger 先生曾对在如此有限的数据库基础上做出结论的恰当性表示怀疑。自 1975 年以来的研究成果肯定了 Berger 先生本人就其正极首次雷击适用性问题的疑问。

值得一提的是, 所记录到的所有的正极反转雷击, 都发生在高塔处。随后发现在高塔上记录到的反转雷击的波形已受到塔顶两端反射的干扰。¹⁹

因为 Berger 记录的所有的正极云对地雷击都发生在高塔处 (而不是没有高建筑物的山峰顶上), 与自然发生的雷击相比, 它们在“激发”雷击的类别内。在他报告中的雷

电, 除一例外, 所有的雷电都是先产生一个向上的放电先导, 然后紧跟的是向下移动的反转雷击。²⁰

IEC 61321-1 标准中说 Berger 先生的数据是自然发生的正极首次雷击率为 10% 具有代表性, 其实不然。考虑到激发雷击的类别, 正极首次雷击的真正发生率不到 1%。

3. 新的研究

Berger 先生的发现引导了 IEC 1312-1 标准的编写者相信正极雷击的峰值电流比对应的负极雷击要高得多。但当国家雷电监测网络 (NLDN) 完成了他们对测量的 6000 万个雷闪的调查时, 发现“所有 $I_{max} > 75$ kA 的放电值中, 高峰值负极云地放电的数量远远超出高峰值正极云地放电的数量。”^{21 22}

随着不断地发现雷电测量中的固有缺陷, 研究者们注意到一个事实, 对早期云对地正极雷击事件结果过于夸大是一个错误。“由于正极云对地雷击 (+ CG) 数据的不足, 原因是相对稀少的正极云对地雷击 (+ CG) 发生率, 以及对每个正极云对地雷击 (+ CG) 的缺乏简单有效的验证手段。”²³ 正如 Orville 先生所指出的: “峰值电流大于 60 千安的负极雷击没有绝对的真实。此外, 还应该注意, 对于任何电流值的正极雷击也不存在绝对的真实”²⁴

在 Berger 先生发表了其结果 30 年以后, 他的数据被进行了全面的重新分析并与其它 3 组实地测试结果进行比较,²⁵ 发现了另一个异常的现象, 即在有如 Berger 先生的单个的电场变化测量观测站上获得了长时延的连续电流, 这似乎证实了该现象的存在。“长时延的连续电流是在单个的电场变化测量观测站上获得的。到目前为止, 所获得的仅有的几个连续电流的条纹底片及电视记录, 显示了电场缓慢变化的后部并不总是来自于下地通道中的连续电流, 而可能是云内附加的活动。”²⁶

4. 建立统一

在本文的开头, 我们曾说明我们希望本文能平息关于这个问题的争论, 而不是激化。

此争论甚至在 IEC 61312-1 实施之前已经开始。在 1995 年, TC 81 协会试图将这些参数成为统一的意见, 结果是 18 个投票国中 78% 的成员对该文件投了赞成票。(IEC 文件的成立由参加的成员以国家为单位的投票来决定, 每国一票)。当这些雷电参数在 IEC 61312-3:2000 标准再发表时, 赞成率下降为 19 个国家 68% 赞成。²⁷

IEEE C62.41.2TM-2002 标准中设定的首次雷击的参数, 包括 IEC 61312 标准中定义的 350 微秒“半峰值时间”, 其结论是: “有一点值得关注的是, 如果将这些‘要求’与根据 IEEE C62 标准家族来设计的电涌保护器的现场表现相比较, ‘高能量’电涌的要求的基础只依据有限的数据库。”²⁸

法国雷电保护协会指出“其它安装的电气设备(断路器、保险等)没有按照等级 I 测试的高幅度要求来制作, 然而这些设备遭到此类破坏的情况还没有被发现。这证明了类似 10/350 的高幅度不存在, 如果存在, 也是非常罕见。”由此, 法国雷电保护协会得出的结论是把 350 微秒的长时延与峰值电流联用是“不合理的”。他们还进一步说明“作为法国标准 NFC 15100 的一部分, 不建议使用带有放电间隙的等级 I 测试的电涌保护器。”²⁹

5. 雷击的时延

即使假设 10/350 微秒波形作为交流电源高电流峰值测试波形的原始决定有瑕疵, 我们都知悉并认为标准制定的必要性。最近有许多关于雷电的研究, 其中涉及直击雷击时延的测量, 这些测量的结果出奇地相近, 总结如下:

5.1 韩国电气电力公司用一台美国“大气研究系统”(Atmospheric Research Systems)制造的 LPATS 完成了一项 5 年的研究。结果发现被测量的 95% 的雷击的半峰值小于 22 微秒。平均半峰值时间是 10.82 μs 。³⁰

5.2 日本一项 3 年的研究结果发现: 所有记录到的雷击的半峰值时延的平均值为 50 μs , 而最长的时延为 80-100 μs , 其发生率在所有测到的雷击中仅为 10%。³¹

5.3 FORTE 卫星(一个用于雷电研究的、装载有无线电波及光学设备的低轨道卫星)所公布的观察结果与日本方面的研究结果相吻合。³²

5.4 美国国家气象服务中心的西部地区办公室和土地管理局通过一项合作协议, 获得了 15 年的雷电研究结果数据, 该项研究结束于 1997 年。研究的结果显示一次雷击的典型时延是 20 到 50 μs 。³³

5.5 1997 年在加拿大的蒙特利尔举行的第十届国际高压工程学研讨会上, 发表了一篇日本 CRIEPI 的一项 7 年的雷电现象研究报告。其研究结果表明, 所监测到的雷电脉冲宽度在 12 到 20 μs 之间。³⁴

5.6 进行了广泛而彻底的测试波形以及测试程序的调查鉴定后, IEEE 在其去年发表的 IEEE 三部曲中总结到: “IEEE Std C62.41.2-2002 所建议使用的两种波形是, 100 kHz 的振铃波及 1.2/50 μs -8/20 μs 组合波(后者包括两个波形, 一个是电压另一个是电流)。”³⁵

6. W/R parameter

在 61643-1 标准中另一个与电涌保护器测试有关的问题参数是能量参数(W/R)。W/R 参数是与 10/350 波形一起被 IEC 61643-1 标准直接从 IEC 61312-1 标准中引用过来的。³⁶其公式如下:

$$W/R = \int i^2 dt. \quad (1)$$

此参数可被看作是一个线性(常数)电阻设计的重要参数, 例如一个雷电保护系统里的导体。然而, 当应用到电涌保护器——非常典型的非线性设备——的时候, 基于电路阻抗值为常数的能量参数就变得毫无意义了。

7. 结论

我们考查的结果, 使我们得出以下的结论: 在今年的 2004 年, 在 IEC 61643-1 标准的定期复审时, 10/350 μs 波形应被列为要求重新审定的头条。此外, 不恰当的 W/R 参数也必须同时被重新审定。IEC 61643-1 标准中的电涌保护器测试参数表, 其角色象“熏鲑鱼”(无关紧要的题外的话)一样, 也是“10/350 争论”在如此长的时间里得以逃避裁决的原因之一。

IEC 61643-1 标准中的参数表应该限于峰值脉冲电流和电荷转移, 同时应该附加一个关于峰值脉冲电流及电荷转移之间关系的参数指引, 以及在众多可能的波形中选取特定的波形作为测试波形的参数指引。

同时, 应该举出相应的例子, 以说明所选取的波形的约定电荷转移“符合”约定的峰值脉冲。这些波形包括 4/10、8/20 或甚至是 10/350 波形, 只要后者不被推断为强制采用的测试波形。

最后, 任何所选取的波形都必须要有科学根据的支持、实践的证明, 且适用于非线性的电涌保护器。

对于象 SEE 这类的技术机构, 在电气及电子领域内帮助传播相关知识, 一直是他们的既定任务之一。我们向 ICLP 提交我们的考查结

果，希望外界能够更深地理解不同的雷电参数是如何产生的，以及它们产生的背景。

8. 答谢

本文的作者谨向 Francois D. Martzloff 先生为我们提供的无价的协助，以及 Michael J. Coyle 先生的鼓励、热诚及指导致以最深的感谢。

9. 参考文献

¹ IEC 61643-1 2001 “连接到低压电源系统配电盘的电涌防护装置 – 第一部分：性能要求及测试方法，版本 1.1 2001 第 143 页。

² IEC 1000-4-1: 1990 (*sic*), 电磁兼容(EMC)-第 4 部分：测试及测量技术 – 第一节：总览。

³ Meissen, W. Ueberspannungen in Niederspannungsnetzen, Electrotechnische Zeitschrift, Vol. 104, 1983.

⁴ 德国标准 VDE 0160 Ausrustung von Starkstromanlagen mit elektronischen Betriebsmitteln (电源系统中使用的电子操作控制设备)，1988 年 5 月，1989 年道歉。

⁵ Fenimore, Charles 及 Francois Martzloff, “100/1300 电涌与可变电阻损坏率之间的矛盾”。在 1991 年苏黎世国际电磁兼容研讨会上发表。

⁶ Fenimore, Charles 及 Francois Martzloff, “实用经验促使电涌测试标准生效：高能测试及可变电阻的性能”。IEEE 在工业应用中的处理, vol. 28, no. 6, December 1992。

⁷ Oldenberg, R., 及 Braskich, B.J. “在计算机及工业环境下交流电源线电涌电压及电流的测量” IEEE 处理文件 PAS-104, no. 10, Oct. 1985。

⁸ IEEE C62.41.1TM-2002 – 附录 A, 第 A.4.2.2 段, 不同波形的不同点. 请同时参阅 A.4.2 段

⁹ Guiseppe Pellegrini & Martzloff, Francois D. “电涌测试使用的真实的，现实的环形波形”，在 1991 年苏黎世国际电磁兼容研讨会上发表。

¹⁰ IEC 1312-1 第一版 1995-02. 表 1 “雷电头次冲击的电流参数” (第 27 页)

¹¹ IEC 1312-1 附录 A, 第 A.1 节。

¹² Anderson, R.B. & A.J. Eriksson, “工程应用中的雷电参数”发表在 *Electra* 杂志第 69 期, 1980 年。

¹³ IBID 第 85 页

¹⁴ IBID 第 99 页

¹⁵ Berger, K., R.B. Anderson 及 H. Kroeninger, CIGRE 研究委员会第 33 (过电压及绝缘) 发表在 *Electra* 杂志第 41 期 (1975) 的“雷电的参数”。

¹⁶ IBID 第 25 页

¹⁷ IBID 附录 A, 第 51 页

¹⁸ IBID 第 36 页

¹⁹ Chowdhuri, Pritindra, 雷电冲击的参数及其在电源系统中的影响, 在 2001 年美国的乔治亚州亚特兰大城举行的 IEEE/PES 传送与分布会议及展览上发表。

²⁰ Rust, W. David, NOAA 国家剧烈风暴实验室, 地球的电气环境, 国家科学院刊物 1986, 第 3 章 正极云地雷击, 第 41 页

²¹ Lyons, W. A., M. Uliasz, 及 T. E. Nelson, 1998: 美国及邻近地区夏季期间的大峰值电流云地雷击。《每月天气回顾》, **126**, 2217-2233。

²² Cummins, K.L., Krider, E.P., 及 Malone, M.D., “美国国家雷电监测网络TM以及云地雷击数据在电源供电系统中的应用” IEEE 传输文件 EM-40, 第 4 号, 1998 年 11 月。

²³ Rust, W. David, NOAA 国家剧烈风暴实验室, 地球的电气环境, 国家科学院刊物 1986, 第 3 章 正极云地雷击, 第 41 页

²⁴ Orville, Richard E., 对“美国及邻近地区夏季期间的大峰值电流云地雷击”的一些评论, 1999 年《每月天气回顾》第 127 卷第 1937 页。

²⁵ Rust, W. David, NOAA 国家剧烈风暴实验室, 地球的电气环境, 国家科学院刊物 1986, 第 3 章 正极云地雷击。

²⁶ IBID

²⁷ C62.41.2TM-2002 IEEE 低压 (1000 V 及以下) 交流电源电路的电涌特性鉴定实施建议, 表 A.7 – IEC 正式投票记录。

²⁸ C62.41.2TM -2002 IEEE 低压 (1000 V 及以下) 交流电源电路的电涌特性鉴定实施建议。第 32 页

²⁹ 数据表 1 – 2000 年 12 月, 由法国雷电保护协会发表。

³⁰ J.W.Woo + E.B.Shim + J.B.Kim + G.W.Lee, 一项对用于相关的绝缘、由韩国的雷电定位及跟踪系统(LPATS)所设计的(1996–1999)雷电参数的统计分析的研究, 韩国电力研究院(KEPRI)。

³¹ G. Ikeda 及 S. Sumi, “日本的雷击参数”, 大气电气的研究报告(日本), 大气电气日志第一卷第 41-44 页, 1987. 日本大气电气协会出版。

³² A. Jacobson, K. Cummins, M. Carter, P. Klingner, D. Roussel-Dupre, S. Knox, “FORTE 卫星对雷电无线电波频率特征的观察”: 结果显示与国家雷电监测网络所监测的结果相符合。文件号 LA-UR-99-870 (1999), 由美国能源部主办。

³³ NOAA 西部地区技术附件第 97-20 号, 1997 年 6 月 17 日

³⁴ T. Shindo, S. Tomita, A. Wada, M. Yamaoka, N. Honma, T. Yamada, M. Shimizu, H. Gozu, M. Adachi, S. Mito, K. Kawasaki, M. Iwamoto, S. Yoshii, “日本的雷电定位系统及使用他们获得的数据的雷电发生率图”, 发表于在加拿大的蒙特利尔举行的第十届国际高压工程学研讨会上。

³⁵ IEEE Std C62.45TM-2002 (IEEE Std C62.45-1992 修订本) IEEE 建议的、连接到低压 (1000 伏及以下) 交流供电系统电路中的设备的电涌的测试方法。2002 年 11 月 11 日通过。条款 9.2, 标准波形。

³⁶ IEC 61312-1, 表 1